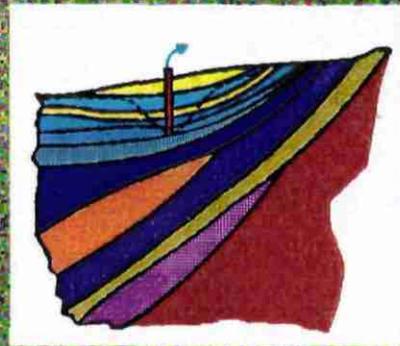
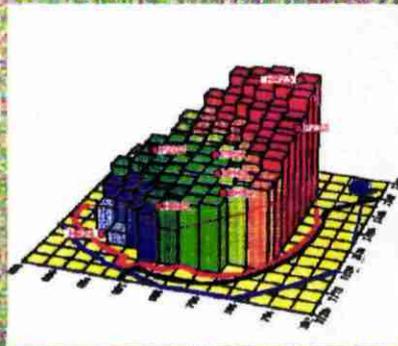


MARTHE



Modèle Hydrodynamique Tridimensionnel

Logiciel MARTHE

Modélisation
d' **A**quifère
par un maillage **R**ectangulaire
en régime **T**ransitoire
pour le calcul **H**ydrodynamique
des **E**coulements

Version 4.3

Dominique THIERY

R 32 210

BRGM
SERVICES SOL ET SOUS-SOL
Département Eau
B.P. 6009 - 45060 Orléans CEDEX 2 - France - Tél.: (33) 38.64.34.34

Logiciel MARTHE

Modélisation
d' **A**quifère
par un maillage **R**ectangulaire
en régime **T**ransitoire
pour le calcul **H**ydrodynamique
des **E**coulements

Version 4.3

BRGM
SERVICES SOL ET SOUS-SOL
Département Eau

RÉSUMÉ

Ce rapport présente en détail le modèle hydrodynamique MARTHE (Modélisation d'Aquifères par un maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Écoulements) (version 4.3) du département EAU du BRGM. MARTHE est un modèle permettant la modélisation en régime transitoire d'aquifères tridimensionnels et multi-couches. Il est adapté aux problèmes classiques d'hydrodynamique souterraine :

- implantation de champs captants,
- interaction entre forages,
- bilans d'aquifères,
- assèchement de fouilles.

Son caractère tridimensionnel et multicouche et ses possibilités de maillage rectangulaire irrégulier le rendent également adapté aux problèmes miniers, aux problèmes de stockage, aux systèmes complexes ainsi qu'aux problèmes de dénoyages avec surface libre.

MARTHE est un logiciel écrit en FORTRAN 77 qui résout les équations de l'hydrodynamique par la méthode des différences finies dans un domaine formé d'un nombre de couches pouvant atteindre 99. Certaines couches peuvent être séparées par des formations semi-perméables (épontes).

SOMMAIRE

	Pages
1 - DESCRIPTION DU MODÈLE	1.1
1.1 - DOMAINE D'APPLICATION DU MODÈLE	
MARTHE	1.3
1.2 - CARACTÉRISTIQUES DU MODÈLE MARTHE	1.4
1.3 - INSTALLATION DU LOGICIEL ET LANCEMENT	
DU MODÈLE	1.8
1.4 - DESCRIPTION DU MAILLAGE	1.12
1.5 - EXTENSION DE L'AQUIFÈRE	1.17
1.6 - CONDITIONS AUX LIMITES	1.18
1.7 - AGENCEMENT DES COUCHES	1.19
1.8 - PARAMÈTRES DU MODÈLE	1.20
1.8.1 - Cotes du substratum	1.20
1.8.2 - Limite supérieure du système	
aquifère : topographie	1.20
1.8.3 - Index de débordement	1.20
1.8.4 - Charges	1.21
1.8.5 - Perméabilité	1.22
1.8.6 - Liaisons étanches	1.23
1.8.7 - Coefficients d'emménagement	1.24
1.8.8 - Zones géométriques	1.26
1.8.9 - Zones équipotentielles	1.27
1.8.10 - Zones de recharge et zones d'irrigation	1.27
1.8.11 - Débits	1.28
1.8.12 - Recharge et surplus d'irrigation	1.29
1.8.13 - Mailles à historique	1.30
1.8.14 - Temps (en régime transitoire)	1.31
1.9 - PRINCIPE DES CALCULS	1.34

	Pages
2 - MISE EN FORME DES DONNÉES	2.1
2.1 - LES FICHIERS DE DONNÉES	2.2
2.2 - DESCRIPTION DES PARAMÈTRES GÉNÉRAUX ...	2.5
2.3 - DEFINITION DES PAS DE TEMPS DE MODÈLES - MODIFICATIONS DES PARAMÈTRES EN RÉGIME TRANSITOIRE -	2.21
2.3.1 - Visualisation et modification éventuelle des actions choisies	2.23
2.3.2 - Création de nouvelles actions	2.26
2.4 - DÉFINITIONS DES DONNÉES DES MAILLES (SEMIS)	2.29
2.5 - DÉFINITIONS DES LIAISONS ÉTANCHES	2.31
2.6 - LES FICHIERS GÉNÉRÉS PAR LE LOGICIEL	2.32
2.6.1 - Le fichier BILANDEB.LST	2.34
2.6.2 - Le fichier HISTORIQ.OUT	2.37
2.6.3 - Le fichier CHASIM.OUT	2.38
2.6.4 - Le fichier DEBSIM.OUT	2.39
2.6.5 - Le fichier CONVERG.DAT	2.39
2.6.6 - Les fichiers états finaux	2.40
 3 - EXEMPLE D'APPLICATION RAPIDE	 3.1
3.1 - POSITION DU PROBLÈME	3.2
3.2 - EXTENSION DU DOMAINE	3.2
3.3 - CONDITIONS LIMITES	3.2
3.4 - GÉNÉRATION DU MAILLAGE	3.3
3.5 - DÉFINITION DES PARAMÈTRES GÉNÉRAUX	3.3
3.6 - DÉFINITION DES PAS DE TEMPS	3.4
3.7 - LANCEMENT DES CALCULS	3.6

	Pages
3.7.1 - Définition des données des mailles	3.6
3.7.2 - Définition des fichiers de résultats	3.8
3.7.3 - Vérification et initialisation	3.8
3.7.4 - Calculs de résolution	3.9
3.7.5 - Édition des résultats	3.9
4 - PRÉPARATION DES DONNÉES DES MAILLES	4.1
4.1 - DIGITALISATION DES DONNÉES	4.3
4.2 - DÉFINITION DU DOMAINE	4.4
4.3 - PRÉPARATION DE LA BASE DE DONNÉES	4.5
4.4 - TRANSFORMATION DE LA BASE DE DONNÉES PAR MISE AU MAILLAGE DU MODÈLE	4.5
5 - DESCRIPTION DÉTAILLÉE DE L'AGENCEMENT DES COUCHES DU MODÈLE MARTHE	5.1
6 - VALIDATION DU MODÈLE, CALCUL DES TRAJECTOIRES ET SCHÉMAS D'ÉCOULEMENTS COMPLEXES	6.1
6.1 - VALIDATION DU MODÈLE MARTHE	6.2
6.1.1 - Modèle anisotrope en régime transitoire	6.2
6.1.2 - Modèle tridimensionnel avec surface libre	6.3
6.1.3 - Modèle coupe avec fortes hétérogénéités	6.4
6.1.4 - Modèle isotrope en régime transitoire ..	6.5
6.2 - CALCULS DES TRAJECTOIRES	6.6
6.3 - CALCUL DE SCHÉMAS D'ÉCOULEMENT COMPLEXE	6.8

ANNEXE 1

**DIALOGUE À L'ÉCRAN CORRESPONDANT
À L'EXEMPLE MONOCAR A1.1**

ANNEXE 2

**FICHER RÉSULTATS CORRESPONDANT
À L'EXEMPLE MONOCAR A2.1**

ANNEXE 3

**CALCUL DU RABATTEMENT EN UN Puits A PARTIR
DU RABATTEMENT DANS UNE MAILLE A3.1**

1 - INTRODUCTION A3.2

2 - LA MÉTHODE DES MODÈLES EMBOÎTÉS A3.4

3 - LA MÉTHODE ANALYTIQUE A3.5

ANNEXE 4

COEFFICIENTS D'ÉCHANGE DANS LE MODÈLE A4.1

1 - ÉCHANGES LATÉRAUX A4.2

2 - ÉCHANGES AVEC LE HAUT ET LE BAS A4.3

ANNEXE 5

**CALCUL DES CHARGES - PRISE EN COMPTE DES
VARIATIONS D'EMMAGASINEMENT EN RÉGIME
TRANSITOIRE - STABILISATION DES OSCILLATIONS .. A5.1**

1 - COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT A5.2

2 - LIMITATION DES VARIATIONS A5.3

**3 - RÉCUPÉRATION DU DÉBIT QUI "TRANSITE"
À TRAVERS UNE MAILLE SUPÉRIEURE VIDE A5.4**

ANNEXE 6

**MÉTHODE DE SIMULATION D'UNE ZONE
ÉQUIPOTENTIELLE A6.1**

1 - RÔLE DE LA ZONE ÉQUIPOTENTIELLE A6.3

**2 - DIFFICULTÉS RENCONTRÉES DANS
L'ALGORITHME NORMAL A6.3**

3 - SOLUTION UTILISÉE A6.4

ANNEXE 7

**MODÉLISATION TRIDIMENSIONNELLE D'UN
ÉCOULEMENT QUASI-BIDIMENSIONNEL A7.1**

1 - POSITION DU PROBLÈME A7.2

2 - NOTATIONS A7.3

3 - RÉOLUTION A7.3

4 - APPLICATION NUMÉRIQUE A7.4

**5 - RÉOLUTION ITÉRATIVE AVEC UN
MODÈLE TRIDIMENSIONNEL A7.4**

6 - CONCLUSION A7.6

ANNEXE 8

DESCRIPTION DE LA CHAÎNE SEMIS A8.1

1 - QU'EST-CE QU'UN SEMIS? A8.2

2 - INTÉRÊT D'UN SEMIS A8.3

ANNEXE 9

INDEX A9.1

INTRODUCTION

Le modèle MARTHE est un logiciel de modélisation hydrodynamique, en régime transitoire, des écoulements dans les milieux poreux tridimensionnels et/ou multicouches. Le schéma de résolution utilise les différences finies avec un maillage parallélépipédique (ou rectangulaire) irrégulier avec possibilité d'une surface libre en n'importe quelle couche de mailles.

Son domaine d'application le plus fréquent est naturellement les aquifères monocouches qu'il permet de modéliser très facilement en régime permanent ou en régime transitoire.

La souplesse du maillage de ce modèle permet une adaptation fidèle aux différents problèmes de l'hydrodynamique minière ou de l'hydrodynamique des milieux fissurés, car il est possible de représenter facilement des discontinuités ou des fractures.

Il est également adapté à l'hydrogéologie urbaine ou karstique par sa possibilité de simuler des drains ou des canaux.

Le modèle décrit ici est écrit en FORTRAN 77 standard. Il est utilisable à la fois sur les ordinateurs centraux, les stations de travail ou les micro-ordinateurs compatibles IBM/PC.

La version décrite dans ce rapport est la version 4.3 de décembre 1990.

Le présent rapport est composé de six parties suivies de huit annexes.

L'installation du logiciel est décrite dans la première partie. La cinquième partie décrit en détail un exemple d'application.

Première partie
DESCRIPTION DU MODÈLE

1.1 - DOMAINE D'APPLICATION DU MODÈLE MARTHE

Dans sa version 4.3 de décembre 1990, le modèle MARTHE présente les caractéristiques suivantes :

- écoulements tridimensionnels,
- aquifères multicouches avec épontes optionnelles,
- maillage rectangulaire irrégulier, l'extension de chaque couche pouvant être différente. Sur une verticale les mailles existantes ont cependant les mêmes dimensions horizontales ; possibilité de courts circuits quand une formation disparaît,
- prise en compte de surface libre dans n'importe quelle couche,
- possibilités de simuler finement un dénoyage local de l'aquifère,
- prise en compte de mailles à débordement (cours d'eau, sources, gravières),
- possibilité de simuler des zones équipotentiels à potentiels inconnus ou variables jusqu'à 99 zones équipotentiels différentes (lacs, gravières),
- prise en compte possible de parois étanches (palplanches, bâtiments, failles, etc.),
- présence optionnelle de coefficients d'anisotropie des perméabilités selon les 2 directions horizontales,
- présence de coefficients d'anisotropie verticale,
- possibilité d'anisotropies horizontales et verticales définies maille par maille,

- simulation en régime permanent ou transitoire,
- utilisation de données sous forme de «semis de points» à la norme du BRGM. Ces «semis» en entrée et en sortie permettent une compatibilité immédiate avec les logiciels BRGM de transformation (OPERA-SEM) d'interpolation et de visualisation (INGRID, UNIGRID), les logiciels de calcul de trajectoires (VIKING), de dispersion (SESAME), de biseau salé (INTRANS) etc.,
- possibilité de faire des modifications ou des affectations de paramètres par zones et de calculer des bilans de débits par zone.

1.2 - CARACTÉRISTIQUES DU MODÈLE MARTHE

Possibilités de calcul

- calcul par différences finies, implicite dans l'espace, explicite dans le temps,
- résolution itérative des calculs avec prise en compte de non linéarités,
- maillage rectangulaire en "tissus écossais",
- schéma tridimensionnel et multicouche simultané,
- module unique pour traiter régime permanent et transitoire (qui peuvent être enchaînés dans le même passage),
- un seul logiciel pour prendre en compte nappes captives, nappes libres ou mixtes,
- très grand nombre de mailles possibles (7 000 sur micro-ordinateur),

- calcul exact des échanges entre deux couches avec épontes en prenant en compte les perméabilités des trois couches du sandwich (et pas seulement la perméabilité de l'éponte),
- calcul des surfaces libres en 3D ou en coupes,
- traitement optimal des dénoyages,
- schéma de calcul exact (en régime transitoire) de l'emménagement lors du passage de nappe libre à nappe captive et réciproquement,
- possibilité d'avoir 99 zones équipotentielles, à potentiel non imposé (lacs, gravières, cavités),
- possibilité de prendre en compte l'emménagement des épontes,
- possibilité de dénoyer n'importe quelle couche,
- possibilité de court-circuiter des couches,
- prise en compte de liaisons étanches (palplanches...),
- anisotropie horizontale (nord sud/est ouest),
- anisotropie verticale/horizontale.

Confort d'utilisation

- définition graphique du maillage par préprocesseur sur habillage graphique de la zone à étudier,
- préprocesseur pleine page pour définir les paramètres,
- préprocesseur pleine page pour définir les pas de temps,

- données sur des fichiers séparés : un fichier de données par type de données,
- 99 zones géométriques (pour définir «en ligne» des paramètres géométriques ou hydrodynamiques),
- 99 zones de pluies, 99 zones d'irrigation,
- utilisation de dates absolues permettant d'enchaîner des simulations, puis de les juxtaposer,
- pas de temps de modèles non périodiques, mais définis par l'utilisateur «à la demande»,
- définition des données de mailles par «fichiers» semis ASCII autodocumentés manipulables par une chaîne de traitement,
- bilans très détaillés des débits d'échanges,
- calcul des rabattements et des débits résiduels,
- possibilité d'éditer les fichiers de résultats dans les mailles en clair ou en binaire (très rapide et très précis),
- possibilité de modifier **toutes** les données avant calcul et à **chaque pas de temps**,
- toutes les données peuvent être modifiées :
 - par lecture d'un nouveau fichier (pour toutes les couches),
 - par affectation d'une valeur constante sur toutes les mailles,
 - par affectation d'une valeur par couche,

- par affectation d'une valeur par zone géométrique,
- par affectation d'une valeur par maille,
- aucune donnée redondante (le substratum d'une couche sert par exemple de toit à la couche sous-jacente).

1.3 - INSTALLATION DU LOGICIEL ET LANCEMENT DU MODÈLE

Configuration nécessaire

Le logiciel MARTHE fonctionne sur tout microordinateur à la norme IBM/PC équipé :

- d'une mémoire centrale de 640 Ko au moins,
- d'un coprocesseur arithmétique 80287,
- d'un lecteur de disquettes 5"1/4 ou 3"1/2,
- d'un disque dur.

Une imprimante est optionnelle (mais souhaitable).

Installation

La procédure décrite ci-après permet la création automatique des répertoires et l'installation des programmes :

- a) Assurez-vous qu'il existe une place suffisante sur le disque dur : au moins 900 Ko pour l'installation complète de MARTHE (jeux d'essais compris),
- b) Insérez la disquette dans le lecteur A (ou B) et tapez :

A: (ou B:)

- c) Tapez ensuite :

INSTALL A: C: (ou A: D:)

Cette commande lance la procédure d'installation qui débute par l'affichage de l'écran de la figure 1.1.

```
B.R.G.M.   Departement   EAU   38-64-34-34

CREATION DE LA DIRECTORY C:MARTHEXE

Copie de MARTHEMU.EXE de BORDMART.EXE et BORDPAST.EXE dans C:\MARTHEXE
Par desarchivage automatique de ARCMARMU.EXE

CREATION DE LA DIRECTORY C:\COMHHH

Copie des fichiers exemple DANS C:\MARTHEXE\DEMO
```

Figure 1.1 - Écran de création des répertoires

Cet écran vous apprend que 2 répertoires sont créés :

★ l'un, de nom **MARTHEXE**, où sont copiés quatre "exécutables" :

- **MARTHEMU**, le logiciel proprement dit ;
- **BORDMART**, pour la création et la modification du fichier des paramètres nécessaires à **MARTHE** ;
- **BORDPAST**, pour la création et la modification du fichier des pas de temps en transitoire ;
- **OPERASEM** pour la création ou la modification de fichiers de données à la norme semis ;

★ l'autre, de nom **DEMO** (sous-répertoire de **MARTHEXE**) où sont copiés les fichiers d'exemples destinés à vous présenter quelques aspects de **MARTHE** et que vous pouvez utiliser à titre d'essais pour vous familiariser avec le logiciel.

Il y a aussi création du répertoire **COMHHH** où sont stockés les fichiers de commandes nécessaires au "lancement" des logiciels.

Dans le "path" de l'AUTOEXEC il est conseillé d'insérer l'instruction C:/COMHHH de façon à pouvoir utiliser MARTHE à partir de n'importe quel répertoire du disque.

Démarrage de Marthe

A la fin de la procédure d'installation, le message suivant apparaît à l'écran (figure 1.2) :

```
B.R.G.M.      Departement  EAU      38-64-34-34

      le logiciel MARTHEMU a ete installe
      dans la Librairie C:\MARTHEXE
*****
*   Ce logiciel est protege ; pour le lancer : *
*   il faut donc utiliser votre Cle (ou bouchon) *
*                                               *
*   pour le lancer il faut Frapper MARTHEMU   *
*                                               *
*           des jeux d'essai                   *
*   ont ete fournis gracieusement comme exemple *
*   dans le repertoire \MARTHEXE\DEMO          *
*                                               *
*   Pour faire un essai Frappez DEMOMAR       *
*                                               *
*   Quand vous voudrez supprimer             *
*   le repertoire DEMO vous frapperez MENAGMAR *
*****
```

Figure 1.2 - Message de fin d'installation

Ce message vous informe que le logiciel MARTHE est "protégé"; il faut, pour l'utiliser, qu'une "clé" soit branchée sur la sortie parallèle (imprimante) de l'ordinateur. Une imprimante peut être éventuellement branchée sur la "clé". Dans ce cas l'imprimante doit alors être sous tension lors de l'utilisation du logiciel.

Lancement du modèle

Le logiciel est appelé MARTHEMU. Il est opérationnel sur plusieurs ordinateurs en particulier sur VAX sous VMS et sur VAX Stations sous VWS sur lesquels il peut traiter plusieurs dizaines de milliers de mailles et sur micro-ordinateurs compatibles IBM/PC ou IBM/PS sur lesquels il permet de traiter au moins 7 000 mailles et même plus, suivant les options choisies (liaisons, gravières, anisotropies, régime transitoire). Pour lancer le modèle, il suffit, sur microordinateur PC ou PS de frapper la commande : MARTHEMU. Pour créer ou modifier les fichiers paramètres ou pas de temps on frappera : BORDMART ou BORDPAST.

1.4 - DESCRIPTION DU MAILLAGE

L'aquifère est défini comme un ensemble de NC couches, la couche 1 étant la couche supérieure. Les mailles sont des parallélépipèdes (voir figures 1.3 et 1.4) dont les dimensions sont définies par :

- les largeurs des colonnes,
- les longueurs des lignes,
- les épaisseurs variables de chaque maille.

Ces dimensions sont données indirectement par :

- les abscisses (absolues) des centres des colonnes,
- les ordonnées (absolues) des centres de lignes.
L'origine des abscisses et des ordonnées peut être quelconque : par exemple coordonnées de type LAMBERT en France.

Les coordonnées des centres des colonnes et des lignes sont définies dans une unité de dimension des mailles précisée par l'utilisateur (mètre, centimètre, pied...).

Les substratum et toit de chaque maille sont exprimés dans l'unité des charges choisie par l'utilisateur.

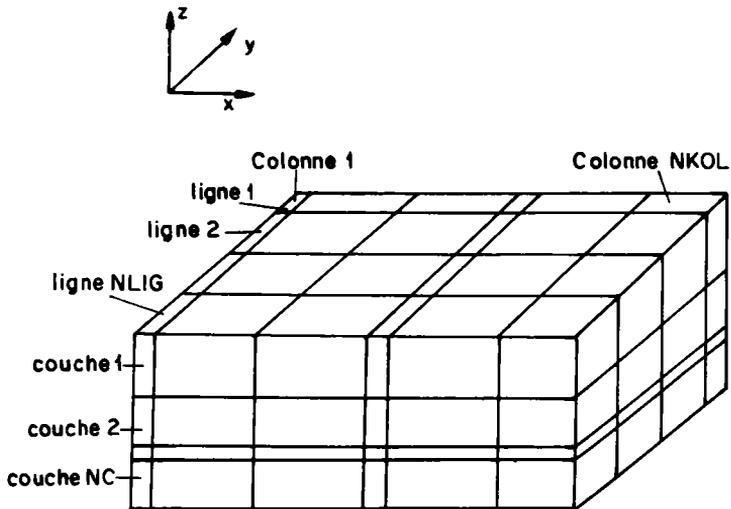


Figure 1.3 - Perspective cavalière d'un maillage tridimensionnel (cas particulier d'un schéma à couches horizontales)

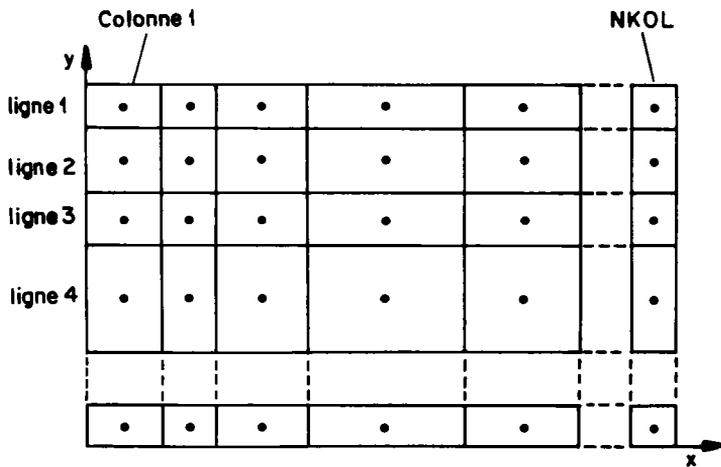


Figure 1.4 - Vue de dessus du maillage

La figure 1.5 ci-contre présente 2 exemples de maillage :

- un maillage carré régulier,
- un maillage rectangulaire irrégulier.

La figure 1.6 de la page suivante présente :

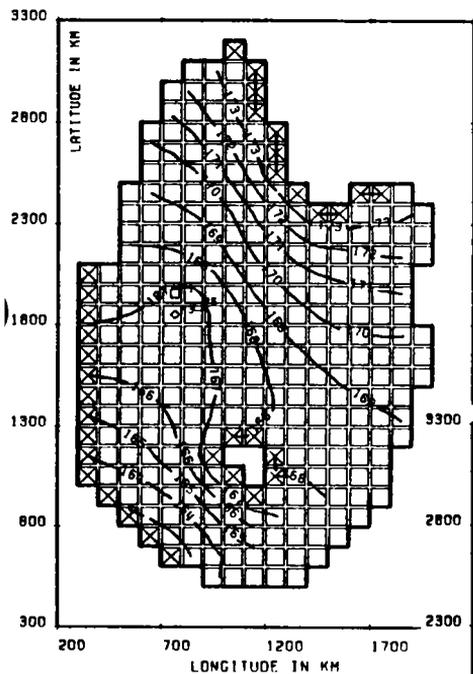
- un maillage rectangulaire en coupe verticale,
- un maillage tridimensionnel (en perspective).

REMARQUE 1 :

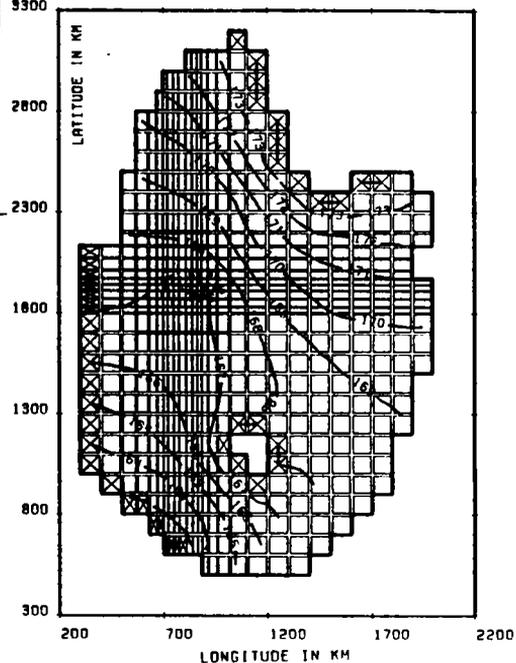
Les abscisses et les ordonnées ne peuvent pas être données «au hasard» car elles doivent correspondre à des centres de lignes et de colonnes ; par exemple les abscisses suivantes (par rapport à l'est de la première maille) sont impossibles : 100, 300, 350, 375 ; en effet, la 2ème maille s'étend de l'abscisse 200 à 400 et la 3ème maille lui serait incluse (et aurait une largeur de – 100 mètres !). Les abscisses et les ordonnées sont calculées automatiquement à partir des largeurs des colonnes et des lignes par des logiciels de mise en forme (RAMAGMAR, OPERASEM) et ne doivent être modifiées manuellement.

REMARQUE 2 :

L'épaisseur moyenne des couches décrite au paragraphe 6 de la définition des paramètres sert uniquement au calcul du coefficient d'emmagasinement captif intrinsèque et pour la définition d'une éventuelle hauteur de suintement en cas de dénoyage (pour permettre les échanges avec les mailles voisines).

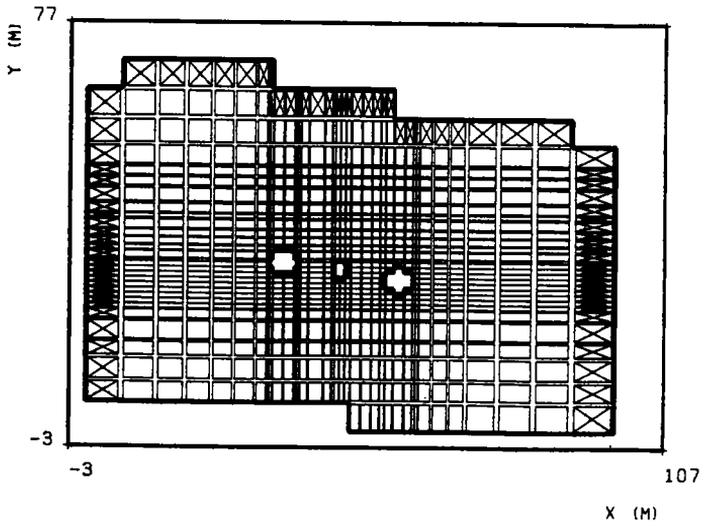


a) Modèle monocouche maillage carré

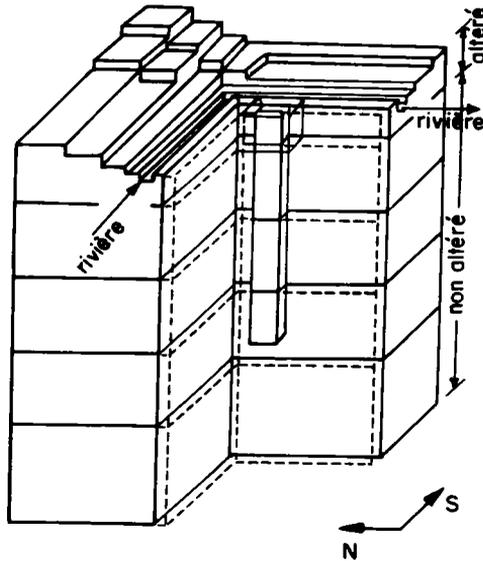


b) Modèle monocouche maillage rectangulaire

Figure 1.5 - Modèle monocouche



c) Modèle coupe verticale (3 tunnels sous la mer)



d) Modèle tridimensionnel (exhaure minière)

Figure 1.6 - Modèle coupe verticale et modèle tridimensionnel

1.5 - EXTENSION DE L'AQUIFÈRE

Les limites de l'aquifère sont définies naturellement par des valeurs de perméabilité positives dans le domaine et par des valeurs nulles à l'extérieur du domaine.

Comme on l'a vu dans le chapitre relatif à l'agencement des couches, une maille à perméabilité nulle n'existe pas. En schéma tridimensionnel on peut également introduire exceptionnellement des mailles imperméables qui empêchent les écoulements. Elles ont une perméabilité codée à 9999.

REMARQUE :

Les limites latérales peuvent être différentes dans chaque couche et ne respecter aucune superposition verticale.

Les limites sont générées automatiquement par le pré-processeur graphique RAMAGMAR (RAMAGE - MARTHE).

En résumé :

- (1) une maille avec une perméabilité > 0 fait partie du domaine aquifère ;
- (2) une maille avec une perméabilité = 0 (ou 9999) est extérieure au domaine ;
- (3) en tridimensionnel ou multicouche on peut distinguer :
 - perméabilité = 0 maille inexistante (transparente aux écoulements),
 - perméabilité = 9999 maille imperméable (peut isoler 2 couches)
Voir croquis dans le § "agencement des couches".

Une maille aquifère (perméabilité > 0) est à potentiel imposé (charge imposée) si son débit initial est fixé à la valeur code 9999.

1.6 - CONDITIONS AUX LIMITES

Sur les limites latérales du modèle, on peut imposer deux types de conditions aux limites :

- charge (ou potentiel) imposé (condition de Dirichlet)
- limite étanche (condition de Cauchy).

Si on ne précise rien sur une maille limite, il n'y a pas d'échange avec l'extérieur, c'est donc une limite étanche.

Si on veut imposer un potentiel sur une maille limite, il suffit de lui affecter un débit initial égal à la valeur code 9999 et de lui affecter la charge (potentiel) souhaitée.

Dans toute maille (interne ou limite) on peut introduire ou prélever un débit). On définit ainsi une maille à débit imposé.

On ne peut pas imposer de débit dans une maille à potentiel imposé.

1.7 - AGENCEMENT DES COUCHES

Le modèle MARTHE peut faire intervenir jusqu'à 99 couches. Certaines couches peuvent être séparées entre elles par des formations semi-perméables (épontes).

La géométrie de chaque couche est décrite par son substratum. Son toit est défini par le substratum de la couche ou de l'éponte qui lui est superposée.

La description précise de l'agencement des couches est détaillée dans le chapitre 5.

La figure 1.7 présente différentes manières de définir le toit d'une couche aquifère surmontée par aucune autre.

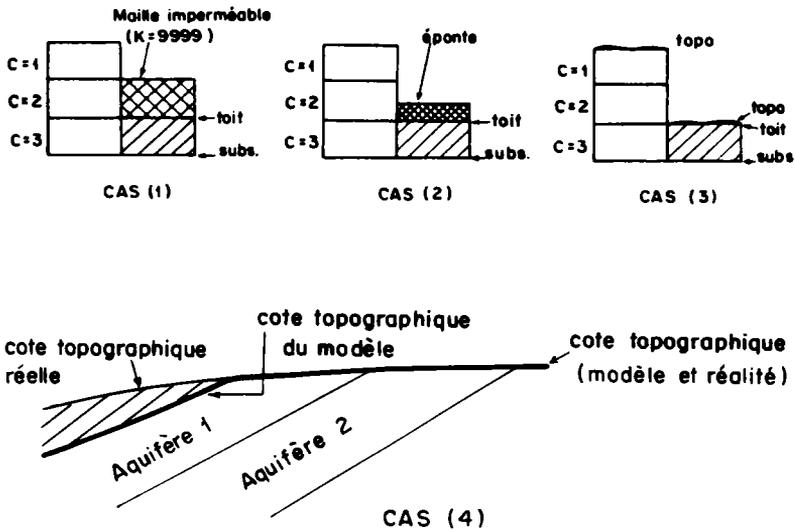


Figure 1.7 - Différentes manières de définir le toit d'une couche aquifère surmontée par aucune autre.

1.8 - PARAMÈTRES DU MODÈLE

1.8.1 - Cotes du substratum

Les cotes du substratum de chaque maille de chaque couche sont en unité de charges (choisie par l'utilisateur). Dans certains cas, on peut donner ces cotes par rapport à une cote de référence notée REFS.

Les cotes du substratum du modèle se déduisent alors des cotes lues, par la relation :

$$\text{cotes substr. modèle} = \text{cotes substr. lues} + \text{REFS}$$

1.8.2 - Limite supérieure du système aquifère : topographie

Sur l'extension totale formée de la réunion de toutes les couches (couche fictive numéro zéro) on définit une cote topographique qui est en fait le toit de la formation aquifère la plus haute (ce n'est pas forcément exactement la topographie si la formation aquifère est recouverte d'une couche imperméable : c'est alors le substratum - la base - de cette couche imperméable).

Chaque fois qu'une formation aquifère affleure, c'est cette topographie qui lui sert de toit. Ce toit peut être soit une limite étanche qui confine l'aquifère, soit une cote de débordement. La nature du toit est définie par l'index de débordement.

L'éventuelle cote de référence du substratum REFS s'applique également aux cotes topographiques.

1.8.3 - Index de débordement

Sur l'extension formée par la réunion de toutes les couches (couche fictive numéro zéro) une cote topographique définit la position du toit de la formation aquifère la plus superficielle.

L'index de débordement précise le comportement de ce toit quand la charge l'atteint et tente de le dépasser. Deux cas sont possibles :

- **index = 1** : le toit est une cote de débordement : si la charge tend à dépasser la cote topographique on observe un débit de débordement qui quitte définitivement le système aquifère,
- **index = 0** : le toit est «étanche». Si la charge dépasse la cote topographique la nappe devient en charge (et l'emmagasinement est caractérisé par le coefficient d'emmagasinement captif).

REMARQUE :

Le terme «toit étanche» implique uniquement une éventuelle mise en charge mais n'empêche pas une alimentation par une infiltration ou une irrigation.

1.8.4 - Charges

Si une maille est en charge (entièrement saturée), la charge est affectée à mi-hauteur de la maille, c'est la charge moyenne dans la maille. Dans une maille à surface libre (partiellement remplie), la charge est affectée à mi-hauteur de l'épaisseur d'eau. Si la charge (imposée ou calculée) est inférieure à la cote du fond d'une maille, l'aquifère est localement dénoyé (ce dénoyage est indiqué sur les fichiers de résultats par une valeur égale à 9999).

Latéralement, la charge est affectée au centre de la maille.

Les charges peuvent être définies par rapport à une hauteur de référence REFH. On a alors :

$$\text{charge modèle} = \text{charge lue} + \text{REFH}$$

Il est possible par cette hauteur de référence de diminuer toutes les charges pour augmenter la précision numérique des calculs.

Exemple :

Charges de 722 à 733 m NGF lues par le modèle.

On fixe REFH = - 720 ce qui permet, sans changer les semis de données, des calculs plus précis avec des charges modèles comprises entre 2 et 13. Dans ce cas, il faudra faire la même correction pour les cotes du substratum et de la topographie (soit ici REFS = - 720).

1.8.5 - Perméabilité

C'est la perméabilité à l'eau (ou conductivité hydraulique). C'est le rapport de la transmissivité à l'épaisseur saturée d'aquifère.

Dans le modèle, on introduit la perméabilité horizontale KH. Celle-ci peut présenter une anisotropie dans le plan : on définit alors un coefficient d'anisotropie plane :

$$AH = KOE/KSN = KX/KY$$

La perméabilité KOE dans la direction Ouest-Est) et la perméabilité KSN dans la direction OY (Sud-Nord) s'en déduisent alors par :

$$\begin{aligned} KOE &= KH \cdot \sqrt{AH} \\ KSN &= KH / \sqrt{AH} \end{aligned}$$

On peut aussi introduire une anisotropie verticale AV. La perméabilité verticale KV s'écrit alors :

$$KV = AV \cdot KH$$

Le coefficient AH peut être introduit pour tout le domaine ou bien maille par maille.

De même le coefficient AV peut être introduit globalement, par couche ou bien maille par maille.

1.8.6 - Liaisons étanches

Il est possible de supprimer les échanges entre 2 mailles juxtaposées ou entre 2 mailles superposées par l'introduction, sur option, de liaisons étanches appelées «liaisons» par abus de langage.

Ces liaisons - généralement un petit nombre - sont introduites seulement pour les mailles concernées. On ne peut pas en introduire sur les contours du modèle. Pour isoler une maille G (à gauche) d'une maille D (à droite) il suffit d'introduire une liaison à l'Est de la maille G ou à l'Ouest de la maille D. Le logiciel génère de lui-même les liaisons symétriques (figure 1.8).



Figure 1.8 - Liaisons étanches entre 2 mailles.

Il suffit d'introduire une seule liaison entre la maille G (gauche) et la maille D (droite) ; la liaison symétrique est générée automatiquement.

On peut également introduire une liaison étanche vers le haut ou vers le bas.

Ces liaisons étanches sont introduites en conversationnel graphique avec le logiciel RAMAGMAR (c'est-à-dire RAMAGE-MARTHE).

1.8.7 - Coefficients d'emmagasinement

Pour chaque maille il faut définir deux coefficients d'emmagasinement :

- **le coefficient d'emmagasinement à surface libre** : c'est en quelque sorte une porosité efficace ; il est utilisé quand une maille (quelle que soit la couche) n'est pas entièrement saturée (ce coefficient est celui qui serait déduit d'un pompage d'essai dans une région où la nappe est libre) ;
- **le coefficient d'emmagasinement captif** : on peut introduire au choix :
 - le coefficient d'emmagasinement spécifique ;
 - le coefficient d'emmagasinement captif des hydrogéologues relatif à une couche du modèle ou relatif à toutes les couches du modèle.

La valeur intrinsèque du coefficient d'emmagasinement captif est le coefficient d'emmagasinement spécifique (généralement noté S_s) qui est un coefficient de compressibilité exprimé en $1/m$ dans le système international. Cet emmagasinement spécifique S_s est intrinsèque car indépendant de l'épaisseur de l'aquifère considérée.

En pratique, les hydrogéologues utilisent le plus souvent le coefficient d'emmagasinement captif S_c qui est le produit $S_s \cdot E$, de l'emmagasinement spécifique S_s par l'épaisseur E de l'aquifère.

Ce coefficient S_c qui est sans dimension n'est plus intrinsèque. Dans un aquifère monocouche il est tout aussi pratique d'utiliser S_c que d'utiliser S_s .

Dans un système purement tridimensionnel (aquifère monocouche discrétisé suivant la verticale) il faut introduire dans chaque maille, soit le coefficient intrinsèque, soit le coefficient captif correspondant à toutes les couches ou plutôt à toute l'épaisseur.

Dans un système purement multicouche, on pourrait introduire dans chaque couche le coefficient captif S_c des hydrogéologues.

Dans un système mixte (multicouche dont certaines couches sont discrétisées suivant la verticale) il est vivement conseillé d'utiliser le coefficient spécifique S_s pour pouvoir utiliser a priori des données constantes.

Le mode d'introduction du coefficient d'emménagement captif est précisé dans la description des paramètres généraux.

REMARQUE 1 :

Si on veut effectuer un calcul en régime permanent, il suffit de mettre une valeur nulle comme définition de l'unité du coefficient d'emménagement libre et captif. Le calcul sera alors effectué sur un seul pas de temps correspondant au régime permanent. Une maille peut avoir un coefficient d'emménagement nul, mais pas négatif.

REMARQUE 2 :

Si on envisage de faire un calcul en régime permanent, il peut être parfois intéressant de procéder comme suit :

- mettre - pour simuler le régime permanent - des unités de coefficients d'emménagement très faibles (par exemple 10⁻²⁰),*
- et simuler plusieurs pas de temps de modèle.*

On obtient ainsi un calcul plus progressif et on peut contrôler sous forme d'historiques qu'on atteint bien une solution d'équilibre.

1.8.8 - Zones géométriques

Il est possible d'introduire (ou de modifier) des paramètres constants sur des zones du modèle appelées "zones géométriques".

Tous les paramètres peuvent être définis par zone géométrique (perméabilité, toit, substratum, emmagasinement, charge, débit, indice de débordement, topographie, anisotropies, zones de recharge, zones d'irrigation, zone de gravière, substratum éponte, toit éponte, etc. Même les zones géométriques peuvent être définies par zones géométriques !).

Les seules exceptions sont les suivantes :

- les liaisons étanches qui ne peuvent être définies que maille par maille,
- les flux de recharge ou d'irrigation qui ne sont définis respectivement que par zone de recharge ou d'irrigation.

Une zone géométrique doit avoir un numéro compris entre 0 et 99 (on ne peut cependant affecter de valeurs à la zone n° zéro).

Il est ainsi possible, après lecture des données par maille et au cours de n'importe quel pas de temps, de donner à un paramètre une valeur égale dans toutes les mailles d'une zone.

Exemple :

On peut affecter dans toutes les mailles de la zone 99 : débit = 9999, charge = 33, perméabilité, emmagasinement et épaisseurs = inchangés ; il est ainsi facile de modifier rapidement (avec une seule valeur) les données relatives à toute une zone.

On peut ainsi par exemple simuler facilement les variations au cours du temps du creusement d'une mine ou de remblaiement d'une gravière. On peut également caler facilement un modèle en ajustant les perméabilités par zone.

1.8.9 - Zones équipotentielles

On peut définir jusqu'à 99 zones équipotentielles différentes ; chacune de ces zones définit une zone équipotentielle (isocharge) mais à charge non imposée ; toutes les mailles d'une même zone auront à tout moment la même charge et on considère que la somme de tous les débits affectés à ces mailles est affectée globalement à la zone.

Ces zones permettent de simuler des fissures ou des cavités de très fortes perméabilités équivalentes dans lesquelles on effectue éventuellement un pompage ou une injection ; elles permettent également de représenter des lacs ou des gravières.

L'avantage de cette zone est qu'elle évite - pour obtenir une zone équipotentielle - d'introduire des mailles contiguës à très forte perméabilité donc génératrices d'instabilités et de difficultés de calcul. Ces zones de gravières sont indépendantes des zones géométriques.

1.8.10 - Zones de recharge et zones d'irrigation

L'extension totale obtenue par la projection en surface de toute les couches constitue la couche (fictive) numéro zéro.

Chaque maille de cette couche peut être affectée à une zone de recharge de numéro 0 à 99 et à une zone de surplus d'irrigation de numéro 0 à 99. Chaque maille peut donc avoir deux numéros indépendants (ou identiques).

Le rôle de la recharge ou du surplus d'irrigation est identique mais les extensions spatiales des zones peuvent ainsi être différentes.

1.8.11 - Débits

Les débits sont définis dans chaque maille aquifère avec la convention suivante :

- débit positif = débit injecté (entrant),
- débit négatif = débit prélevé (sortant),
- débit = 9999 : valeur code indiquant une maille à potentiel imposé (si on voulait justement introduire un débit entrant égal à 9999, il suffirait par exemple de le fixer à 9999,1).

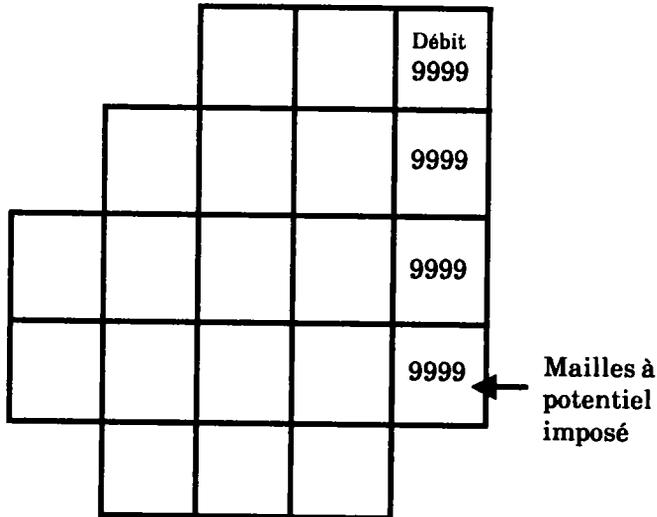


Figure 1.9 - Mailles à potentiel imposé

Les mailles à potentiel imposé sont définies automatiquement avec le logiciel RAMAGMAR.

1.8.12 - Recharge et surplus d'irrigation

La recharge arrive dans la couche qui affleure, que cette couche ait un toit "étanche" ou à "cote de débordement". La recharge arrive toujours, même si cette couche est dénoyée. La recharge est affectée à chaque pas de temps de modèle pour chacune des zones numéro 1 à 99 ; c'est le flux moyen entre le début et la fin du pas de temps, c'est-à-dire une hauteur divisée par un temps.

REMARQUE 1 :

On peut introduire une recharge ou un surplus d'irrigation négatif pour représenter une évapotranspiration ; mais si la maille de la couche affleurante est asséchée, il n'y aura pas de reprise.

REMARQUE 2 :

Les zones à charge imposée (débit = 9999) font partie du domaine aquifère. Elles reçoivent donc normalement recharge et irrigation.

REMARQUE 3 :

Il ne faut introduire dans le modèle que le surplus d'irrigation c'est-à-dire seulement la fraction de l'irrigation en excédent qui n'est pas consommée par les cultures et par l'évapotranspiration.

1.8.13 - Mailles à historique

On peut définir un certain nombre de mailles dont on désire mémoriser l'évolution des charges ou des débits calculés au cours des différents pas de temps de modèle, par exemple pour comparer avec des mesures correspondantes.

Le nombre maximal de mailles à historique (de charge et/ou débit) est fixé à 300.

Au cours des pas de temps de modèle il y a également conservation des historiques des 13 grandeurs suivantes qui caractérisent le bilan de la nappe et la convergence des calculs :

- somme des débits limites entrants,
- somme des débits limites sortants,
- somme des débits imposés entrants,
- somme des débits imposés sortants,
- somme des débits de débordement,
- somme des débits de recharge,
- somme des débits d'emmagasinement (stockage),
- somme des débits résiduels (en valeur absolue),
- débit résiduel maximal,
- somme des débits limites (positifs + négatifs),
- somme des débits imposés (positifs + négatifs),
- pourcentage d'écart de convergence,
- somme des débits de surplus d'irrigation.

1.8.14 - Temps (en régime transitoire)

Le calcul est effectué pour un certain nombre de pas - appelés pas de modèle - dont le nombre maximal est précisé dans les paramètres généraux (ce nombre maximal ne sert qu'à réserver de la place mémoire pour le stockage des historiques calculés).

Pour chaque "pas de modèle", on définit la date de la fin du pas qui doit être strictement supérieure à celle du pas précédent, sinon le programme s'arrête (on ne peut pas remonter le temps). Les pas de modèle sont définis suivant n'importe quel espacement au gré de l'utilisateur à l'aide du module BORDPAST qui génère un fichier "pas de temps" d'extension .PAS.

A chaque pas de temps de modèle, on définit (à l'aide du module BORDPAST) :

- la date de la fin du pas,
- les flux de recharge ou de surplus d'irrigation dans les zones où ils sont modifiés,
- les éventuelles modifications de : charge, débit, perméabilité, épaisseur de la couche supérieure (débordement), zone, cote du substratum, etc.,
- les éditions souhaitées (semis, tableaux...)

Le temps est donné sous forme de date absolue (dans une unité choisie par l'utilisateur : seconde, minute, heure, jour, mois ou année). Le début des calculs est défini par la date du pas de modèle numéro zéro (figure 1.10).

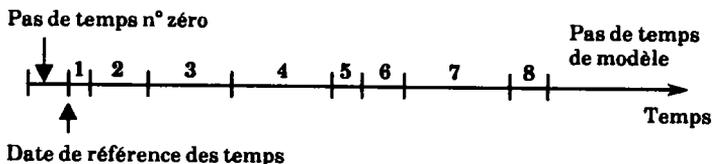


Figure 1.10 - Discrétisation du temps en pas de temps de modèle (exemple avec 8 pas de temps de modèle)

En ce pas numéro zéro on peut :

- soit réaliser un calcul en régime permanent unique si on a précisé un nombre d'itérations pour ce pas numéro zéro,
- soit réaliser un calcul en régime permanent avant un calcul en régime transitoire si on a précisé un nombre d'itérations pour ce pas numéro zéro,
- soit ne réaliser aucun calcul si on a fixé un nombre d'itérations égal à zéro, le modèle réalise alors uniquement un calcul de débits pour constater l'état d'équilibre.

A chaque "pas de modèle", les charges et les débits calculés d'un certain nombre de mailles choisies par l'utilisateur peuvent être mis en mémoire et constituent les "historiques" au cours du temps. Les historiques des échanges globaux du système aquifère ainsi que les caractéristiques de la convergence des calculs sont également automatiquement conservés sous forme d'historiques.

Pour effectuer les calculs, chaque pas de modèle peut être découpé automatiquement en un nombre constant de pas de calcul de durées variables (la durée des pas de calcul augmente linéairement jusqu'à la moitié du pas de modèle, puis reste constante pendant la seconde moitié - voir figure 1.11).

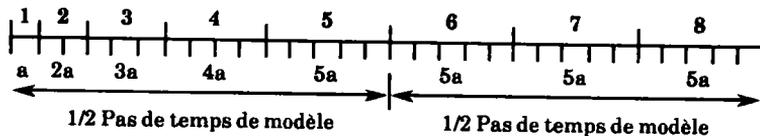


Figure 1.11 - Découpage d'un pas de temps de modèle en 8 sous pas

Il est possible de n'avoir qu'un pas de calcul par pas de modèle puisqu'il est possible, en régime transitoire, de choisir des pas de modèle de durées quelconques et donc de les resserrer après des modifications brutales (de débit, de pluie ou de niveau imposé). Les historiques qui sont mémorisés à chaque pas de modèle sont alors conservés à chaque pas de calcul ainsi que les bilans qui permettent de contrôler la convergence des résultats.

Le découpage en sous pas de temps de calcul avec une progression arithmétique sur la première moitié du pas de temps de modèle aboutit aux ratios suivants entre le plus petit sous pas et le pas de modèle total :

Nombre de sous pas de calcul	Rapport de réduction du plus petit pas	Nombre de sous pas de calcul	Rapport de réduction du plus petit pas
1	1	10	45
2	3	20	165
3	5	50	975
4	9	100	3 825
5	12	N très grand	$3 N^2/8$

Tableau 1.1 - Découpage des pas de temps de modèle en sous pas de temps de calcul

L'utilisation de sous-pas de temps n'est avantageuse que si l'on ne s'intéresse qu'à l'état de l'aquifère à certaines dates précises. On évite de définir ainsi un grand nombre de pas de modèles tout en conservant des pas de temps de calculs raisonnables.

1.9 - PRINCIPE DES CALCULS

Le calcul des charges se fait avec un schéma à différences finies avec une discrétisation implicite, en établissant l'équation d'équilibre des débits entre la maille de calcul (C) et les six mailles voisines (Nord, Sud, Est, Ouest, Haut et Bas).

Cette équation s'écrit globalement dans le cas général :

$$\sum_{i=1}^6 T_i \cdot [H_i - H(t)] + Q + \text{RECH} \cdot \text{SURF} = S \cdot \text{SURF} \cdot [H(t) - H(t-dt)]/dt$$

T_i	coefficient d'échange global ("transmissivité") entre la maille de calcul et une maille voisine i ,
H_i	charge d'une maille voisine à la date t ,
$H(t)$	charge de la maille de calcul à la date t ,
Q	débit prélevé ou injecté,
RECH	flux de recharge et de surplus d'irrigation,
SURF	surface horizontale de la maille = $DX \cdot DY$,
S	coefficient d'emmagasinement dont le détail est donné en Annexe 5.

La charge au centre de la maille de calcul est donc obtenue par itérations suivant la relation :

$$H(t) = \frac{\sum_{i=1}^6 T_i \cdot H_i + Q + \text{RECH.SURF} + \text{S.SURF} \cdot H(t-dt) / dt}{\sum_{i=1}^6 T_i + \text{S.SURF} / dt}$$

La résolution se fait de manière itérative avec cependant la possibilité d'utiliser un coefficient de sur-relaxation ou de sous-relaxation (suivant le cas) selon l'équation :

$$H_k = H_{k-1} + \text{RELAX} \cdot (H - H_{k-1})$$

H	charge calculée par résolution de l'équation d'équilibre,
H _{k-1}	charge à l'itération k - 1,
H _k	charge affectée à l'itération k,
RELAX	coefficient de relaxation (1 par défaut).

Si la convergence est délicate à cause de débordements ou d'assèchements par exemple, ou présente des oscillations, il peut être nécessaire d'utiliser pour RELAX une valeur inférieure à 1 (0.7 par exemple). C'est alors un coefficient de sous-relaxation.

Par contre, si la convergence est régulière (mais lente) il peut être intéressant d'utiliser un coefficient de sur-relaxation (ex : RELAX = 1,3 à 1,7).

Le pas de temps critique de calcul est égal à $SURF.S./4T$ (en unités rationnelles). Ce n'est pas du tout un pas de temps de calcul maximal puisque le schéma de résolution est absolument stable.

L'ordre de grandeur de temps d'inertie de la nappe est $SURNAP.S/4.T$, $SURNAP$ étant la surface totale modélisée.

Deuxième partie
MISE EN FORME DES DONNÉES

2.1 - LES FICHIERS DE DONNÉES

Les fichiers de données nécessaires pour utiliser le modèle MARTHE sont au nombre maximal de 19 puisque chaque type de donnée est sur un fichier séparé. Il n'y a cependant que 2 fichiers qu'il faut obligatoirement définir tous les autres étant facultatifs : ce sont respectivement le fichier des perméabilités et le fichier des paramètres généraux. Pour faciliter l'utilisation du logiciel, les noms de tous ces fichiers sont rassemblés dans un fichier répertoire. Ce fichier répertoire est tout simplement une liste en clair des noms des 19 fichiers éventuels. Le fichier répertoire est constitué automatiquement par le logiciel. Il a pour extension automatique .RMA c'est à dire Répertoire de MARthe.

La liste des 19 fichiers de données est reproduite dans la figure 2.1 avec l'extension automatique de chaque nom de fichier et la désignation codée de chaque type de données. Un exemple de fichier répertoire est donné sur la figure 2.2.

Quand un fichier devrait contenir des valeurs toutes identiques, il n'est pas nécessaire de créer ce fichier ; il suffit de lui donner - en réponse à la question demandant son nom - le nom fictif = valeur. Par exemple si la charge initiale est à la cote 50 on répondra "= 50" (sans les guillemets). Ceci n'est pas possible pour le fichier perméabilité qui est obligatoire.

N°	Type de donnée	Extens. nom de fichier	Code donnée
1	Perméabilités	.PER	PERMH
2	Débits	.DEB	DEBIT
3	Charges	.CHA	CHARG
4	Emmagasinement captif	.ECP	EMMCA
5	Emmagasinement libre	.ELI	EMMLI
6	Zones de géométrie	.ZGE	ZONEG
7	Cotes du substratum	.SUB	HSUBS
8	Zones équipotentielles	.EQU	EQUIP
9	Cotes topographiques	.TOP	TOPOG
10	Zones d'infiltration (recharge)	.ZPL	ZONEP
	Zones de surplus d'irrigation	.ZIR	ZONEI
11	Index de débordement	.IDE	IDEBO
12	Substratum éponte supérieure	.TOI	HTOIT
13	Perméabilité éponte supérieure	.PVE	PERMV
14	Paramètres généraux	.MAR	(PARAM)
15	Description pas de temps	.PAS*	(PASTP)
16	Liaisons étanches	.LIA*	LIAIS
17	Anisotropie horizontale KX/KY	.ANH	ANISH
18	Anisotropie verticale KV/KH	.ANV	ANISV
19	Rabattements (différence de charge)	.RAB**	RABAT
-	Flux d'infiltration (recharge)	.PLU**	INFIL
-	Flux de surplus d'irrigation	.IRR**	IRRIQ

* : ce n'est pas un fichier de données de mailles.

** : ce n'est pas un fichier de données mais seulement un "objet" modifiable en cours de calcul.

Figure 2.1 - Liste des fichiers de données, leur extension automatique et leur nom de code

NAPPE EXEMPLE TEST DE DÉNOYAGE AVEC 3 COUCHES

DENOY.PER	= Fichier : Perméabilités
	= Fichier : Débits
	= Fichier : Charges
	= Fichier : Emmagasinement captif
	= Fichier : Emmagasinement libre
= 0	= Fichier : Zones de géométrie
DENOY.SUB	= Fichier : Cotes du substratum
= 0	= Fichier : Zones équipotentielles
DENOY.TOP	= Fichier : Cotes topographiques
= 0	= Fichier : Zones d'infiltration
= 0	= Fichier : Zones de surplus d'irrigation
= 1	= Fichier : Index de débordement
	= Fichier : Substratum éponte supérieure
	= Fichier : Perméabilité éponte supérieure
DENOYVID.MAR	= Fichier : Paramètres généraux
DENOYVID.PAS	= Fichier : Description pas de temps
	= Fichier : Liaisons étanches
	= Fichier : Anisotropie horizontale KX/KY
	= Fichier : Anisotropie verticale KV/KH

**Figure 2.2 - Exemple de fichier répertoire
des fichiers de données**

2.2 - DESCRIPTION DES PARAMÈTRES GÉNÉRAUX

Les paramètres généraux sont rassemblés dans un fichier appelé "fichier des paramètres généraux". Ils sont définis de manière conversationnelle par le module BORDMART.

Ces paramètres généraux sont rassemblés en 9 paragraphes.

Le fichier généré par le module BORDMART a pour extension .MAR ; un exemple en est donné sur la figure 2.3 de la page suivante.

Les 9 paragraphes de ce fichier sont les suivants :

```
*** Editions et controles souhaitees    MARTHE 4.3 ***
*** Dimensions et geometrie             ***
*** Controle de la Resolution           ***
*** Unites des donnees                  ***
*** Point origine des donnees           ***
*** Description des couches aquiferes   ***
*** Mailles a Historiques                ***
*** Options supplementaires (3) (pour accessoires) ***
*** Initialisation avant calculs        ***
```

```

MAPPE EXEMPLE TEST DE DENOYAGE AVEC 4 COUCHES
*** Editions et controles souhaitees MARTHE 4.3 ***
1-LISTING DETAILLE DE TOUTES LES OPERATIONS ET RESULTATS
0-CONTROLE SUR CONSOLE DE LA LECTURE DES BLOCS DE DONNEES
1-EDITION DE TOUS LES TABLEAUX DE DONNEES LUS (ET DEDUITS)
1-EDITION DES DONNEES DE MAILLES EN FIN DE CALCUL (-1=81naire)
1-CONTROLE DE LA CONVERGENCE DANS UNE MAILLE PARTICULIERE

*** Dimensions et geometrie ***
20-NOMBRE MAXIMAL DE PAS DE MODELE (peut etre > nombre reel)
1-NOMBRE DE PAS DE CALCUL PAR PAS MODELE (VALEUR STANDARD=1)
1-LECTURE DE COTES TOPOGRAPHIQUES (TOIT SUPERIEUR)

*** Controle de la Resolution ***
500-NOMBRE MAXIMAL D'ITERATIONS PAR PAS DE CALCUL (TRANSITOIRE)
0-NOMBRE MAXIMAL D'ITERATIONS POUR INITIALISATION PERMANENT
5-8-MAXIMUM DE LA VARIATION MOYENNE DE CHARGE ENTRE 2 ITERATIONS
1-COEFF. DE RELAXATION DES CALCULS (1-NORMAL >1 -SUR <1-SOUS)
0-[PARAMETRE SUPPLEMENTAIRE PREVU ... POUR CONVERGENCE]
2-2-RAPPORT = (EPAIS. MINI DENOYAGE) / (EPAIS. MOYENNE COUCHE)

*** Unites des donnees ***
1-UNITE DES PERMEABILITES DES AQUIF EN M/S
1-UNITE DES DEBITS EN M3/S
1-UNITE DES CHARGES EN M
1-UNITE DES EMMAGASINEMENTS CAPTIFS EN [-] ou 1/M (0 = PERMA)
1-UNITE DES EMMAGASINEMENTS LIBRES EN [-] (0 = PERMA)
1-UNITE DES HAUTEURS D'INFILTRATION EN MM
1-UNITE DES HAUTEURS D'IRRIGATION EN MM
SEC-DUREE DE REFERENCE HAUTEURS INFILT (SEC,MIN,HEU,JOU,MOI,ANN)
SEC-UNITE DE TEMPS (PAS DE MODELE) (SEC,MIN,HEU,JOU,MOI,ANN)
5-UNITE DES COORDONNEES DES MAILLES EN M
1-COEFFICIENT D'ANISOTROPIE VERTICALE KV/KH PERMEABILITES
1-COEFFICIENT D'ANISOTROPIE HORIZONTALE KX/KY PERMEABILITES
-1-EMMAGASIN. CAPTIF LUS (1=SPECIF. 0=TOUTES CHES -1=PAR COU)

*** Point origine des donnees ***
0-REFERENCE DES CHARGES (CHARGES MODELE=CHARGES LU + REF)
0-REFERENCE DU SUBSTRATUM (SUBSTR. MODELE=SUBSTR. LU + REF)
9999-////////////////////// inutilise ////////////////////////

*** Description des couches aquiferes ***
COU= 1;EPAIS= 5;EPON SUP =0;EMMAG EPON= 0;UNI KE= 1;ANISOT= 0
COU= 2;EPAIS= 5;EPON SUP =1;EMMAG EPON= 0;UNI KE= 1;ANISOT= 0
COU= 3;EPAIS= 5;EPON SUP =0;EMMAG EPON= 0;UNI KE= 1;ANISOT= 0
COU= 4;EPAIS= 5;EPON SUP =0;EMMAG EPON= 0;UNI KE= 1;ANISOT= 0

*** Mailles a Historiques ***
*** Options supplementaires (3) (pour accessoires) ***
0-[Option supplementaire 1]
0-[Option supplementaire 2]
0-[Option supplementaire 3]

*** Initialisation avant calculs ***
/*****/ Fin d'initialisation
*** Fin fichier Generalites ***

```

Figure 2.3 - Exemple de fichier paramètres

Le logiciel BORDMART demande d'abord s'il faut créer un nouveau fichier paramètres ou corriger un fichier qui existe déjà (figure 2.4). Il affiche alors les 9 paragraphes (figure 2.5). Pour désigner un paragraphe, il suffit d'amener le symbole => au moyen des touches de déplacement vers le haut, vers le bas, en haut de page ou en bas de page (le déplacement est déroulant). Pour sélectionner le paragraphe désigné par => il suffit d'appuyer sur <return> ou sur la barre d'espace.

```

-----
-   Logiciel BORDMART   -
-                       -
-   Version 1.3         -
-   Dec 1990           -
-----

NOM du fichier des PARAMETRES a Modifier
  (ou <Return> s'il faut le Creer)
==>
NOM a Donner au fichier des parametres Modifie ?
  (ou <Return> pour l'abandonner)
-->MONOCAR

Donnez un TITRE pour le Fichier ? ou <Return> pour conserver le titre :

  EXEMPLE MAILLAGE MONOCOUCHE CARRE
  (lu sur le Fichier a corriger)
==> <Return>

```

Figure 2.4 - Choix du fichier paramètre.

```

                                logiciel BRGM/4S

                                Choix du Paragraphe

==> Editions et controles souhaite   MARTHE  4.3  ***
*** Dimensions et geometrie         ***
*** Controle de la Resolution       ***
*** Unites des donnees              ***
*** Point origine des donnees       ***
*** Description des couches aquiferes ***
*** Maillles a Historiques          ***
*** Options supplementaires (3) (pour accessoires) ***
*** Initialisation avant calculs    ***

Espace ou <Return> pour Selectionner le Paragraphe a corriger ) ?
eXit pour [terminer] ou <Esc> <Esc> pour [sortie rapide]

```

Figure 2.5 - Choix du paragraphe à corriger.

PARAGRAPHE 1 : Édition et contrôles souhaités

*** Éditions et contrôles souhaités

1=LISTING DÉTAILLÉ DE TOUTES LES OPÉRATIONS ET RÉSULTATS
0=CONTRÔLE SUR CONSOLE DE LA LECTURE DES BLOCS DE DONNÉES
1=ÉDITION DE TOUS LES TABLEAUX DE DONNÉES LUS (ET DÉDUITS)
1=ÉDITION DES DONNÉES DE MAILLES EN FIN DE CALCUL (-1=Binatre)
1=CONTRÔLE DE LA CONVERGENCE DANS UNE MAILLE PARTICULIÈRE

- **paramètre 1** : LISTING DÉTAILLÉ DE TOUTES LES OPÉRATIONS ET RÉSULTATS.

1 = Oui ; le fichier listing s'appellera MARTHE.LST
0 = Non ; Pas de fichier listing.

- **paramètre 2** : CONTRÔLE SUR CONSOLE DE LA LECTURE DES SEMIS DE DONNÉES DANS LES MAILLES.

1 = Oui : Les titres des semis de données apparaissent à l'écran au fur et à mesure qu'ils sont lus. On peut alors contrôler la conformité des données lues. Option à choisir pour le premier passage.
0 = Pas d'affichage. Lecture beaucoup plus rapide en exploitation.

- **paramètre 3** : ÉDITION SUR LISTING DE TOUTES LES DONNÉES DE MAILLES LUES (ET DÉDUITES DE DONNÉES LUES).

1 = Oui (utile pour un contrôle lors d'un premier passage)
0 = Non ; pas d'édition.

- **paramètre 4** : ÉDITION EN FIN DE CALCUL DES FICHIERS SEMIS DE DONNÉES DES MAILLES MODIFIÉES APRÈS LECTURE INITIALE.

Les fichiers de données pourront alors être réutilisés pour des calculs futurs.

0 = Non pas d'édition
1 = Oui ; édition en clair

-1 = Oui ; édition en binaire : plus rapide, précision totale, fichiers réutilisables par les postprocesseurs INGRID, VIKING, SESAME ; fichiers éditables avec le module OPERASEM, mais non éditables ni contrôlables avec éditeur de texte non spécialisé. Les noms des nouveaux fichiers actualisés seront rassemblés dans un fichier répertoire dont le nom sera donné par l'utilisateur.

● **paramètre 5 : CONTRÔLE DE LA CONVERGENCE DANS UNE MAILLE PARTICULIÈRE.**

1 = Oui ; on veut contrôler tous les bilans d'échanges et la convergence dans une maille dont on donnera les coordonnées à la console lors de l'exécution du modèle. Les résultats seront sur le fichier CONVERG.DAT.

0 = Non.

PARAGRAPHE 2 : Dimensions et géométrie

*** Dimensions et geometrie

30-NOMBRE MAXIMAL DE PAS DE MODELE (peut etre > nombre reel)
5-NOMBRE DE PAS DE CALCUL PAR PAS MODELE (VALEUR STANDARD=1)
1-LECTURE DE COTES TOPOGRAPHIQUES (TOIT SUPERIEUR)

● **paramètre 1 : NOMBRE MAXIMAL DE PAS DE TEMPS DE MODÈLE.**

C'est un nombre maximal qui sert à réserver de la place pour des historiques de résultats. Si le logiciel ne rencontre pas auparavant la fin des pas de modèles il y aura arrêt après ce nombre maximal de pas. Il n'est pas gênant de donner un nombre supérieur au nombre réel de pas de temps modèles :

Exemple :

S'il y a 5 pas de modèle le nombre maximal peut être fixé sans conséquences à 10 mais s'il est fixé à 3, le modèle s'arrêtera après le 3^{ième} pas.

- **paramètre 2 : NOMBRE DE SOUS PAS DE TEMPS DE CALCULS PAR PAS DE MODÈLE.**

En régime transitoire chaque pas de temps modèle peut être découpé en un certain nombre de sous-pas de temps de calcul. Etant donné que les pas de temps de modèle peuvent être choisis de durée variable, il n'est pas forcément nécessaire d'utiliser des sous pas de calcul : (valeur par défaut 0) (voir chapitre spécifique).

- **paramètre 3 : LECTURE DE COTES TOPOGRAPHIQUES.**

1 = Oui

0 = Non

Il est conseillé de lire des cotes topographiques, mais si on choisit l'option contraire, le modèle générera des cotes topographiques correspondant aux cotes du substratum de la couche affleurante majorées de l'épaisseur moyenne de l'aquifère définie au paragraphe 6.

PARAGRAPHE 3 : Contrôle de la Résolution

*** Contrôle de la Résolution

150-NOMBRE MAXIMAL D'ITERATIONS PAR PAS DE CALCUL (TRANSITOIRE)
0-NOMBRE MAXIMAL D'ITERATIONS POUR INITIALISATION PERMANENT
5-8-MAXIMUM DE LA VARIATION MOYENNE DE CHARGE ENTRE 2 ITERATIONS
1-COEFF. DE RELAXATION DES CALCULS (1-NORMAL >1 -SUR <1-SOUS)
0=[PARAMETRE SUPPLEMENTAIRE PREVU ... POUR CONVERGENCE]
1-2-RAPPORT = (EPAIS. MINI DENOYAGE) / (EPAIS. MOYENNE COUCHE)

- **paramètre 1 : NOMBRE MAXIMAL D'ITÉRATIONS PAR PAS DE TEMPS DE CALCUL POUR LE RÉGIME TRANSITOIRE.**

Ce nombre maximal d'itérations s'applique aux pas de temps de calcul des pas de modèle n° 1, 2 et suivants. Il ne s'applique pas au pas de modèle n° zéro.

- **paramètre 2 : NOMBRE MAXIMAL D'ITÉRATIONS DU PAS DE MODÈLE NUMÉRO ZÉRO.**

Le pas zéro sert à définir l'origine des temps et à réaliser des initialisations. Il est possible de faire un calcul des charges pour ce pas zéro. Il peut s'agir d'une initialisation avant un calcul en régime transitoire (pas de modèle 1, 2 et suivants). On peut également réaliser un calcul en régime permanent au cours du pas de modèle zéro, sans régime transitoire après. Il est également possible de ne faire aucun calcul au pas de temps zéro (donc 0 itérations) et de faire un calcul en régime permanent au pas de temps numéro 1 ; (le pas de temps de modèle zéro sert alors de référence pour calculer un éventuel rabatement). Valeur conseillée de l'ordre de 1 itération par maille de calcul.

- **paramètre 3 : ÉCART MOYEN DE CHARGE CALCULÉE ENTRE 2 ITÉRATIONS SUCCESSIVES DÉCLANCHANT L'ARRÊT DES CALCULS.**

Quand l'écart moyen est inférieur à ce seuil la résolution est considérée comme acceptable et les calculs de ce (sous) pas de calcul s'arrêtent. L'écart moyen est calculé en faisant la moyenne des valeurs absolues des écarts obtenus en chaque maille de calcul. Attention il s'agit bien d'un écart entre 2 itérations successives et non d'une erreur ni d'une précision de calcul. L'ordre de grandeur de cet écart devrait être de l'ordre de 10^{-6} fois la valeur moyenne des charges du modèle. Par exemple si les charges du modèle sont comprises entre 50 et 150 mètres (moyenne 100) l'écart maximal devrait être de l'ordre de 10^{-4} m (Il ne faut pas oublier que les calculs, en simple précision, garantissent pour chaque opération une précision numérique relative qui n'atteint que 10^{-7}).

- **paramètre 4 : COEFFICIENT DE RELAXATION DE CALCULS.**

Par défaut ce coefficient est égal à 1. S'il est supérieur à 1 (1,3 ou 1,7 par ex.) il s'agit d'une sur-relaxation qui accélère les calculs. S'il est inférieur à 1 (0,7 ou 0,3 par ex.) il s'agit d'une sous-relaxation qui amortit les fluctuations quand les calculs sont instables. Valeur conseillée : 1.

- **paramètre 5 : PARAMÈTRE NON AFFECTÉ DANS LA VER. 4.3.**
- **paramètre 6 : CONTRÔLE DU DÉNOYAGE.**

Ce paramètre définit une épaisseur minimale d'eau qui intervient dans les calculs en cas de dénoyage local dans une couche. Il est défini comme le rapport R de l'épaisseur minimale d'eau e_m divisée par l'épaisseur moyenne E de la couche concernée. Par exemple si l'épaisseur moyenne est égale à 10 mètres et que l'on choisit un rapport R = 0.01 l'épaisseur minimale d'eau e_m sera égale à 0.1 m.
Valeur conseillée 0.01.

PARAGRAPHE 4 : Unités des données

*** Unites des donnees

1-4=UNITE DES PERMEABILITES DES AQUIF	EN M/S	
2.7777-4=UNITE DES DEBITS	EN M3/S	
1=UNITE DES CHARGES	EN M	
1-2=UNITE DES EMMAGASINEMENTS CAPTIFS	EN [-] ou 1/M	(0 = PERMA)
1-2=UNITE DES EMMAGASINEMENTS LIBRES	EN [-]	(0 = PERMA)
1=UNITE DES HAUTEURS D'INFILTRATION	EN MM	
1=UNITE DES HAUTEURS D'IRRIGATION	EN MM	
SEC=DUREE DE REFERENCE HAUTEURS INFILT	(SEC, MIN, HEU, JOU, MOI, ANN)	
HEU=UNITE DE TEMPS (PAS DE MODELE)	(SEC, MIN, HEU, JOU, MOI, ANN)	
1=UNITE DES COORDONNEES DES MAILLES	EN M	
1=COEFFICIENT D'ANISOTROPIE VERTICALE	KV/KH PERMEABILITES	
1=COEFFICIENT D'ANISOTROPIE HORIZONTALE	KX/KY PERMEABILITES	
0=EMMAGASIN. CAPTIF LUS (1=SPECIF. 0=TOUTES CHES -1=PAR COU)		

Il est conseillé de choisir des unités de telle sorte que les nombres dans les fichiers soient dans la gamme de 1 à 10 000.

- **paramètre 1 : UNITÉ DES PERMÉABILITÉS DES AQUIFÈRES.**

C'est le facteur par lequel il faut multiplier les perméabilités des aquifères données par l'utilisateur pour les transformer en m/s. Par exemple si les perméabilités sont en 10⁻⁶ m/s l'unité est 10⁻⁶.

Attention ! cette unité s'applique aux perméabilités (horizontales et verticales) des aquifères mais pas aux épontes dont l'unité de perméabilité est définie dans le § 6.

- **paramètre 2 : UNITÉ DES DÉBITS POUR LES TRANSFORMER EN M³/S.**

On rappelle : $1 \text{ m}^3/\text{h} = 2.778 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
 $1 \text{ m}^3/\text{j} = 1.157 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$
 $1 \text{ l/s} = 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

- **paramètre 3 : UNITÉ DES CHARGES POUR LES TRANSFORMER EN M.**

C'est aussi l'unité des cotes sur la verticale (cote du substratum des aquifères ou des épontes, cotes topographiques, épaisseur d'aquifère, etc.).

- **paramètre 4 : UNITÉ DES COEFFICIENTS D'EMMAGASINEMENT CAPTIFS.**

C'est le facteur par lequel il faut multiplier ce coefficient d'emmagasinement.

- **paramètre 5 : UNITÉ DES COEFFICIENTS D'EMMAGASINEMENT LIBRE.**

Par exemple si les coefficients d'emmagasinement libres sont donnés en % (pour cent) l'unité est égale à 0.01.

N.B. : Si les 2 unités de coefficients d'emmagasinement (paramètres 4 et 5) sont égales à zéro les calculs seront réalisés en régime permanent.

- **paramètre 6 : UNITÉ DES HAUTEURS DE RECHARGE.**

Les flux de recharge et de surplus d'irrigation sont donnés sous la forme du rapport d'une hauteur de recharge pendant une durée de référence (paramètre 7). L'unité des hauteurs de recharge est le coefficient multiplicatif pour transformer ces hauteurs en millimètres (attention ! pas en mètres).

- **paramètre 7 : UNITÉ DES HAUTEURS DE SURPLUS D'IRRIGATION.**

Idem paramètre 6 mais pour les surplus d'irrigations.

- **paramètre 8 : DURÉE DE RÉFÉRENCE POUR LES HAUTEURS DE RECHARGE ET DE SURPLUS D'IRRIGATION.**

Choix entre une des 6 durées possibles :

SEC = seconde	JOU = jour
MIN = minute	MOI = mois
HEU = heure	ANN = année

ou en anglais : SEC, MIN, HOU, DAY, MON, YEA.

- **paramètre 9 : UNITÉ DE TEMPS POUR LES PAS DE MODÈLE.**

Unité pour transformer les temps en secondes. Choix parmi les durées :

SEC, MIN, HEU, JOU, MOI, ANN
(SEC, MIN, HOU, DAY, MON, YEA).

- **paramètre 10 : UNITÉ DE DIMENSION DES MAILLES (EN M).**

Par exemple si les dimensions des mailles sont données en km l'unité de dimension sera égale à 1 000 ; Valeur par défaut = 1.

- **paramètre 11 : COEFFICIENT D'ANISOTROPIE VERTICALE.**

Ce coefficient AV est égal au rapport de la perméabilité verticale KV divisée par la perméabilité horizontale KH. Par exemple si la perméabilité verticale est 100 fois plus faible que la perméabilité horizontale, le coefficient est égal à 0.01. Par défaut ce coefficient AV est égal à 1. Le coefficient

d'anisotropie verticale AV peut également être redéfini couche par couche dans le paragraphe 6. Il peut également être défini maille par maille.

- **paramètre 12 : COEFFICIENT D'ANISOTROPIE HORIZONTALE.**

Ce coefficient AH est le rapport de la perméabilité horizontale KOE dans la direction Ouest-Est divisée par la perméabilité horizontale KSN dans la direction Sud-Nord.

Par rapport à la perméabilité horizontale KH définie dans chaque maille on a les relations :

$$\begin{aligned} \text{KOE} &= \text{KH} \cdot \sqrt{\text{AH}} \\ \text{KSN} &= \text{KH} / \sqrt{\text{AH}} \end{aligned}$$

Par défaut ce coefficient AH est égal à 1. Il peut également être défini maille par maille.

- **paramètre 13 : MODE DE DÉFINITION DU COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT CAPTIF.**

La valeur intrinsèque du coefficient d'emmagasinement captif est le coefficient d'emmagasinement spécifique (généralement noté Ss) qui est un coefficient de compressibilité exprimé en 1/m dans le système international. Cet emmagasinement spécifique Ss est intrinsèque car indépendant de l'épaisseur de l'aquifère considéré.

En pratique, les hydrogéologues utilisent le plus souvent le coefficient d'emmagasinement captif Sc qui est le produit Ss.E de l'emmagasinement spécifique Ss par l'épaisseur E de l'aquifère. Ce coefficient Sc qui est sans dimension n'est plus intrinsèque. Dans un aquifère monocouche il est tout aussi pratique d'utiliser Sc que d'utiliser Ss (à condition de le préciser).

Dans un système purement tridimensionnel (aquifère monocouche discrétisé suivant la verticale) il faut introduire dans chaque maille soit le coefficient intrinsèque, soit le coefficient captif correspondant à toutes les couches ou plutôt à toute l'épaisseur.

Dans un système purement multicouche, on pourrait introduire dans chaque couche le coefficient captif Sc des hydrogéologues.

Dans un système mixte (multicouche dont certaines couches sont discrétisées suivant la verticale) il est vivement conseillé d'utiliser le coefficient spécifique Ss ...Sinon on ne sait plus très bien ce que l'on fait.

En résumé les modes d'introduction prévus sont :

- 1 = Coefficient spécifique Ss (c'est-à-dire Sc des hydrogéologues divisé par l'épaisseur moyenne E). C'est la forme recommandée et quasi obligatoire pour les systèmes multicouches-tridimensionnels mixtes.
- 0 = Coefficient captif Sc relatif à l'épaisseur totale de toute la (ou toutes les) couche(s). Peut être utilisé en monocouche ou en tridimensionnel pur (mais pas facilement en multicouche pur ni mixte).
- 1 = Coefficient captif Sc relatif à l'épaisseur E de la maille considérée. Peut être utilisé en monocouche ou en multicouche pur (mais pas facilement en tridimensionnel ni en multicouche mixte).

N.B. : En monocouche les modes 0 ou -1 sont équivalents.

PARAGRAPHE 5 : Point origine des données

*** Point origine des donnees

```
0-REFERENCE DES CHARGES (CHARGES MODELE=CHARGES LU + REF)
0-REFERENCE DU SUBSTRATUM (SUBSTR. MODELE=SUBSTR. LU + REF)
9999-//////////////////// inut111se //////////////////////
```

- **paramètre 1 : RÉFÉRENCE DES CHARGES.**

C'est une éventuelle constante REFH qui s'ajoute aux charges H lues dans les données :

$$H_{\text{modèle}} = H_{\text{lue}} + \text{REFH}$$

- **paramètre 2 : RÉFÉRENCE DES COTES DU SUBSTRATUM (ET DES COTES TOPOGRAPHIQUES).**

C'est une éventuelle constante REFS qui s'ajoute aux substratum SUB lus dans les données (ainsi qu'aux substratum des épontes et aux cotes topographiques) :

$$\text{SUB}_{\text{modèle}} = \text{SUB}_{\text{lue}} + \text{REFS}$$

Par défaut REFH = REFS = 0.

Il peut être intéressant d'utiliser ces paramètres REFH et REFS dans les cas suivants :

- a) les charges et les substratum ne sont pas connus à partir du même référentiel,
 - b) pour augmenter la précision des calculs.
- a) Dans le premier cas, par exemple les charges sont données par rapport au zéro des océans (NGF ou MSL) et les substratums par rapport à l'altitude moyenne de la surface du sol. On choisira alors :

$$\text{REFH} = 0$$

$$\text{REFS} = \text{cote du sol par rapport au niveau de la mer.}$$

- b) Dans le second cas, si les valeurs réelles des charges sont grandes par rapport à leur amplitude.

Par exemple si les charges varient entre les altitudes 1 652 mètres et 1 659 mètres, on choisira alors :

$$\text{REFH} = \text{REFS} = - 1\ 650.$$

Les charges dans le modèle seront alors comprises entre 2 et 9 d'où une importante augmentation de la précision relative des calculs.

- **paramètre 3 : NON UTILISÉ.**

PARAGRAPHE 6 : Description de couches aquifères

*** Description des couches aquifères

1= numero de la couche
50= épaisseur moyenne approximative de la couche
0= présence d'une eponte au dessus de la couche
0= emmagasinement de l'éventuelle eponte (futur)
1= Unité de permeabilité verticale de l'eponte
0= Anisotropie (>0=horizontale <0=verticale 0=defaut)

Pour chaque couche on définit les 5 paramètres suivants :

- **paramètre 1 : ÉPAISSEUR MOYENNE APPROXIMATIVE DE LA COUCHE (EN UNITÉ VERTICALE).**

C'est cette épaisseur moyenne qui est utilisée pour définir l'épaisseur minimale de dénoyage, pour calculer éventuellement l'emmagasinement captif à partir de l'emmagasinement spécifique ou pour définir la topographie dans les cas où on n'a pas choisi de la lire explicitement (paragraphe 2, paramètre 3).

- **paramètre 2 : PRÉSENCE D'UNE ÉPONTE AU DESSUS DE LA COUCHE AQUIFÈRE CONSIDÉRÉE.**

0 = Non (cas général en monocouche ou tridimensionnel pur)

1 = Oui (cas général en multicouche pur).

- **paramètre 3 : COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT DANS L'ÉVENTUELLE ÉPONTE SUPÉRIEURE.**

Paramètre non pris en compte dans cette version du modèle.

- **paramètre 4 : UNITÉ DES PERMÉABILITÉS VERTICALES DE L'ÉVENTUELLE ÉPONTE SUPÉRIEURE.**

Elle ne concerne que les épontes et non les perméabilités verticales des aquifères.

Par exemple si on définit pour la couche 2 une unité de perméabilité verticale de l'éponte égale à 10^{-4} , la perméabilité verticale qui sera lue pour l'éponte située au dessus de la couche 2 sera multipliée par 10^{-4} . Par contre la perméabilité verticale de l'aquifère de la couche 2 ne sera pas affectée. L'unité par défaut est égale à 1.

- **paramètre 5 : COEFFICIENT D'ANISOTROPIE VERTICALE DANS L'AQUIFÈRE DE LA COUCHE CONSIDÉRÉE.**

Par défaut si on donne la valeur 0 le coefficient d'anisotropie verticale de l'aquifère est le coefficient AV défini dans le paragraphe 4, paramètre 11. Si on redéfinit un coefficient d'anisotropie ici, pour une couche donnée, c'est celui-ci qui sera utilisé pour cette couche.

N.B. 1 : Ce coefficient d'anisotropie verticale de l'aquifère peut être redéfini maille par maille.

N.B. 2 : Si on donne une valeur négative, le modèle simule cette couche comme une éponte c'est-à-dire une couche avec un écoulement uniquement vertical. Dans ce cas c'est alors la valeur absolue de l'anisotropie verticale qui est prise en compte. Par exemple si ce coefficient d'anisotropie est égal à -10 et si la perméabilité horizontale lue est égale à 5, on aura en fait dans cette couche uniquement une perméabilité verticale égale à 50 ($KH = 0$).

PARAGRAPHE 7 : Définition des mailles à historique

*** Mailles a Historiques

Frappez C pour un historique de Charge
Frappez D pour un historique de Debit
Frappez <Return> pour retourner

Les mailles à historiques sont les mailles pour lesquelles on désire suivre les variations de charge ou de niveau au cours du régime transitoire.

En régime permanent on n'obtient que 2 valeurs par maille sélectionnée : la valeur avant calcul et la valeur après calcul.

En régime transitoire les valeurs de charge ou de débits sont conservées pour chaque pas de temps de modèle mais pas pour les sous pas de temps de calcul ; d'où l'intérêt, pour un même nombre d'itérations de calcul, d'avoir plutôt de nombreux pas de modèles avec peu (ou pas) de sous pas de calcul que le contraire.

Le nombre total des mailles avec historiques de charges + des mailles avec historiques de débits est égal à 300. Les historiques de charges et de débits sont donnés sous format libre ASCII sur le fichier HISTORIQ.OUT (Date sur 15 caractères, charge ou débit sur 15 caractères).

Les mailles à historiques sont définies dans ce paragraphe 7 par leur ligne, colonne et couche. Dans le cas de la charge, si on donne un numéro de couche égal à 0, on obtiendra - en tridimensionnel ou multicouche - la charge moyenne sur la verticale pondérée par l'épaisseur de couche, ce qui correspond à peu près à la charge qui serait obtenue par un forage ou un piézomètre traversant toute l'épaisseur de l'aquifère.

PARAGRAPHE 8 : Options supplémentaires

Ce sont des options prévues éventuellement pour des versions futures et pour permettre plus facilement une compatibilité ascendante des fichiers paramètres.

PARAGRAPHE 9 : Initialisation avant calculs

Ce paragraphe permet d'initialiser toutes les données par semis, par couche, par zone ou par maille et de définir des options d'édition. Ces initialisations sont identiques aux "modifications" et options qui peuvent être définies (avec le module BORDPAST) à chaque pas de temps de modèle.

2.3 - DEFINITION DES PAS DE TEMPS DE MODÈLES - MODIFICATIONS DES PARAMÈTRES EN RÉGIME TRANSITOIRE

Le chapitre 1.8.14 décrit l'agencement des pas de temps de modèle et des sous pas de calcul. Chaque pas de temps de modèle est défini par la date à laquelle il se termine. La durée de ce pas est donc la différence entre cette date et la fin du pas de temps précédent.

Pour le pas de temps numéro zéro on précise seulement la date de début des calculs. Le pas numéro zéro n'a pas de durée.

La définition des dates des pas de temps et des modifications éventuelles de paramètres - appelés actions - se fait avec le module BORDPAST. Il est possible la première fois de générer un fichier pas de temps (dont l'extension est .PAS) puis de le modifier ou le compléter ultérieurement (figure 2.6).

```
-----  
-   Logiciel BORDPAST   -  
-  
-   Version 1.3       -  
-   Dec 1990         -  
-----  
  
NOM du fichier des PAS de TEMPS a Modifier  
(ou <Return> s'il faut le Creer)  
-->MONOCAR  
NOM a Donner au fichier des Pas de Temps Modifie ?  
(ou <Return> pour l'abandonner)  
-->MONOCAR  
  
Donnez un TITRE pour le Fichier ? ou <Return> pour conserver le titre :  
  
EXEMPLE MAILLAGE MONOCOUCHE CARRE  
(Tu sur le Fichier a corriger)  
--> <Return>  
  
*** Fin de lecture apres :   7 pas (+ un pas initialisation) ***  
***                          et : 11 Lignes de Modifications     ***
```

Figure 2.6 - Choix du fichier pas de temps

Lors de la création il est possible de générer automatiquement des pas de temps de modèle régulièrement espacés ou de durées quelconques.

Si on choisit des dates irrégulières, elles doivent bien évidemment être croissantes sinon le modèle s'arrêtera puisqu'on ne peut pas remonter le temps.

A chaque pas de temps de modèle on peut faire des modifications de tous les paramètres.

Par l'intermédiaire des modifications, il est possible en particulier :

- de modifier des valeurs de charge imposée (variation du niveau d'un cours d'eau, d'un lac, de la mer ...),
- de modifier une cote de débordement (modification d'une émergence de source, de la position d'un drain),
- de modifier des débits captés (ou injectés) pour simuler une croissance des besoins,
- de modifier le maillage en changeant la position des des mailles à perméabilité nulle,
- de changer l'extension d'éventuelles fissures ou gravières par modification de l'extension des zones équipotentielles,
- d'imposer ou de libérer des potentiels en ajoutant ou en retirant des débits codés à 9999.

Après avoir choisi un pas de temps de modèle (fig. 2.7) on peut réaliser 3 types d'opération :

- définition de la date de fin du pas,
- visualisation et modification éventuelle des actions demandées à ce pas,
- création de nouvelles actions pour ce pas.

```

Choix d'un pas de temps a visualiser/corriger

Numero a consulter ( 0 a 7)
(or 8 pour CREER un(e) Numero de plus)

( <Return> = No 0 ; eXit ou <Esc> <Esc> =Retour )
==>]
Pas de modele numero 1

Visualisation/correction la date du pas
-->Visualisation/correction des Modifications
Creation de Nouvelles Modifications

( 3 Ligne(s) de Modifications)
Espace ou <Return> pour Selectionner le Paragraphe a corriger ?
eXit pour [terminer] ou <Esc> <Esc> pour [sortie rapide]

```

Figure 2.7 - Choix du pas de temps et de l'opération à réaliser

2.3.1 - Visualisation et modification éventuelle des actions choisies

Le logiciel affiche les objets déjà choisis (fig. 2.8).

```

[ Visualisation/modification des actions deja choisies]

Choix de l'Objet a creer/modifier Pas No 1

: PERMEABILITES
-->DEBIT : DEBITS
CHARG : CHARGES
: EMMAGASINEMENT CAPTIF
: EMMAGASINEMENT LIBRE
: ZONES DE GEOMETRIE
: COTES DU SUBSTRATUM
: ZONES EQUIPOTENTIELLES
: COTES TOPOGRAPHIQUES
: ZONES D'INFILTRATION
: ZONES D'EXCES D'IRRIGATION
: INDEX DE DEBORDEMENT
: SUBSTRATUM EPONTE SUPER.
: PERMEABILITE EPONTE SUPER.
: LIAISONS ETANCHES
: ANISTROPIE HORIZONTALE KX/KY
: ANISTROPIE VERTICALE KV/KH
: RABATTEMENTS (DIFFERENCE CH.)
: <Suite>

Espace ou <Return> pour Selectionner le Paragraphe a corriger ?
eXit pour [terminer] ou <Esc> <Esc> pour [sortie rapide]

```

Figure 2.8 - Choix d'un objet à modifier

Il affiche ensuite, pour chaque objet, les actions qui ont été sélectionnées (figure 2.9).

```
Choix de l'Action a appliquer a l'objet : 'DEBIT' Pas No 1
: LECTURE PAR SEMIS
: MODIFICATIONS PAR COUCHES
: MODIFICATIONS PAR ZONES GEOM.
==>MAILL : MODIFICATIONS PAR MAILLES
EDITI : EDITION
: MODIFICATIONS PAR ZONES INFIL
: MODIFICATIONS PAR ZONES IRRIG

Espace ou <Return> pour Selectionner le Paragraphe a corriger ?
eXit pour [terminer] ou <Esc> <Esc> pour [sortie rapide]

Modification de 'DEBIT' par 'MAILL' ; Pas no 1 (Page 1/ 1)

-->      1= Colonne Modification no 1
        15= Ligne
        1= Couche
        -500= Valeur
        0= Colonne Modification no 2
        0= Ligne
        0= Couche
        0= Valeur

Espace ou <Return> pour SELECTIONNER le Parametre a corriger ) ?
eXit pour [suite ou terminer] ou <Esc> <Esc> pour [sortie rapide] R=[Preced]
```

Figure 2.9 - Choix d'une action sur l'objet à modifier

Les actions possibles sont au nombre de 7 :

- lecture par semis (ou fichier pour liaisons étanches),
- modification par couche,
- modification par zone géométrique,
- modification par maille,
- édition des paramètres (seulement pour les charges, les rabattements ou les débits calculés),
- modification par zones de recharge ou d'irrigation (seulement pour recharges et surplus d'irrigation).

Certaines actions sont impossibles comme par exemple affecter une recharge par maille (possible seulement par zone de recharge) ou bien modifier des liaisons étanches par zone (possible seulement par mailles) ou bien éditer d'autres paramètres que charge, rabattement ou débit. Un dictionnaire de syntaxe vérifie les actions autorisées sur les différents objets.

Les objets possibles sont au nombre de 20 (fig. 2.10).

N°	Type de donnée	Extens. nom de fichier	Code donnée
1	Perméabilités	.PER	PERMH
2	Débits	.DEB	DEBIT
3	Charges	.CHA	CHARG
4	Emmagasinement captif	.ECP	EMMCA
5	Emmagasinement libre	.ELI	EMMLI
6	Zones de géométrie	.ZGE	ZONEG
7	Cotes du substratum	.SUB	HSUBS
8	Zones équipotentielles	.EQU	EQUIP
9	Cotes topographiques	.TOP	TOPOG
10	Zones d'infiltration (recharge)	.ZPL	ZONEP
	Zones de surplus d'irrigation	.ZIR	ZONEI
11	Index de débordement	.IDE	IDEBO
12	Substratum éponte supérieure	.TOI	HTOIT
13	Perméabilité éponte supérieure	.PVE	PERMV
14	Paramètres généraux	.MAR	(PARAM)
15	Description pas de temps	.PAS*	(PASTP)
16	Liaisons étanches	.LIA*	LIAIS
17	Anisotropie horizontale KX/KY	.ANH	ANISH
18	Anisotropie verticale KV/KH	.ANV	ANISV
19	Rabattements (différence de charge)	.RAB**	RABAT
-	Flux d'infiltration (recharge)	.PLU**	INFIL
-	Flux de surplus d'irrigation	.IRR**	IRRIG

* : ce n'est pas un fichier de données de mailles.

** : ce n'est pas un fichier de données mais seulement un "objet" modifiable en cours de calcul.

Figure 2.10 - Liste des fichiers de données, leur extension automatique et leur nom de code

2.3.2 - Création de nouvelles actions

Dans le paragraphe précédant on a vu comment on peut modifier une action déjà choisie : par exemple modifier un débit d'exploitation ou un flux de recharge ou bien supprimer une édition de charges calculées. La troisième opération permet d'introduire de nouvelles actions (nouveaux pompages etc.). Il suffit comme précédemment de choisir un objet puis une action (figure 2.11).

```
[ Creation de nouvelles actions ]
Choix de l'Objet a creer/modifier      Pas No   1
PERMH : PERMEABILITES
DEBIT : DEBITS
-->CHARG : CHARGES
EMMCA : EMMAGASINEMENT CAPTIF
EMMLI : EMMAGASINEMENT LIBRE
ZONEG : ZONES DE GEOMETRIE
HSUBS : COTES DU SUBSTRATUM
EQUIP : ZONES EQUIPOTENTIELLES
TOPOG : COTES TOPOGRAPHIQUES
ZONEP : ZONES D'INFILTRATION
ZONEI : ZONES D'EXCES D'IRRIGATION
IDEBO : INDEX DE DEBORDEMENT
HTOIT : SUBSTRATUM EPONTE SUPER.
PERMV : PERMEABILITE EPONTE SUPER.
LIAIS : LIAISONS ETANCHES
ANISH : ANISTROPIE HORIZONTALE KX/KY
ANISV : ANISTROPIE VERTICALE KV/KH
RABAT : RABATTEMENTS (DIFFERENCE CH.)
      : <Suite>
INFIL : FLUX D'INFILTRATION (RECH.)
IRRIG : FLUX D'IRRIGATION
      : <Suite>

Choix de l'Action a appliquer a l'objet : 'CHARG' Pas No   1
SEMIS : LECTURE PAR SEMIS
COUCH : MODIFICATIONS PAR COUCHES
ZONES : MODIFICATIONS PAR ZONES GEOM.
MAILL : MODIFICATIONS PAR MAILLES
-->EDIT : EDITION
      : MODIFICATIONS PAR ZONES INFIL
      : MODIFICATIONS PAR ZONES IRRIG

Espace ou <Return> pour Selectionner le Paragraphe a corriger ?
eXit pour [terminer] ou <Esc> <Esc> pour [sortie rapide]
```

Figure 2.11 - Choix d'un objet et d'une action à créer

Edition de 'DEBIT' ; Pas no 0 (Page 1/ 1)
 --> = Indice d'edition (0=Non ; 1=List ; 2=fich ; < 0 =Binaire)
 = Edition debits verticaux
 = Edition debits (1=uniq. potentiels impos ; 2=sauf poten. impos)
 eXit pour [suite ou terminer] ou <Esc> <Esc> pour [sortie rapide] H=[e]p

Figure 2.12 - Édition des débits

CAS PARTICULIER

Paramètre 1 : ÉDITION DES DÉBITS CALCULÉS.

- 0 = Non
- 1 = Oui sur listing
- 2 = sur listing et sur fichier DEBSIM.OUT
- 1 = Oui sur listing et sur fichier DEBSIM.OUT en binaire.

Paramètre 2 : ÉDITION DES DÉBITS VERTICAUX.

- 0 = Non
- 1 = Oui (fichier DEBSIM.OUT intercalés avec l'éventuelle édition des débits calculés).

Paramètre 3 : ÉDITION DES DÉBITS DES MAILLES À POTENTIEL IMPOSÉ (SI ON A DEMANDÉ L'ÉDITION DES DÉBITS CALCULÉS).

- 0 = Non
- 1 = uniquement les débits des mailles à potentiel imposé
- 2 = tous les débits sauf ceux des mailles à potentiels imposés.

REMARQUE :

Les actions sont faites dans l'ordre où elles sont définies. Si on réalise plusieurs actions sur le même objet il est nécessaire de les faire dans l'ordre : semis, couche, zone et maille c'est-à-dire de l'élément le plus gros à l'élément le plus petit.

La figure 2.13 donne un exemple de fichier pas de temps.

```
EXEMPLE MAILLAGE MONOCOUCHE CARRE
*** Debut de la simulation a la date :      12; ***
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 1: se termine a la date :      13; ***
/DEBIT/MAILL C= 1L= 15P= 1V= -500;
/CHARG/EDITI I= 2
/DEBIT/EDITI *= 3;V= 0;L= 0
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 2: se termine a la date :      18; ***
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 3: se termine a la date :      24; ***
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 4: se termine a la date :      36; ***
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 5: se termine a la date :      60; ***
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 6: se termine a la date :     108; ***
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 7: se termine a la date :     132; ***
/CHARG/EDITI I= 2
/DEBIT/EDITI *= 3;V= 0;L= 0
/***** Fin de ce pas
*** : : Fin de la simulation : ; ***
```

**Figure 2.13 - Fichier pas de temps
MONOCAR.PAS**

2.4 - DÉFINITIONS DES DONNÉES DES MAILLES (SEMIS)

Les données des mailles doivent être à la norme "semis" du BRGM qui est décrite en annexe. Ces fichiers semis peuvent être créés par les logiciels :

- INGRID pour l'interpolation,
- OPERASEM pour la génération, les opérations entre semis et l'utilisation d'un tableur spécialisé.

Chaque type de donnée (perméabilité, débit etc.) est dans un fichier séparé dont l'extension automatique est donnée dans la figure 2.10 placée plus haut.

Si un champ de données a une valeur constante - par exemple une charge égale à 53 mètres - sur tout le domaine, il n'est pas nécessaire de constituer de fichier semis ; il suffira quand les logiciels demanderont le nom du fichier de dire que le fichier s'appelle " = valeur " c'est-à-dire ici = 53 (sans guillemets).

Dans un certain nombre de cas, quand le fichier n'existe pas on pourra dire que son nom est N (pour Non). Ceci s'applique pour les fichiers :

- liaisons étanches,
- anisotropies horizontales et verticales,
- coefficients d'emménagement si on est en régime permanent (unités d'emménagement égales à zéro).

Si on a utilisé cette option, il est bien entendu impossible de définir ou de modifier des valeurs au cours des pas de temps.

REMARQUE 1 :

Même si le fichier perméabilité a une valeur constante, il faut le définir explicitement sous forme d'un semis puisque c'est ce semis qui définit les coordonnées des centres des mailles du domaine et les transmet au modèle. Un tel fichier semis homogène peut être construit très facilement avec le module OPERASEM (OPERATIONS sur des SEMis).

REMARQUE 2 :

Pour les systèmes tridimensionnels ou multicouches, les semis d'un même type de donnée (perméabilité par exemple) sont rangés successivement dans le même fichier, de la première couche (en haut) à la dernière couche (en bas). Les données relatives aux éventuelles épontes sont rangées - dans d'autres fichiers - également successivement de haut en bas.

2.5 - DÉFINITIONS DES LIAISONS ÉTANCHES

Les liaisons étanches (facultatives) sont décrites (ponctuellement) dans un fichier séparé dont un exemple est donné sur la figure 2.14 ci-dessous. Ce fichier est constitué automatiquement par le logiciel RAMAGMAR. Pour chaque direction le code est le suivant :

- 0 = inchangé
- 1 = ajoute une liaison étanche
- 9 = retire une liaison étanche.

Les liaisons sont données dans l'ordre H-B (haut, bas) puis N-E-S-W (Nord, Est, Sud, Ouest), c'est-à-dire dans le sens des aiguilles d'une montre.

```
COL LIG COU;HBNESW IMPERMEABLE CONNECTIONS
5 15 1 0001
5 16 1 0001
5 17 1 0001
5 18 1 0001
5 19 1 0001
5 20 1 0001
5 21 1 0011
6 21 1 001
7 21 1 001
8 21 1 001
9 21 1 001
10 21 1 001
11 21 1 001
12 21 1 001
13 21 1 001
14 21 1 001
15 21 1 001
16 21 1 001
17 21 1 001
```

**Figure 2.14 - Modèle MARTHE.
Exemple de fichier liaisons étanches**

2.6 - LES FICHIERS GÉNÉRÉS PAR LE LOGICIEL

Le logiciel **MARTHE** génère automatiquement les fichiers suivants :

MARTHE.LST	= listing de contrôle (facultatif).
BILANDEB.LST	= bilan des débits couche par couche (contrôle de la résolution).
HISTORIQ.OUT	= historique de charges et de débits demandés.
CHASIM.OUT	= semis des charges calculées.
DEBSIM.OUT	= semis des débits calculés.
RABAT.OUT	= semis des rabattements (différences par rapport aux charges initiales lues en début de calcul).
CONVERG.DAT	= fichier d'analyse des échanges dans une maille donnée.

(Voir figure 2.15 ci-contre.)

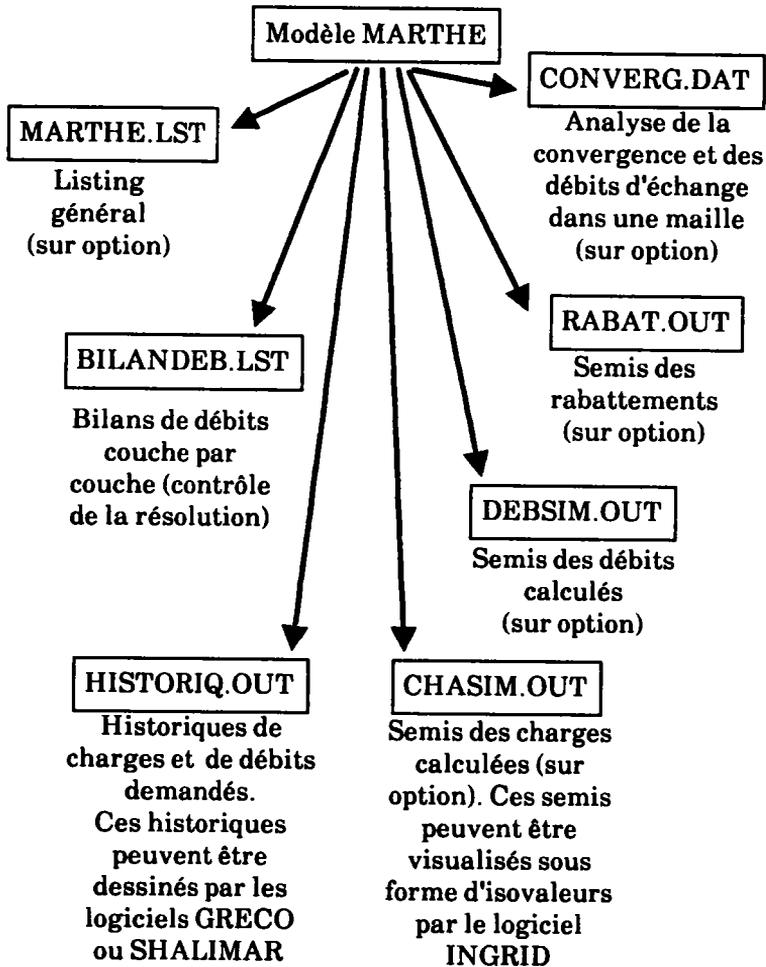


Figure 2.15 - Les fichiers de résultats produits par le logiciel MARTHE

2.6.1 - Le fichier BILANDEB.LST

Ce fichier permet d'une part de suivre la convergence itérative des calculs, et d'autre part d'établir (et de contrôler) le bilan des débits dans l'aquifère. Un exemple de fichier BILANDEB.LST est donné figures 2.16 et 2.17.

```
-----
$ PAS DE MODELE 7
-----
DEBUT: 108.000 {= 3.888E+05 SECONDES = 4.50 JOUR(S)}
DUREE: 24.000 {= 8.640E+04 SECONDES = 1.00 JOUR(S)}
FIN : 132.000 {= 4.752E+05 SECONDES = 5.50 JOUR(S)}

SOUS-PAS NOMBRE VARIATION DUREE DUREE VARIATION MAXIMALE
NUMERO ITERATIONS MOYENNE PAS DE CUMULEE VALEUR COL LIG COU
          PAR MAILLE DE CALCUL

1         10      1.773E-06 2.000E+00 2.000E+00 -1.144E-05 4 9 1
.
5         26      1.496E-08 6.000E+00 2.400E+01 -3.815E-06 13 10 1

Ecart maxi/Ecart moyen = 255.0

Une sous-relaxation pourrait eventuellement diminuer ce ratio
(ce ratio ne prejuge en rien la qualite de la convergence)
en particulier si la precision maxi est atteinte !
```

**Figure 2.16 - Fichier BILANDEB.LST.
Pas de 7. Convergence itérative**

```
- BILAN EN UNITES DE DEBIT Pas de temps No 7 -----
DEBITS ENTRANT PAR LES LIMITES = 0.000E+00
DEBITS SORTANT PAR LES LIMITES = 0.000E+00
DEBITS ENTRANT DANS LES MAILLES= 4.347E-02
DEBITS SORTANT DES MAILLES = -5.000E+02 (-5.000E+02 IMPOSE)
-----
STOCKAGE = -4.999E+02
BILAN DE CONTROLE = -3.497E-02 (Somme de tous les debits)
DEBIT RESIDUEL D'ERREUR = 5.083E-02 (Somme Val absol debits residu.)

DEBIT RESIDUEL MAXIMAL = 5.747E-04 LIG: 12 , COL: 10
SOIT UN ECART DE CHARGE DE : 6.191E-06
HAUTEUR RESIDUELLE D'ERREUR MAXIMALE = 6.191E-06 LIG: 12 , COL: 10

somme abs (Debits residuels)= 5.083E-02 Flux Total maxi= 5.000E+02
d'ou une convergence a : 1.017E-02 % (d'erreur)
```

**Figure 2.17 - Fichier BILANDEB.LST.
Pas de 7. Bilan des débits**

On voit d'abord apparaître le bilan de l'aquifère avant calcul (pas de mesure 0) puis, pour chaque pas de calcul :

- **le suivi de la convergence** toutes les 5 ou 10 itérations (pour chacun des éventuels sous pas de calcul) avec en particulier la maille qui a présenté la plus forte variation de charge entre 2 itérations successives,
- **le bilan des débits** pour chacune des couches, avec la terminologie suivante :

DÉBITS ENTRANT OU SORTANT PAR LES LIMITES

Débits calculés dans les mailles à potentiel imposé.

DÉBITS ENTRANT OU SORTANT DES MAILLES

Débits calculés dans les mailles internes du modèle. Ces débits doivent être très proches des débits imposés par l'utilisateur.

DÉBORDEMENT

Débit sortant par les mailles à débordement ; ce débit quitte l'aquifère.

STOCKAGE (EN RÉGIME TRANSITOIRE)

Débit moyen correspondant à la variation de stock pendant le pas de temps calcul.

DÉBIT DE TRANSIT

En tridimensionnel ou multicouche : débit transitant à travers des mailles à sec et se reportant vers la couche du dessous.

BILAN DE CONTRÔLE

Somme algébrique de tous les débits, il est toujours faible, à la précision de l'ordinateur près, même si les calculs n'ont pas encore convergé.

DÉBIT RÉSIDUEL D'ERREUR

Somme (des valeurs absolues) des débits résiduels calculés dans chacune des mailles. Le débit résiduel est la différence entre le débit éventuel imposé et le débit calculé d'après les mailles voisines. C'est le critère de convergence.

Le bilan est équilibré quand le débit résiduel ne dépasse pas quelques pourcents du chiffre d'affaire de la nappe c'est-à-dire par exemple de la somme des débits entrants (positifs) ou de la somme des débits sortants (négatifs). Dans une maille donnée le débit résiduel est transformé en écart de charge (ou hauteur résiduelle). C'est la correction de charge qu'il faudrait appliquer pour équilibrer les débits. C'est également un critère de convergence important à examiner puisqu'il peut arriver qu'un très faible débit résiduel corresponde à une forte correction de charge (si les perméabilités sont très faibles) ; ou bien un fort débit résiduel peut ne correspondre qu'à une correction de charge insignifiante (si les perméabilités sont très fortes).

On voit également apparaître :

- la somme des débits (calculés) par zone,
- (pour un aquifère tridimensionnel) : le bilan global de toutes les couches,
- le résumé des échanges de couche à couche.

2.6.2 - Le fichier HISTORIQ.OUT

Ce fichier contient les historiques de charge ou de débit au cours des pas de temps de mesure pour chacune des mailles sélectionnées y compris le pas numéro zéro à la date zéro. Il contient également les historiques des bilans globaux et de la convergence (figures 2.18 et 2.19). Ces historiques sont écrits en clair sous forme (date, valeur) en unités utilisateurs. Ils peuvent être dessinés immédiatement par le logiciel GRECO du BRGM par exemple. (Il suffit de préciser le format libre ; 2 valeurs par ligne et lecture simultanée de X et Y).

```

EXEMPLE MAILLAGE MONOCOUCHE CARRE
HISTORIQUES DE CHARGES : DATES ET CHARGES
MAILLE COLONNE 1 LIGNE 15 COUCHE 1
12.0000 50.0000
13.0000 46.5837
18.0000 37.3652
24.0000 31.8443
36.0000 26.0162
60.0000 20.0447
108.0000 13.9979
132.0000 11.9675
MAILLE COLONNE 6 LIGNE 8 COUCHE 1
12.0000 50.0000
.....
132.0000 48.6898
  
```

Figure 2.18 - Fichier HISTORIQ.OUT : charges

```

DEBITS LIMITES ENTRANTS
12.0000 0.0000E+00
.....
132.0000 0.0000E+00
DEBITS LIMITES SORTANTS
12.0000 0.0000E+00
.....
132.0000 0.0000E+00
DEBITS INTERNES (IMPOSES) ENTRANTS
12.0000 0.0000E+00
.....
132.0000 0.0000E+00
DEBITS INTERNES (IMPOSES) SORTANTS
12.0000 0.0000E+00
13.0000 -5.0000E+02
.....
132.0000 -5.0000E+02
  
```

Figure 2.19 - Fichier HISTORIQ.OUT : Suivi des termes du bilan

La figure 2.20 donne un exemple d'historiques tracés par le logiciel GRECO. Les historiques peuvent également être visualisés instantanément par le logiciel SHALIMAR du BRGM.

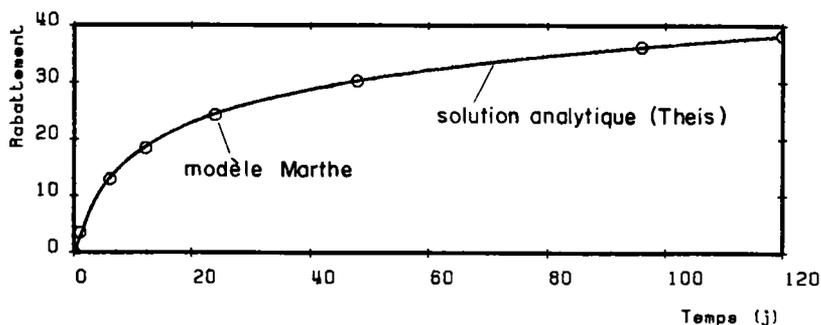


Figure 2.20 - Dessin du fichier HISTORIQ.OUT par le logiciel GRECO

2.6.3 - Le fichier CHASIM.OUT

Ce fichier contient en clair les valeurs de charges calculées. Elles sont données couche par couche pour chacun des pas de temps (de modèle) pour lesquels on l'a demandé.

Les charges sont présentées sous forme de "semis" qui peut être examiné directement et être visualisé immédiatement par isovalues - sans interpolation - par le logiciel INGRID.

Il est possible d'obtenir ce fichier sous forme de semis en binaire (plus rapide, plus précis, mais non éditable).

Ces fichiers peuvent être lus par les logiciels INGRID, OPERASEM, UNIGRID, VIKING, SESAME, INTRANS, etc.

2.6.4 - Le fichier DEBSIM.OUT

Ce fichier contient les débits calculés dans chaque maille.

- Dans une maille interne sans débit imposé (et sans potentiel imposé) : le débit imposé est égal à zéro et le débit calculé est donc un débit résiduel d'erreur.
- Dans une maille à débit imposé : on doit retrouver une valeur très proche de ce débit (sauf si l'aquifère est dénoyé puisqu'on prélève un débit trop important).
- Dans une maille à débordement : on peut obtenir le débit de débordement.
- Dans une maille à potentiel imposé : on obtient le débit qu'il faudrait introduire (ou prélever) pour imposer ce potentiel. C'est le débit d'échange avec l'extérieur.

2.6.5 - Le fichier CONVERG.DAT

Ce fichier facultatif contient les coefficients d'échanges et les débits d'échange entre une maille choisie par l'utilisateur et les 6 mailles voisines.

Ce fichier permet en particulier de suivre la convergence dans une maille singulière et en cas de difficultés d'analyser la provenance de débits résiduels ou d'oscillations.

2.6.6 - Les fichiers états finaux

Ces fichiers contiennent en clair (ou en binaire) toutes les données des mailles du modèle à la fin du dernier pas de calcul (y compris les charges calculées), toutes les modifications de géométries, affectations par zone, etc. ayant été prises en compte. Ces fichiers peuvent directement être réutilisés. La liste des nouveaux fichiers est conservée dans un fichier répertoire :

- pour un complément de calage,
- pour une prolongation du régime transitoire.

Cette possibilité permet d'effectuer un calcul en régime permanent en plusieurs parties, par exemple en 3 fois 400 itérations (après contrôle) plutôt qu'en 1 seule fois 1 200 itérations avec un risque d'erreur sur un paramètre ou une donnée. Pour la même raison il peut être intéressant en régime transitoire de dissocier en plusieurs fois un calcul sur un grand nombre de pas de temps, ce qui est facile puisque MARTHE utilise des dates absolues.

Troisième partie

EXEMPLE D'APPLICATION RAPIDE

3.1 - POSITION DU PROBLÈME

Soit un aquifère de 50 mètres d'épaisseur initialement au repos. La perméabilité moyenne est de 10^{-4} m/s et le coefficient d'emmagasinement en nappe libre est de 5 %. On réalise un pompage d'essai pendant 5 jours soit 120 heures à partir du 1er avril à midi (12h). On cherche alors à prévoir les rabattements engendrés par le pompage de 2 000 m³/h.

3.2 - EXTENSION DU DOMAINE

On suppose en première approximation que la transmissivité restera à peu près constante et égale à $5 \cdot 10^{-3}$ m²/s (et que la nappe sera libre). Le rayon d'action R après 5 jours sera approximativement :

$$R = 1.5 \sqrt{T \cdot t / S}$$

R = rayon d'action (m)

t = temps $\approx 4.3 \cdot 10^5$ s

S = coefficient d'emmagasinement : $5 \cdot 10^{-2}$

T = transmissivité : $5 \cdot 10^{-3}$ m²/s

soit $R \approx 310$ mètres

On choisit donc de modéliser 1/4 de plan par un domaine de 15 lignes sur 17 colonnes de mailles carrées de 50 mètres de côté (soit 255 mailles au total, une extension horizontale de 850 mètres, verticale de 750 mètres, qui dépasse nettement le rayon d'action théorique).

3.3 - CONDITIONS LIMITES

On ne précise aucun débit aux limites. Les limites latérales servent donc des limites étanches. Ceci est compatible à la fois avec les deux directions de symétrie et avec le rayon d'action qui n'atteint pas les limites.

3.4 - GÉNÉRATION DU MAILLAGE

On utilise le module OPERASEM (OPERAtion sur les SEMis) avec l'option G (génération) :

X de 0 à 850 ; Y de 0 à 750 ; coté = 50 mètres en X et en Y

Valeur (de perméabilité) à affecter au semis = 1.

On obtient alors immédiatement un semis qu'on appelle MONOCAR.PER (MONOCouche CARré) (figure 3.1).

```
PANNEAU no 1 / 2 d'un SEMIS-de 15 LIGNES par 17 COL; X0= 0 Y0= 0
MAILLAGE CARRE PERMH 1
  25 75 125 175 225 275 325 375 425 475
525 575 625 675 725 775 825
COORDONNEES DES LIGNES :
  725 675 625 575 525 475 425 375 325 275
  225 175 125 75 25
VALEUR UNIFORME = 1.00
```

**Figure 3.1 - Fichier perméabilité :
MONOCAR.PER obtenu par
le logiciel OPERASEM**

3.5 - DÉFINITION DES PARAMÈTRES GÉNÉRAUX

On utilise le module BORDMART. On génère un nouveau fichier. On lui donnera le nom MONOCAR (.MAR).

Il n'y a qu'une dizaine de paramètres à définir :

- **paragraphe 1** : contrôle des opérations (pour les premiers passages).
- **paragraphe 2** : 30 pas de temps de modèle au maximum ; 5 sous-pas de temps de calcul par pas de modèle.
- **paragraphe 3** (résolution) : 150 itérations au maximum en transitoire.
5 10^{-8} = variation de charge maximum entre 2 itérations.

- **paragraphe 4 (unités de données) :**
 - . unité des perméabilités : 10^{-4}
 - . unité des débits : $2.7777 \cdot 10^{-4}$ (donc en m^3/h)
 - . unité des emmagasinement : 10^{-2} (donc en %)
 - . unité de temps : HEU (donc en heures)
 - . coefficient d'emmagasinement captif apparent : paramètre 13 = 0.

- **paragraphe 5 (couches aquifères) :**
 - 1 couche d'épaisseur moyenne 50 mètres.

- **paragraphe 6 (historiques) :**
 - suivi des historiques de la maille dans l'angle inférieur gauche (colonne 1, ligne 15, couche 1) voir figure 3.2 ci-contre.

3.6 - DÉFINITION DES PAS DE TEMPS

On utilise le module BORDPAST. On génère un nouveau fichier. On lui donnera le nom MONOCAR (.PAS). On choisit des pas de temps irréguliers. Au pas zéro la simulation débute à la date 12 (heures) c'est-à-dire à midi. On définit alors successivement 7 pas de modèle dont les dates de fin de pas sont respectivement :

13, 18, 24, 36, 60, 108 et 132 heures absolues, c'est-à-dire : 1, 6, 12, 24, 48, 96 et 120 heures après le début du pompage soit des pas de durées respectives : 1, 5, 6, 12, 24, 48 et 24 heures.

On introduit au début du premier pas de modèle un débit de 500 (m^3/h) dans la maille du coin inférieur droit (ligne 15, colonne 17). Comme il s'agit d'un pompage on pense bien à introduire -500 et non 500 qui correspondrait à une injection. On ne modélise qu' $1/4$ de plan ; on introduit donc un pompage de 500 m^3/h (soit $4 \times 500 = 2\,000$ m^3/h pour le plan entier). On demande une édition des charges et des débits à la fin des pas n°1 et n°7. Voir figure 3.3.

```

EXEMPLE MAILLAGE MONOCOUCHE CARRE
*** Editions et controles souhaitees   MARTHE 4.3 ***
  1-LISTING DETAILLE DE TOUTES LES OPERATIONS ET RESULTATS
  0-CONTROLE SUR CONSOLE DE LA LECTURE DES BLOCS DE DONNEES
  1-EDITION DE TOUS LES TABLEAUX DE DONNEES LUS (ET DEDUITS)
  1-EDITION DES DONNEES DE MAILLES EN FIN DE CALCUL (-1=Binaire)
  1-CONTROLE DE LA CONVERGENCE DANS UNE MAILLE PARTICULIERE
*** Dimensions et geometrie           ***
  30-NOMBRE MAXIMAL DE PAS DE MODELE (peut etre > nombre reel)
  5-NOMBRE DE PAS DE CALCUL PAR PAS MODELE (VALEUR STANDARD=1)
  1-LECTURE DE COTES TOPOGRAPHIQUES (TOIT SUPERIEUR)
*** Controle de la Resolution         ***
  150-NOMBRE MAXIMAL D'ITERATIONS PAR PAS DE CALCUL (TRANSITOIRE)
  0-NOMBRE MAXIMAL D'ITERATIONS POUR INITIALISATION PERMANENT
  5-8-MAXIMUM DE LA VARIATION MOYENNE DE CHARGE ENTRE 2 ITERATIONS
  1-COEFF. DE RELAXATION DES CALCULS (1=NORMAL >1 =SUR <1=SOUS)
  0-[PARAMETRE SUPPLEMENTAIRE PREVU ... POUR CONVERGENCE]
  1-2-RAPPORT = (EPAIS. MINI DENOYAGE) / (EPAIS. MOYENNE COUCHE)
*** Unites des donnees                ***
  1-4-UNITE DES PERMEABILITES DES AQUIF EN M/S
  2.7777-4-UNITE DES DEBITS              EN M3/S
  1-UNITE DES CHARGES                     EN M
  1-2-UNITE DES EMMAGASINEMENTS CAPTIFS EN [-] ou 1/M (0 = PERMA)
  1-2-UNITE DES EMMAGASINEMENTS LIBRES EN [-] (0 = PERMA)
  1-UNITE DES HAUTEURS D'INFILTRATION EN MM
  1-UNITE DES HAUTEURS D'IRRIGATION EN MM
  SEC-DUREE DE REFERENCE HAUTEURS INFILT (SEC,MIN,HEU,JOU,MOI,ANH)
  HEU-UNITE DE TEMPS (PAS DE MODELE) (SEC,MIN,HEU,JOU,MOI,ANH)
  1-UNITE DES COORDONNEES DES MAILLES EN M
  1-COEFFICIENT D'ANISOTROPIE VERTICALE KV/KH PERMEABILITES
  1-COEFFICIENT D'ANISOTROPIE HORIZONTALE KX/KY PERMEABILITES
  0-EMMAGASIN. CAPTIF LUS (1=SPECIF. 0=TOUTES CHES -1=PAR COU)
*** Point origine des donnees         ***
  0-REFERENCE DES CHARGES (CHARGES MODELE=CHARGES LU + REF)
  0-REFERENCE DU SUBSTRATUM (SUBSTR. MODELE=SUBSTR. LU + REF)
  9999-//////////////////////////////////// inutilise //////////////////////////////////////
*** Description des couches aquiferes ***
COU= 1;EPAIS= 50;EPON SUP =0;EMMAG EPON= 0;UNI KE= 1;ANISOT= 0
*** Mailles a Historiques              ***
/CHARG/HISTO C= 1L= 15P= 1;C= 6L= 8P= 1;C= 12L= 8P= 1;C= 1L= 13P= 1;
/CHARG/HISTO C= 3L= 13P= 1;
/DEBIT/HISTO C= 1L= 15P= 1;C= 6L= 8P= 1;C= 12L= 8P= 1;
*** Options supplementaires (3) (pour accessoires) ***
  0-[Option supplementaire 1]
  0-[Option supplementaire 2]
  0-[Option supplementaire 3]
*** Initialisation avant calculs      ***
/*****/*****/ Fin d'initialisation
*** Fin fichier Generalites           ***

```

**Figure 3.2 - Fichier paramètres :
MONOCAR.MAR**

```

EXEMPLE MAILLAGE MONOCOUCHE CARRE
*** Debut de la simulation a la date :      12; ***
/*****/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 1: se termine a la date :      13; ***
/DEBIT/MAILL C= 1L- 15P- 1V- -500;
/CHARG/EDITI I= 2
/DEBIT/EDITI *= 3;V= 0;L= 0
/*****/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 2: se termine a la date :      18; ***
/*****/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 3: se termine a la date :      24; ***
/*****/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 4: se termine a la date :      36; ***
/*****/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 5: se termine a la date :      60; ***
/*****/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 6: se termine a la date :     108; ***
/*****/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 7: se termine a la date :     132; ***
/CHARG/EDITI I= 2
/DEBIT/EDITI *= 3;V= 0;L= 0
/*****/***** Fin de ce pas
***      :      : Fin de la simulation :      ; ***

```

**Figure 3.3 - Fichier pas de temps :
MONOCAR.PAS**

3.7 - LANCEMENT DES CALCULS

On frappe la commande MARTHEMU. Le dialogue est reproduit sur les figures de l'Annexe 1.

3.7.1 - Définition des données des mailles

On choisit une exécution conversationnelle et on va définir le "répertoire" c'est-à-dire la liste des noms des fichiers. Le seul fichier de données à lire, celui des perméabilités qui définit également le maillage, est le fichier MONOCAR (.PER).

Les fichiers de paramètres généraux et de pas de temps sont MONOCAR (.MAR et .PAS). Les valeurs des différents paramètres des mailles sont introduits directement sous la forme " = valeur".

Par exemple on choisit comme nom de fichier de charges initiales un fichier de nom "= 50" c'est-à-dire que toutes les charges sont valorisées à 50 mètres ; la topographie est à la cote zéro et le substratum à la cote - 50 (ce qui correspond bien à une épaisseur de 50 mètres).

Les fichiers inutilisés dans cette modélisation (zones géométriques, zones équipotentielles, zones d'infiltration etc.) sont également valorisés à 0. La nappe est donc captive (et la topographie est "étanche") contrairement à ce qu'on avait énoncé dans la position du problème. Il s'agit tout simplement ici d'imposer une épaisseur en eau constante.

Les paramètres d'épentes sont valorisés à la valeur N c'est-à-dire absents (ils ne seront pas lu). De même les liaisons imperméables et les anisotropies sont valorisées à N (option qui doit toujours être confirmée).

On obtiendrait les mêmes résultats en donnant la valeur "= 0" à ces derniers paramètres mais on perdrait de la place mémoire puisqu'avec l'option N les paramètres ne sont même pas chargés.

Après récapitulation et correction éventuelle des fichiers le modèle lit les paramètres généraux. On lui indique une maille dont on veut "surveiller" la convergence ; c'est la maille pompée.

Après lecture des données des mailles le modèle demande un nom de fichier pour sauvegarder la liste des fichiers. Cette liste est appelée "répertoire" dans le sens d'annuaire (pas dans le sens informatique anglais de directory).

On lui donne le nom de MONOCAR (.RMA). Ce fichier répertoire pourra être réutilisé pour reprendre un calcul similaire directement, sans redéfinir tous les noms de fichiers à la console (figure 3.4).

EXEMPLE MAILLAGE MONOCOUCHE CARRE	
MONOCAR.PER	-Fichier: PERMEABILITES
MONOFIN.DEB	-Fichier: DEBITS
MONOFIN.CHA	-Fichier: CHARGES
+5	-Fichier: EMMAGASINEMENT CAPTIF
-5	-Fichier: EMMAGASINEMENT LIBRE
+0	-Fichier: ZONES DE GEOMETRIE
--50	-Fichier: COTES DU SUBSTRATUM
+0	-Fichier: ZONES EQUIPOTENTIELLES
+0	-Fichier: COTES TOPOGRAPHIQUES
+0	-Fichier: ZONES D'INFILTRATION
+0	-Fichier: ZONES D'EXCES D'IRRIGATION
+0	-Fichier: INDEX DE DEBORDEMENT
	-Fichier: SUBSTRATUM EPONTE SUPER.
MONOCAR.MAR	-Fichier: PERMEABILITE EPONTE SUPER.
MONOCAR.PAS	-Fichier: PARAMETRES GENERAUX
	-Fichier: DESCRIPTION PAS DE TEMPS
	-Fichier: LIAISONS ETANCHES
	-Fichier: ANISTROPIE HORIZONTALE KX/KY
	-Fichier: ANISTROPIE VERTICALE KV/KH

**Figure 3.4 - Fichier répertoire des fichiers :
MONOCAR.RMA**

3.7.2 - Définition des fichiers de résultats

Le modèle demande alors un nom de "fichier répertoire" pour conserver les noms des fichiers dans leur état de fin de simulation. Ce fichier répertoire contiendra les noms originaux des fichiers dont les données sont inchangées et des nouveaux noms pour ceux dont les données ont été changées après lecture ; par exemple ici : les charges et les débits initiaux. On choisit le nom MONOFIN (.RMA) et l'option par défaut pour nommer les fichiers modifiés : MONOFIN . Extension.

3.7.3 - Vérification et initialisation

Le modèle édite alors sur listing (selon la demande) les données des mailles et vérifie les épaisseurs des aquifères. Dans notre exemple il vérifie que les cotes topographiques sont supérieures aux cotes du substratum.

Le modèle indique également en passant qu'il n'y a aucune maille à potentiel imposé et aucune maille à débordement ... ce qui est assez rare mais correspond bien à notre exemple.

3.7.4 - Calculs de résolution

Au pas zéro le modèle calcule uniquement les débits. Puis pour les pas de modèle 1 à 7 les calculs itératifs se poursuivent pour chacun des 5 sous pas. Les calculs s'arrêtent très vite pour les premiers pas qui sont relativement courts.

La variation maximale de $5 \cdot 10^{-8}$ mètres est atteinte après 27 itérations pour le premier pas et 114 itérations pour le 7^{ème}. Avant l'arrêt des calculs, entre l'itération 113 et 114 (entre l'itération 25 et 26 du 5^{ème} sous pas) la variation maximale de charge a été observée dans la maille ligne 13 colonne 10 ou un abaissement de $3.8 \cdot 10^{-6}$ m a été observé (on remarque que $4 \cdot 10^{-6}$ m divisé par une charge de 50 mètres correspond à 10^{-7} qui est la précision maximale de l'ordinateur en simple précision).

La variation "moyenne" obtenue comme la moyenne des valeurs absolues des variations dans toutes les mailles n'est que de $1.5 \cdot 10^{-8}$ m soit extrêmement faible.

Les débits sont parfaitement équilibrés puisque l'erreur de bilan n'est que de 10^{-2} % (soit 10^{-4}).

3.7.5 - Édition des résultats

Le modèle édite alors les données modifiées au cours de la simulation :

MONOFIN.CHA = charges à la fin du 7^{ème} pas de temps.

MONOFIN.DEB = débits initiaux avec la modification introduite au pas de modèle n° 1 (pompage - 500).

MONOFIN.RMA = fichier répertoire des fichiers de données dans l'état final.

Le modèle édite aussi les fichiers :

- CHASIM.OUT = charges calculées aux pas de temps sélectionnés : (pas de modèles 1 et 7).
- DEBSIM.OUT = débits calculés aux pas de modèle sélectionnés (1 et 7).
- CONVERG.DAT = termes d'échanges de la maille : ligne 8, colonne 1.

Le modèle génère également les fichiers :

- MARTHE.LST = listing général.
- BILANDEB.LST = suivi de la résolution et bilans.
- HISTORIQ.OUT = suivi des historiques dans la maille pompée (et dans 2 autres mailles choisies également) ; suivi également de la convergence et des flux globaux.

Le fichier HISTORIQ.OUT a été dessiné avec le logiciel GRECO. La figure 3.5 présente les rabattements calculés par le modèle (cercles) dans la maille pompée, comparés à la solution analytique par la formule de Theis (en trait continu).

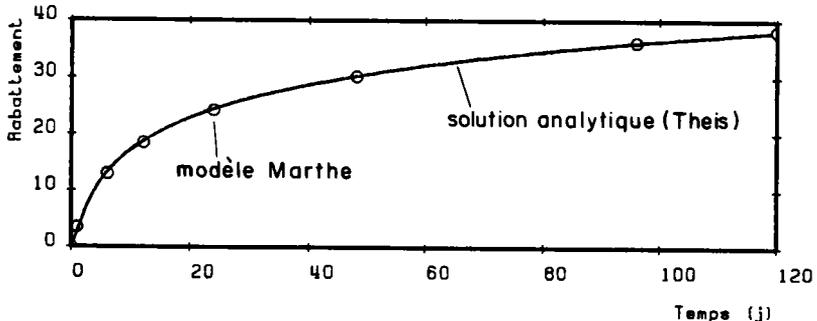


Figure 3.5 - Historique du rabattement dans la maille pompée

Un logiciel d'ajustement automatique a permis de trouver une transmissivité de $51.2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ alors qu'on a réalisé le calcul avec une valeur de $50 \cdot 10^{-4}$ et un rayon équivalent de 34.6 mètres pour un coefficient d'emmagasinement de 5 %.

Ce rayon équivalent est cohérent puisque le modèle donne la charge moyenne dans 4 mailles de 50 mètres de coté. Le rayon équivalent est d'environ 0.3 fois le coté d'une maille de 100 m par 100 m. On a également illustré l'influence du pas de temps de calcul en réalisant 3 autres simulations avec des pas de temps respectivement de 36 heures, 60 heures et 120 heures. La figure 3.6 montre qu'on obtient alors - surtout au début - des rabattements calculés très inférieurs aux vraies valeurs ; en effet, en utilisant un pas de temps trop grand, on obtient un cône de rabattement trop étalé.

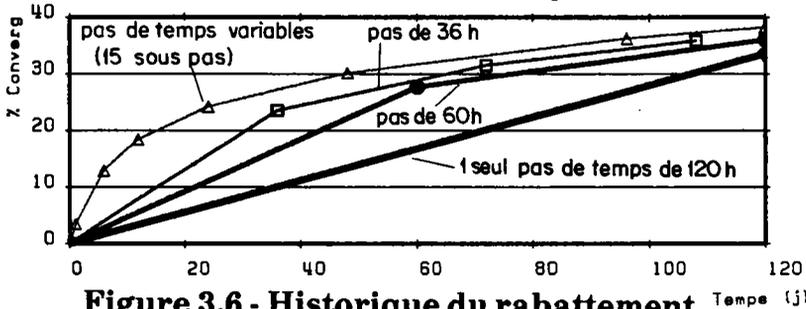


Figure 3.6 - Historique du rabattement dans la maille pompée pour différents pas de temps de calcul

Avec des pas de temps extrêmement petits, 2 simulations du rabatement ont été réalisées : après 1 h avec 100 pas de modèle de 1/100 h chacun, puis avec les pas de 1/100 h découpé chacun en 100 sous-pas de calcul. La figure 3.7 montre dans les 2 cas les évolutions de rabatement quasi identiques (traits confondus).

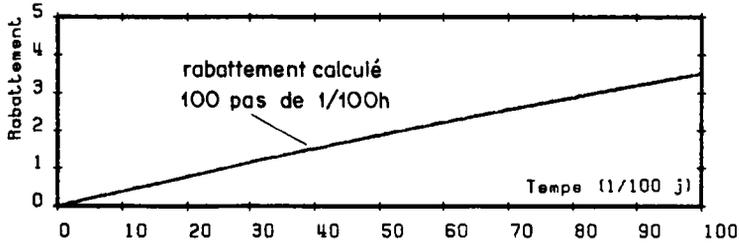


Figure 3.7 - Rabatements au cours de la première heure calculés avec des pas très fins dans la maille pompée

La figure 3.8 montre cependant que dans le cas avec les plus petits pas (trait épais) les bilans sont nettement moins bien équilibrés puisque l'écart de convergence dépasse parfois 3.5 % au lieu de 0.3 % avec des pas un peu plus gros (trait fin). Ceci est dû aux arrondis de calculs car les variations de charges pendant de trop petits pas de temps sont du même ordre de grandeur que les arrondis de calculs.

On rappelle ici que le pas de temps critique de calcul est égal à $SURF.S/4T$ ($SURF$ = surface de la maille) soit ici 6 250 secondes soit environ 2 heures.

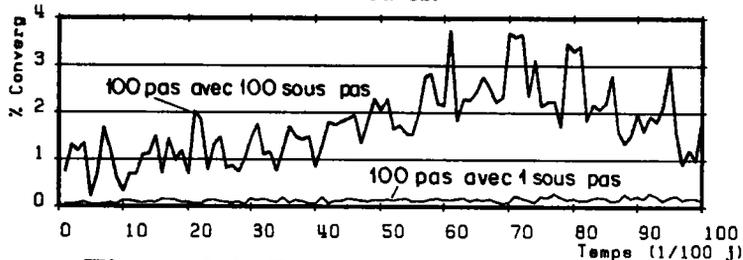


Figure 3.8 - Pourcentage d'erreur de convergence pendant la première heure pour deux durées de pas de temps de calcul

Quatrième partie

PRÉPARATION DES DONNÉES DES MAILLES

La description détaillée de la préparation des données des mailles n'est pas l'objet de ce texte mais on en donne quelques indications rapides.

On doit distinguer 6 phases successives dans le cas général :

- **Digitalisation** des limites du domaine, des affleurements, des limites de zones, des isovaleurs des champs continus.

Logiciel de *digitalisation* ;

- **Définition graphique** de l'extension de chaque couche, des potentiels imposés et des liaisons étanches.

Logiciel *RAMAGMAR* ;

- **Préparation des semis** de la base de données.

Logiciels *INGRID* et *OPERASEM* ;

- **Définition du nombre de couches** et de l'existence éventuelle des épontes.

Module *BORDMART* qui produit un fichier paramètres (qui peut être très simplifié à ce stade) puisqu'il suffit uniquement de connaître le nombre de couches et la présence des épontes ;

- **Mise de la base de données** (tous les semis) au maillage défini par *RAMAGMAR*.

Logiciel *FUSIOMAR* (qui utilise le fichier paramètres généraux) ;

- Eventuellement ultérieurement : **modification du maillage** par *RAMAGMAR* puis mise au maillage par *FUSIOMAR*.

4.1 - DIGITALISATION DES DONNÉES

● Les données à digitaliser par isovaleurs sont toutes les données continues :

- topographie,
- charges,
- substratum
- substratum épontes.

Les isovaleurs relevées sous forme de suites de coordonnées (X, Y) doivent être transformées en fichier de triplets (X, Y, Valeur de l'isovaleur) - par exemple par le *module CODISOVA*.

● Les données définies par plages doivent être digitalisées en relevant les contours de ces plages.

Ces données sont :

- perméabilité,
- coefficients d'emmagasinement,
- zones de recharge,
- d'irrigation,
- zones géométriques,
- zones équipotentiellles,
- index de débordement,
- perméabilité des épontes.

Le logiciel OPERASEM permet d'affecter une valeur constante à l'intérieur d'un contour fermé de zone.

- Les débits ponctuels doivent être relevés par points.

Le logiciel INGRID pourra les affecter directement dans les mailles.

4.2 - DÉFINITION DU DOMAINE

Le logiciel graphique RAMAGMAR permet à partir d'éléments cartographiques (parfois appelés "habillages") et de contours extérieurs des aquifères (ces contours sont appelés "masques") de définir très facilement un maillage et les mailles qui sont à l'intérieur de ce maillage. Chaque couche du modèle peut avoir une extension différente.

RAMAGMAR produit un fichier présence qui comporte des valeurs zéro à l'extérieur du domaine et des valeurs -1 à l'intérieur. Ce fichier présence est équivalent au fichier perméabilité.

Le logiciel FUSIOMAR affectera ultérieurement à chaque maille ayant une valeur non nulle la perméabilité la plus proche extraite du semis de perméabilité de la base de données. Si on modifie par RAMAGMAR un maillage existant, on introduira en entrée le fichier perméabilité. Les mailles éliminées seront mises à zéro et les nouvelles mailles créées seront mises à -1, les autres mailles seront inchangées.

RAMAGMAR permet également d'introduire graphiquement des potentiels imposés ou de les retirer ; il génère alors un fichier de débits avec des 9999 sur les mailles à potentiel imposé.

Si on modifie un maillage existant il faut repartir du fichier débit qui contient éventuellement déjà des débits pompés ou injectés.

Avec le logiciel RAMAGMAR on peut introduire (ou retirer) des liaisons imperméables entre mailles qui sont décrites dans le fichier liaisons imperméables. Le logiciel RAMAGMAR permet de plus d'éditer sur un fichier les coordonnées des côtés de toutes les mailles aquifères ainsi que des figures des potentiels imposés et des liaisons étanches. Ce fichier qui est en format libre, maille par maille peut être utilisé pour une superposition future du dessin du maillage du modèle sur les isovalues dessinées à partir des résultats des calculs.

4.3 - PRÉPARATION DE LA BASE DE DONNÉES

Elle se fait couche par couche avec les logiciels INGRID et OPERASEM comme expliqué plus haut. Pour un même type de données (par exemple les perméabilités) les semis sont rangés dans un même fichier, successivement de la première couche (en haut) à la dernière couche (en bas). Les données d'épontes - qui n'apparaissent qu'au dessus de certaines couches - sont rangées dans d'autres fichiers également successivement de haut en bas dans leur ordre d'apparition.

4.4 - TRANSFORMATION DE LA BASE DE DONNÉES PAR MISE AU MAILLAGE DU MODÈLE

La base de données est généralement constituée avec des mailles carrées régulières. Le maillage du modèle peut être constitué (ou modifié) par RAMAGMAR avec des mailles irrégulières, plus fines, près des singularités.

Cette opération consiste à faire un changement de maillage si les maillages sont différents mais surtout à charger toutes les données de la base de données, en particulier les données de perméabilité dans le fichier présence et les données de débits dans le fichier débits limites. Cette opération de fusionnement de fichier est réalisée par le module FUSIO-MAR : en entrée on donne le nom du fichier répertoire de la base de données, ainsi que les noms des fichiers présence, débits limites et liaisons créées ou modifiées par RAMAGMAR,

et on obtient pour toutes les couches à la fois une nouvelle base de données actualisée.

Si le fichier répertoire des fichiers de la base de données n'existe pas, il sera constitué en conversationnel. Ce fichier répertoire doit contenir également le nom du fichier des paramètres généraux car celui-ci donne description du nombre de couches et de la position des épontes.

Cinquième partie

***DESCRIPTION DÉTAILLÉE
DE L'AGENCEMENT DES COUCHES
DU MODÈLE MARTHE***

REMARQUE :

Pour réaliser un modèle monocouche le lecteur peut sauter ce paragraphe ou le parcourir rapidement.

Le modèle MARTHE peut faire intervenir jusqu'à 99 couches d'épaisseur variable dans chaque maille. Certaines couches peuvent être séparées entre elles par des formations semi-perméables (épontes), mais ce n'est pas obligatoire ; certaines couches peuvent se biseauter au sein du modèle et disparaître, permettant des courts circuits entre 2 couches non consécutives.

La couche la plus haute est la couche 1 mais chaque couche peut affleurer en surface. La recharge est appliquée, par zone, à la couche qui affleure localement. Chaque couche peut être localement en charge, à surface libre, dénoyée ou débordante.

La figure 5.1 montre un exemple complexe de couches avec des épontes entre certains horizons.

La figure 5.2 montre la schématisation d'un système tridimensionnel pur. On remarque que la couche numéro 3 disparaît à l'Est de la zone modélisée, on a un contact entre la couche 2 et la couche 4.

La figure 5.3 montre en coupe un schéma monocouche classique.

Au-dessus du modèle on définit une couche fictive couche zéro dont l'extension couvre la superficie totale de toutes les couches. Cette couche numéro zéro sert à définir les conditions d'affleurement : cote topographique, état de la topographie en surface (mise en charge ou condition de débordement), zones de recharges, zones d'irrigation (voir figure 5.4).

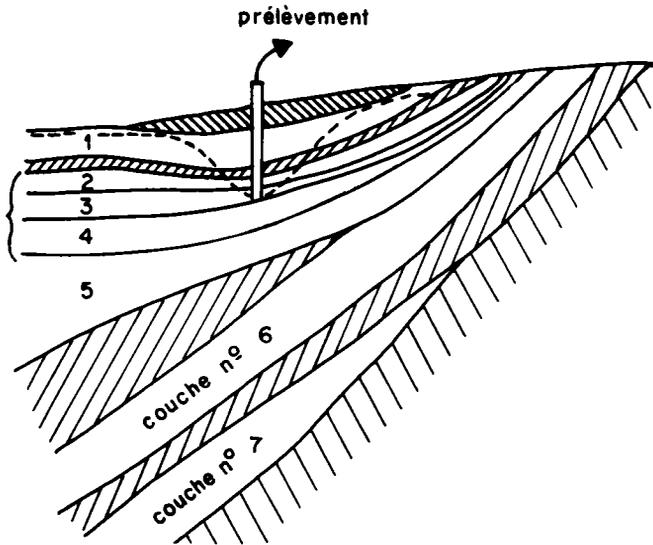


Figure 5.1 - Exemple de système complexe qui peut être modélisé avec le logiciel MARTHE

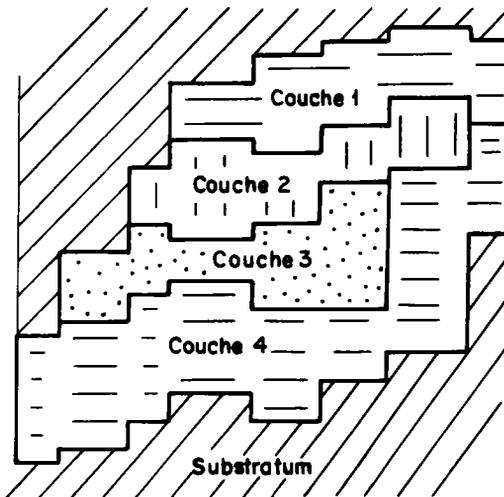


Figure 5.2 - Vue en coupe d'un maillage tridimensionnel

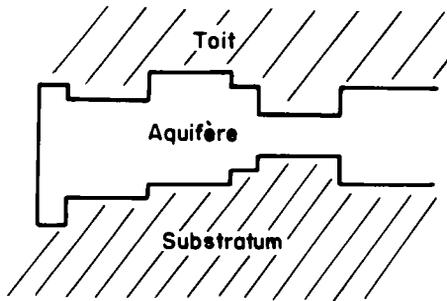
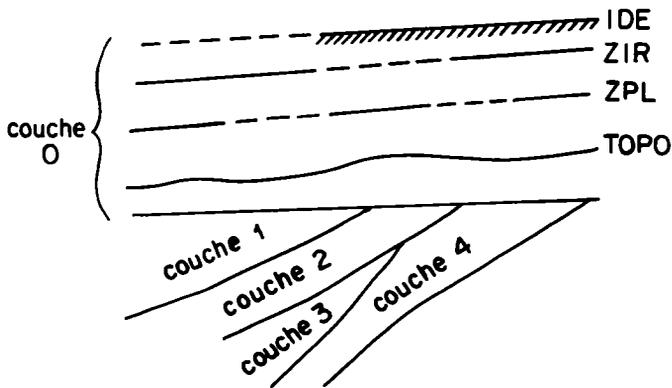


Figure 5.3 - Vue en coupe d'un système monocouche



IDE : index de débordement.

ZPL : zone de recharge.

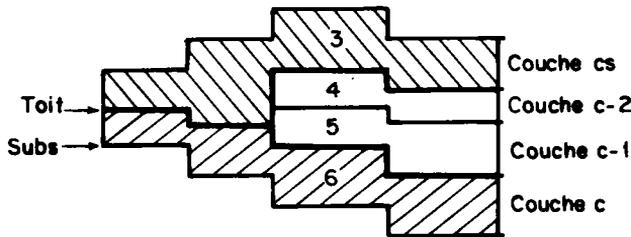
ZIR : zone d'irrigation.

TOPO: cotes topographiques.

Figure 5.4 - Définition de la couche numéro zéro (vue en coupe verticale)

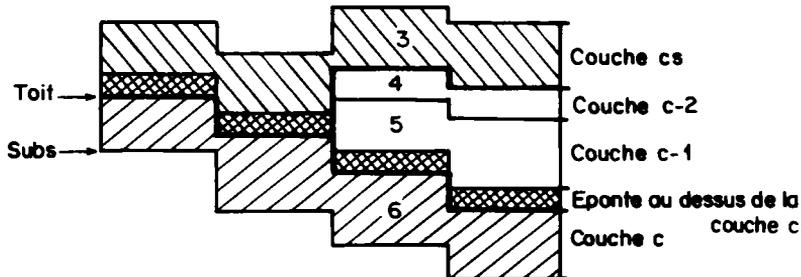
Dans chaque couche (c), le substratum SUBS de chaque maille est défini explicitement. Par contre, pour éviter toute redondance, le toit TOIT de la nappe est déduit indirectement du substratum des couches supérieures ou de la topographie. Dans tous le cas : $TOIT = SUBS$ (dessus). Les différentes situations sont les suivantes :

- a) Au-dessus de la maille (c) il existe une maille (cs) dans une couche supérieure (cs). La couche (cs) est une couche située au-dessus de la couche (c) mais ce n'est pas forcément la couche numéro (c-1). Par exemple, il existe une maille de la couche 3 située au-dessus de la maille correspondante de la couche 6 (il n'y a pas de maille correspondante dans les couches 4 et 5).



$$TOIT(c) = SUBS(cs)$$

- b) La couche (c) est surmontée par une éponte (e)



$$TOIT(c) = SUBS(e)$$

Ici c'est le substratum de l'éponte (e) qui définit le toit de l'aquifère (c). Quand la maille (cs) d'une couche aquifère supérieure existe elle définit le toit de l'éponte :

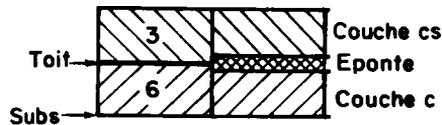
$$TOIT(e) = SUBS(cs).$$

- c) **Cas particulier** : le substratum de l'éponte (e) a une cote égale à 9999 dans cette maille. Ce code indique que l'éponte a disparu à cet endroit (elle a une épaisseur nulle).

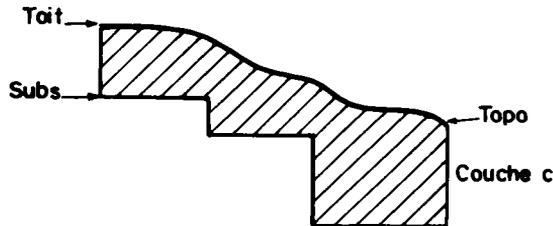
On est donc ramené au cas a) :

$$\text{TOIT (c)} = \text{SUBS (cs)}$$

(et aussi $\text{SUBS (e)} = \text{TOIT (e)} = \text{SUBS (sc)}$)



- d) Il n'y a ni éponte ni maille d'une couche supérieure (il n'y a pas de couche supérieure à cet emplacement)

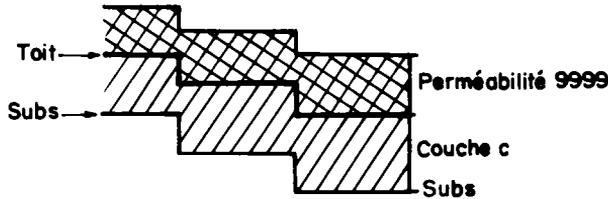


$$\text{TOIT (c)} = \text{TOPO}$$

- e) Il y a dans une couche supérieure une maille avec une perméabilité égale à 9999. Une perméabilité avec la valeur code 9999 indique en fait une maille imperméable. C'est une maille imperméable et non pas inexistante (une maille inexistante a une perméabilité égale à zéro et non pas à 9999).

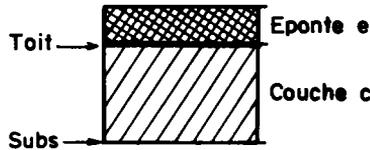
N.B. : En aquifère monocouche une maille imperméable (perméabilité = 9999) est équivalente à une maille inexistante (perméabilité = 0).

On retrouve le cas général a) :



$$\text{TOIT (c)} = \text{SUBS (cs)}$$

- f) **Cas particulier** : il y a une éponte e, mais pas d'aquifère au-dessus de cette éponte.

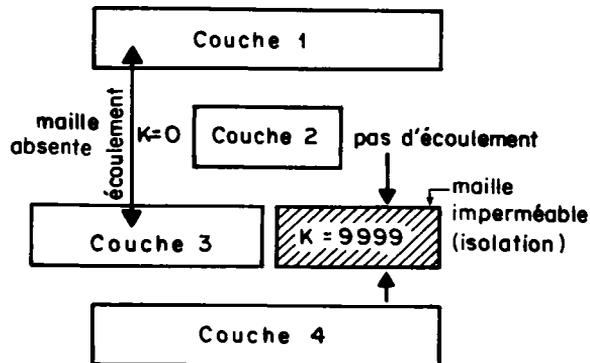


Comme dans le cas b) : $\text{TOIT (c)} = \text{SUBS (e)}$

Le toit de l'éponte n'est pas utilisé (ni défini).

On remarque donc qu'une éponte peut, dans certains cas, ne servir qu'à définir le toit de l'aquifère. C'est le cas quand il n'y a aucune maille aquifère au-dessus de l'éponte. Dans ce dernier cas, la perméabilité de l'éponte n'a aucune importance. Une éponte n'est donc pas forcément comprise entre 2 mailles aquifères superposées.

La figure 5.5 illustre la différence (en multicouche ou en 3D) entre une maille à perméabilité $K = 0$ (zéro) et une maille à perméabilité $K' = 9999$.



A gauche : écoulement entre les couches 1 et 3 qui sont en contact.

A droite : pas d'écoulement entre les couches 1 et 4 qui sont isolées par la maille imperméable ($K = 9999$) de la couche 3.

Figure 5.5 - Illustration de la différence entre une maille inexistante ($K = 0$) et une maille imperméable ($K' = 9999$)

En résumé :

Dans chaque couche le substratum SUB de chaque maille est défini explicitement. Le toit TOIT est généralement défini :

- par le substratum de l'éponte immédiatement supérieure si elle existe,
- par le substratum d'une couche aquifère supérieure s'il y en a une,
- par la topographie si la couche affleure.

Dans le cas particulier d'une maille de la couche (c) (avec $c > 1$) qui n'est superposée par aucune maille aquifère (figure 5.6), on peut définir le toit :

- (1) soit par une maille imperméable (perméabilité 9999) située au-dessus ;
- (2) soit par une éponte dont le substratum servira de toit (dans les zones où cette éponte est inutile, il suffit de mettre son substratum à la cote 9999) ;
- (3) soit par une cote topographique (artificielle) égale à ce toit.

La cote topographique est en fait le toit de la formation affleurante (cas 3 bis)

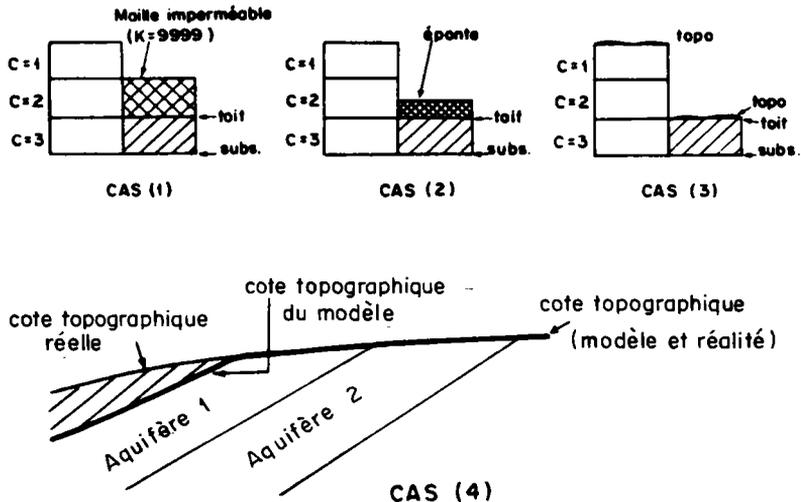


Figure 5.6 - Différentes manières de définir le toit d'une couche aquifère surmontée par aucune couche aquifère

Sixième partie

**VALIDATION DU MODÈLE,
CALCUL DES TRAJECTOIRES ET SCHÉMAS
D'ÉCOULEMENTS COMPLEXES**

6.1 - VALIDATION DU MODÈLE MARTHE

Le modèle MARTHE a été utilisé pour un grand nombre d'études (plus de 80 nappes différentes) tant en régime permanent qu'en régime transitoire, en monocouche et en tridimensionnel. Il est cependant important de prouver sa validité par rapport à des solutions connues.

Quatre validations sont présentées ici :

- Modèle monocouche anisotrope en régime transitoire (*Papadopoulos*).
- Modèle tridimensionnel homogène avec surface libre en régime permanent (*Barrage*).
- Modèle coupe avec fortes hétérogénéités (*Tunnels sous la mer*).
- Modèle monocouche isotrope en régime transitoire.

6.1.1 - Modèle anisotrope en régime transitoire

On a simulé l'exemple donné par *Papadopoulos 1965* : "Nonsteady flow to a well in an infinite aquifer. Hydrologie des roches fissurées - Colloque de Dubrovnik - octobre 1965". Les caractéristiques sont les suivantes :

$$T_{xx} = 37 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$T_{yy} = 11 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$S = 0.048$$

$$Q = 6.67 \text{ l/s}$$

Les calculs ont été réalisés pendant 10 pas de mesures de 10^4 secondes et l'état après 10^5 secondes a été comparé avec la solution analytique. Les charges calculées par le modèle non représentées graphiquement ici ont été comparées à la solution analytique exacte. L'accord est très bon et l'écart est inférieur à 0.05 cm (pour un rabattement de 100 cm à une distance de 20 mètres du puits).

6.1.2 - Modèle tridimensionnel avec surface libre

On a simulé un massif filtrant de 19.1 mètres de largeur et de 4.20 mètres de haut.

La perméabilité est égale à 10^{-6} m/s. La charge amont est imposée à 4.10 mètres et la charge aval à 0.10 mètres.

Une coupe du massif a été représentée avec 21 couches de 0.2 mètres d'épaisseur et 20 mailles dans chaque couche.

La figure 6.1 montre le maillage choisi, les charges et la surface libre calculées comparées avec la surface libre calculée par une formule analytique (simplifiée) supposant des vitesses horizontales (hypothèse de DUPUIITS).

On voit que les résultats sont très bons. Le débit calculé est de $4.15 \cdot 10^{-7}$ m³/s par mètre de largeur du massif, le débit donné par la solution analytique (simplifiée) est de $4.39 \cdot 10^{-7}$ m³/s.

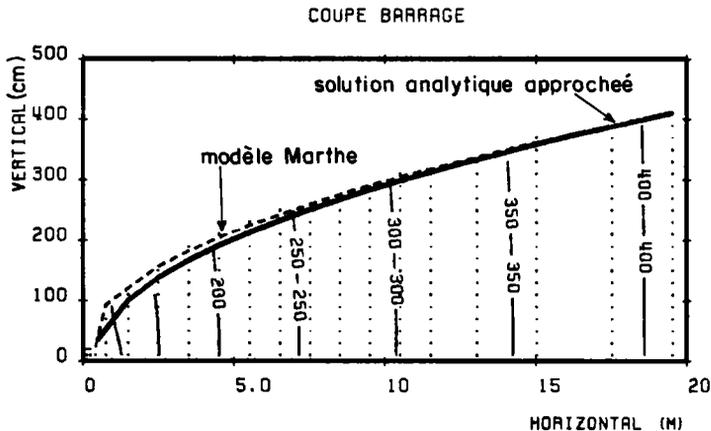


Figure 6.1 - Modèle coupe avec surface libre (massif filtrant)

6.1.3 - Modèle coupe avec fortes hétérogénéités

La zone étudiée est une coupe verticale dans un ensemble de 5 couches très hétérogènes de 70 mètres d'épaisseur totale dont la couche centrale est traversée par 3 tunnels à pression atmosphérique.

Les perméabilités sont respectivement, de haut en bas :

- craie altérée $K = 5.10^{-5}$ m/s,
- craie saine $K = 2.10^{-6}$ m/s,
- craie bleue $K = 5.10^{-7}$ m/s,
- argile de gault $K = 1.10^{-9}$ m/s,
- sable $K = 1.10^{-4}$ m/s,

soit dans un rapport de 1 à 100 000 entre la plus grande et la plus faible.

Les calculs de charges d'où on a déduit les pressions (en ajoutant la profondeur) (figure 6.2) on été comparés à un modèle par éléments finis. Les pressions calculées sont quasiment identiques avec les 2 modèles.

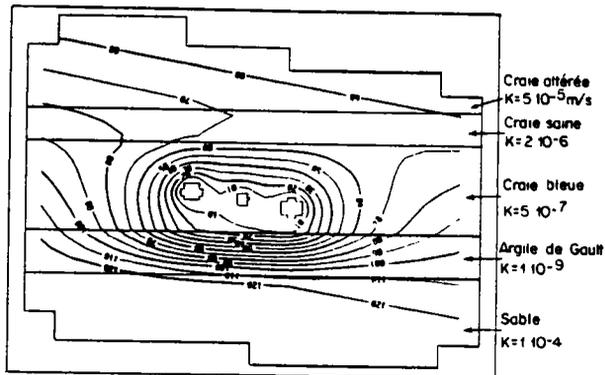


Figure 6.2 - Coupe verticale avec fortes hétérogénéités (3 tunnels sous la mer : champ des pressions)

6.1.4 - Modèle isotrope en régime transitoire

Le schéma étudié dans l'exemple d'application a été utilisé comme validation :

- nappe isotrope de transmissivité $5.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$,
- emmagasinement 5 %,
- maillage carré de 50 mètres de côté,
- pompage de 2 000 m^3/h pendant 120 heures,

On a considéré les deux piézomètres situés respectivement dans les mailles (ligne 13, colonne 1) et (ligne 13, colonne 3), c'est-à-dire situés à des distances respectivement de 127.48 m et 176.78 m du centre des 4 mailles pompées.

La simulation du modèle non représenté graphiquement a été analysée par un logiciel d'interprétation automatique de pompage d'essai selon la formule de Theis (ajustement non linéaire à partir des dérivées).

Les paramètres hydrodynamiques obtenus par interprétation automatique sont les suivants :

Piézomètre	Transmissivité en $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$	Coefficient d'emmagasinement en %
Ligne 13, colonne 1	5.16	4.8
Ligne 13, colonne 3	5.08	5.2

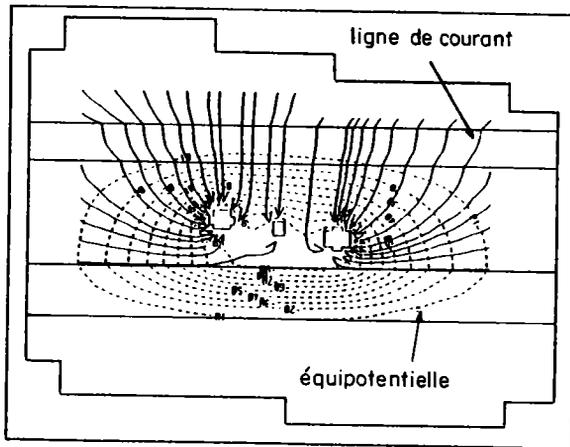
L'accord est donc très bon, compte tenu de la proximité des pompages (qui ne sont pas ponctuels) et de la durée des pas de temps.

6.2 - CALCULS DES TRAJECTOIRES

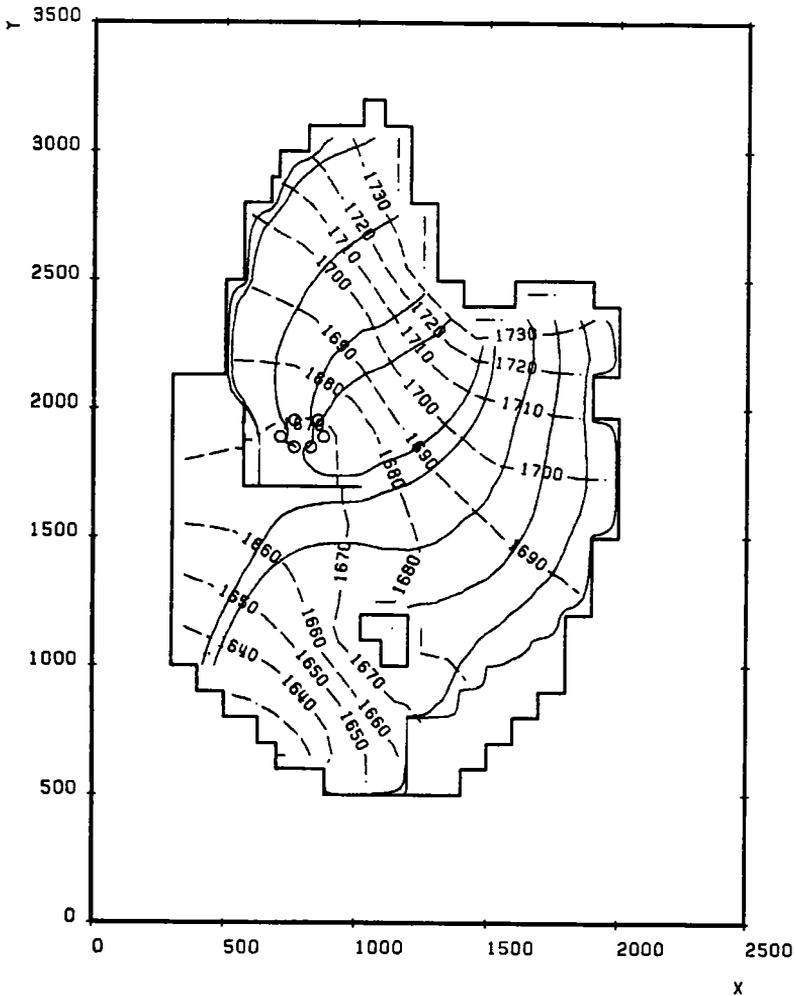
Après un calcul hydrodynamique, il est très souvent intéressant de calculer les lignes de courant (ou trajectoire en régime transitoire) ou de visualiser le champ de vitesses.

Cette opération est immédiate avec le logiciel VIKING du BRGM (ou le logiciel SESAME pour prendre en compte la dispersion) à partir des fichiers de données des mailles et des charges calculées sous forme de semis (fichier CHASIM.OUT).

Les figures 6.3 et 6.4 présentent deux exemples de visualisation des lignes de courant (tous ces tracés peuvent être réalisés très facilement à l'aide du logiciel INGRID du BRGM).



**Figure 6.3 - Calcul de trajectoires :
Modèle coupe : tunnels sous la mer**



**Figure 6.4 - Calcul des trajectoires :
Aquifère monocouche**

6.3 - CALCUL DE SCHEMAS D'ÉCOULEMENT COMPLEXE

La figure 6.5 présente le fichier des perméabilités (4 couches en coupe).

Les figures 6.6 à 6.13 présentent le fichier des paramètres et le fichier des pas de temps d'une simulation qui enchaîne 15 simulations particulièrement complexes sur un schéma en coupe faisant intervenir 1 à 4 couches, en régime permanent ou transitoire avec parfois une éponte entre les couches 1 et 2. Les 15 simulations complètement indépendantes sont enchaînées comme 15 pas de temps de modèle mais on redéfinit les paramètres à chaque pas. Les 15 schémas sont les suivants :

- 1 - surface libre ; 3 couches, départ en charge
- 2 - surface libre ; 3 couches, départ en charges quelconques lues
- 3 - surface libre ; 3 couches, départ complètement dénoyé
- 4 - surface libre ; 4 couches, départ dénoyé, gradient de charge opposé à la pente des couches
- 5 - surface libre ; 4 couches d'épaisseurs variables avec disparitions de couches
- 6 - surface libre ; 4 couches, infiltration, charge imposée à droite
- 7 - surface libre 4 couches, infiltration, charge imposée à gauche, faible infiltration
- 8 - surface libre, départ en charge, charge imposée à gauche d'où un hystérésis
- 9 - surface libre, départ dénoyé, charge imposée à gauche
- 10 - départ complètement dénoyé, remplissage en transitoire par infiltration. Aucune charge imposée
- 11 - départ noyé, pompage en transitoire au centre. Aucune charge imposée
- 12 - départ noyé, trop fort pompage transitoire au centre qui provoque un dénoiement
- 13 - à gauche une rivière perchée. Continuité hydraulique

- 14 - à gauche une rivière perchée, isolée par une éponte d'où un décrochement piézométrique
- 15 - dénoiement de la couche la plus basse due à un pompage à proximité.

Les figures 6.14 à 6.17 présentent les charges calculées pour les schémas 1, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14 et 15. Les potentiels imposés sont figurés par des traits pointillés plus épais. Les résultats des schémas 1, 2 et 3 sont absolument identiques. Le schéma 7 conduit à des oscillations de charges comme le montre la figure 6.18. Ces oscillations disparaissent immédiatement si on introduit une sous-relaxation.

```

PANNEAU no 1 / 1 d'un SEMIS=de 1 LIGNES par 10 COL; XO= 0.5 YO= 0.5
PERMEABILITE (HORIZ) PERMH 1
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
COORDONNEES DES LIGNES :
1
VALEUR UNIFORME = 1.000
PANNEAU no 1 / 1 d'un SEMIS de 1 LIGNES par 10 COL; XO= 0.5 YO= 0.5
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 PERMH 2
PERMEABILITE (HORIZ)
1 1 1 1 1 1 1 1 0 0
PANNEAU no 1 / 1 d'un SEMIS=de 1 LIGNES par 10 COL; XO= 0.5 YO= 0.5
PERMEABILITE (HORIZ) PERMH 3
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
COORDONNEES DES LIGNES :
1
VALEUR UNIFORME = 1.000
PANNEAU no 1 / 1 d'un SEMIS=de 1 LIGNES par 10 COL; XO= 0.5 YO= 0.5
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 PERMH 4
PERMEABILITE (HORIZ)
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
COORDONNEES DES LIGNES :
1
VALEUR UNIFORME = 1.000

```

Figure 6.5 - Fichier perméabilité à 4 couches : DENOY.PER

```

NAPPE EXEMPLE TEST DE DENOYAGE AVEC 4 COUCHES
*** Editions et controles souhaites  MARTHE 4.3 ***
  1-LISTING DETAILLE DE TOUTES LES OPERATIONS ET RESULTATS
  0-CONTROLE SUR CONSOLE DE LA LECTURE DES BLOCS DE DONNEES
  1-EDITION DE TOUS LES TABLEAUX DE DONNEES LUS (ET DEDUITS)
  1-EDITION DES DONNEES DE MAILLES EN FIN DE CALCUL (-1=Binaire)
  1-CONTROLE DE LA CONVERGENCE DANS UNE MAILLE PARTICULIERE
*** Dimensions et geometrie ***
  20-NOMBRE MAXIMAL DE PAS DE MODELE (peut etre > nombre reel)
  1-NOMBRE DE PAS DE CALCUL PAR PAS MODELE (VALEUR STANDARD=1)
  1-LECTURE DE COTES TOPOGRAPHIQUES (TOIT SUPERIEUR)
*** Controle de la Resolution ***
  500-NOMBRE MAXIMAL D'ITERATIONS PAR PAS DE CALCUL (TRANSITOIRE)
  0-NOMBRE MAXIMAL D'ITERATIONS POUR INITIALISATION PERMANENT
  5-8-MAXIMUM DE LA VARIATION MOYENNE DE CHARGE ENTRE 2 ITERATIONS
  1-COEFF. DE RELAXATION DES CALCULS (1=NORMAL >1 =SUR <1=SOUS)
  0=[PARAMETRE SUPPLEMENTAIRE PREVU ... POUR CONVERGENCE]
  2-2-RAPPORT = (EPAIS. MINI DENOYAGE) / (EPAIS. MOYENNE COUCHE)
*** Unites des donnees ***
  1-UNITE DES PERMEABILITES DES AQUIF EN M/S
  1-UNITE DES DEBITS EN M3/S
  1-UNITE DES CHARGES EN M
  1-UNITE DES EMMAGASINEMENTS CAPTIFS EN [-] ou 1/M (0 = PERMA)
  1-UNITE DES EMMAGASINEMENTS LIBRES EN [-] (0 = PERMA)
  1-UNITE DES HAUTEURS D'INFILTRATION EN MM
  1-UNITE DES HAUTEURS D'IRRIGATION EN MM
  SEC=DUREE DE REFERENCE HAUTEURS INFILT (SEC,MIN,HEU,JOU,MOI,ANN)
  SEC=UNITE DE TEMPS (PAS DE MODELE) (SEC,MIN,HEU,JOU,MOI,ANN)
  5-UNITE DES COORDONNEES DES MAILLES EN M
  1-COEFFICIENT D'ANISOTROPIE VERTICALE KV/KH PERMEABILITES
  1-COEFFICIENT D'ANISOTROPIE HORIZONTALE KX/KY PERMEABILITES
  -1-EMMAGASIN. CAPTIF LUS (1-SPECIF. 0-TOUTES CHES -1-PAR COU)
*** Point origine des donnees ***
  0-REFERENCE DES CHARGES (CHARGES MODELE=CHARGES LU + REF)
  0-REFERENCE DU SUBSTRATUM (SUBSTR. MODELE=SUBSTR. LU + REF)
  9999-////////////////////// inutile ////////////////////////
*** Description des couches aquiferes ***
COU- 1;EPAIS= 5;EPON SUP =0;EMMAG EPON= 0;UNI KE= 1;ANISOT= 0
COU- 2;EPAIS= 5;EPON SUP =1;EMMAG EPON= 0;UNI KE= 1;ANISOT= 0
COU- 3;EPAIS= 5;EPON SUP =0;EMMAG EPON= 0;UNI KE= 1;ANISOT= 0
COU- 4;EPAIS= 5;EPON SUP =0;EMMAG EPON= 0;UNI KE= 1;ANISOT= 0
*** Mailles a Historiques ***
*** Options supplementaires (3) (pour accessoires) ***
  0-[Option supplementaire 1]
  0-[Option supplementaire 2]
  0-[Option supplementaire 3]
*** Initialisation avant calculs ***
/*****/***** Fin d'Initialisation
*** Fin fichier Generalites ***

```

Figure 6.6 - Fichier paramètres généraux

```

EXEMPLES DE SIMULATIONS AVEC DENOYAGES COMPLEXES
*** Debut de la simulation a la date :          0; ***
/PERMH/SEMIS N: DENOY.PER
/PERMH/COUCH C= 4V= 0
/DEBIT/MAILL C= 1L= 1P= 1V= 9999;C= 10L= 1P= 3V= 9999;
/CHARG/SEMIS N: -20.5
/CHARG/MAILL C= 1L= 1P= 1V= 12.5;C= 10L= 1P= 3V= 14.5;
/HTOIT/SEMIS N: -9999
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 1: se termine a la date :          1; ***
[surface libre 3 couches ; depart en charge]
/CHARG/EDITI I= 2
/DEBIT/EDITI *= 3;V= 0;L= 0
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 2: se termine a la date :          2; ***
[surface libre 3 couches ; depart charges lues]
/CHARG/SEMIS N: DENOY2.CHA
/CHARG/MAILL C= 1L= 1P= 1V= 12.5;C= 10L= 1P= 3V= 14.5;
/CHARG/EDITI I= 2
/DEBIT/EDITI *= 3;V= 0;L= 0
/***** Fin de ce pas

```

Figure 6.7 - Fichier des pas de temps : pas 0, 1 et 2

```

*** Le pas : 3: se termine a la date :          3; ***
[surface libre 3 couches ; depart denoye]
/DEBIT/MAILL C= 1L= 1P= 1V= 9999;C= 10L= 1P= 3V= 9999;
/CHARG/SEMIS N: -3.0
/CHARG/MAILL C= 1L= 1P= 1V= 12.5;C= 10L= 1P= 3V= 14.5;
/CHARG/EDITI I= 2
/DEBIT/EDITI *= 3;V= 0;L= 0
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 4: se termine a la date :          4; ***
[surface libre 4 couches ; depart denoye ; contre-pente]
/PERMH/SEMIS N: DENOY.PER
/DEBIT/SEMIS N: =0
/DEBIT/MAILL C= 1L= 1P= 1V= 9999;C= 10L= 1P= 4V= 9999;
/CHARG/SEMIS N: --3.5
/CHARG/MAILL C= 1L= 1P= 1V= 12.5;C= 10L= 1P= 4V= 7.5;
/CHARG/EDITI I= 2
/PERMH/SEMIS N: =1
/HTOIT/SEMIS N: DENOY.TOI
/DEBIT/EDITI *= 3;V= 0;L= 0
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 5: se termine a la date :          5; ***
[surface libre 4 couches epaisseurs variables ; depart denoye]
/PERMH/SEMIS N: DENOYVAR.PER
/HSUBS/SEMIS N: DENOYVAR.SUB
/TOPOG/SEMIS N: DENOYVAR.TOP
/PERMV/SEMIS N: =-1.
/HTOIT/SEMIS N: -9999.
/DEBIT/MAILL C= 1L= 1P= 1V= 9999;C= 10L= 1P= 4V= 9999;
/CHARG/SEMIS N: --10
/CHARG/MAILL C= 1L= 1P= 1V= 12.5;C= 10L= 1P= 4V= 5.5;
/CHARG/EDITI I= 2
/DEBIT/EDITI *= 3;V= 0;L= 0
/***** Fin de ce pas

```

Figure 6.8 - Fichier des pas de temps : pas 3 à 5

```

*** Le pas : 6: se termine a la date : 6; ***
[surface libre 4 couches ; depart denoye ; infiltration ; H impose droite]
/PERMH/SEMIS N: DENOY.PER
/HSUBS/SEMIS N: DENOY.SUB
/TOPOG/SEMIS N: DENOY.TOP
/PERMV/SEMIS N: =1.
/HTOIT/SEMIS N: =9999.
/ZONEP/SEMIS N: =1
/DEBIT/SEMIS N: =0
/DEBIT/MAILL C= 10L= 1P= 4V= 9999;
/CHARG/SEMIS N: =-10
/CHARG/MAILL C= 10L= 1P= 4V= 7.5;
/CHARG/EDITI I= 2
/DEBIT/EDITI *= 3;V= 0;L= 0
/INFIL/ZONEP Z= 1V= 100
/*****/***** Fin de ce pas

*** Le pas : 7: se termine a la date : 7; ***
[surface libre 4 couches ; depart denoye ; infiltration ; H impose gauche]
/DEBIT/SEMIS N: =0
/DEBIT/MAILL C= 1L= 1P= 4V= 9999;
/CHARG/SEMIS N: =-10
/CHARG/MAILL C= 1L= 1P= 4V= -2;
/CHARG/EDITI I= 2
/DEBIT/EDITI *= 3;V= 0;L= 0
/INFIL/ZONEP Z= 1V= 10
/*****/***** Fin de ce pas

```

Figure 6.9 - Fichier des pas de temps : pas 6 et 7

```

*** Le pas : 8: se termine a la date : 8; ***
[surface libre ; Hysteresis depart en charge ; H impose gauche]
/PERMH/SEMIS N: DENOY.PER
/PERMH/COUCH C= 2V= 0C= 3V= 0C= 4V= 0
/HSUBS/SEMIS N: DENOY2.SUB
/TOPOG/SEMIS N: DENOY2.TOP
/PERMV/SEMIS N: =1.
/HTOIT/SEMIS N: =9999.
/ZONEP/SEMIS N: =1
/DEBIT/SEMIS N: =0
/DEBIT/MAILL C= 1L= 1P= 1V= 9999;
/CHARG/SEMIS N: =-22
/CHARG/MAILL C= 1L= 1P= 1V= 17;
/CHARG/EDITI I= 2
/DEBIT/EDITI *= 3;V= 0;L= 0
/INFIL/ZONEP Z= 1V= 0
/*****/***** Fin de ce pas

*** Le pas : 9: se termine a la date : 9; ***
[surface libre ; Hysteresis depart denoye ; H impose gauche]
/DEBIT/SEMIS N: =0
/DEBIT/MAILL C= 1L= 1P= 1V= 9999;
/CHARG/SEMIS N: =-10
/CHARG/MAILL C= 1L= 1P= 1V= 17;
/CHARG/EDITI I= 2
/DEBIT/EDITI *= 3;V= 0;L= 0
/INFIL/ZONEP Z= 1V= 0
/*****/***** Fin de ce pas

```

Figure 6.10 - Fichier des pas de temps : pas 8 et 9

```

*** Le pas : 10; se termine a la date : 10; ***
[depart denoye ; remplissage par infiltration; pas de H impose]
/PERMH/SEMIS N: DENOY.PER
/PERMH/COUCH C= 2V- OC= 3V- OC= 4V- 0
/HSUBS/SEMIS N: DENOY.SUB
/TOPOG/SEMIS N: DENOY.TOP
/PERMV/SEMIS N: -1.
/HTOIT/SEMIS N: -9999.
/ZONEP/SEMIS N: -1
/DEBIT/SEMIS N: -0
/CHARG/SEMIS N: -20
/CHARG/EDITI I= 2
/DEBIT/EDITI *= 3;V= 0;L= 0
/INFIL/ZONEP Z= 1V- 5
/EMMLI/SEMIS N: -0.01
/***** Fin de ce pas

*** Le pas : 11; se termine a la date : 11; ***
[depart noye ; pompage transitoire au centre ; pas de H impose]
/PERMH/COUCH C= 1V- 0.1
/PERMH/COUCH C= 2V- OC= 3V- OC= 4V- 0
/HSUBS/COUCH C= 1V- 15C= 2V- 10C= 3V- 5C= 4V- 0
/TOPOG/SEMIS N: -30
/PERMV/SEMIS N: -1.
/HTOIT/SEMIS N: -9999.
/ZONEP/SEMIS N: -1
/DEBIT/SEMIS N: -0
/DEBIT/MAILL C= 5L= 1P= 1V- -8;
/CHARG/SEMIS N: -20
/CHARG/EDITI I= 2
/DEBIT/EDITI *= 3;V= 0;L= 0
/INFIL/ZONEP Z= 1V- 5
/EMMLI/SEMIS N: -0.01
/***** Fin de ce pas

```

**Figure 6.11 - Fichier des pas de temps :
pas 10 et 11**

```

*** Le pas : 12: se termine a la date :      12; ***
  [depart noye ; fort pompage transitoire au centre ; pas de H impose]
/PERMH/COUCH C= 1V=      1
/PERMH/COUCH C= 2V=      0C= 3V=      0C= 4V=      0
/HSUBS/COUCH C= 1V=      15C= 2V=      10C= 3V=      5C= 4V=      0
/TOPOG/SEMIS N: =30
/PERMV/SEMIS N: =1.
/HTOIT/SEMIS N: =9999.
/ZONEP/SEMIS N: =1
/DEBIT/SEMIS N: =0
/DEBIT/MAILL C= 5L= 1P= 1V= -13.5;
/CHARG/SEMIS N: =25
/CHARG/EDITI I= 2
/DEBIT/EDITI *= 3;V= 0;L= 0
/INFIL/ZONEP Z= 1V=      5
/EMMLI/SEMIS N: =0.01
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 13: se termine a la date :      13; ***
  [surface libre ; riviere a gauche ; continuite hydraulique]
/PERMH/SEMIS N: DENOY.PER
/HSUBS/COUCH C= 1V=      15C= 2V=      10C= 3V=      5C= 4V=      0
/TOPOG/SEMIS N: =20
/PERMV/SEMIS N: =1.
/HTOIT/SEMIS N: =9999.
/ZONEP/SEMIS N: =1
/DEBIT/SEMIS N: =0
/DEBIT/MAILL C= 1L= 1P= 4V= 9999;C= 2L= 1P= 4V= 9999;
/DEBIT/MAILL C= 10L= 1P= 1V= 9999;
/DEBIT/EDITI *= 3;V= 0;L= 0
/CHARG/SEMIS N: =2.5
/CHARG/MAILL C= 1L= 1P= 4V= 2.5;C= 2L= 1P= 4V= 2.5;
/CHARG/MAILL C= 10L= 1P= 1V= 17;
/CHARG/EDITI I= 2
/INFIL/ZONEP Z= 1V=      0
/EMMLI/SEMIS N: =0.0
/***** Fin de ce pas

```

**Figure 6.12 - Fichier des pas de temps :
pas 12 et 13**

```

*** Le pas : 14: se termine a la date : 14; ***
      [surface libre ; riviere a gauche ; eponte ==> decrochement]
/HSUBS/COUCH C= 1V- 15C- 2V- 10C- 3V- 5C- 4V- 0
/TOPOG/SEMIS N: -20
/PERMV/SEMIS N: -1.E-2
/HTOIT/SEMIS N: -14.
/ZONEP/SEMIS N: -1
/DEBIT/SEMIS N: -0
/DEBIT/MAILL C= 1L- 1P- 4V- 9999;C= 2L- 1P- 4V- 9999;
/DEBIT/MAILL C= 10L- 1P- 1V- 9999;
/DEBIT/EDITI *= 3;V= 0;L= 0
/CHARG/SEMIS N: -2.5
/CHARG/MAILL C= 1L- 1P- 4V- 2.5;C= 2L- 1P- 4V- 2.5;
/CHARG/MAILL C= 10L- 1P- 1V- 17;
/CHARG/EDITI I= 2
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 15: se termine a la date : 15; ***
      [surface libre ; denoyement par pompage dans la maille 4]
/PERMH/SEMIS N: DENOY.PER
/PERMH/COUCH C= 1V- 0C- 2V- 0C- 3V- 0
/HSUBS/SEMIS N: DENOY.SUB
/INFIL/ZONEP Z= 1V- 0
/EMMLI/SEMIS N: -0.0
/TOPOG/SEMIS N: -30
/PERMV/SEMIS N: -1.
/HTOIT/SEMIS N: -9999.
/ZONEP/SEMIS N: -1
/DEBIT/SEMIS N: -0
/DEBIT/MAILL C= 1L- 1P- 4V- 9999;C= 4L- 1P- 4V- -2;
/DEBIT/EDITI *= 3;V= 0;L= 0
/CHARG/SEMIS N: -2.5
/CHARG/MAILL C= 1L- 1P- 4V- 2.5;
/CHARG/EDITI I= 2
/***** Fin de ce pas
*** : : Fin de la simulation : ; ***

```

**Figure 6.13 - Fichier des pas de temps :
pas 14 et 15**

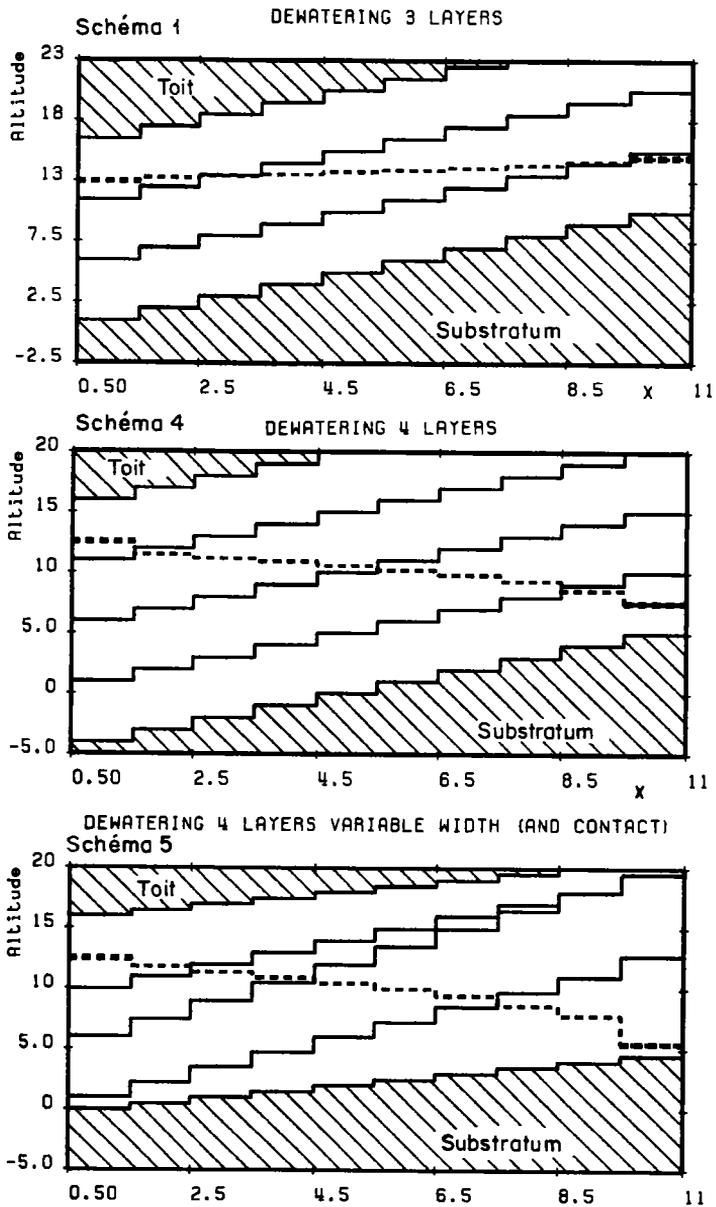


Figure 6.14 - Schéma d'écoulements complexes : schémas 1, 4 et 5

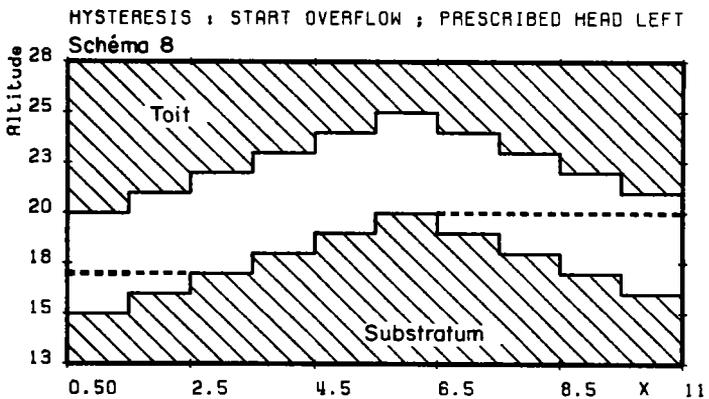
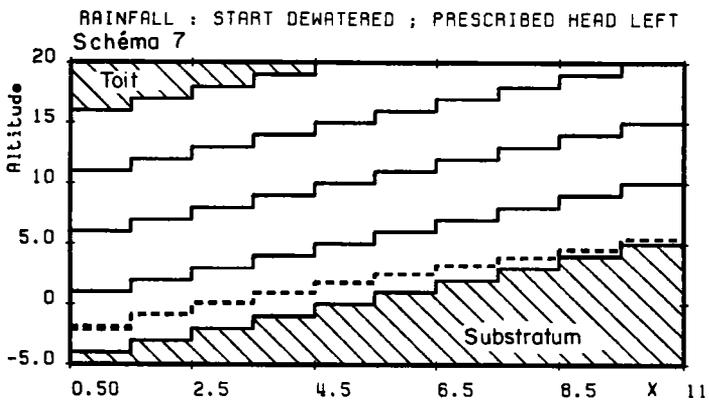
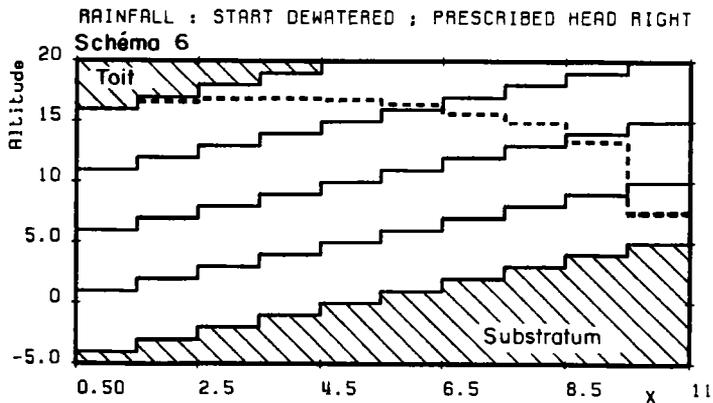


Figure 6.15 - Schéma d'écoulements complexes : schémas 6, 7 et 8

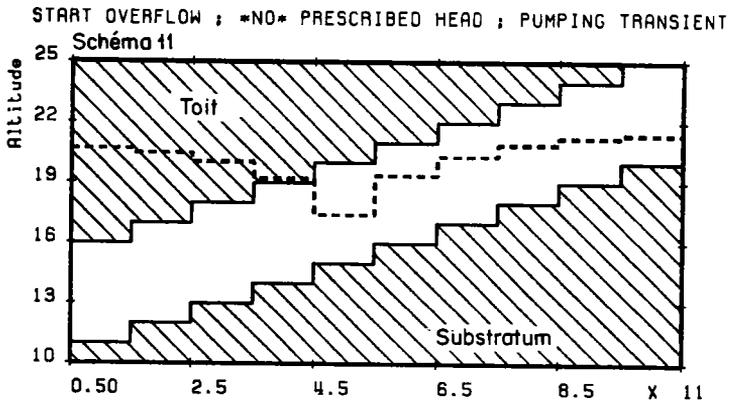
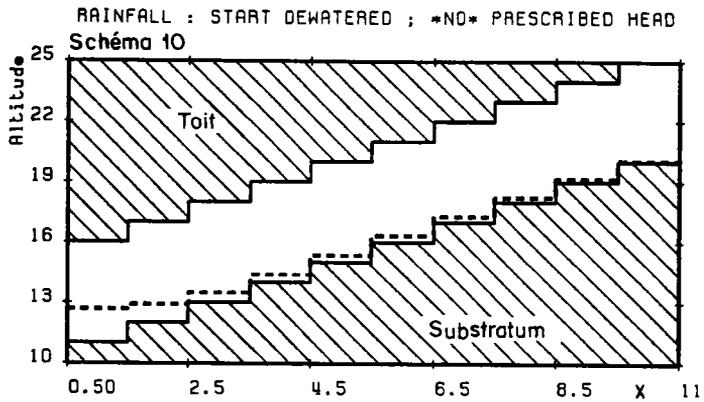
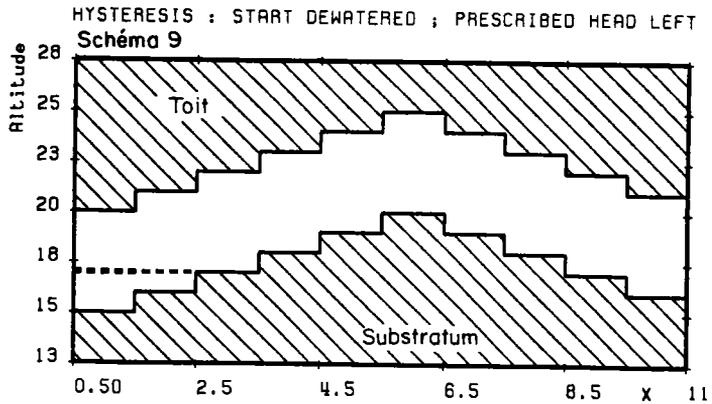


Figure 6.16 - Schéma d'écoulements complexes : schémas 8, 9 et 11

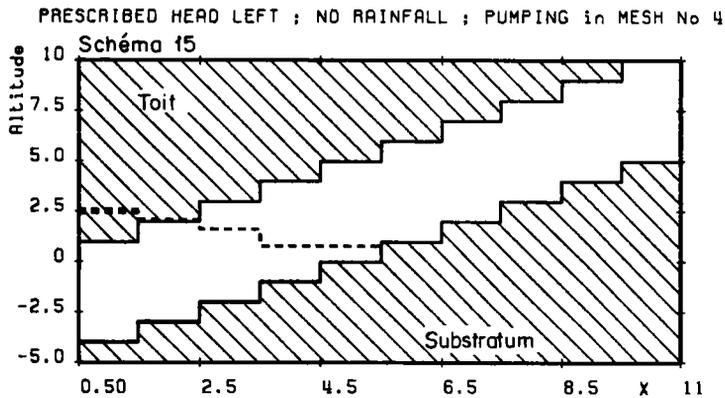
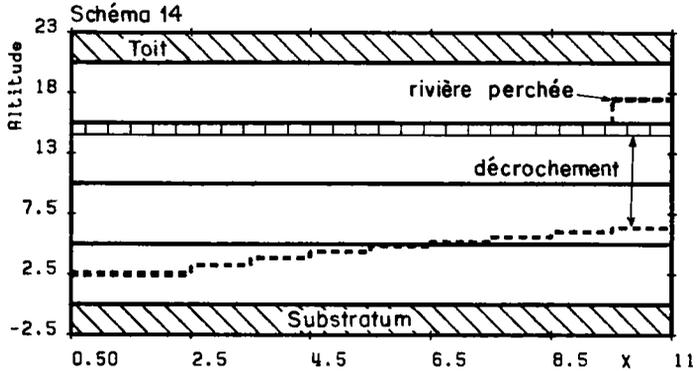
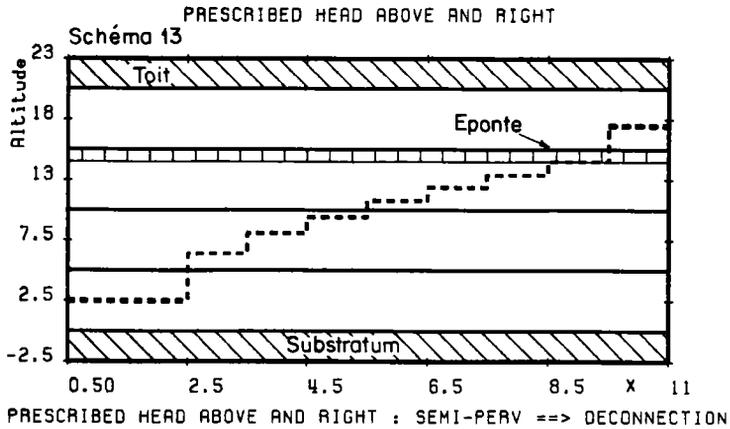
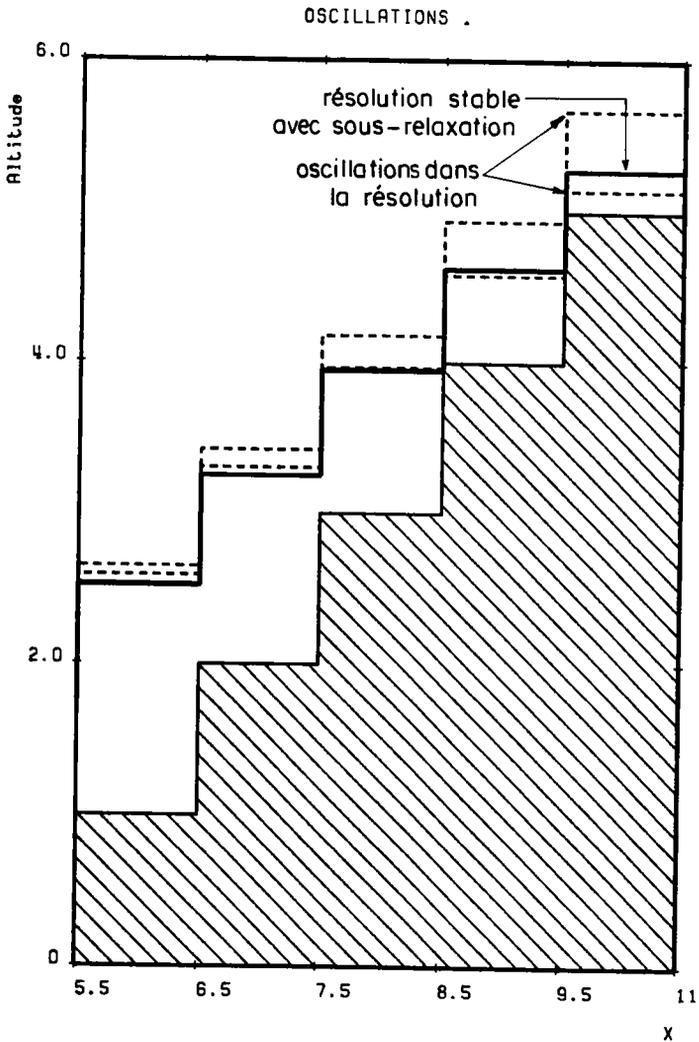


Figure 6.17 - Schéma d'écoulements complexes : schémas 13, 14 et 15



**Figure 6.18 - Schéma 7 détail :
oscillations dans la résolution**

ANNEXES

Annexe 1

DIALOGUE À L'ÉCRAN CORRESPONDANT À L'EXEMPLE MONOCAR

- >** indique que le logiciel attend une réponse
- /---** indique "frappez" une touche pour passer à la page suivante

```

=====
=          Logiciel MARTHE          =
=          Multicouche              =
=                                     =
=          Version 4.3              =
=          Dec 1990                 =
=====

```

Frappez <Return> pour une execution Conversationnelle
ou B pour une execution en Batch
(ou conversationnel rapide)

==><Return>

Donnez un TITRE GENERAL pour ce passage

ou <Return> pour conserver le titre qui sera lu sur le fichier
parametres

==><Return>

NOM du fichier REPERTOIRE des Fichiers ?

(ou <Return> pour les donner a la console)
(une premiere fois)

==><Return>

Frappez <Return> pour confirmer
ou Frappez le nom de repertoire corrigé

==><Return>

Donnez un titre pour caracteriser le repertoire a creer
==>MONOCOUCHE A MAILLES CARREES

Nom du Fichier : PERMEABILITES

==>MONOCAR

Nom du Fichier : DEBITS
(ou '=valeur numerique')
ou N =pas de fichier

==>=0

Nom du Fichier : CHARGES
(ou '=valeur numerique')
ou N =pas de fichier

==>=50

Nom du Fichier : EMMAGASINEMENT CAPTIF
(ou '=valeur numerique')
ou N =pas de fichier

==>=5

Nom du Fichier : EMMAGASINEMENT LIBRE
(ou '=valeur numerique')
ou N =pas de fichier

==>=5

Nom du Fichier : ZONES DE GEOMETRIE
(ou '=valeur numerique')
ou N =pas de fichier

==>=0

Nom du Fichier : COTES DU SUBSTRATUM
(ou '=valeur numerique')
ou N =pas de fichier
==>=-50
Nom du Fichier : ZONES EQUIPOTENTIELLES
(ou '=valeur numerique')
ou N =pas de fichier
==>=0
Nom du Fichier : COTES TOPOGRAPHIQUES
(ou '=valeur numerique')
ou N =pas de fichier
==>=0

Nom du Fichier : ZONES D'INFILTRATION
(ou '=valeur numerique')
ou N =pas de fichier
==>=0
Nom du Fichier : ZONES D'EXCES D'IRRIGATION
(ou '=valeur numerique')
ou N =pas de fichier
==>=0
Nom du Fichier : INDEX DE DEBORDEMENT
(ou '=valeur numerique')
ou N =pas de fichier
==>=0

Nom du Fichier : SUBSTRATUM EPONTE SUPER.
(ou '=valeur numerique')
ou N =pas de fichier
==>N
Frappez <Return> pour confirmer
ou Frappez le nom de fichier corrige
==><Return>
Nom du Fichier : PERMEABILITE EPONTE SUPER.
(ou '=valeur numerique')
ou N =pas de fichier
==>N
Frappez <Return> pour confirmer
ou Frappez le nom de fichier corrige
==><Return>
Nom du Fichier : PARAMETRES GENERAUX
[defaut = MONOCAR.MAR]
==><Return>

Nom du Fichier : DESCRIPTION PAS DE TEMPS
[default = MONOCAR.PAS]

==><Return>

Nom du Fichier : LIAISONS ETANCHES
(ou '=valeur numerique')
ou N =pas de fichier

==>N

Frappez <Return> pour confirmer
ou Frappez le nom de fichier corrige

==><Return>

Nom du Fichier : ANISTROPIE HORIZONTALE KX/KY
(ou '=valeur numerique')
ou N =pas de fichier

==>N

Frappez <Return> pour confirmer
ou Frappez le nom de fichier corrige

==><Return>

Nom du Fichier : ANISTROPIE VERTICALE KV/KH
(ou '=valeur numerique')
ou N =pas de fichier

==>N

Frappez <Return> pour confirmer
ou Frappez le nom de fichier corrige

==><Return>

--/--

MONOCOUCHE A MAILLES CARREES

1 MONOCAR.PER
2 =0
3 =50
4 =5
5 =5
6 =0
7 --50
8 =0
9 =0
10 =0
11 =0
12 =0
13
14
15 MONOCAR.MAR
16 MONOCAR.PAS
17
18
19

-Fich: PERMEABILITES
-Fich: DEBITS
-Fich: CHARGES
-Fich: EMMAGASINEMENT CAPTIF
-Fich: EMMAGASINEMENT LIBRE
-Fich: ZONES DE GEOMETRIE
-Fich: COTES DU SUBSTRATUM
-Fich: ZONES EQUIPOTENTIELLES
-Fich: COTES TOPOGRAPHIQUES
-Fich: ZONES D'INFILTRATION
-Fich: ZONES D'IRRIGATION
-Fich: INDEX DE DEBORDEMENT
-Fich: SUBSTRATUM EPONTE SUPER.
-Fich: PERMEABILITE EPONTE SUPER.
-Fich: PARAMETRES GENERAUX
-Fich: DESCRIPTION PAS DE TEMPS
-Fich: LIAISONS ETANCHES
-Fich: ANISTROPIE HORIZONTALE KX/KY
-Fich: ANISTROPIE VERTICALE KV/KH

Numero a modifier (<return> si OK)
==><Return>

Lecture des donnees des GENERALITES

```
*** Editions et controles souhaitees      MARTHE 4.3 ***
*** Dimensions et geometrie                ***
*** Controle de la Resolution              ***
*** Unites des donnees                     ***
*** Point origine des donnees              ***
*** Description des couches aquiferes      ***
*** Mailles a Historiques                  ***
```

Analyse de la Convergence (resultats sur fichier CONVERG.DAT)

Coordonnees de la maille a SURVEILLER

Numero de la COUCHE ?
(Donner 0 pour Surveiller la maille
ayant le debit residuel le plus eleve)
==>1

Numero de la LIGNE ?
==>8

Numero de la COLONNE ?
==>1

Nombre d'iterations finales a surveiller ?
(1 par default)
==>2

Lecture des donnees des MAILLES

- * Vous avez defini les noms fichiers a la console
ou bien
- * Des Fichiers ont ete modifies (/Repertoire lu):

NOM a donner au fichier REPERTOIRE corrige ?

(ou <Return> pour ne pas le conserver)
==>MONOCAR

NOM a donner au fichier Repertoire des fichiers en fin de simulation ?
(extension facultative) -----
ou <return> pour ne pas les conserver ?
-->MONOFIN

Definition des noms des fichiers en fin de simulation

- o Racine automatique : Frappez <Return> pour obtenir MONOFIN.*
 - o Nouvelle Racine : Frappez racine.* (ex: ORLEANS.*)
 - o Meme fichiers (remplacement) : Frappez *.*
(un peu dangereux ... en cas d'erreur)
- ><Return>

*** Initialisation avant calculs

Connection des couches

Edition sur listing des valeurs lues

Verification des epaisseurs de toutes les couches

** AUCUNE CHARGE IMPOSEE NI COTE DE DEBORDEMENT !! **

calculs des charges pour initialisation

PAS DE MODELE 0 ** POUR INITIALISATION **

calculs des debits

Debut du calcul des charges

\$ PAS DE MODELE 1

DEBUT: 12.000 (= 4.320E+04 SECONDES = 0.50 JOUR(S))
DUREE: 1.000 (= 3.600E+03 SECONDES = 0.04 JOUR(S))
FIN : 13.000 (= 4.680E+04 SECONDES = 0.54 JOUR(S))

calculs des charges

\$ PAS DE MODELE 1

SOUS-PAS NUMERO	NOMBRE ITERATIONS	VARIATION MOYENNE PAR MAILLE	DUREE PAS DE DE CALCUL	DUREE CUMULEE	VARIATION VALEUR COL	MAXIMALE LIG	COU	
1	4	0.000E+00	8.333E-02	8.333E-02	0.000E+00	0	0	0
2	4	4.488E-08	1.667E-01	2.500E-01	-3.815E-06	2	14	1
3	4	4.488E-08	2.500E-01	5.000E-01	-3.815E-06	1	14	1
4	5	1.496E-08	2.500E-01	7.500E-01	-3.815E-06	2	14	1
5	5	0.000E+00	2.500E-01	1.000E+00	0.000E+00	0	0	0
5	5	0.000E+00	2.500E-01	1.000E+00	0.000E+00	0	0	0

calculs des debits

somme abs (Debits residuels)= 2.495E-02 Flux Total maxi= 5.000E+02
d'ou une convergence a : 4.989E-03 % (d'erreur)
edition du SEMIS des charges calculees Couche 1
edition du SEMIS des debits calcules Couche 1

 \$ PAS DE MODELE 7

DEBUT: 108.000 (= 3.888E+05 SECONDES = 4.50 JOUR(S))
 DUREE: 24.000 (= 8.640E+04 SECONDES = 1.00 JOUR(S))
 FIN : 132.000 (= 4.752E+05 SECONDES = 5.50 JOUR(S))

calculs des charges

 \$ PAS DE MODELE 7

SOUS-PAS NUMERO	NOMBRE ITERATIONS	VARIATION MOYENNE PAR MAILLE	DUREE PAS DE DE CALCUL	DUREE CUMULEE	VARIATION VALEUR COL	MAXIMALE LIG COU
1	10	1.773E-06	2.000E+00	2.000E+00	-1.144E-05	4 9 1
1	13	2.992E-08			-3.815E-06	3 12 1
2	10	8.260E-05	4.000E+00	6.000E+00	-3.662E-04	1 11 1
2	20	7.480E-08			-3.815E-06	9 3 1
2	21	1.496E-08			-3.815E-06	6 13 1
3	10	4.764E-04	6.000E+00	1.200E+01	-2.026E-03	2 13 1
3	20	3.897E-06			-1.526E-05	3 11 1
3	28	1.496E-08			-3.815E-06	3 12 1
4	10	4.574E-04	6.000E+00	1.800E+01	-2.584E-03	1 14 1
4	20	3.811E-06			-1.526E-05	5 13 1
4	26	2.992E-08			-3.815E-06	3 7 1
5	10	4.598E-04	6.000E+00	2.400E+01	-2.481E-03	1 14 1
5	20	3.736E-06			-1.526E-05	2 13 1
5	26	1.496E-08	6.000E+00	2.400E+01	-3.815E-06	13 10 1

 \$ PAS DE MODELE 7

SOUS-PAS NUMERO	NOMBRE ITERATIONS	VARIATION MOYENNE PAR MAILLE	DUREE PAS DE DE CALCUL	DUREE CUMULEE	VARIATION VALEUR COL	MAXIMALE LIG COU
5	26	1.496E-08	6.000E+00	2.400E+01	-3.815E-06	13 10 1

Ecart maxi/Ecart moyen = 255.0

Une sous-relaxation pourrait eventuellement diminuer ce ratio
 (ce ratio ne prejuge en rien la qualite de la convergence)
 en particulier si la precision maxi est atteinte !

calculs des debits

somme abs (Debits residuels)= 5.083E-02 Flux Total maxi= 5.000E+02
 d'ou une convergence a : 1.017E-02 % (d'erreur)

 \$ PAS DE MODELE 7

SOUS-PAS NUMERO	NOMBRE ITERATIONS	VARIATION MOYENNE PAR MAILLE	DUREE PAS DE DE CALCUL	DUREE CUMULEE	VARIATION VALEUR COL	MAXIMALE LIG COU
--------------------	----------------------	------------------------------------	------------------------------	------------------	-------------------------	---------------------

edition du SEMIS des charges calculees Couche 1
 edition du SEMIS des debits calcules Couche 1

Edition des Valeurs du Modele Modifiees

Edition des Historiques

Fin normale des calculs

```
*****  
* Les fichiers suivants ont ete crees: *  
* MARTHE.LST = Listing general *  
* BILANDEB.LST = Bilan des Debits *  
* HISTORIQ.OUT = Historiques pour dessin *  
* (format libre digital.) *  
* CHASIM.OUT = semis CHARGES pour ISOV. *  
* DEBSIM.OUT = Semis des Debits Calcul. *  
* CONVERG.DAT = ANALYSE de Convergence *  
* *  
* Conservation des Donnees calculees *  
* sur les FICHIERS du REPERTOIRE : *  
* MONOFIN.RMA *  
* Prets a etre utilises pour des Simulations *  
* ou un Complement de calage *  
*****
```

Annexe 2

**FICHER RÉSULTATS CORRESPONDANT À
L'EXEMPLE MONOCAR**

PANNEAU no 1 / 25	2 / 75	2 d'un SEMIS de 125	175	225	15 LIGNES par 275	325	17 COL; X0= 375	X0= 425	0 Y0= 475	0								
CHARGES SIMULEES										CHARG 1								
49.775	49.782	49.796	49.815	49.838	49.862	49.885	49.908	49.927	49.944	725								
49.727	49.736	49.754	49.777	49.805	49.835	49.864	49.891	49.915	49.935	675								
49.623	49.637	49.662	49.696	49.736	49.778	49.818	49.856	49.888	49.916	625								
49.448	49.469	49.508	49.561	49.621	49.684	49.744	49.798	49.845	49.884	575								
49.176	49.209	49.271	49.353	49.446	49.542	49.633	49.714	49.783	49.839	525								
48.768	48.822	48.92	49.049	49.194	49.34	49.476	49.596	49.697	49.778	475								
48.174	48.259	48.415	48.618	48.841	49.061	49.264	49.439	49.584	49.698	425								
47.319	47.457	47.705	48.021	48.361	48.69	48.986	49.237	49.44	49.599	375								
46.105	46.33	46.725	47.215	47.728	48.211	48.635	48.986	49.265	49.479	325								
44.391	44.764	45.4	46.159	46.923	47.619	48.212	48.691	49.063	49.344	275								
41.973	42.614	43.652	44.821	45.943	46.923	47.729	48.362	48.843	49.198	225								
38.523	39.693	41.417	43.211	44.821	46.159	47.216	48.023	48.621	49.054	175								
33.462	35.788	38.713	41.417	43.652	45.401	46.726	47.707	48.419	48.926	125								
25.588	30.814	35.788	39.693	42.615	44.765	46.331	47.459	48.263	48.828	75								
11.967	25.588	33.462	38.523	41.973	44.392	46.106	47.322	48.178	48.775	25								
PANNEAU no 2 / 525										2 / 575	2 d'un SEMIS de 625	175	15 LIGNES par 225	275	17 COL; X0= 325	X0= 375	0 Y0= 425	0
CHARGES SIMULEES										CHARG 1								
49.958	49.969	49.978	49.984	49.988	49.991	49.992				725								
49.952	49.965	49.974	49.982	49.987	49.99	49.991				675								
49.938	49.955	49.968	49.977	49.983	49.987	49.989				625								
49.915	49.939	49.957	49.97	49.978	49.984	49.986				575								
49.884	49.917	49.942	49.96	49.971	49.979	49.982				525								
49.841	49.888	49.922	49.946	49.962	49.972	49.977				475								
49.786	49.851	49.898	49.93	49.951	49.964	49.97				425								
49.718	49.806	49.868	49.91	49.938	49.955	49.963				375								
49.638	49.753	49.833	49.888	49.923	49.945	49.954				325								
49.549	49.694	49.796	49.864	49.908	49.934	49.946				275								
49.454	49.634	49.757	49.839	49.892	49.923	49.937				225								
49.362	49.575	49.72	49.816	49.877	49.912	49.929				175								
49.28	49.524	49.688	49.796	49.864	49.904	49.922				125								
49.219	49.486	49.664	49.781	49.855	49.897	49.917				75								
49.186	49.465	49.652	49.773	49.85	49.894	49.914				25								

Figure A2.1 - Fichier MONOFIN.CHA : charges en fin de simulation

PANNEAU	no	1 /	2 d'un	SEMIS de	15 LIGNES	par	17 COL; X0=	0 Y0=	0
EXEMPLE	MAILLAGE	MONOCOUCHE	CARRE					DEBIT	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	725
0	0	0	0	0	0	0	0	0	675
0	0	0	0	0	0	0	0	0	625
0	0	0	0	0	0	0	0	0	575
0	0	0	0	0	0	0	0	0	525
0	0	0	0	0	0	0	0	0	475
0	0	0	0	0	0	0	0	0	425
0	0	0	0	0	0	0	0	0	375
0	0	0	0	0	0	0	0	0	325
0	0	0	0	0	0	0	0	0	275
0	0	0	0	0	0	0	0	0	225
0	0	0	0	0	0	0	0	0	175
0	0	0	0	0	0	0	0	0	125
0	0	0	0	0	0	0	0	0	75
-500	0	0	0	0	0	0	0	0	25
									0
PANNEAU	no	2 /	2 d'un	SEMIS de	15 LIGNES	par	17 COL; X0=	0 Y0=	0
EXEMPLE	MAILLAGE	MONOCOUCHE	CARRE					DEBIT	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	725
0	0	0	0	0	0	0	0	0	675
0	0	0	0	0	0	0	0	0	625
0	0	0	0	0	0	0	0	0	575
0	0	0	0	0	0	0	0	0	525
0	0	0	0	0	0	0	0	0	475
0	0	0	0	0	0	0	0	0	425
0	0	0	0	0	0	0	0	0	375
0	0	0	0	0	0	0	0	0	325
0	0	0	0	0	0	0	0	0	275
0	0	0	0	0	0	0	0	0	225
0	0	0	0	0	0	0	0	0	175
0	0	0	0	0	0	0	0	0	125
0	0	0	0	0	0	0	0	0	75
0	0	0	0	0	0	0	0	0	25

Figure A2.2 - Fichier MONOFIN.DEB : Débits initiaux

EXEMPLE MAILLAGE MONOCOUCHE CARRE	
MONOCAR.PER	*Fichier: PERMEABILITES
-0	*Fichier: DEBITS
*50	*Fichier: CHARGES
-5	*Fichier: EMMAGASINEMENT CAPTIF
-5	*Fichier: EMMAGASINEMENT LIBRE
-0	*Fichier: ZONES DE GEOMETRIE
--50	*Fichier: COTES DU SUBSTRATUM
-0	*Fichier: ZONES EQUIPOTENTIELLES
-0	*Fichier: COTES TOPOGRAPHIQUES
-0	*Fichier: ZONES D'INFILTRATION
-0	*Fichier: ZONES D'EXCES D'IRRIGATION
-0	*Fichier: INDEX DE DEBORDEMENT
	*Fichier: SUBSTRATUM EPONTE SUPER.
MONOCAR.MAR	*Fichier: PERMEABILITE EPONTE SUPER.
MONOCAR.PAS	*Fichier: PARAMETRES GENERAUX
	*Fichier: DESCRIPTION PAS DE TEMPS
	*Fichier: LIAISONS ETANCHES
	*Fichier: ANISTROPIE HORIZONTALE KX/KY
	*Fichier: ANISTROPIE VERTICALE KV/KH

**Figure A2.3 - Fichier MONOFIN.RMA :
Fichier répertoire des fichiers dans l'état final**

```

Fichier CHASIM.OUT : [Pas de temps numero 1]
PANNEAU no 1 / 2 d'un SEMIS de 15 LIGNES par 17 COL; X0= 0 YO= 0
25 75 125 175 225 275 325 375 425 475
EXEMPLE MAILLAGE MONOCOUCHE CARRE PAS 1 COUCHE= 1
50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 725
50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 675
50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 625
50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 575
50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 525
50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 475
50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 425
50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 375
50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 325
50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 275
50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 225
49.999 50 50 50 50 50 50 50 50 50 175
49.984 49.998 50 50 50 50 50 50 50 50 125
49.743 49.97 49.998 50 50 50 50 50 50 50 75
46.584 49.743 49.984 49.999 50 50 50 50 50 50 25
PANNEAU no 2 / 2 d'un SEMIS de 15 LIGNES par 17 COL; X0= 0 YO= 0
525 575 625 675 725 775 825
EXEMPLE MAILLAGE MONOCOUCHE CARRE PAS 1 COUCHE= 1
50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 725
50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 675
50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 625
50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 575
50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 525
50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 475
50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 425
50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 375
50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 325
50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 275
50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 225
50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 175
50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 125
50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 75
50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 25

```

**Figure A2.4 - Fichier CHASIM.OUT :
Charges calculées au pas n° 1**

[Pas de temps numero 7]														
PANNEAU no 1 / 2 d'un SEMIS de		15 LIGNES par		17 COL; XO-		0 YO-								
25	75	125	175	225	275	325	375	425	475	7 COUCHE=		1		
EXEMPLE MAILLAGE MONOCOUCHE CARRE												PAS	7 COUCHE=	1
49.775	49.782	49.796	49.815	49.838	49.862	49.885	49.908	49.927	49.944			725		
49.727	49.736	49.754	49.777	49.805	49.835	49.864	49.891	49.915	49.935			675		
49.623	49.637	49.662	49.696	49.736	49.778	49.818	49.856	49.888	49.916			625		
49.448	49.469	49.508	49.561	49.621	49.684	49.744	49.798	49.845	49.884			575		
49.176	49.209	49.271	49.353	49.446	49.542	49.633	49.714	49.783	49.839			525		
48.768	48.822	48.92	49.049	49.194	49.34	49.476	49.596	49.697	49.778			475		
48.174	48.259	48.415	48.618	48.841	49.061	49.264	49.439	49.584	49.698			425		
47.319	47.457	47.705	48.021	48.361	48.69	48.986	49.237	49.44	49.599			375		
46.105	46.33	46.725	47.215	47.728	48.211	48.635	48.986	49.265	49.479			325		
44.391	44.764	45.4	46.159	46.923	47.619	48.212	48.691	49.063	49.344			275		
41.973	42.614	43.652	44.821	45.943	46.923	47.729	48.362	48.843	49.198			225		
38.523	39.693	41.417	43.211	44.821	46.159	47.216	48.023	48.621	49.054			175		
33.462	35.788	38.713	41.417	43.652	45.401	46.726	47.707	48.419	48.926			125		
25.588	30.814	35.788	39.693	42.615	44.765	46.331	47.459	48.263	48.828			75		
11.967	25.588	33.462	38.523	41.973	44.392	46.106	47.322	48.178	48.775			25		
PANNEAU no 2 / 2 d'un SEMIS de		15 LIGNES par		17 COL; XO-		0 YO-								
525	575	625	675	725	775	825					0			
EXEMPLE MAILLAGE MONOCOUCHE CARRE												PAS	7 COUCHE=	1
49.958	49.969	49.978	49.984	49.988	49.991	49.992					725			
49.952	49.965	49.974	49.982	49.987	49.99	49.991					675			
49.938	49.955	49.968	49.977	49.983	49.987	49.989					625			
49.915	49.939	49.957	49.97	49.978	49.984	49.986					575			
49.884	49.917	49.942	49.96	49.971	49.979	49.982					525			
49.841	49.888	49.922	49.946	49.962	49.972	49.977					475			
49.786	49.851	49.898	49.93	49.951	49.964	49.97					425			
49.718	49.806	49.868	49.91	49.938	49.955	49.963					375			
49.638	49.753	49.833	49.888	49.923	49.945	49.954					325			
49.549	49.694	49.796	49.864	49.908	49.934	49.946					275			
49.454	49.634	49.757	49.839	49.892	49.923	49.937					225			
49.362	49.575	49.72	49.816	49.877	49.912	49.929					175			
49.28	49.524	49.688	49.796	49.864	49.904	49.922					125			
49.219	49.486	49.664	49.781	49.855	49.897	49.917					75			
49.186	49.465	49.652	49.773	49.85	49.894	49.914					25			

**Figure A2.5 - Fichier CHASIM.OUT :
Charges calculées au pas n°7**


```

[Pas de temps numero 7]
PANNEAU no 1 / 2 d'un SEMIS de 15 LIGNES par 17 COL; X0= 0 Y0= 0
25 75 125 175 225 275 325 375 425 475
EXEMPLE MAILLAGE MONOCOUCHE CARRE PAS 7 COUCHE= 1
-1.7-4 -1.6-4 1.55-5 -6.2-5 -7.1-5 -1.3-4 -2.9-4 -1.6-4 -9.3-5 -1.5-4 725
-1.7-4 2.94-4 -1.3-4 3.2-4 8.33-5 1.27-4 -1.1-4 2.73-4 3.21-4 3.03-4 675
8.15-5 2.27-4 2.78-4 2.73-4 -5.5-5 1.89-6 2.54-4 3.65-4 2.64-4 9.36-5 625
-2.3-4 4.33-4 2.21-4 2.67-4 3.15-4 3.97-4 1.3-4 8.48-5 4.81-4 2.7-4 575
9.77-5 4.34-4 3.2-4 5.21-4 2.53-4 4.33-4 3.43-4 2-4 -5.8-6 1.86-4 525
-2.8-4 2.13-4 2.61-4 -2.4-4 2.75-5 1.96-4 3.33-4 4.02-4 -6.6-6 5.33-5 475
-3.2-4 1.28-4 1.34-4 4.55-4 5.66-5 3.89-4 6.64-5 3.06-4 4.11-4 2.04-4 425
-7.4-5 3.72-4 -1.1-4 5.22-5 2.7-4 3.05-4 7.11-5 2.68-4 2.19-4 -1.3-4 375
4.7-5 1.19-4 -2.4-5 3.4-4 1.86-4 1.65-4 2.93-4 1.99-4 7.45-5 1.78-4 325
-1-4 9.54-5 2.49-4 3.35-4 2.83-4 3.27-4 3.14-4 1.97-4 2.07-4 -1.4-4 275
-1.8-4 1.03-5 2.01-4 3.39-4 -1.7-5 2.28-4 2.47-4 4.24-4 1.83-4 3.33-4 225
-1.4-4 9.48-5 6.87-6 3.05-4 2.38-4 9.92-5 2.75-5 1.52-4 2.21-4 5.75-4 175
1.52-4 4.05-4 3.91-5 1.32-4 2.25-4 5.69-4 2.71-5 1.62-4 2.76-4 1.75-4 125
-7.5-5 1.74-4 1.16-4 1.1-5 2.73-4 1.1-4 3.76-4 3.04-4 2.48-4 1.51-4 75
-500 -8.4-5 -5.7-5 1.06-4 2.28-4 -2.2-5 -4.8-5 1.75-4 -1.6-4 1.01-4 25
PANNEAU no 2 / 2 d'un SEMIS de 15 LIGNES par 17 COL; X0= 0 Y0= 0
525 575 625 675 725 775 825
EXEMPLE MAILLAGE MONOCOUCHE CARRE PAS 7 COUCHE= 1
2.24-4 -2.2-4 -3.1-4 -1.4-5 -1.1-4 -1.5-4 5.75-5 725
8.14-5 2-4 3.54-4 3.17-4 1-4 2.73-4 -3.2-5 675
2.61-4 -6.1-5 7.94-5 3.44-4 -2.6-4 3.08-4 -2.1-4 625
1.33-4 2.18-5 4.6-4 -2.1-4 1.23-4 4.17-4 -4.9-5 575
-4.5-5 2.78-4 4.48-5 2.66-4 1.63-4 2.82-4 -3.9-5 525
2.28-4 5.5-4 2.73-4 1.96-4 -1.9-5 3-4 -4-5 475
1.99-5 -9.4-5 2.62-4 3.77-4 4.38-4 2-4 1.27-5 425
2.43-4 3.8-4 4.65-4 3.97-5 1.42-4 4.71-4 1.3-4 375
4.05-5 2.75-4 1.84-4 1.62-4 -1.4-4 2.62-4 -1.2-4 325
1.36-4 3.11-4 4.66-4 3.6-4 1.85-4 2.33-4 1.36-4 275
1.87-4 2.25-4 1.15-4 3.11-4 -5.9-5 2.62-4 4.11-5 225
5.1-5 1.62-4 1.01-5 1.2-4 4.12-5 1.47-4 -8.5-5 175
1.37-4 3.92-4 -9-5 2.59-4 2.63-4 2.09-4 -1.3-5 125
3.68-4 2.34-4 3.42-4 4.35-4 1.44-4 4.71-4 -1.5-4 75
8.88-5 -1.9-4 -1.1-5 -5.7-5 -4-5 2.05-4 -2.3-4 25

```

**Figure A2.7 - Fichier DEBSIM.OUT (suite):
Débits calculés au pas n° 7**

```

EXEMPLE MAILLAGE MONOCOUCHE CARRE
HISTORIQUES DE CHARGES : DATES ET CHARGES
MAILLE COLONNE 1 LIGNE 15 COUCHE 1
    12.0000    50.0000
    13.0000    46.5837
    18.0000    37.3652
    24.0000    31.8443
    36.0000    26.0162
    60.0000    20.0447
   108.0000    13.9979
   132.0000    11.9675
MAILLE COLONNE 6 LIGNE 8 COUCHE 1
    12.0000    50.0000
    .....
   132.0000    48.6898

```

**Figure A2.8 - Fichier HISTORIQ.OUT :
Charges et débits**

HISTORIQUES DE DEBITS : DATES ET DEBITS			
MAILLE	COLONNE	LIGNE	COUCHE
	1	15	1
12.0000		0.0000	
13.0000		-500.0004	
18.0000		-499.9999	
24.0000		-499.9999	
36.0000		-500.0000	
60.0000		-500.0000	
108.0000		-499.9999	
132.0000		-500.0001	
MAILLE	COLONNE	LIGNE	COUCHE
	6	8	1
12.0000		0.0000	
.....		
132.0000		0.0003	

**Figure A2.9 - Fichier HISTORIQ.OUT (suite) :
Débits calculés**

DEBITS LIMITES ENTRANTS		
	12.0000	0.0000E+00

	132.0000	0.0000E+00
DEBITS LIMITES SORTANTS		
	12.0000	0.0000E+00

	132.0000	0.0000E+00
DEBITS INTERNES (IMPOSES) ENTRANTS		
	12.0000	0.0000E+00

	132.0000	0.0000E+00
DEBITS INTERNES (IMPOSES) SORTANTS		
	12.0000	0.0000E+00
	13.0000	-5.0000E+02

	132.0000	-5.0000E+02

**Figure A2.10 - Fichier HISTORIQ.OUT :
Suivi des bilans**

DEBITS DE DEBORDEMENT	
12.0000	0.0000E+00
.....
132.0000	0.0000E+00
DEBITS D'INFILTRATION	
12.0000	0.0000E+00
.....
132.0000	0.0000E+00
DEBITS DE STOCKAGE	
12.0000	0.0000E+00
13.0000	-5.0000E+02
.....
132.0000	-4.9993E+02

**Figure A2.11 - Fichier HISTORIQ.OUT :
Suivi des bilans**

SOMME ABS DEBITS RESIDUELS	
12.0000	0.0000E+00
13.0000	2.4946E-02
18.0000	2.0471E-02
24.0000	3.0169E-02
36.0000	4.0119E-02
60.0000	5.4420E-02
108.0000	4.0716E-02
132.0000	5.0826E-02
DEBIT RESIDUEL MAXIMAL	
12.0000	0.0000E+00
13.0000	3.6054E-03
18.0000	9.5464E-04
24.0000	7.7049E-04
36.0000	5.9156E-04
60.0000	6.2616E-04
108.0000	5.1118E-04
132.0000	5.7474E-04

**Figure A2.12 - Fichier HISTORIQ.OUT :
Débits résiduels**

DEBIT LIMITES (ENTRANT SORTANT)	
12.0000	0.0000E+00
.....
132.0000	0.0000E+00
DEBIT IMPOSES (ENTRANT SORTANT)	
12.0000	0.0000E+00
13.0000	-5.0000E+02
.....
132.0000	-5.0000E+02
POURCENTAGE DE CONVERGENCE (DEBITS)	
12.0000	9.9990E+03
13.0000	4.9892E-03
18.0000	4.0941E-03
24.0000	6.0339E-03
36.0000	8.0237E-03
60.0000	1.0884E-02
108.0000	8.1431E-03
132.0000	1.0165E-02
DEBITS D'IRRIGATION	
12.0000	0.0000E+00
.....
132.0000	0.0000E+00

**Figure A2.13 - Fichier HISTORIQ.OUT :
Bilan et convergence**

\$ PAS DE MODELE 7

DEBUT: 108.000 { = 3.888E+05 SECONDES = 4.50 JOUR(S) }
DUREE: 24.000 { = 8.640E+04 SECONDES = 1.00 JOUR(S) }
FIN : 132.000 { = 4.752E+05 SECONDES = 5.50 JOUR(S) }

calculs des charges

SOUS-PAS NUMERO	NOMBRE ITERATIONS	VARIATION MOYENNE PAR MAILLE	DUREE PAS DE DE CALCUL	DUREE CUMULEE	VARIATION VALEUR COL	MAXIMALE LIG	COU
--------------------	----------------------	------------------------------------	------------------------------	------------------	-------------------------	-----------------	-----

5	26	1.496E-08	6.000E+00	2.400E+01	-3.815E-06	13	10 1
---	----	-----------	-----------	-----------	------------	----	------

Ecart maxi/Ecart moyen = 255.0

Une sous-relaxation pourrait eventuellement diminuer ce ratio
(ce ratio ne prejugé en rien la qualite de la convergence)
en particulier si la precision maxi est atteinte !

calculs des debits

somme abs (Debits residuels) = 5.083E-02 Flux Total maxi = 5.000E+02
d'ou une convergence a : 1.017E-02 % (d'erreur)

Figure A2.14 - Fichier BILANDEB.LST : Pas n°7 - Convergence itérative

EXEMPLE MAILLAGE MONOCOUCHE CARRE

PAS DE MODELE 0 ** POUR INITIALISATION **

- BILAN EN UNITES DE DEBIT Pas de temps No 0 -----
DEBITS ENTRANT PAR LES LIMITES = 0.000E+00
DEBITS SORTANT PAR LES LIMITES = 0.000E+00
DEBITS ENTRANT DANS LES MAILLES = 0.000E+00
DEBITS SORTANT DES MAILLES = 0.000E+00

BILAN DE CONTROLE = 0.000E+00 (Somme de tous les debits)
DEBIT RESIDUEL D'ERREUR = 0.000E+00 (Somm. Val absol debits residu.)

**Figure A2.15 - Fichier BILANDEB.LST :
Pas n° 0 (avant calcul)**

```

- BILAN EN UNITES DE DEBIT Pas de temps No 7 -----
DEBITS ENTRANT PAR LES LIMITES = 0.000E+00
DEBITS SORTANT PAR LES LIMITES = 0.000E+00
DEBITS ENTRANT DANS LES MAILLES= 4.347E-02
DEBITS SORTANT DES MAILLES = -5.000E+02 ( -5.000E+02 IMPOSE)
-----
STOCKAGE = -4.999E+02
BILAN DE CONTROLE = -3.497E-02 (Somme de tous les debits)
DEBIT RESIDUEL D'ERREUR = 5.083E-02 (Somm. Val absol debits residu.)

DEBIT RESIDUEL MAXIMAL = 5.747E-04 LIG: 12 , COL: 10
SOIT UN ECART DE CHARGE DE : 6.191E-06
HAUTEUR RESIDUELLE D'ERREUR MAXIMALE = 6.191E-06 LIG: 12 , COL: 10

somme abs (Debits residuels)= 5.083E-02 Flux Total max1= 5.000E+02
d'ou une convergence a : 1.017E-02 % (d'erreur)

```

Le pourcentage d'erreur de convergence est égal à :
 $5.1 \cdot 10^{-2} / 500$ soit $10^{-2} \%$

**Figure A2.16 - Fichier BILANDEB.LST :
Pas de temps n° 7. Bilan des débits**

```

      CUMUL DES DEBITS CALCULES des  1 ZONE(S)
ZONE:  0 0= -500.

      INFILTRATION
      I
      V
      0.000E+00
      I
      V
      *****
LIMITES  0.000E+00 --> * -4.999E+02 * --> -5.000E+02 DEBIT IMPOSE COU 1
      *****

      Verification des flux verticaux
ecart residuel vertical =  0.000E+00

```

**Figure A2.17 - Fichier BILANDEB.LST :
Bilan global**

Annexe 3

CALCUL DU RABATTEMENT EN UN PUIITS A PARTIR DU RABATTEMENT DANS UNE MAILLE

d'après la note technique BRGM/EAU n° 82/05

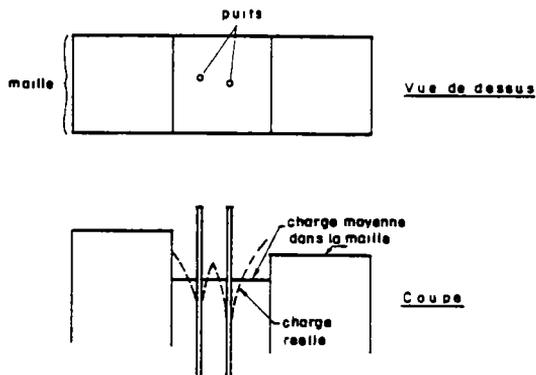
1 - INTRODUCTION

Pour étudier l'influence d'un champ de captage sur une nappe souterraine, il est classique d'utiliser un modèle mathématique maillé à différences finies. Un tel modèle permet de calculer en tout point la charge moyenne dans une maille de calcul, c'est-à-dire dans un élément généralement carré ou rectangulaire d'une certaine dimension.

Dans une zone régulière, sans singularités (puits, limite à potentiel imposé), la charge calculée diffère peu de la charge en un point situé au centre de la maille.

Dans une maille représentant un élément d'aquifère dans lequel sont situés un ou plusieurs puits, on affecte globalement la somme algébrique de tous les débits de ces puits. Dans une telle maille, la charge moyenne calculée est très différente de la charge en un de ces puits ; par contre on n'introduit qu'une erreur très faible dans les mailles voisines.

Or, en pratique, il est très important de connaître le rabattement (ou la charge) dans un puits pour étudier les risques de dénoyage des crépines en particulier (voir figure ci-dessous). Il est évident que l'écart entre la charge moyenne dans la maille et la charge réelle est d'autant plus grand que la maille est grande.



S'il n'existe qu'un seul puits situé au centre d'une maille carrée, J.P. SAUTY (1973) montre qu'il faut ajouter à la charge dans la maille un rabattement supplémentaire dont l'expression est :

$$\text{COR} = \frac{Q}{2\pi T} \left[\text{Ln} \left(\frac{a}{r_p} \right) - \frac{\pi}{2} \right] \quad (1)$$

avec :

COR	rabattement supplémentaire
Q	débit pompé
r_p	rayon du puits
a	côté de la maille
T	transmissivité de la maille
Ln	logarithme népérien
π	3.1416

Il est évident qu'il convient d'ajouter également au rabattement les pertes de charges singulières qui peuvent être estimées plus ou moins précisément.

N.B. : On montre que le rabattement moyen calculé dans la maille - donc avant correction - correspond à celui qui serait obtenu dans un puits de rayon fictif r_f :

$$r_f = a \cdot \exp(-\pi/2) \approx 0.208 a$$

Exemple d'application

Soit une nappe de caractéristiques suivantes :

Perméabilité	$K = 5 \cdot 10^{-4}$ m/s
Débit pompé	$Q = 1,399 \cdot 10^{-2}$ m ³ /s (50 m ³ /h)
Epaisseur en eau	$e = 10$ m
Côté de la maille	$a = 100$ m
Rayon du puits	$r_p = 0.15$ m (diamètre 30 cm)

On obtient donc, pour $T = K \cdot e = 5 \cdot 10^{-3}$ m²/s, une correction COR de 2.18 m. Si la transmissivité était 2 fois plus petite ou le débit 2 fois plus fort, la correction serait double.

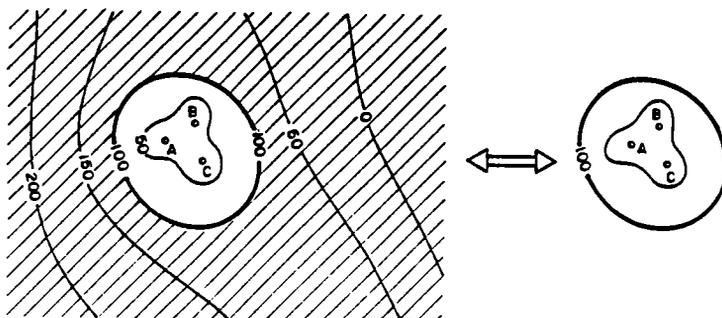
Si le puits n'est pas au centre de la maille et si la transmissivité est identique dans les mailles voisines, on pourra effectuer la même correction en supposant implicitement que si on déplace légèrement la grille du maillage pour amener le puits au centre d'une maille, on ne changera pas les résultats.

Dans le cas général où il existe plusieurs puits dans une même maille, il n'est plus possible de faire une telle correction. On pourra alors soit refaire un petit modèle local emboîté (modèles gigognes), soit faire un calcul analytique de superposition de puits.

2 - LA MÉTHODE DES MODÈLES EMBOÎTES

Pour résoudre le problème posé, on peut utiliser une méthode classique en électrostatique (la "métallisation imaginaire d'une équipotentielle").

L'idée est la suivante : soit le domaine étudié et une courbe équipotentielle entourant le point singulier à un moment donné (il est évident qu'il existe de telles équipotentielles). Si on conserve cette équipotentielle et qu'on supprime tout le domaine extérieur, on ne change rien à l'intérieur (voir figure ci-dessous). Toute l'influence (régionale) de l'extérieur est résumée par cette équipotentielle.



On a donc remplacé un domaine de grande extension, hétérogène, soumis à de multiples influences, par un petit domaine contenant un nombre limité de points singuliers (puits).

Pour étudier ce petit domaine, on peut : soit le simuler avec un nouveau modèle maillé qui aura donc des mailles beaucoup plus petites (par exemple 20 à 100 fois plus petites), soit étudier analytiquement ce domaine.

Pour utiliser une méthode analytique, il faut :

- que la ligne équipotentielle soit simple (cercle, rectangle),
- que les paramètres hydrodynamiques (transmissivité, coefficient d'emménagement) puissent être considérés comme homogènes.

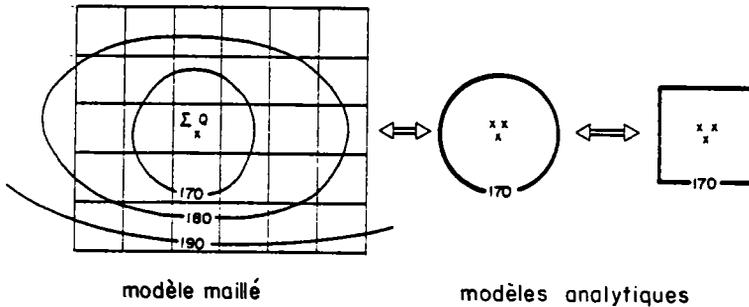
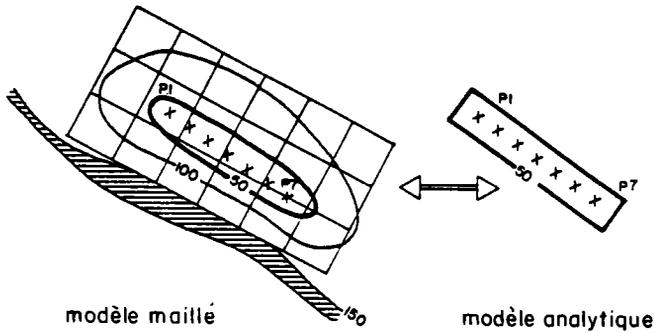
3 - LA MÉTHODE ANALYTIQUE

La méthode analytique est fondée sur le principe de superposition :

- superposition en un point des influences de tous les puits réels,
- représentation de limites équipotentielles de géométrie simple par la méthode des images (série de puits images pour représenter les limites rectilignes formant un rectangle ou un triangle).

Dans un milieu infini de transmissivité T et de coefficient d'emménagement S , à la date t , l'influence S_{ij} du puits P_i de débit Q_i (depuis $t = 0$) sur le point M_j situé à la distance r_{ij} est donné par la solution analytique de THEIS.

Dans le cas général, on peut le plus souvent trouver une limite équipotentielle de forme plus ou moins elliptique ou circulaire qui pourra être assimilée à un rectangle ou à un carré.



Le calcul du rabattement résultant de plusieurs puits situés dans un aquifère homogène limité par une équipotentielle rectangulaire ou carrée pourrait en principe se faire "à la main", mais en pratique le nombre de puits images à prendre en compte peut être très élevé (il ne faut d'ailleurs pas oublier que dans une géométrie carrée ou rectangulaire ces images sont réparties dans l'espace à deux dimensions et non dans une seule direction). On pourra alors utiliser un logiciel d'influences entre puits (ISAPE, IMAGE, etc.)

Annexe 4

**COEFFICIENTS D'ÉCHANGE DANS
LE MODÈLE**

1 - ÉCHANGES LATÉRAUX

Le coefficient d'échanges T entre 2 mailles présentant une différence de charge DH donne le débit Q d'échange :

$$Q = T.DH$$

Les coefficients d'échanges latéraux (TN, TS, TE, TO) (Nord, Sud, Est, Ouest) sont donnés par la relation écrite ici pour les échanges avec le Nord) :

$$TN = 1 / \left(\frac{1}{\frac{K.DZ.DX}{DY/2}} + \frac{1}{\frac{KN.DZN.DX}{DYN/2}} \right) \cdot \sqrt{AH}$$

soit en développant :

$$TN = \frac{2DX.K.DZ.KN.DZN}{K.DZ.DYN + KN.DZN.DY} \sqrt{AH}$$

avec :

K, KN	perméabilité
DX	longueur de la maille (direction Ox)
DY, DYN	largeur des mailles (direction Oy)
DZ, DZN	épaisseur en eau des mailles (direction Oz)
AH	anisotropie plane des perméabilités (KNS:KOE)

N, S, E, O, H, B Nord, Sud, Est, Ouest, Haut, Bas.

Pour les échanges avec le Sud, l'équation est identique en remplaçant la lettre N (Nord) par la lettre S (Sud).

Pour l'Est, on obtient :

$$TE = \frac{2DY.K.DZ.KE.DZE}{K.DZ.DXE + KE.DZE.DX} \cdot \frac{1}{\sqrt{AH}}$$

Pour les échanges avec l'Ouest, l'équation est identique en remplaçant la lettre E (Est) par la lettre O (Ouest).

2 - ÉCHANGES AVEC LE HAUT ET LE BAS

Les coefficients d'échange avec le haut (H) et le bas (B) sont donnés par les relations :

$$T_H = 1 / \left(\frac{1}{\frac{K \cdot D_X \cdot D_Y}{D_Z/2}} + \frac{1}{\frac{K_H \cdot D_X \cdot D_Y}{D_{ZH}/2}} \right)$$

soit en développant :

$$T_H = \frac{2D_X \cdot D_Y \cdot K \cdot K_H}{K \cdot D_{ZH} + K_H \cdot D_Z}$$

Pour les échanges avec le bas, on écrit de la même manière :

$$T_B = \frac{2D_X \cdot D_Y \cdot K \cdot K_B}{K \cdot D_{ZB} + K_B \cdot D_Z}$$

avec ici K, K_H et K_B qui sont les perméabilités du centre, du haut et du bas respectivement multipliées par les coefficients d'anisotropie verticales A_V du centre, du haut et du bas. Le coefficient d'anisotropie verticale est le rapport de la perméabilité verticale sur la perméabilité horizontale.

Annexe 5

CALCUL DES CHARGES - PRISE EN COMPTE DES VARIATIONS D'EMMAGASINEMENT EN RÉGIME TRANSITOIRE - STABILISATION DES OSCILLATIONS

1 - COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT

Selon l'état de la maille de calcul le modèle utilisera :

- * soit le coefficient d'emménagement libre S si la maille reste à surface libre pendant tout le pas de calcul,
- * soit le coefficient d'emménagement captif $S_C = S_S \cdot dz$ si la maille reste captive pendant tout le pas de calcul,
avec $S_S =$ coefficient d'emménagement captif spécifique et $dz =$ épaisseur de la maille.
- * soit, si l'état change pendant le pas de temps, le débit de stockage Q_S s'écrit :

$$Q_S = \text{SURF} \cdot \left\{ S_C \cdot [H(t) - \text{TOIT}] + S_L \cdot [\text{TOIT} - H(t - dt)] \right\} / dt$$

si la maille devient en charge.

$$Q_S = \text{SURF} \cdot \left\{ S_L \cdot [H(t) - \text{TOIT}] + S_C \cdot [\text{TOIT} - H(t - dt)] \right\} / dt$$

si la maille devient à surface libre.

Dans tous les cas le débit de stockage s'écrit :

$$Q_S = \text{SURF} \cdot \left\{ S_F \cdot [H(t) - \text{TOIT}] + S_D \cdot [\text{TOIT} - H(t - dt)] \right\} / dt$$

avec :

S_F = coefficient d'emménagement dans l'état final

S_D = coefficient d'emménagement dans l'état initial

TOIT = cote du toit de l'aquifère

Quand $S_F = S_D$ on obtient bien :

$$Q_S = SURF \cdot S \cdot [H(t) - H(t-dt)] / dt$$

cependant, dans ce dernier cas, d'un point de vue numérique comme $[TOIT - H]$ est généralement très supérieur à $[H(t) - H(t-dt)]$ pendant le pas dt , surtout s'il est très petit, le modèle utilise directement cette dernière expression de Q_s .

2 - LIMITATION DES VARIATIONS

Pour aider la stabilité, le modèle impose 2 conditions.

- * Si une maille était noyée à l'itération précédente et devient non noyée, le modèle ne permet qu'un abaissement à une cote juste inférieure au toit de la maille.

En effet le coefficient d'emmagasinement pour le calcul est captif (donc petit), or dès le dénoyement il devrait devenir libre donc plus grand donc limitant la descente. Si la descente doit se poursuivre, cela sera fait à l'itération suivante.

- * Si une maille non noyée à l'itération précédente devient noyée (à la suite par exemple d'un débit de percolation du dessus trop élevé), le modèle ne lui permet d'atteindre que la cote du toit pour éviter qu'à l'itération suivante elle ne provoque une augmentation de la charge de la maille du dessus provoquant de proche en proche une divergence. A l'itération suivante, la charge de la maille de calcul sera noyée et la remontée sera éventuellement confirmée.

3 - RÉCUPÉRATION DU DÉBIT QUI "TRANSITE" À TRAVERS UNE MAILLE SUPÉRIEURE VIDE

Le calcul de la charge de la maille de calcul tient compte des 6 mailles voisines (et en plus d'un éventuel débit interne). Si la maille supérieure est vide, elle n'apportera aucune contribution, alors qu'elle peut très bien laisser transiter un débit pouvant provenir :

- de ses voisines (latérales et du haut),
- de la recharge et du surplus d'irrigation.

Exemple

$$K = 10^{-4} \text{ m/s}$$

$$\text{recharge} = 100 \text{ mm/mois} = 1.16 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$$

Le débit de la recharge percole totalement pendant un pas de temps de calcul. Il faut tenir compte de ce débit qui doit atteindre les couches inférieures.

Le calcul des charges se fait donc de haut en bas et si une maille qui reçoit du débit de ses voisines s'assèche, ce débit est reporté - sous forme de débit de transit - dans la maille inférieure.

Annexe 6

**MÉTHODE DE SIMULATION
D'UNE ZONE ÉQUIPOTENTIELLE**

Dans les problèmes d'hydrodynamique, on a parfois besoin d'introduire une zone équipotentielle (connexe ou non) dont le potentiel est inconnu.

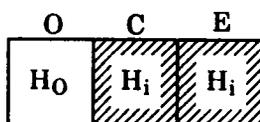
1 - RÔLE DE LA ZONE ÉQUIPOTENTIELLE

Toutes les mailles d'une zone équipotentielle auront le même potentiel, mais ce potentiel n'est pas imposé. Il peut s'agir d'une cavité, d'un forage, d'un lac, d'un cours d'eau, d'un réseau karstique, dont le potentiel n'est pas connu ou bien varie au cours du temps.

2 - DIFFICULTÉS RENCONTRÉES DANS L'ALGORITHME NORMAL

Pour simuler une telle zone, on aurait pu penser à introduire une transmissivité très élevée dans toutes ces mailles. On montre facilement que, dans ce cas, le modèle converge très mal.

Par exemple, supposons la situation suivante :



Équipotentielle

où H_0 = charge externe (imposée par exemple) à l'Ouest
 H_i = charge interne.

Si on s'intéresse au bilan de la maille de calcul H_{iC} , on écrit (en simplifiant) :

$$H_{iC} = (T_0 H_0 + T_i H_{iE}) / (T_0 + T_i)$$

en notant T_0 et T_i les coefficients d'échanges vers l'Ouest et vers l'Est.

Supposons $T_i = k T_O$ (par exemple 1 000 T) pour avoir $H_{iE} \approx H_{iC}$, à l'équilibre, on aura $H_O = H_{iE}$.

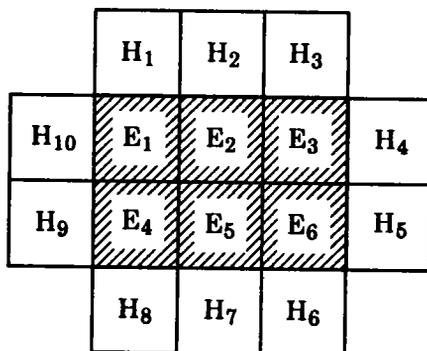
Supposons $H_{iE} = H_O + dH$ à une itération donnée, on obtient dans la maille C la charge :

$$\begin{aligned} H_{iC} &= [H_O + k (H_O + dH)] / (1 + k) \\ H_{iC} &= H_O + dH \cdot k / (1 + k) \end{aligned}$$

On voit donc une convergence extrêmement lente vers la solution $H_{iC} = H_O$. Cette convergence est encore plus difficile et quasi-impossible pour une maille de la zone équipotentielle en contact avec 2 ou 3 mailles de la même zone.

3 - SOLUTION UTILISÉE

On ne calcule aucun échange direct entre deux mailles équipotentielles (ici les mailles E1, E2, E3, E4, E5 et E6).



On suppose qu'on a calculé la charge EQUIP à l'itération $i-1$ dans toute la zone équipotentielle à l'itération 1 :

- On calcule normalement les charges H_1 à H_{10} (par exemple) des mailles voisines, en tenant compte de la charge EQUIP de l'itération précédente.

- Quand le modèle rencontre une maille m de la zone équipotentielle :
 - il met à zéro les coefficients d'échange avec une maille voisine équipotentielle,
 - il calcule les coefficients d'échange normaux avec les autres mailles non équipotentielles.

Il calcule alors le numérateur et le dénominateur d'après les coefficients d'échange dans les 6 directions (N, S, E, O, haut et bas) :

$$\text{NUM}_m = \sum_{N=1}^6 T_N \cdot H_N + S \cdot \text{EQUIp} \cdot \text{SURF}/dt + \text{RECH}$$

$$\text{DENOM}_m = \sum_{N=1}^6 T_N + S \cdot \text{SURF}/dt$$

Après avoir balayé toutes les mailles, le modèle calcule d'un seul coup la charge unique EQUI. Pour cela :

- * il affecte à la zone équipotentielle la somme Q_{zone} de tous les éventuels débits introduits dans certaines mailles de cette zone z.
- * il a alors :

$$\text{EQUI} = \left(\sum_m \text{NUM}_m + Q_{\text{zone}} \right) / \sum_m \text{DENOM}_m$$

qui correspond à :

$$\text{EQUI} = \left[\sum_{\text{voisines}} T \cdot H_{\text{voisines}} + Q_{\text{zone}} + \text{RECH}_{\text{zone}} + \sum_z S_z \cdot \text{SURF}_z \cdot \text{EQUIp}/dt \right] / D$$

avec :

$$D = \sum_{\text{voisines}} T_{\text{voisines}} + \sum_Z S_Z \cdot \text{SURF}_Z / dt$$

qui correspond bien à l'équation *globale* de la zone équipotentielle :

$$\begin{aligned} & \sum_{\text{voisines}} T_V (H_V - \text{EQUI}) + Q_{\text{zone}} + \text{RECH}_{\text{zone}} \\ & = \sum_Z S_Z \cdot \text{SURF}_Z (\text{EQUI} - \text{EQUIp}) / dt \end{aligned}$$

Annexe 7

MODÉLISATION TRIDIMENSIONNELLE D'UN ÉCOULEMENT QUASI-BIDIMENSIONNEL Problèmes rencontrés

D'après la note technique BRGM/EAU n° 90/009

INTRODUCTION

Les écoulements dans un aquifère sont le plus souvent quasi-horizontaux, sauf au voisinage des singularités (pompages sur une partie de l'épaisseur) où on peut parfois observer une forte composante verticale. Ces écoulements sont généralement modélisés avec un schéma à deux dimensions (x et y). On peut être tenté d'utiliser un schéma à trois dimensions (en y ajoutant la dimension verticale) dans un but d'augmentation de la précision. Quand la discrétisation spatiale des calculs fait intervenir des mailles d'extension latérale très supérieure à leur épaisseur, on obtient souvent un système numériquement très mal conditionné dont la résolution est extrêmement lente et même parfois quasi-impossible. Le but de cette note est d'analyser en détail sur un exemple théorique l'origine de ces difficultés.

1 - POSITION DU PROBLÈME

On suppose un système formé de deux couches d'épaisseur e et de perméabilité k . Le domaine est limité à l'ouest par des mailles à niveau imposé H_L et à l'est par une limite imperméable. On pompe un débit Q dans la couche n° 2, c'est-à-dire la plus basse.

La maille au dessus de la maille pompée est dénoyée à la suite d'un rabattement excessif.

2 - NOTATIONS

- K = perméabilité
e = épaisseur d'une maille
L = côté d'une maille
Q = débit pompé
H = charge (L = limite, H = haut, B = bas,
Q = maille pompée)
a = e^2/L^2

3 - RESOLUTION

La charge H_L est fixée. Il reste à calculer les charges : H_H , H_B et H_Q des trois mailles de calcul. On note $a = e^2/L^2$, et on suppose que $e \ll L$, c'est-à-dire $a \ll 1$.

L'équation dans chaque maille permet d'écrire :

$$K.e (H_H - H_L).L/L + K.L^2 (H_H - H_B)/e = 0 \quad (1)$$

$$K L^2 (H_B - H_H)/e + K.e (H_B - H_Q) + K.e (H_B - H_L) = 0 \quad (2)$$

$$K.e (H_Q - H_B) = Q \quad (3)$$

d'où le système :

$$H_H = H_L.a/(1+a) + H_B/(1+a) \quad (4)$$

$$H_B = H_L.a/(1+2a) + H_Q.a/(1+2a) + H_H/(1+2a) \quad (5)$$

$$H_Q = H_B + Q/(k.e) \quad (6)$$

En remplaçant dans (5) H_H et H_Q par leur valeur de (4) et (6), on obtient la solution exacte :

$$H_B = H_L + (1+a)/(2+a).Q/(K.e) \quad (7)$$

d'où on déduit :

$$H_Q = H_L + (3+2a)/(2+a).Q/(K.e) \quad (8)$$

$$H_H = H_L + 1/(2+a).Q/(K.e) \quad (9)$$

4 - APPLICATION NUMÉRIQUE

$$L = 1\,000 \text{ m}$$

$$e = 10 \text{ m}$$

d'où :

$$a = 10^{-4}$$

$$Q / (K.e) = 10 \text{ m}$$

$$H_L = 6 \text{ m}$$

N.B. : Pour simplifier les notations, on note $Q > 0$, alors qu'il s'agit d'un pompage. Les charges sont en fait des rabattements (en dessous du niveau 0).

On obtient alors :

$$H_B = 11 + 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

$$H_Q = 21 \text{ m}$$

$$H_H = 11 - 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

5 - RÉOLUTION ITÉRATIVE AVEC UN MODÈLE TRIDIMENSIONNEL

On suppose une résolution par la méthode de GAUSS SEIDEL dans l'ordre H_H, H_B, H_Q .

On a approximativement par simplification des équations (4) à (6), en négligeant les termes du deuxième ordre :

$$H_H = a H_L + (1-a) H_B \quad (10)$$

$$H_B = a H_L + a H_Q + (1-2a) H_H \quad (11)$$

$$H_Q = Q / (K.e) + H_B \quad (12)$$

On part des valeurs H_{H1} , H_{B1} , H_{Q1} (avec cependant $H_{Q1} = Q / (K \cdot e) + H_{B1}$). On obtient alors :

$$H_{H2} = a H_L + (1-a) H_{B1} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} H_{B2} &= a H_L + a H_{Q1} + (1-2a) H_{H2} \\ &= a H_L + a H_{Q1} + (1-2a) [a H_L + (1-a) H_{B1}] \\ &= 2 a_1 + a H_{Q1} + (1-3a) H_{B1} \end{aligned} \quad (14)$$

(en négligeant les termes du deuxième ordre)

$$H_{Q2} = Q / K \cdot e + H_{B2} \quad (15)$$

On obtient ainsi les variations suivantes :

$$DH_B = H_{B2} - H_{B1} = 2aH_L + aH_{Q1} - 3aH_{B1} \quad (\text{d'après (14)})$$

$$DH_Q = H_{Q2} - H_{Q1} = H_{B2} - H_{B1} = DH_B \quad (\text{d'après (15)})$$

$$\begin{aligned} DH_H &= H_{H3} - H_{H2} \\ &= [aH_L + (1-a)H_{B2}] - [aH_L + (1-a)H_{B1}] \quad (\text{d'après (13)}) \\ &= (1-a) DH_B = DH_B \end{aligned}$$

Il apparaît que les trois charges H_H , H_B et H_Q varient (baisser) à chaque itération d'une même quantité :

$$DH = a (2H_L + H_{Q1} - 3 H_{B1}).$$

Application numérique

En supposant un départ pas trop éloigné de la solution :

$$\begin{array}{ll} H_L = 6 \text{ m} & H_{B1} = 8 \text{ m} \\ H_{H1} = 8 \text{ m} & H_{Q1} = 18 \text{ m} \end{array}$$

On obtient - à chaque itération - une variation $DH = 6 \cdot 10^{-4}$ m. La convergence est donc extrêmement lente ; cette variation a même tendance à diminuer encore quand on se rapproche de la solution, soit à l'itération i :

$$DH_i = 2 \cdot 10^{-4} (H_B - H_{B1})$$

L'écart par rapport à la solution réelle est donc divisé par 2 en $\ln(2) / 2 \cdot 10^{-4} = 3\,500$ itérations. Après ces 3 500 itérations, l'erreur par rapport à la solution exacte est encore égale à 1,5 m, et à la fin du balayage, on obtient $H_B = H_H + DH$, soit d'après l'équation (1) pour $DH = 3a$, un débit résiduel Q_R :

$$Q_R / Ke = (H_H - H_L) + 3 = 0,5$$

soit : $Q_R / Q = 5 \%$

ce qui est encore considérable.

Il faudrait alors 14 000 itérations pour diviser par 8 ces valeurs.

6 - CONCLUSION

Il convient d'être très prudent dans l'utilisation d'un modèle hydrodynamique en tridimensionnel pour résoudre un problème quasi-bidimensionnel. En particulier, il faut veiller à ne pas faire intervenir des mailles dans l'extension latérale, soit excessivement supérieure à leur épaisseur. Un facteur L/e de 100 est certainement excessif. Un rapport de 25 à 30 semblerait un maximum.

Si un schéma tridimensionnel est nécessaire, il ne faut l'utiliser que localement au voisinage d'une singularité.

Annexe 8
DESCRIPTION DE LA CHAINE SEMIS

1 - QU'EST-CE QU'UN SEMIS ?

C'est une norme de fichiers auto-documentés pour un champ de valeurs dans un semis de point réguliers, c'est-à-dire aux noeuds ou aux centres d'un maillage rectangulaire.

Les rectangles sont définis par des lignes et des colonnes de largeur et de hauteur variables. Les fichiers sont auto-documentés puisque les abscisses absolues des colonnes et les ordonnées absolues des centres des lignes apparaissent en clair sur le fichier. Ces coordonnées peuvent, en particulier, être les coordonnées Lambert (généralisées) en France ou tout autre système orthonormé.

Les fichiers sont "en clair" et peuvent être consultés et visualisés directement (voir exemple de semis ci-dessous).

n° du panneau		nombre de panneaux					abscisses des centres des colonnes					origine (coin en bas à gauche)	
no	1 / 2	d'un	SEMIS	de	de	9 LIGNES	par	12 COL;	X0=	200 Y0=	100		
225	275	325	375	425	475	525	575	625	675	725	775		
CHARGES SIMULEES											CHARG	1	
49.2	49.2	49.3	49.4	49.4	49.5	49.6	49.7	49.8	49.8	49.8	525		
48.8	48.8	48.9	49	49.2	49.3	49.5	49.6	49.7	49.8	49.8	475		
48.2	48.3	48.4	48.6	48.8	49.1	49.3	49.4	49.6	49.7	49.7	425		
47.3	47.5	47.7	48	48.4	48.7	49	49.2	49.4	49.6	49.6	375		
46.1	46.3	46.7	47.2	47.7	48.2	48.6	49	49.3	49.5	49.5	325		
44.4	44.8	45.4	46.2	46.9	47.6	48.2	48.7	49.1	49.3	49.3	275		
42	42.6	43.7	44.8	45.9	46.9	47.7	48.4	48.8	49.2	49.2	225		
38.5	39.7	41.4	43.2	44.8	46.2	47.2	48	48.6	49.1	49.1	175		
33.5	35.8	38.7	41.4	43.7	45.4	46.7	47.7	48.4	48.9	48.9	125		
PANNEAU no 2 / 2 d'un SEMIS de 9 LIGNES par 12 COL; X0= 200 Y0= 100											CHARG	1	
CHARGES SIMULEES											CHARG	1	
49.9	49.9										525		
49.8	49.9										475		
49.8	49.9										425		
49.7	49.8										375		
49.6	49.8										325		
49.5	49.7										275		
49.5	49.6										225		
49.4	49.6										175		
49.3	49.5										125		

Exemple de semis

Les valeurs du champ sont à leur place et le fichier découpé en "panneaux" de 10 colonnes de large. Ce système est compact puisque seules les abscisses des colonnes et les ordonnées des lignes apparaissent sur un panneau. Par exemple, sur un panneau de 30 lignes de 10 colonnes apparaissent 30 ordonnées et 10 abscisses, soit 40 valeurs (au lieu de 300 abscisses et 300 ordonnées, soit 600 valeurs pour un fichier séquentiel).

2 - INTÉRÊT D'UN SEMIS

C'est une véritable base de données. Les valeurs d'un champ peuvent être conservées et être utilisées plus tard sans aucun problème de localisation. On verra qu'on peut très facilement compléter, fusionner cette banque de données et changer de maillage.

Il est très facile de calculer la **valeur du champ en un point quelconque d'un semis** (en dehors des noeuds) par interpolation double (avec le logiciel INGRID par exemple).

Les semis peuvent être constitués :

- soit directement : par saisie à l'éditeur de semis du logiciel OPERASEM,
- soit par combinaisons entre semis avec le logiciel OPERASEM,
- soit avec le logiciel INGRID :
 - après saisie d'isovaleur à la table à digitaliser,
 - à partir de valeurs en un certain nombre de points épars,
 - à partir d'autres semis.

Les semis sont acceptés en entrée et générés en sortie par tous les logiciels 4S/EAU du BRGM qui manipulent des données dans un maillage "écossais" : INGRID, UNIGRID, MARTHE, VIKING, SESAME, RAMAGE, OPERASEM, INTRANS, TED, SHALIMAR, NONSAT.

Annexe 9

INDEX

INDEX

	Pages
Agencement des couches	1.15, 5.1
Anisotropie	1.22, 1.24
Bilan des débits	2.35
Coefficient d'échanges	A4
Coefficient d'emmagasinement	1.24, A5.2
Convergence	2.10, 2.40
Correction au puits	A3
Cote de débordement	1.20
Débit de débordement	2.36
Débit résiduel	2.36
Débit de transit	2.36, 5.4
Dénoisement	2.12, 2.36
Domaine d'application	1.3
Épontes	5.1
Exemple d'application	3.1, 6.1, 6.8
Exemples de maillage	1.13
Fichiers de données	2.2, 4.1
Fichier des paramètres	2.5
Fichier des pas de temps	2.22
Fichiers de résultats	2.33
Gravière	1.27, A6
Hauteur résiduelle	2.37
Historiques	1.30, 2.38
Index de débordement	1.20
Infiltration	1.27, 1.29
Initialisation	2.10
Installation	1.8
Irrigation	1.27, 1.29
Itérations	2.10
Liaisons étanches	2.32
Lignes de courant	6.6
Limites géométriques	1.17, 1.18
Modèle coupe	6.4
Nombre de mailles	1.11
Ordinateurs	1.8, 1.11

	Pages
Pas de temps	1.31, 2.22
Pas de modèle	1.31, 2.22
Pas de calcul	1.31, 2.22
Pluie efficace	1.27, 1.29
Potentiel imposé	1.22
Recharge	1.21
Référence des charges	1.21
Référence du substratum	1.20
Régime transitoire	1.31, 2.22
Relaxation	1.35, 2.12
Schéma de résolution	1.34, A4
Semi-perméable	5.1
Semis de données	2.30, A8
Substratum	1.20, 5.1
Surface libre	6.4
Toit	1.20, 5.1
Trajectoire	6.6
Unités	2.12
Validation du modèle	6.2
Vérification des données	4.1
Vitesses	6.6
Visualisation des historiques	2.38
Visualisation des isovaleurs	2.39
Visualisation du maillage	4.1
Zones	1.26, 1.27
Zone équipotentielle	1.27, A6



document public

**Résolution matricielle
et nouvelles géométries
dans le logiciel MARTHE**

Dominique THIERY

**R37762
EAU 4S 93**

- SOMMAIRE -

INTRODUCTION	4
CHAPITRE 1 :	
RESOLUTION DIRECTE PAR GRADIENTS	
CONJUGUES	5
INTRODUCTION	6
1 - PERFORMANCES	6
2 - DOMAINE D'APPLICATION	7
3 - PRINCIPE DE LA METHODE	7
4 - PARAMETRES DE CONTROLE	9
5 - VALEURS CONSEILLEES (A TITRE INDICATIF) POUR LES PARAMETRES	10
REFERENCES	12

*Résolution matricielle et nouvelles géométries
dans le logiciel MARTHE (D. THIERY)*

CHAPITRE 2 :	
MAILLAGES GIGOGNES	13
INTRODUCTION.....	14
1 - DOMAINE D'APPLICATION	15
2 - SYNTAXE DES MAILLAGES GIGOGNES...	15
3 - PRINCIPE DE LA RESOLUTION DES CALCULS	18
4 - CAS PARTICULIERS.....	20
5 - AFFECTATIONS ET MODIFICATIONS DE DONNEES.....	21
6 - FICHIERS DE DONNEES	21
7 - GENERATION PRATIQUE D'UN SOUS-MAILLAGE.....	22
8 - PARAMETRES	23
9 - FICHIERS RESULTATS	23
10 - EXEMPLES	24

CHAPITRE 3 :	
MODELISATION EN COUPE VERTICALE	27
INTRODUCTION.....	28
1 - DIFFERENTS TYPES DE COUPES	28
2 - COUPE DE TYPE 1 : "EN CHARGE"	29
3 - COUPE DE TYPE 2 : AVEC ZONE NON SATUREE (ZNS).....	30
4 - COUPE DE TYPE 3 : AVEC DENSITE (SANS ZNS).....	33
5 - COUPE DE TYPE 4 : AVEC SURFACE LIBRE (SANS DENSITE NI ZNS).....	34
6 - COUPE DE TYPE 5 : TOITS ET SUBSTRATUMS NON PARALLELES ET POSSIBILITE D'EPONTES.....	34
7 - TABLEAU RECAPITULATIF	36

*Résolution matricielle et nouvelles géométries
dans le logiciel MARTHE (D. THIERY)*

CHAPITRE 4 :	
MODELISATION A SYMETRIE CYLINDRIQUE.....	38
INTRODUCTION.....	39
1 - CONDITIONS D'APPLICATION	39
2 - PRINCIPE.....	40
3 - MISE EN OEUVRE PRATIQUE	44
4 - EXEMPLE D'APPLICATION	45

- INTRODUCTION -

La version 4.3 du logiciel MARTHE est décrite dans le rapport R32210 de 1990. Depuis cette date, les pré et post-processeurs RAMAGE et GRAPHMAR ont été créés et ajoutés au mode d'emploi.

Parallèlement, de nouvelles méthodes de résolution des calculs ont été ajoutées :

- * Résolution matricielle par gradients conjugués (à partir de la version 4.4).

De nouvelles géométries ont également été introduites :

- * Maillages gigognes,
- * Modélisation en coupe verticale,
- * Modélisation à symétrie cylindrique.

Ce rapport, constitué de 4 chapitres totalement indépendants, décrit en détail ces nouvelles possibilités.

- CHAPITRE 1 -

**RESOLUTION DIRECTE
PAR GRADIENTS CONJUGUES**

INTRODUCTION

Une nouvelle méthode de résolution des calculs hydrodynamiques, c'est-à-dire du calcul des charges ou des pressions, a été mise au point et introduite dans le logiciel MARTHE à partir de la version 4.4. Cette méthode utilise le principe des Gradients Conjugués avec Préconditionnement. L'intérêt principal de cette méthode est sa rapidité et aussi sa capacité à traiter des systèmes aquifères présentant de très grands contrastes de transmissivité. Le module de résolution est adapté du sous-programme PCG2 développé par l'U.S.G.S et décrit par HILL (1990). La base de ce travail (écoulements en charge, sans débordements ni zone non saturée) a été réalisée dans le cadre d'un financement ANDRA.

1 - PERFORMANCES

Les performances obtenues décrites par THIERY (1992) font apparaître, par rapport à la méthode itérative classique maille par maille, un gain de rapidité d'un facteur 15 à 20 pour les systèmes parfaitement linéaires (nappes captives à transmissivité constante en 2D ou 3D sans courts-circuits, ni zones équipotentiellles, ni maillages gigognes). Dans le cas général de nappes libres complexes avec dénoiements, débordements, etc., le gain de rapidité est de l'ordre d'un facteur 5. Cette méthode de calcul nécessite légèrement plus de capacité mémoire que la précédente. Le nombre maximal de maille accepté est donc légèrement réduit.

2 - DOMAINE D'APPLICATION

La méthode de résolution s'adapte à tous les cas : régime permanent ou transitoire, écoulement à 2D ou 3D, nappes libres ou captives, mailles dénoyées ou à débordements, zones équipotentielles, recharge, calcul en zone non saturée, calcul avec densité, calculs en pression, maillages gigognes, etc. Il arrive cependant exceptionnellement qu'elle soit prise en défaut dans le cas de systèmes 3D ou multicouche présentant de grandes zones de mailles dénoyées entre 2 couches. Les contrastes de transmissivité entre 2 mailles adjacentes de même dimension peuvent atteindre un facteur 5000 (au lieu de 100 environ pour la méthode itérative classique).

3 - PRINCIPE DE LA METHODE DE RESOLUTION

Le bilan dans chaque maille donne lieu à une équation entre la charge (ou la pression) du centre et les charges (ou pressions) des 6 mailles voisines. Au total, on obtient un système de N équations à N inconnues (les charges), N étant le nombre de mailles. Ce système d'équations correspond à une matrice symétrique très "creuse" puisque les seuls éléments non nuls correspondent à la diagonale centrale et à 6 diagonales latérales. Cette matrice est préconditionnée puis résolue itérativement par la méthode des gradients conjuguées (PRESS et al. 1989).

*Résolution matricielle et nouvelles géométries
dans le logiciel MARTHE (D. THIERY)*

Deux méthodes de préconditionnement sont disponibles :

- * la méthode de Choleski qui s'est toujours révélée la plus rapide et la plus précise,
- * la méthode Polynomiale... qui pourrait être adaptée dans le futur aux ordinateurs parallèles.

Dans le cas d'une nappe libre (ou bien avec des non linéarités comme des courts-circuits ou des zones équipotentielles), les coefficients de la matrice dépendent des charges qui ne sont pas encore connues. Pour une première évaluation des charges, on calcule les coefficients et on résout la matrice par NITRES itérations puis on réévalue NITCOE fois ces coefficients. Il y a donc un double processus itératif :

- * . NITCOE itérations dites "externes" où l'on calcule les coefficients.
- * . NITRES itérations dites "internes" pour inverser la matrice.

Il y a donc au total NITCOE x NITRES itérations mais l'expérience montre que ce sont les NITCOE fois où l'on calcule les coefficients qui sont coûteuses et qu'il faut minimiser. Pour chaque valeur des coefficients, la matrice est inversée correctement après NITRES itérations (si NITRES est suffisamment grand) et les charges ne varient pratiquement plus. Par contre, si les coefficients varient encore, après recalcul des coefficients, les charges qui en seront déduites varieront encore. La convergence est donc obtenue quand les charges ne varient plus dès la première itération INTERNE.

4 - PARAMETRES DE CONTROLE

Les paramètres de contrôle sont les suivants :

- NITCOE** = Nombre maximal d'itérations par pas de calcul ou en régime permanent
- TOL** = Variation maximale de charge entre 2 itérations
- RELAX** = Coefficient de relaxation (< 1 pour ralentir les calculs en cas de forte non-linéarité, > 1 pour les accélérer, ce qui est rare avec ce schéma de résolution)
- IRESOL** = Méthode de résolution :
- 1 = bandes de calcul.
 - 2 = gradients conjugués avec pré-conditionnement Choleski ; c'est la méthode conseillée.
 - 3 = gradient conjugué avec pré-conditionnement Polynomial.
 - 4 = résolution itérative maille par maille. C'est la méthode de base, la plus lente, mais qui marche toujours.
- NITRES** = Nombre maximal d'itérations internes pour la résolution matricielle par gradients conjugués.

*Résolution matricielle et nouvelles géométries
dans le logiciel MARTHE (D. THIERY)*

- IALTER = Type de résolution par Gradients Conjugués en 3D :
- 0 = toutes les couches à la fois. C'est le cas général.
 - 1 = couche par couche. Cette méthode, plus lente, est automatiquement choisie en cas de courts-circuits. L'expérience a montré qu'il vaut mieux dans tous les cas laisser ce paramètre égal à zéro.

Les paramètres NITCOE, TOL et RELAX existaient déjà dans la méthode classique maille par maille.

5 - VALEURS CONSEILLEES (A TITRE INDICATIF) POUR LES PARAMETRES

Les valeurs conseillées des paramètres sont les suivantes :

- NITCOE = 1 à 5 en nappe captive totalement linéaire
15 à 50 en nappe libre ou non linéaire
- TOL = un peu moins sévère qu'en résolution maille par maille. De l'ordre de 10^{-5} fois la charge moyenne (pour des raisons de précision numérique)

*Résolution matricielle et nouvelles géométries
dans le logiciel MARTHE (D. THIERY)*

RELAX	=	1 (0.7 à 0.3 en cas d'oscillations importantes ; il convient alors d'augmenter NITCOE)
IRESOL	=	2 (c'est la valeur par défaut pour les versions > 5.2)
NITRES	=	50 en nappe captive totalement linéaire 10 en nappe libre ou non linéaire (c'est la valeur par défaut qui est prise si on met zéro)
IALTER	=	0

En pratique, pour les nappes captives totalement linéaires, il suffit de mettre NITCOE = 1, c'est-à-dire un seul calcul des coefficients, ce qui est économique, et NITRES suffisamment grand, cependant l'expérience montre que si NITRES dépasse environ 50, on risque une perte de précision et il est plus précis d'augmenter NITCOE à 3 ou 5 et de limiter NITRES à 50.

N.B. : 1. Le paramètre TOL (exprimé en unité de charges) à deux rôles distincts :

- a) arrêt de l'inversion matricielle quand la variation maximale de charge (en valeur absolue) est inférieure à TOL,
- b) arrêt définitif de la résolution quand la variation moyenne de charge (pour toutes les couches) est inférieure à TOL dès la première itération interne.

*Résolution matricielle et nouvelles géométries
dans le logiciel MARTHE (D. THIERY)*

N.B. : 2. On appelle schéma non linéaire un schéma qui comporte au moins une des caractéristiques suivantes :

- nappe libre (la transmissivité dépend de la charge),
- courts-circuits entre couches (par exemple : couche 2 connectée à la couche 4),
- présence de zones équipotentiellles,
- maillages gigognes,
- calculs en zone non saturée,
- calcul de la densité (qui modifie la pression).

REFERENCES

HILL Mary C. (1990) - Preconditionned Conjugate Gradient 2 PCG2. A computer program for solving ground-water flow equation. US Geological Survey. Denver (CO) 1990.

PRESS W.-H., FLANNERY B.-P., TEUKOLSKY S.-A., VETTERLING W.-T. (1989) - Numerical recipes : The art of scientific computing (FORTRAN VERSION). Cambridge University Press.

THIERY D. (1992) - Amélioration des techniques de résolution du modèle hydrodynamique MARTHE. Rapport ANDRA 620 RP BRG 92-011 (R 34851 STO 4S/92).

- CHAPITRE 2 -

MAILLAGES GIGOGNES

INTRODUCTION

Pour permettre une précision de calcul accrue dans certaines régions d'un modèle tout en conservant un nombre de mailles raisonnable, un système de maillages gigognes a été introduit dans le logiciel MARTHE à partir de la version 4.4. Ce système permet de définir jusqu'à 10 sous-maillages qui sont comme des "rustines" ou des "patches" sur le maillage principal. Ces sous-maillages peuvent également déborder du maillage principal pour former une extension latérale du maillage. Réciproquement, on peut concevoir que le maillage principal permet de rassembler dans un modèle régional des modèles locaux détaillés.

La base de ce travail (écoulements saturés) a été réalisé dans le cadre d'un contrat ANDRA.

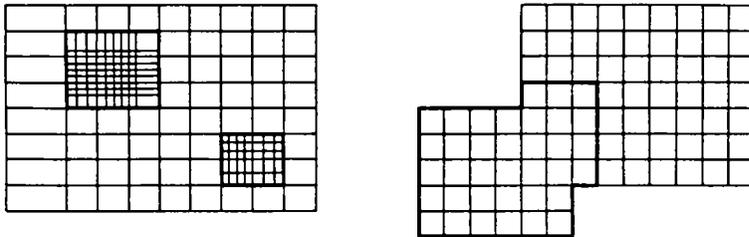


Schéma 1 - Exemples de maillages gigognes

1 - DOMAINE D'APPLICATION

Les maillages gigognes sont totalement opérationnels dans les cas suivants :

- * Maillages 2D, 3D ou multicouches, nappes libres ou captives, calculs en zone saturée ou non saturée, résolution itérative ou par gradients conjugués, transport uniquement par particules (au 1/10/93).

Ils ne sont pas (encore) opérationnels pour les calculs de transports de polluant et de densité par différences finies.

Le post-processeur GRAPHMAR sait reconnaître et gérer les maillages gigognes mais le module RAMAGE ne sait pas le faire.

2 - SYNTAXE DES MAILLAGES GIGOGNES

- ① Le nombre de sous-maillages est limité à 10.
- ② L'emboîtement n'est qu'à un seul niveau, c'est-à-dire qu'un sous-maillage ne peut pas contenir un autre sous-maillage.
- ③ Les sous-maillages doivent être indépendants, c'est-à-dire ne doivent pas se recouvrir.

*Résolution matricielle et nouvelles géométries
dans le logiciel MARTHE (D. THIERY)*

- ④ Le principe de subdivision est que les lignes et les colonnes du maillage principal sont subdivisées en un nombre entier de lignes et de colonnes. Par exemple, si la région formée par les colonnes 4 à 6 et les lignes 9 à 10 est remplacée par un sous-maillage, on pourra avoir le schéma suivant :

Colonnes du maillage	Nombre de colonnes du sous-maillage
n° 4	3
n° 5	5
n° 6	2

Lignes du maillage principal	Nombre de lignes du sous-maillage
9	2
10	3

Il faudra bien entendu vérifier que la somme des largeurs des 3 colonnes contenues dans la colonne n° 4 est égale à la largeur de la colonne n° 4, ou que la somme des hauteurs des 2 lignes contenues dans la ligne n° 9 est égale à la hauteur de la ligne n° 9.

*Résolution matricielle et nouvelles géométries
dans le logiciel MARTHE (D. THIERY)*

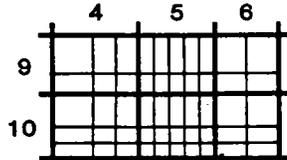
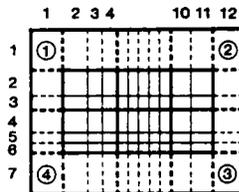


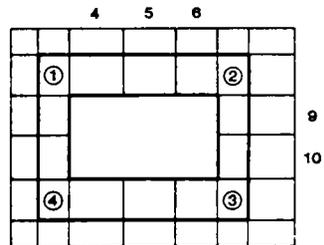
Schéma 2 - Détail

- ⑤ Le nombre de sous-lignes (ou de sous-colonnes) contenues dans une ligne (ou une colonne) n'est pas limité. Ces sous-lignes (ou sous-colonnes) ne sont pas obligées d'être égales entre elles.
- ⑥ Chaque sous-maillage est bordé par des marges qui servent au transfert des données calculées dans le maillage principal.



Sous-maillage

(Les marges sont en traits tiretés)



Maillage principal

Schéma 3 - Illustration des marges

On remarque que, par construction, les 4 coins (notés ① à ④) ont les mêmes dimensions dans le maillage principal et dans le sous-maillage.

*Résolution matricielle et nouvelles géométries
dans le logiciel MARTHE (D. THIERY)*

- ⑦ Toutes les couches sont affectées par les mêmes sous-maillages.
- ⑧ Les marges appartiennent au maillage principal. On évitera que des singularités y apparaissent (dénoitements, liaisons étanches, mailles absentes, etc.). Si des éventuelles contraintes étaient introduites dans les mailles du sous-maillage correspondant aux marges : pompages, potentiels imposés, liaisons étanches, etc., elles ne seraient pas prises en compte.

3 - PRINCIPE DE LA RESOLUTION DES CALCULS

Les calculs hydrodynamiques sont réalisés de manière itérative, d'abord dans le maillage principal (avec les informations les plus récentes des sous-maillages) puis dans les sous-maillages (avec les informations les plus récentes du maillage principal). A chaque itération de calcul, on calcule les charges dans le maillage principal et dans tous les sous-maillages. Le couplage est donc total.

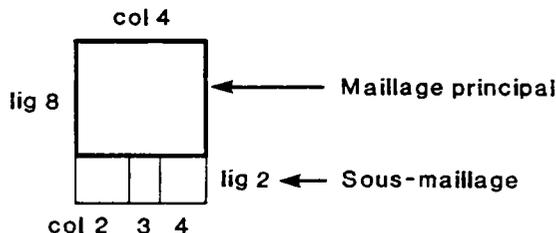


Schéma 4 - Calcul au sud de la maille col. 4, lig. 8

*Résolution matricielle et nouvelles géométries
dans le logiciel MARTHE (D. THIERY)*

Exemple : échanges au sud de la maille colonne 4, ligne 8 du maillage principal (voir schéma 4). Cette maille a 3 mailles (du sous-maillage) à son sud : les mailles ligne 2, colonnes 2, 3 et 4. Une fois calculée la charge H48 dans cette maille (col. 4, lig. 8), elle est reportée, identiquement, dans les 3 mailles ligne 1, colonnes 2, 3 et 4 de la marge du sous-maillage (schéma 5).

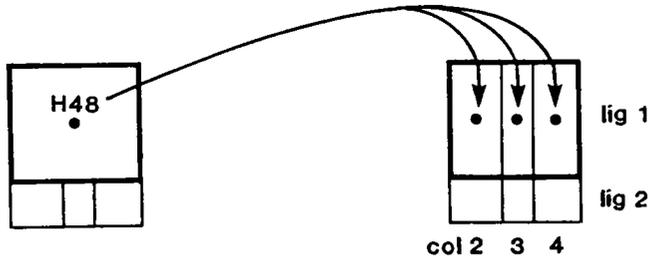


Schéma 5 - Report dans la marge du sous-maillage

Les calculs dans le sous-maillage se font en sautant les marges (premières et dernières lignes, premières et dernières colonnes dans le cas général) qui sont fournies par le maillage principal.

4 - CAS PARTICULIERS

Le principe des 4 coins égaux (principe ⑥) ne s'applique pas si le sous-maillage n'est pas complètement inclus dans le maillage principal ; en particulier le sous-maillage peut :

- a) être inclus mais tangent sur 1 ou 2 de ses bords : schéma 6,
- b) déborder du maillage principal.



Schéma 6 - Sous-maillage tangent ; il n'y a qu'un coin (n° ①) identique dans les 2 maillages.

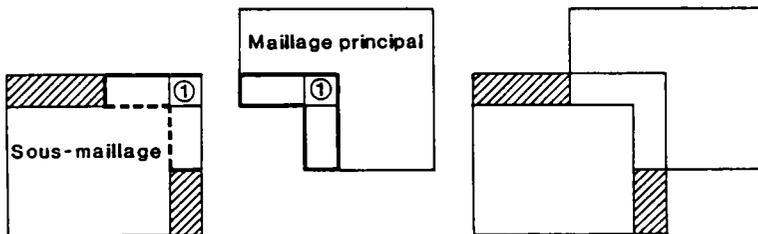


Schéma 7 - Sous-maillage débordant. On remarque que, par construction, les parties hachurées sont supprimées par le modèle car elles ne font pas partie des marges mais elles généreraient une désymétrie et des bilans déséquilibrés.

5 - AFFECTATIONS ET MODIFICATIONS DE DONNEES DANS LE LOGICIEL MARTHE

- a) Modifications par "semis" : elles concernent tout le maillage donc avec tous les sous-maillages.
- b) Modifications par couche. On peut préciser le numéro du sous-maillage (0 = maillage principal, 99 = tous les sous-maillages, **n** = sous maillage n°n).
- c) Modifications par zones géométriques. On peut également préciser le numéro du sous-maillage (0 = maillage principal, 99 = tous les sous-maillages).
- d) Modifications par mailles : on précise les numéros de ligne, colonne, couche et également de sous-maillage.
- e) Edition : elle concerne tout le maillage donc avec tous les sous-maillages.

N.B. : dans le logiciel MARTHE (et ses pré et post-processeurs), le numéro du sous-maillage est souvent appelé "numéro du détail" dans un souci de concision.

6 - FICHIERS DE DONNEES

Les fichiers de données sont constitués pour chaque type de donnée du semis du maillage principal suivi des semis des sous-maillages dans l'ordre. Dans le cas d'un système 3D ou multicouche, pour chaque type de donnée on placera les NC semis des NC couches du maillage principal puis les NC semis des NC couches du premier sous-maillage, etc.

7 - GENERATION PRATIQUE D'UN SOUS-MAILLAGE

Pour générer un sous-maillage, le plus pratique est actuellement de procéder sous-maillage par sous-maillage.

On commence d'abord par générer un nouveau maillage avec le module RAMAGE ou OPERASEM. On veillera à respecter la syntaxe décrite par le paragraphe 2. Ce maillage sera un fichier "présence" (correspondant à la perméabilité). On lui affectera la valeur -1. On utilisera alors le module FUSIOMAR pour fabriquer les semis de tous les types de données (substratum, zones, perméabilité, etc.) à partir des semis du maillage principal. On ajoutera alors pour chaque type de donnée les données du sous-maillage au maillage principal (cette dernière opération sera réalisée automatiquement dans une version future du module FUSIOMAR). Pour faciliter le travail, on pourra réaliser un fichier commande du type :

COPY PRINCIP.SUB + SOUMAIL1.SUB COMPLET.SUB

COPY PRINCIP.PER + SOUMAIL1.PER COMPLET.PER

COPY PRINCIP.ZGE + SOUMAIL1.ZGE COMPLET.ZGE

etc.

8 - PARAMETRES

Il n'y a aucun paramètre à préciser dans le fichier paramètre du logiciel MARTHE. La reconnaissance de fichiers gigognes est automatique.

9 - FICHIERS RESULTATS

Pour une visualisation graphique des résultats (par exemple des charges calculées), il est conseillé d'utiliser le module GRAPHMAR qui reconnaît automatiquement le maillage principal et ses sous-maillages et les dessine ensemble, en les séparant (volontairement) au niveau des marges. On peut également utiliser le module INGRID en dessinant le maillage principal puis en demandant explicitement la superposition d'un autre semis : le premier sous-maillage, puis éventuellement des autres sous-maillages.

Dans tous les cas, il est conseillé, pour obtenir un dessin agréable, de dessiner un fichier sortie du type CHASIM.OUT puisque les marges des sous-maillages y sont occultées et non un fichier état final (du type FINAL.CHA) puisque les marges apparaissent avec des séries de valeurs identiques.

10 - EXEMPLES

Deux exemples sont présentés figures 1 et 2 :

Figure 1 : 1 sous-maillage inclus, correspondant aux schémas 2 et 3.

Figure 2 : 1 sous-maillage débordant, correspondant au schéma 7.

*Résolution matricielle et nouvelles géométries
dans le logiciel MARTHE (D. THIERY)*

PANNEAU no 1 / 1 d'un SEMIS de 12 LIGNES par 8 COL; X0= 0 Y0= 0									
5	15	22.5	30	42.5	55	64	71.5		
EXEMPLE	MAILLAGE	AVEC UN	SOUS-MAILLAGE	INCLU (M.PRINCIP)				PERMH	
5	5	5	5	5	5	5	5	1	115
5	5	5	5	5	5	5	5		105
5	5	5	5	5	5	5	5		95
5	5	5	5	5	5	5	5		85
5	5	5	5	5	5	5	5		75
5	5	5	5	5	5	5	5		65
5	5	5	5	5	5	5	5		55
1	1	1	1	1	1	1	1		45
1	1	1	1	1	1	1	1		35
1	1	1	1	1	1	1	1		25
1	1	1	1	1	1	1	1		15
1	1	1	1	1	1	1	1		5
PANNEAU no 1 / 2 d'un SEMIS de 7 LIGNES par 12 COL; X0= 20 Y0= 10									
22.5	27.5	31.5	34	36.5	39.5	42.5	45.5	48.5	52.5
EXEMPLE	MAILLAGE	AVEC UN	SOUS-MAILLAGE	INCLU (SOUS-MAILL)					PERMH
1	1	1	1	1	1	1	1	1	45
1	1	1	1	2	2	2	2	2	36.5
1	1	1	1	2	2	2	2	2	31.5
1	1	1	1	3	3	3	3	3	27
1	1	1	1	3	3	3	3	3	23
1	1	1	1	3	3	3	3	3	21
1	1	1	1	1	1	1	1	1	15
PANNEAU no 2 / 2 d'un SEMIS de 7 LIGNES par 12 COL; X0= 20 Y0= 10									
57.5	64								
EXEMPLE	MAILLAGE	AVEC UN	SOUS-MAILLAGE	INCLU (SOUS-MAILL)					PERMH
1	1								45
3	1								36.5
3	1								31.5
2	1								27
2	1								23
2	1								21
1	1								15

**Figure 1 - Fichier perméabilité correspondant
à un maillage principal et un sous-maillage inclus
entre les lignes 9 et 10 et les colonnes 4 à 6.**

*Résolution matricielle et nouvelles géométries
dans le logiciel MARTHE (D. THIERY)*

PANNEAU no	1 / 1	d'un	SEMIS de	6 LIGNES par	6 COL; X0=	0	Y0=	0
5	15	25	35 45 55					
EXEMPLE	MAILLAGE	AVEC UN	SOUS-MAILLAGE	DEBORDANT	(M.PRINCIP)		PERMH	1
1	1	1	2 3 1					55
1	1	1	2 3 1					45
1	1	1	2 3 1					35
1	1	1	2 3 1					25
1	1	1	2 3 1					15
1	1	1	2 3 1					5
PANNEAU no	1 / 1	d'un	SEMIS de	7 LIGNES par	7 COL; X0=	-30	Y0=	-20
-25	-15	-5	2.5 7.5	15 25				
EXEMPLE	MAILLAGE	AVEC UN	SOUS-MAILLAGE	DEBORDANT	(SOUS-MAILLAGE)		PERMH	1
1	1	1	1 1 1 1					35
1	1	1	1 1 1 1					25
1	1	1	2 2 1 1					17.5
1	1	1	2 2 1 1					12.5
1	1	1	1 1 1 1					5
1	1	1	1 1 1 1					-5
1	1	1	1 1 1 1					-15

**Figure 2 - Fichier perméabilité correspondant
à un maillage principal et un sous-maillage
débordant (situé au sud-ouest).**

- CHAPITRE 3 -

**MODELISATION
EN COUPE VERTICALE**

INTRODUCTION

Il existe un grand nombre de situations où on souhaite modéliser un écoulement en coupe verticale (écoulement à travers un barrage, équilibre eau douce-eau salée le long d'une limite rectiligne, écoulement sous des fondations, etc.). Il est toujours possible de réaliser une telle modélisation avec le logiciel MARTHE en définissant une seule ligne de mailles par couche et un certain nombre de couches. Cependant, l'introduction et le contrôle des données sous forme de "semis" par couche n'est pas très agréable et l'utilisation de post-processeurs n'est pas aisée. Des possibilités spécifiques incluses dans le logiciel MARTHE permettent une introduction aisée des données sous forme de semis en coupe verticale. Il est alors possible d'utiliser efficacement les modules RAMAGE, GRAPHMAR, OPERASEM, INGRID (ou UNIGRID sur station de travail).

1 - DIFFERENTS TYPES DE COUPES

Il existe 5 types de coupes verticales :

- * type 1 : écoulement classique en charge sans influence de l'altitude, c'est-à-dire sans prise en compte de la zone non saturée (ZNS) ni de la densité du fluide ; à partir de la version 4.3,
- * type 2 : écoulement en zone non saturée (ZNS) ; à partir de la version 5.1,
- * type 3 : écoulement avec densité (sans ZNS) ; à partir de la version 5.1,

*Résolution matricielle et nouvelles géométries
dans le logiciel MARTHE (D. THIERY)*

- * type 4 : écoulement avec surface libre : sans ZNS ni densité ; à partir de la version 5.1,
- * type 5 : écoulement multicouche avec toits et substratums non parallèles et épontes ; à partir de la version 4.4.

2 - COUPE DE TYPE 1 : "EN CHARGE"

En fait, à partir du moment où un écoulement est en charge (et qu'il n'y a pas d'effet d'altitude par l'intermédiaire de la ZNS ou de la densité), l'orientation du maillage n'a aucune influence. Il suffit de construire un maillage monocouche (x, y) et de le *considérer* comme un maillage (x, z). On obtient donc immédiatement une coupe verticale, sans aucun paramètre spécifique. L'épaisseur de la couche (qui peut être variable d'une maille à l'autre) est donnée par la différence entre la "topographie" et le "substratum". Il est même possible de réaliser cette coupe en symétrie cylindrique.

Pour les modifications par mailles ou la définition des mailles à historiques, le numéro de la couche est remplacé par le numéro de la ligne (puisqu, vu du modèle, l'écoulement est monocouche horizontal).

Recharge : il ne faudra définir de zone de recharge que sur la ligne n° 1.

Il est possible d'avoir des maillages gigognes.

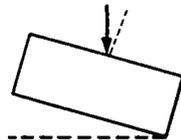
N.B. : Il faudra bien vérifier, a posteriori, que l'écoulement est partout en charge, c'est-à-dire que la charge est toujours supérieure au "toit" de la maille.

3 - COUPE DE TYPE 2 : AVEC ZONE NON SATUREE (ZNS)

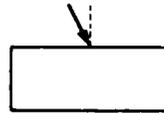
Pour les écoulements avec zone non saturée, on définit l'orientation de la gravité (c'est-à-dire de la pesanteur) au moyen de 3 paramètres :

- NPESAN = direction de la gravité (pesanteur) :
- 0 = direction Oz : vers le bas (z négatif)
 - 1 = direction Oy : vers les y négatifs
 - 2 = direction Ox : vers la droite (x positif)
- ANGPES = angle (correcteur) de la pesanteur par rapport à la verticale (définie par NPESAN). Cet angle est exprimé en degrés.

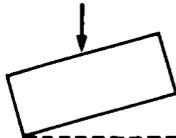
Ex.:



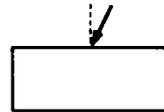
équivalent à :



angle = +20°



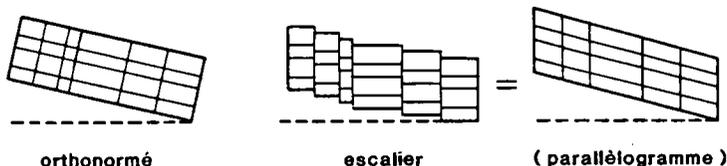
équivalent à :



angle = -20°

*Résolution matricielle et nouvelles géométries
dans le logiciel MARTHE (D. THIERY)*

IESCAL = type de maillage incliné (actif seulement
si l'angle ANGPEs n'est pas nul)
0 = orthonormé
1 = escalier (parallélogramme)



Pour réaliser une coupe verticale, il suffit donc de définir un maillage monocouche horizontal (comme dans le type n° 1) et de définir la pesanteur sur la direction Oy (NPESAN = 1). Si on veut incliner la coupe, on pourra définir un angle ANGPEs et un type d'inclinaison. Dans le cas d'un schéma multicouche (3D), on n'a pas la possibilité de fixer NPESAN = 1 car il ne s'agirait plus d'une coupe.

Comme dans le type n° 1, l'épaisseur de la coupe est définie par la différence entre la cote de la "topographie" et celle du substratum". Pour les modifications par maille ou la définition des mailles à historiques, le numéro de la couche est remplacé par le numéro de la ligne (le numéro de la couche doit être fixé à 1) puisque, vu du modèle, il s'agit d'un maillage monocouche horizontal avec seulement la pesanteur dans une direction autre que Oz. Il est possible d'avoir des maillages gigognes.

4 - COUPE DE TYPE 3 : AVEC DENSITE (SANS ZNS)

On définit un maillage monocouche horizontal et on utilise le paramètre NPESAN = 1, c'est-à-dire pesanteur sur Oy. C'est alors un code qui indique au logiciel MARTHE qu'il s'agit d'un écoulement en coupe verticale, c'est-à-dire en 3D mais avec une seule ligne par couche. Contrairement aux types 1 et 2, le calcul est ici réalisé en 3D par le modèle, avec prise en compte de désaturation ou de dénoiements. Seule l'introduction (et la restitution) des données se fait sous forme d'un "semis" unique correspondant à la coupe. le modèle définit automatiquement les toits et substratums des mailles d'après les limites supérieures et inférieures des lignes. Ces toits et substratums sont donc horizontaux. L'épaisseur de la coupe, définie par le paramètre "épaisseur de la coupe", est défini dans le fichier paramètre.

Pour les modifications par maille ou la définition des mailles à historiques, on utilise le numéro de la couche et on fixe le numéro de la ligne à 1 puisque le calcul est réalisé réellement en 3D (seule l'introduction des données est en 2D). Pour la même raison, on ne peut définir de maillages gigognes (qui ne sont que dans le plan horizontal).

Il est possible de définir également un angle ANGPEs et un type d'inclinaison IESCAL. Ceci joue pour le calcul de l'altitude qui est utilisé dans la prise en compte de la densité.

5 - COUPE DE TYPE 4 : AVEC SURFACE LIBRE (SANS ZNS, SANS DENSITE)

Ce type est exactement comme le type 3 (avec densité), les paramètres d'inclinaison ANGPEs et IESCAL sont utilisés pour le calcul de la cote du toit et du substratum (mais pas pour l'altitude qui n'est pas utilisée).

6 - COUPE TYPE 5 : TOITS ET SUBSTRATUMS NON PARALLELES ET POSSIBILITES D'EPONTES

Il s'agit du cas le plus complexe (mais le plus général). Etant donné que les toits et substratums ne sont plus parallèles, ils ne peuvent être déduits des ordonnées d'un semis. On définit donc des semis anamorphosés. Les abscisses des colonnes sont inchangées, mais les ordonnées des lignes sont remplacées par l'opposé du numéro de couche, c'est-à-dire par les ordonnées suivantes : -1, 2-, -3, ..., -NC (NC étant le nombre de couches). On n'oubliera pas que le point origine des ordonnées Y_0 de chaque semis sera égal à - NC - 0,5 (c'est-à-dire -12.5 s'il y a 12 couches par exemple). Les cotes des substratums (non parallèles) seront définies également par un semis (anamorphosé) de substratums. Les cotes topographiques, zones d'infiltration, zones d'irrigation et index de débordement seront également définis par des semis mais seulement la première ligne, correspondant à la surface, sera utilisée ; (les autres lignes pourront être codées

*Résolution matricielle et nouvelles géométries
dans le logiciel MARTHE (D. THIERY)*

à 9999). S'il y a des épontes, les perméabilités des épontes supérieures et les substratums des épontes supérieures seront également données dans des semis, et les données seront mises seulement dans les lignes correspondant à leur place ; c'est-à-dire que s'il y a par exemple 2 épontes : la première au-dessus de la couche 3 et le deuxième au-dessus de la couche 7, on mettra ces données respectivement dans les lignes 3 et 7 (les autres lignes pourront être codées à 9999).

L'épaisseur de la coupe est définie par le paramètre "épaisseur de la coupe", défini en unité de coordonnées et placé dans le fichier paramètres.

Pour définir la présence éventuelle et la position des épontes, il faudra obligatoirement définir NC couches dans le fichier paramètres au paragraphe "description des couches". Il n'y a pas d'autres paramètres spécifiques à utiliser (pas besoin de NPESAN). Le modèle détecte sur le fichier paramètre qu'il y a NC couches ; il ne trouve qu'un seul semis mais avec NC lignes et chaque ligne ayant comme ordonnée -1, -2, ..., -NC. Il en déduit qu'il s'agit d'une coupe verticale (de type 5).

Pour les modifications par maille et pour la définition des mailles à historiques, on utilise le numéro de la couche (et on fixe le numéro de la ligne à 1) puisque le calcul est réalisé réellement en 3D (seule l'introduction des semis de données est sous forme 2D).

N.B. : il n'est pas possible d'avoir de maillages gigognes puisque les maillages gigognes ne sont possibles que dans le plan horizontal.

Un exemple de fichiers correspondant au type 5 est donné dans la figure 1.

7 - TABLEAU RECAPITULATIF

	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5
Nombre de couches à indiquer dans le fichier paramètres	1	1	1	1	NC
NPESAN (direction de la pesanteur)	0	1	1	1	0
ANGPES (angle de la pesanteur avec la verticale)	Non	Oui	Oui	Oui	Non
Maillages gigognes	Oui	Oui	Non	Non	Non
Epaisseur de la coupe	Topogr. -subs	Topogr. -subs	Paramètre dans fichier paramètre	Paramètre dans fichier paramètre	Paramètre dans fichier paramètre
Historiques et modification par mailles : Définition de la couche par :	Numéro Ligne	Numéro Ligne	Numéro Couche	Numéro Couche	Numéro Couche

*Résolution matricielle et nouvelles géométries
dans le logiciel MARTHE (D. THIERY)*

Fichier : Topographie

PANNEAU no	1 /	1 d'un	SEMIS de	4 LIGNES	par	10 COL;	X0=	0.5 Y0=	-4.5	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
TOPOGRAPHIE									TOPOG 1	
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	-1
9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	-2
9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	-3
9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	-4

Fichier : Substratum

PANNEAU no	1 /	1 d'un	SEMIS de	4 LIGNES	par	10 COL;	X0=	0.5 Y0=	-4.5	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
SUBSTRATUM									SUBST 1	
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	-1
6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	-2
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	-3
-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	-4

Fichier : Substratum Eponte superieure

PANNEAU no	1 /	1 d'un	SEMIS de	4 LIGNES	par	10 COL;	X0=	0.5 Y0=	-4.5	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
SUBSTRATUM EPONTE SUPERIEURE									HTOIT 1	
9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	-1
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	-2
9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	-3
9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	-4

Fichier : Zones de Recharge

PANNEAU no	1 /	1 d'un	SEMIS de	4 LIGNES	par	10 COL;	X0=	0.5 Y0=	-4.5	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
ZONES DE RECHARGE									ZONEP 1	
0	0	1	1	1	2	2	2	3	0	-1
9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	-2
9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	-3
9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	-4

**Figure 1 - Exemple de fichiers pour une coupe
à toits et substratums pas forcément parallèles
(type 5)**

- CHAPITRE 4 -

**MODELISATION
A SYMETRIE CYLINDRIQUE**

INTRODUCTION

Les écoulements au voisinage d'un forage (pompage, injection, slug test, essai PANDA) présentent souvent une symétrie cylindrique (ou "axisymétrique"). La modélisation de tels écoulements peut se faire classiquement en différences finies en deux dimensions avec des mailles rectangulaires ou en trois dimensions avec des mailles parallélépipédiques.

De tels maillages ne sont pas particulièrement adaptés à une symétrie cylindrique ("quadrature du cercle"). Il est possible en utilisant la méthode décrite ci-dessous d'obtenir une précision nettement améliorée tout en réduisant considérablement le nombre de mailles : un écoulement en 3D devient en 2D et un écoulement en 2D devient en 1D. Cette méthode ne s'applique qu'à des écoulements en charge (totalement saturés) ou à des écoulements en zone non saturée. Elle ne s'applique pas à des écoulements avec "nappe à surface libre".

1 - CONDITIONS D'APPLICATION

Cette méthode s'applique en régime permanent ou transitoire pour des écoulements en charge (charge au dessus du toit). Elle s'applique également aux écoulements avec prise en compte de la zone non saturée. Il est possible de l'utiliser également dans les écoulements avec prise en compte de la densité.

2 - PRINCIPE

Maillage

soit le maillage suivant :

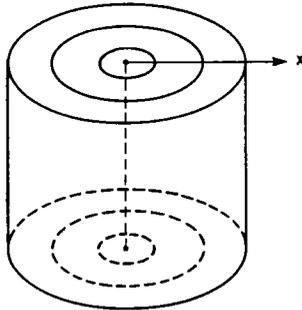


Schéma 1

Il suffit de ne modéliser qu'un secteur d'angle α .

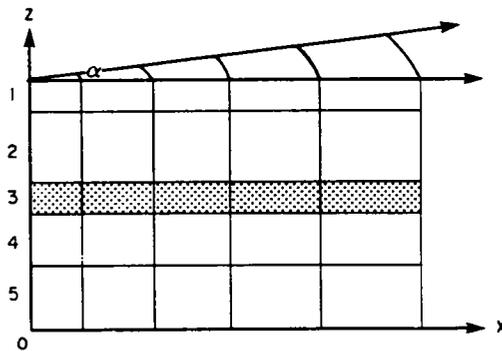


Schéma 2

*Résolution matricielle et nouvelles géométries
dans le logiciel MARTHE (D. THIERY)*

On bascule le maillage sur le plan horizontal.

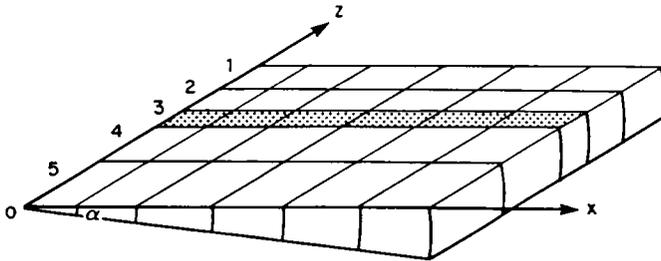


Schéma 3

Soit un plan avec oz qui devient oy :

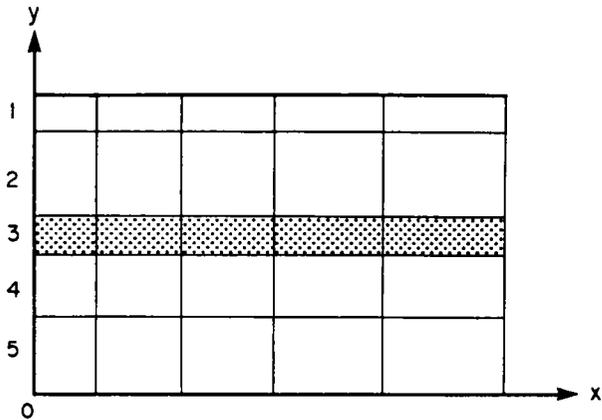


Schéma 4

*Résolution matricielle et nouvelles géométries
dans le logiciel MARTHE (D. THIERY)*

On aboutit ainsi à un maillage rectangulaire à 2D,
mais avec des épaisseurs proportionnelles à l'abscisse x .

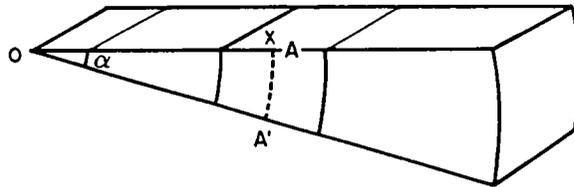


Schéma 5

Épaisseur $E = AA' = x.\alpha$ avec $\alpha =$ angle en radians.

Par discrétisation on obtient le schéma équivalent suivant.

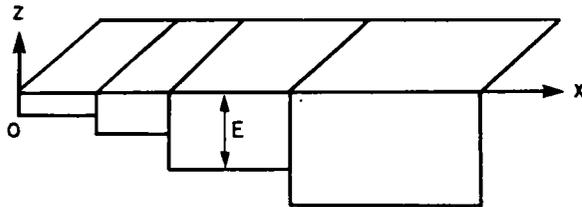


Schéma 6

*Résolution matricielle et nouvelles géométries
dans le logiciel MARTHE (D. THIERY)*

Pour la mise en oeuvre, le plus simple est de considérer un angle $\alpha = 1$ radian (57.3 degrés). Il suffit alors de donner à chaque maille une épaisseur $E = x$.

Débits

Étant donné que la circonférence totale représente 360 °, c'est à dire 2π radians, le secteur représente $1/2\pi$ du maillage total.

S'il y a des débits Q, prélevés ou injectés, on introduira dans la modèle le débit QM correspondant défini par :

$$QM = \frac{1}{2\pi} \cdot Q = 0.15915 \cdot Q$$

Régime transitoire

Si on est en régime transitoire, il faudra obligatoirement utiliser le coefficient d'emmagasinement spécifique S_s (exprimé en $[L^{-1}]$) au lieu du "coefficient d'emmagasinement S des hydrogéologues".

3 - MISE EN OEUVRE PRATIQUE

Il n'y a aucun paramètre particulier à utiliser.

- * Toit et substratum : pour donner une épaisseur égale à l'abscisse x , le plus simple est de définir une cote topographique (toit) égale à zéro partout et de définir un substratum égal à $-x$. On veillera alors à avoir des charges toujours > 0 de façon à être toujours en charge.

Dans le cas contraire, il suffirait de faire un changement de repère :

par exemple : référence substratum = - 100.

- * Épaisseur moyenne de la couche : il n'y a pas d'épaisseur moyenne bien définie. Il suffit par exemple de donner l'épaisseur correspondant à la colonne centrale.
- * Rapport Épaisseur minimale de denoyage : il faut donner une valeur très faible (par exemple 10^{-4} ou 10^{-5}) de telle sorte que ce nombre, multiplié par l'épaisseur moyenne soit très inférieur à l'épaisseur de la première colonne. Pour les versions Marthe 5.2 et suivante il n'y a pas besoin de s'en préoccuper.

*Résolution matricielle et nouvelles géométries
dans le logiciel MARTHE (D. THIERY)*

- * En transitoire préciser : coefficient d'emmagasinement spécifique.
- * Pour un calcul en zone non saturée, versions 5.2 et suivantes, il faudra indiquer que la gravité est dans la direction Oy.

4 - EXEMPLE D'APPLICATION

Exemple 1 : Monocouche

Nappe de 50 m d'épaisseur, perméabilité $K = 10^{-4}$ m/s, coefficient d'emmagasinement $S = 5 \cdot 10^{-2}$, pompage au centre de 2000 m³/h.

Solution

On se ramène à un maillage à 1 dimension, donc 1 seule ligne de mailles de 50 m de hauteur.

$$S_s = 5 \cdot 10^{-2} / 50 \text{ m} = 10^{-3} \text{ m}^{-1}$$

$$QM = 2000 \times 0.15915 = 318.31 \text{ m}^3/\text{h}$$

*Résolution matricielle et nouvelles géométries
dans le logiciel MARTHE (D. THIERY)*

Le maillage est formé d'une ligne de 17 mailles de 50 mètres de largeur. Les figures 1 et 2 présentent le fichier répertoire, le fichier substratum, le fichier pas de temps, le fichier paramètres. La figure 3 montre le profil de charge calculées après 120 h de pompage (en traits interrompus) comparé à la solution de Theis (en trait continu). Il apparaît que l'ajustement est extrêmement bon (excepté pour la première maille puisque le pompage n'est pas situé exactement au même endroit).

Résolution matricielle et nouvelles géométries dans le logiciel MARTHE (D. THIERY)

Fichier répertoire

```

EXEMPLE MAILLAGE CYLINDRIQUE 2D --> 1D (POMPAGE)
MONORADI.PER           =Fichier: PERMEABILITES
=0                     =Fichier: DEBITS
=50                    =Fichier: CHARGES
=10                    =Fichier: EMMAGASINEMENT CAPTIF
=5                     =Fichier: EMMAGASINEMENT LIBRE
=0                     =Fichier: ZONES DE GEOMETRIE
MONORADI.SUB           =Fichier: COTES DU SUBSTRATUM
=0                     =Fichier: ZONES EQUIPOTENTIELLES
=0                     =Fichier: COTES TOPOGRAPHIQUES
=0                     =Fichier: ZONES D'INFILTRATION
=0                     =Fichier: ZONES D'EXCES D'IRRIGATION
=0                     =Fichier: INDEX DE DEBORDEMENT
MONORADI.MAR           =Fichier: SUBSTRATUM EPONTE SUPER.
MONORADI.PAS           =Fichier: PERMEABILITE EPONTE SUPER.
                       =Fichier: PARAMETRES GENERAUX
                       =Fichier: DESCRIPTION PAS DE TEMPS
                       =Fichier: LIAISONS ETANCHES
                       =Fichier: ANISTROPIE HORIZONTALE KX/KY
                       =Fichier: ANISTROPIE VERTICALE KV/KH
    
```

Fichier substratum

```

PANNEAU no 1 / 2 d'un SEMIS de 1 LIGNES par 17 COL; X0= 0 Y0= 0
      25      75      125      175      225      275      325      375      425      475
MAILLAGE RADIAL                                     HSUBS 1
-25 -75 -125 -175 -225 -275 -325 -375 -425 -475 HSUBS 25
PANNEAU no 2 / 2 d'un SEMIS de 1 LIGNES par 17 COL; X0= 0 Y0= 0
      525      575      625      675      725      775      825
MAILLAGE RADIAL                                     HSUBS 1
-525 -575 -625 -675 -725 -775 -825 HSUBS 25
    
```

Fichier pas de temps

```

EXEMPLE MAILLAGE CYLINDRIQUE 2D --> 1D (DEBIT=2000/2PI = 318.31)
*** Debut de la simulation a la date : 12; ***
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 1: se termine a la date : 13; ***
/DEBIT/MAILL C= 1L= 1P= 1V=-318.31;
/CHARG/EDITI I= 2
/DEBIT/EDITI *= 3;V= 0;L= 0
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 2: se termine a la date : 18; ***
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 3: se termine a la date : 24; ***
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 4: se termine a la date : 36; ***
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 5: se termine a la date : 60; ***
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 6: se termine a la date : 108; ***
/***** fin de ce pas
*** Le pas : 7: se termine a la date : 132; ***
/CHARG/EDITI I= 2
/DEBIT/EDITI *= 3;V= 0;L= 0
/***** Fin de ce pas
*** : : Fin de la simulation : ; ***
    
```

**Figure 1 - Exemple 1 cylindrique : fichiers répertoires,
substratum et pas de temps**

Résolution matricielle et nouvelles géométries dans le logiciel MARTHE (D. THIERY)

```

EXEMPLE MAILLAGE CYLINDRIQUE 2D --> 1D (POMPAGE)
*** Editions et controles souhaitees MARTHE 4.4 ***
0=LISTING DETAILLE DE TOUTES LES OPERATIONS ET RESULTATS
0=CONTROLE SUR CONSOLE DE LA LECTURE DES BLOCS DE DONNEES
0=EDITION DE TOUS LES TABLEAUX DE DONNEES LUS (ET DEDUITS)
0=EDITION DES DONNEES DE MAILLES EN FIN DE CALCUL (-1=binnaire)
0=CONTROLE DE LA CONVERGENCE DANS UNE MAILLE PARTICULIERE
0=NUMERO DE LIGNE DE L'EVENTUELLE MAILLE A CONTROLER
0=NUMERO DE COLONNE DE L'EVENTUELLE MAILLE A CONTROLER
0=NUMERO DE COUCHE A CONTROLER [0=MAILLE MAX(DEBIT RESID)]
0=NUMERO DU "DETAIL" DE L'EVENTUELLE MAILLE A CONTROLER
0=NOMBRE D'ITERATIONS FINALES A CONTROLER

*** Dimensions et geometrie ***
30=NOMBRE MAXIMAL DE PAS DE MODELE (peut etre > nombre reel)
15=NOMBRE DE PAS DE CALCUL PAR PAS MODELE (VALEUR STANDARD=1)
1=LECTURE DE COTES TOPOGRAPHIQUES (TOIT SUPERIEUR)

*** Controle de la Resolution ***
20=NOMBRE MAXIMAL D'ITERATIONS PAR PAS DE CALCUL (TRANSITOIRE)
0=NOMBRE MAXIMAL D'ITERATIONS POUR INITIALISATION PERMANENT
5-5=MAXIMUM DE LA VARIATION MOYENNE DE CHARGE ENTRE 2 ITERATIONS
1=COEFF. DE RELAXATION DES CALCULS (1=NORMAL >1 =SUR <1=SOUS)
0=[PARAMETRE SUPPLEMENTAIRE PREVU ... POUR CONVERGENCE]
1-2=RAPPORT = (EPAIS. MINI DENOYAGE) / (EPAIS. MOYENNE COUCHE)
2=MODE RESOLUTION [0=MAILL 1=BANDES 2=DIRECT/CHOLES 3=POLYN]
0=NOMBRE D'ITERATIONS INTERNES SI RESOLUTION DIRECTE (DEF=10)
0=TYPE DE RESOL DIRECTE [0=GLOBAL 1=COUCHES]

*** Unites des donnees ***
1-4=UNITE DES PERMEABILITES DES AQUIF EN M/S
2.7777-4=UNITE DES DEBITS EN M3/S
1=UNITE DES CHARGES EN M
1-4=UNITE DES EMMAGASINEMENTS CAPTIFS EN [-] ou 1/M (0 = PERMA)
1-2=UNITE DES EMMAGASINEMENTS LIBRES EN [-] (0 = PERMA)
1=UNITE DES HAUTEURS D'INFILTRATION EN MM
1=UNITE DES HAUTEURS D'IRRIGATION EN MM
SEC=DUREE DE REFERENCE HAUTEURS INFILT (SEC,MIN,HEU,JOU,MOI,ANN)
HEU=UNITE DE TEMPS (PAS DE MODELE) (SEC,MIN,HEU,JOU,MOI,ANN)
1=UNITE DES COORDONNEES DES MAILLES EN M
1=COEFFICIENT D'ANISOTROPIE VERTICALE KV/KH PERMEABILITES
1=COEFFICIENT D'ANISOTROPIE HORIZONTALE KX/KY PERMEABILITES
1=EMMAGASIN. CAPTIF LUS (1=SPECIF. 0=TOUTES CHES -1=PAR COU)

*** Point origine des donnees ***
0=REFERENCE DES CHARGES (CHARGES MODELE=CHARGES LU + REF)
0=REFERENCE DU SUBSTRATUM (SUBSTR. MODELE=SUBSTR. LU + REF)
0=EPAISSEUR EVENTUELLE DE LA TRANCHE DE COUPE (DEFAULT=0)

*** Description des couches aquiferes ***
COU= 1;EPAIS= 50;EPON SUP =0;EMMAG EPON= 0;UNI KE= 1;ANISOT= 0

*** Mailles a Historiques ***
/CHARG/HISTO C= 15L= 1P= 1;C= 10L= 1P= 1;C= 12L= 1P= 1;C= 1L= 1P= 1;
/DEBIT/HISTO C= 15L= 1P= 1;C= 10L= 1P= 1;C= 12L= 1P= 1;C= 1L= 1P= 1;

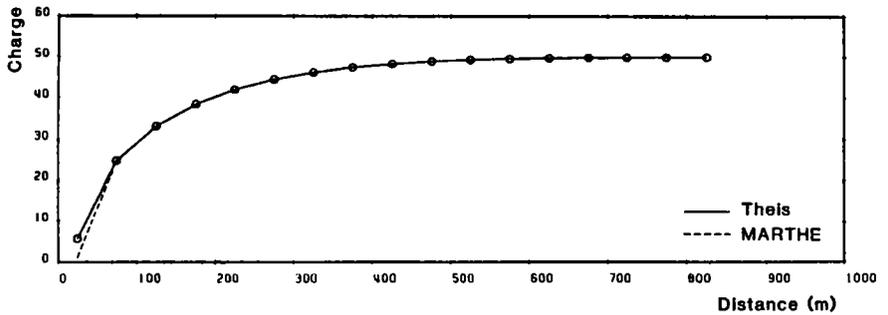
*** Options supplementaires (3) (pour accessoires) ***
0=[Option supplementaire 1]
0=[Option supplementaire 2]
0=[Option supplementaire 3]

*** Initialisation avant calculs ***
/*****/***** Fin d'Initialisation
*** Fin fichier Generalites ***

```

Figure 2 - Exemple 1 cylindrique : fichier paramètre

*Résolution matricielle et nouvelles géométries
dans le logiciel MARTHE (D. THIERY)*



**Figure 3 - Exemple 1 cylindrique : profil de charge après
120 heures de pompage**

*Résolution matricielle et nouvelles géométries
dans le logiciel MARTHE (D. THIERY)*

Exemple 2 :

Forage à pénétration partielle (3D). Il s'agit d'un aquifère de 40 mètres d'épaisseur (4000 cm) avec un forage pénétrant de 20 mètres, qui est modélisé par une zone équipotentielle.

Le maillage est formé de 16 lignes de 2.5 mètres de haut et de 18 colonnes de largeurs augmentant régulièrement de 10 cm à 25 mètres. La figure 4 montre le fichier paramètres, la figure 5, le fichier substratum et la figure 6, les charges calculées en régime permanent de 0 à 80 mètres de distance avec visualisation des vitesses.

Résolution matricielle et nouvelles géométries dans le logiciel MARTHE (D. THIERY)

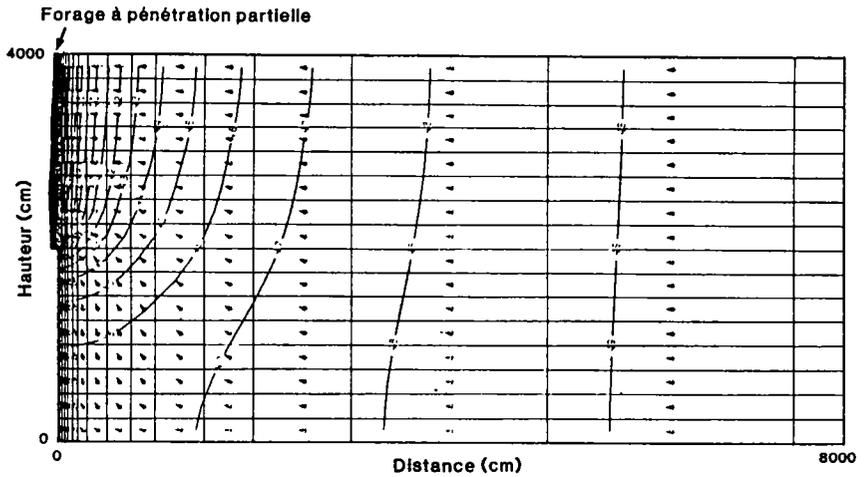
```

EXEMPLE MAILLAGE CYLINDRIQUE 3D --> 2D (POMPAGE PENETRATION PARTIELLE)
*** Editions et controles souhaitees MARTHE 4.4 ***
0=LISTING DETAILLE DE TOUTES LES OPERATIONS ET RESULTATS
0=CONTROLE SUR CONSOLE DE LA LECTURE DES BLOCS DE DONNEES
1=EDITION DE TOUS LES TABLEAUX DE DONNEES LUS (ET DEDUITS)
0=EDITION DES DONNEES DE MAILLES EN FIN DE CALCUL (-1=Binaire)
0=CONTROLE DE LA CONVERGENCE DANS UNE MAILLE PARTICULIERE
0=NUMERO DE LIGNE DE L'EVENTUELLE MAILLE A CONTROLER
0=NUMERO DE COLONNE DE L'EVENTUELLE MAILLE A CONTROLER
0=NUMERO DE COUCHE A CONTROLER [0=MAILLE MAX(DEBIT RESID)]
0=NUMERO DU "DETAIL" DE L'EVENTUELLE MAILLE A CONTROLER
0=OMBRE D'ITERATIONS FINALES A CONTROLER
*** Dimensions et geometrie ***
0=NOMBRE MAXIMAL DE PAS DE MODELE (peut etre > nombre reel)
1=NOMBRE DE PAS DE CALCUL PAR PAS MODELE (VALEUR STANDARD=1)
1=LECTURE DE COTES TOPOGRAPHIQUES (TOIT SUPERIEUR)
*** Controle de la Resolution ***
0=NOMBRE MAXIMAL D'ITERATIONS PAR PAS DE CALCUL (TRANSITOIRE)
80=NOMBRE MAXIMAL D'ITERATIONS POUR INITIALISATION PERMANENT
5-5=MAXIMUM DE LA VARIATION MOYENNE DE CHARGE ENTRE 2 ITERATIONS
1.6=COEFF. DE RELAXATION DES CALCULS (1=NORMAL >1 =SUR <1=SOUS)
0=(PARAMETRE SUPPLEMENTAIRE PREVU ... POUR CONVERGENCE)
1-2=RAPPORT = (EPAIS. MINI DENOYAGE) / (EPAIS. MOYENNE COUCHE)
2=MODE RESOLUTION [0=MAILL 1=/BANDES 2=DIRECT/CHOLES 3=POLYN]
0=NOMBRE D'ITERATIONS INTERNES SI RESOLUTION DIRECTE [DEF=10]
0=TYPE DE RESOL DIRECTE [0=GLOBAL 1=/COUCHES]
*** Unites des donnees ***
1-4=UNITE DES PERMEABILITES DES AQUIF EN M/S
2.7777-7=UNITE DES DEBITS EN M3/S
1-2=UNITE DES CHARGES EN M
0=UNITE DES EMMAGASINEMENTS CAPTIFS EN [-] ou 1/M (0 = PERMA)
0=UNITE DES EMMAGASINEMENTS LIBRES EN [-] (0 = PERMA)
1=UNITE DES HAUTEURS D'INFILTRATION EN MM
1=UNITE DES HAUTEURS D'IRRIGATION EN MM
SEC=DUREE DE REFERENCE HAUTEURS INFILT (SEC,MIN,HEU,JOU,MOI,ANN)
HEU=UNITE DE TEMPS (PAS DE MODELE) (SEC,MIN,HEU,JOU,MOI,ANN)
1-2=UNITE DES COORDONNEES DES MAILLES EN M
1=COEFFICIENT D'ANISOTROPIE VERTICALE KV/KH PERMEABILITES
1=COEFFICIENT D'ANISOTROPIE HORIZONTALE KX/KY PERMEABILITES
1=EMMAGASIN. CAPTIF LUS (1=SPECIF. 0=TOUTES CHES -1=PAR COU)
*** Point origine des donnees ***
0=REFERENCE DES CHARGES (CHARGES MODELE=CHARGES LU + REF)
0=REFERENCE DU SUBSTRATUM (SUBSTR. MODELE=SUBSTR. LU + REF)
0=EPAISSEUR EVENTUELLE DE LA TRANCHE DE COUPE (DEFAULT=0)
*** Description des couches aquiferes ***
COU= 1;EPAIS= 1000;EPON SUP =0;EMMAG EPON= 0;UNI KE= 1;ANISOT= 0
*** Mailles a Historiques ***
/CHARG/HISTO C= 15L= 1P= 1;C= 10L= 1P= 1;C= 12L= 1P= 1;C= 1L= 1P= 1;
/DEBIT/HISTO C= 15L= 1P= 1;C= 10L= 1P= 1;C= 12L= 1P= 1;C= 1L= 1P= 1;
*** Options supplementaires (3) (pour accessoires) ***
0=[Option supplementaire 1]
0=[Option supplementaire 2]
0=[Option supplementaire 3]
*** Initialisation avant calculs ***
/EQUIP/MAILL C= 1L= 1P= 1V= 1;C= 1L= 2P= 1V= 1;
/EQUIP/MAILL C= 1L= 3P= 1V= 1;C= 1L= 4P= 1V= 1;
/EQUIP/MAILL C= 1L= 5P= 1V= 1;C= 1L= 6P= 1V= 1;
/EQUIP/MAILL C= 1L= 7P= 1V= 1;C= 1L= 8P= 1V= 1;
/DEBIT/MAILL C= 1L= 1P= 1V=-318.31;
/DEBIT/MAILL C= 18L=999P= 1V= 9999;
/CHARG/EDITI I= 2
/DEBIT/EDITI *= 3;V= 0;L= 0
/***** Fin d'Initialisation
*** Fin fichier Generalites ***

```

**Figure 4 - Exemple 2 cylindrique 3D → 2D :
Fichier paramètre**

*Résolution matricielle et nouvelles géométries
dans le logiciel MARTHE (D. THIERY)*



**Figure 6 - Exemple 2 : Forage à pénétration partielle :
isovaleurs de charges (et vitesses)**