

Didacticiel du code de calcul Marthe v7.0

Votre premier modèle

Rapport final

BRGM/RP-58632-FR

Mai 2010

Dominique THIÉRY



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Didacticiel du code de calcul Marthe v7.0

Votre premier modèle

Rapport final

BRGM/RP-58632-FR
Mai 2010

Dominique Thiéry

Vérifié par :

Nom : Y. Barthélemy

Date : 28/05/2010



Approuvé par :

Nom : S. Lallier

Date : 31/05/2010

Mots clés : Code de calcul MARTHE, Didacticiel, Pré processeur, Manuel d'utilisation, WinMarthe

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Thiéry D. (2010) - Didacticiel du code de calcul Marthe v7.0. Votre premier modèle. Rapport BRGM/RP-58632-FR.

Synthèse

Le code de calcul MARTHE (**M**odélisation d'**A**quifères par maillage **R**ectangulaire en régime **T**ransitoire pour le calcul **H**ydrodynamique des **E**coulements) du BRGM permet le calcul des écoulements de fluides et de transferts de masse et d'énergie en milieux poreux tridimensionnels. Les schémas peuvent être simples ou complexes (zone non saturée, écoulements multiphasiques, prise en compte de la densité du fluide, prise en compte de la végétation, interaction avec des cours d'eau, etc.). La mise en œuvre de ces différentes fonctionnalités est décrite par Thiéry (1990a et b, 1993, 1994, 1995a et b, 2004, 2006, 2007a, 2007b), Thiéry et Golaz (2002), Thiéry et al. (2002).

L'objet de ce rapport est de présenter, d'explorer et de mettre en œuvre la plupart des fonctionnalités du code de calcul Marthe version 7.0c sous forme d'un didacticiel appliqué à un certain nombre d'exemples de difficultés croissantes. Ce didacticiel a pour but de permettre à l'utilisateur une première prise en main autonome du code de calcul, éventuellement en amont d'une formation sur les fonctionnalités avancées sous forme de stages organisés. La présentation des fonctionnalités du code MARTHE *sensu stricto* (le moteur de calculs) n'est pas l'objet de ce didacticiel. Elle fait l'objet de rapports spécifiques décrits dans la liste des références bibliographiques.

Le rapport « Didacticiel du pré-processeur WinMarthe v4.0. Rapport final. BRGM/RP-54652-FR » (Thiéry 2006) présente en détail le pré-processeur WinMarthe.

Sommaire

1.	Introduction	9
2.	Description du premier exemple d'application	11
3.	Définition du maillage.....	13
4.	Définition des paramètres pour le calcul de l'hydrodynamique.....	17
5.	Lancement du calcul et examen des résultats	27
6.	Simulation du transfert de masse	33
7.	Lancement du calcul de transport et examen des résultats	41
8.	Insertion d'un maillage gigogne	49
9.	Calage automatique des paramètres	53
10.	Écoulement sous un barrage.....	59
11.	Écoulement à surface libre à travers un barrage avec surface de suintement	63
12.	Simulation fine en radial d'une remontée de la surface libre résultant d'une recharge locale à travers la zone non saturée	67
13.	Écoulement avec effets de densité à proximité de la mer : Biseau salé de Henry	71
14.	Simulation d'un doublet géothermique	79
15.	Écoulement à travers la Zone Non Saturée sous un cours d'eau	85
16.	Écoulement à travers la Zone Non Saturée en milieu hétérogène à surfaces libres multiples.....	91
17.	Aquifère côtier avec intrusion saline	97
18.	Annexe	103
19.	Bibliographie	111

Liste des illustrations

Figure 1 – Vue 3D du système à modéliser	11
Figure 2 - Boîte de dialogue de création du maillage.....	13
Figure 3 - Boîte de dialogue de sélection d'un paramètre.....	14
Figure 4 – Visualisation en coupe des épaisseurs.....	15
Figure 5 – Menu des paramètres non maillés.....	19
Figure 6 – Menu du fichier des paramètres généraux.....	20
Figure 7 – Affectation d'une recharge de 252.46 mm/an dans la zone de sol n°1.....	22
Figure 8 – Recherche de l'objet « Anisotropie verticale ».....	23
Figure 9 – Affectation d'une anisotropie verticale égale à 500 dans les 3 couches de la maille de pompage.....	24
Figure 10 – Sélection du fichier des départs de trajectoires.....	25
Figure 11 – Définition des départs de trajectoires.....	25
Figure 12 – Bilan global des 3 couches.....	27
Figure 13 – Débits échangés entre les 3 couches.....	28
Figure 14 – Champ des charges calculées (couche n°1).....	29
Figure 15 – Champ des charges calculées (couche n°1).....	29
Figure 16 – Isovaleurs des charges calculées (couche n°1).....	30
Figure 17 – Trajectoires (régime permanent).....	31
Figure 18 – Trajectoires pendant une durée de 100 jours.....	31
Figure 19 – Création d'une modification au pas de temps n°1.....	35
Figure 20 – Définition du Débit Massique Concentration au pas de temps n°1.....	35
Figure 21 – Définition de la valeur du Débit Massique Concentration au pas de temps n°1.....	36
Figure 22 – Changement de pas de temps.....	37
Figure 23 – Définition des mailles à historiques.....	37
Figure 24 – Type de définition d'un historique.....	38
Figure 25 – Définition des coordonnées d'un emplacement d'historique.....	38
Figure 26 – Fichier «Mailles à Historiques ».....	39
Figure 27 – Bilan de masse cumulé après 3 ans.....	41
Figure 28 – Choix du paramètre et du pas de temps.....	42
Figure 29 – Concentrations après 3 ans dans la couche n°3.....	43
Figure 30 – Isovaleurs des concentrations après 3 ans dans la couche n°3.....	43
Figure 31 – Concentrations après 3 ans en coupe verticale dans l'axe du puits.....	43

Figure 32 – Évolution temporelle des concentrations dans les 6 points à historiques.....	44
Figure 33 – Concentrations après 3 ans dans la couche n°3, Méthode MOC.....	45
Figure 34 – Évolution temporelle des concentrations dans les 6 points à historiques. Méthode MOC.....	45
Figure 35 – Définition de la Concentration de la Recharge au pas de temps n°1.....	47
Figure 36 – Définition de l'extension du maillage gigogne.....	50
Figure 37 – Définition des dimensions des sous-colonnes et sous-lignes.....	50
Figure 38 – Sous-maillage gigogne au voisinage du puits de pompage.....	51
Figure 39 – Départs de trajectoires inverses à partir du puits.....	52
Figure 40 – Isovaleurs et lignes de courant : calcul avec un sous-maillage gigogne au voisinage du puits de pompage.....	52
Figure 41 – Choix des variables à optimiser.....	56
Figure 42– Paramètres de la perméabilités de la zone n°3.....	57
Figure 43 – Mise à jour du fichier Projet Optimisation.....	58
Figure 44 – Définition des départs de trajectoires sous le barrage.....	60
Figure 45 – Écoulement sous un barrage : équipotentielles (en bleu) et lignes de courant (en rouge).....	61
Figure 46 – Écoulement à surface libre à travers un barrage avec surface de suintement.....	65
Figure 47 – Remontée de la surface libre : régime permanent.....	69
Figure 48 – Remontée de la surface libre : régime transitoire.....	70
Figure 49 – Champ de Salinité calculée.....	76
Figure 50 – Champ de Charges réelles calculées.....	76
Figure 51 – Champ de Salinité calculée après 15 minutes.....	78
Figure 52 – Champ de Salinité calculée après 80 minutes.....	78
Figure 53 – Vue en plan de la température dans l'aquifère après 17.5 et 35 ans.....	82
Figure 54 – Vue en coupe verticale de la température dans l'aquifère et les épontes après 35 ans.....	82
Figure 55 – Vue en plan de la température dans l'aquifère après 17.5 et 35 ans en supposant des épontes adiabatiques.....	83
Figure 56 – Évolution de la température au puits de pompage (avec ou sans prise en compte des épontes, avec ou sans écoulement régional).....	83
Figure 57 – Profil de teneur en eau après 10 h, 50 h, 100 h et 300 h (maillage de 0.5 m).....	88
Figure 58 – Profil de teneur en eau après 10 h, 50 h, 100 h et 300 h (maillage de 0.125 m).....	88
Figure 59 – Évolution au cours du temps de la surface libre (pression = 0).....	88
Figure 60 – Profil de teneur en eau après 100 h : à gauche canal, à droite bassin circulaire.....	89

Figure 61 – Concentration après 300 h : à gauche : avec dispersivité, à droite sans dispersivité.	90
Figure 62 – Écoulement en zone non saturée dans un milieu hétérogène.	91
Figure 63 – Teneurs en eaux. La ligne noire représente la limite de pression nulle, donc la surface libre.	95
Figure 64 – Champ des charges et isovaleurs tous les 1 m de charge.	95
Figure 65 – À gauche : charges d'eau douce. À droite : altitude de l'interface salée.	100
Figure 66 – Vue en coupe Ouest-Est de l'altitude de l'interface salée (ordonnée = 0 km).	100
Figure 67 – Altitude de l'interface salée à t=0, t=50 ans et t=300 ans.	102
Figure 68 - Fenêtre principale du préprocesseur graphique WinMarthe.	103

Liste des tableaux

Tableau 1- Calage automatique de 4 paramètres hydrauliques et hydrodispersifs.	58
---	----

1. Introduction

Le code de calcul MARTHE (**M**odélisation d'**A**quifères par maillage **R**ectangulaire en régime **T**ransitoire pour le calcul **H**ydrodynamique des **E**coulements) du BRGM permet le calcul des écoulements de fluides et de transferts de masse et d'énergie en milieux poreux tridimensionnels avec une approche en volumes finis. Les schémas peuvent être simples ou complexes (zone non saturée, écoulements multiphasiques, prise en compte de la densité du fluide, prise en compte de la végétation, interaction avec des cours d'eau, transferts d'énergie, etc.). La mise en œuvre de ces différentes fonctionnalités est décrite par Thiéry (1990a et b, 1993, 1994, 1995a et b, 2004, 2006, 2007a, 2007b), Thiéry et Golaz (2002), Thiéry et al. (2002). Cette schématisation en volumes finis fait intervenir des mailles organisées en couches empilées, chaque couche étant formée de mailles organisées en lignes et colonnes (comme dans un tableur).

L'objet de ce rapport est de présenter, d'explorer et de mettre en œuvre la plupart des fonctionnalités du code de calcul Marthe version 7.0c sous forme d'un didacticiel appliqué à un certain nombre d'exemples de difficultés croissantes. Ce didacticiel a pour but de permettre à l'utilisateur une première prise en main autonome du code de calcul, éventuellement en amont d'une formation sur les fonctionnalités avancées sous forme de stages organisés. La présentation des fonctionnalités du code MARTHE *sensu stricto* (le moteur de calculs) n'est pas l'objet de ce didacticiel. Elle fait l'objet de rapports spécifiques décrits dans la liste des références bibliographiques.

Le rapport « Didacticiel du pré-processeur WinMarthe v4.0. Rapport final. BRGM/RP-54652-FR » (Thiéry 2006) présente en détail le pré-processeur WinMarthe.

2. Description du premier exemple d'application

L'exemple à modéliser est un système aquifère formé de 2 formations géologiques superposées. Les limites nord et sud sont imperméables et les limites ouest et est sont limitées par chacune par une rivière qui impose son potentiel à la nappe. Les charges imposées sur les limites ouest et est sont respectivement de 9 mètres et 8 mètres au dessus d'un niveau de référence (par exemple le niveau de la mer). L'extension du Nord au Sud est de 600 m, la distance entre les deux rivières est de 580 mètres de l'Ouest à l'Est. La nappe est libre et chacune des deux formations est homogène. Les perméabilités (horizontales) des deux formations sont respectivement, de haut en bas, de $1 \cdot 10^{-4}$ m/s et $5 \cdot 10^{-4}$ m/s. Chaque formation est anisotrope : la perméabilité verticale est égale au 1/10 de la perméabilité horizontale. La porosité efficace est égale à 25 %. Les épaisseurs des deux formations sont respectivement de 4 m et 6 m, et le toit de la première formation est horizontal, à l'altitude 10 m. L'aquifère est alimenté par une recharge constante de 252.46 mm/an, soit $8 \cdot 10^{-9}$ m/s. Une zone de contamination est située dans l'aquifère supérieur, près de la limite ouest, dans un rectangle compris entre les abscisses 100 m et 220 m, et les ordonnées 240 m et 380 m. Le but du modèle est d'isoler le zone contaminée en utilisant un puits traversant totalement les deux formations, situé au point de coordonnées 490 m, 310 m. (Figure 1).

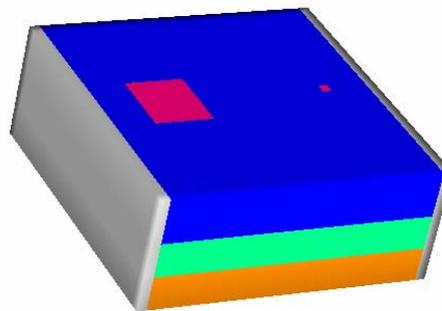


Figure 1 – Vue 3D du système à modéliser

Les paramètres relatifs au transport de pollution sont les suivants : on suppose que la pollution libère $1 \cdot 10^{-4}$ $\mu\text{g/s/m}^2$, (ou 262.98 $\mu\text{g/mois/m}^2$). Compte tenu de la recharge de $8 \cdot 10^{-9}$ m/s la pollution correspond à une concentration égale à $1 \cdot 10^{-4}$ $[\mu\text{g/s/m}^2] / 8 \cdot 10^{-9}$ m/s = $1.25 \cdot 10^4$ $[\mu\text{g/m}^3]$. Les dispersivités longitudinales et transversales sont respectivement de 10 m et 1 m, le coefficient de retard est égal à 2, le coefficient de diffusion moléculaire et la constante de demi-dégradation sont considérés comme égaux à 0. La concentration initiale dans les aquifères est égale à 0, ainsi que la concentration provenant de la recharge et des rivières. L'évolution de la concentration sera calculée pendant 3 ans, et on examinera en particulier les variations de concentrations en deux points P1 et P2 situés respectivement aux coordonnées (290 m, 310 m) et (390 m, 310 m) dans chacune des formations.

En résumé les caractéristiques du site sont les suivantes :

Géométrie

- Deux formations d'épaisseurs 4 m et 6 m (de haut en bas)
- Extension latérale : 580 m de l'Ouest à l'Est et 600 m du Sud au Nord
- Limites sud et nord étanches
- Limites ouest : charge imposée à +9 m ; limite est : charge imposée à +8 m

Caractéristiques hydrodynamiques et alimentation

- Perméabilités des formations : $1 \cdot 10^{-4}$ m/s et $5 \cdot 10^{-4}$ m/s
- Anisotropie verticale (K_v / K_h) : 1/10
- Porosité : 25 %
- Recharge : 252.46 mm/an, soit $8 \cdot 10^{-9}$ m/s.
- Pompage traversant les 2 formations situé en (490 m, 310 m)
- Régime hydraulique permanent

Caractéristique du transport

- Zone contaminée dans rectangle : $[100 \text{ m} < x < 220 \text{ m}]$, et $[240 \text{ m} < y < 380 \text{ m}]$
- Concentration de la contamination : $1.25 \cdot 10^{+4} \mu\text{g}/\text{m}^3$, soit un flux massique de $1 \cdot 10^{-4} \mu\text{g}/\text{s}/\text{m}^2$ (ou $262.98 \mu\text{g}/\text{mois}/\text{m}^2$).
- Dispersivité longitudinale et transversale : 10 m et 1 m
- Coefficient de retard : 2
- Calcul des concentrations pendant 3 ans et examen de l'évolution aux points de coordonnées (290, 310) et (390, 310).

Discrétisation

Pour la simulation de cet exemple on va considérer un ensemble de mailles carrées égales de 20 mètres de côté et la formation inférieure, de 6 mètres d'épaisseur, sera découpée en deux couches de modèles identiques de 3 m d'épaisseur, pour mieux représenter les écoulements sur la verticale. Le système sera donc modélisé par un ensemble de 3 couches aquifères.

3. Définition du maillage

3.1. CRÉATION DU MAILLAGE

Créer un dossier, par exemple de nom « Didactic » pour ce projet, mais ce n'est pas nécessaire, car un nouveau dossier peut être créé en définissant un nouveau projet dans WinMarthe.

Puis double-cliquer sur l'icône  pour ouvrir WinMarthe, puis cliquer sur l'icône  ou bien sur **Fichier → Nouveau**

WinMarthe demande alors un nom de fichier pour le projet à créer : on donne par exemple le nom **Didact2** (dans le dossier **Didactic**), on voit alors apparaître une boîte de dialogue pour la définition du maillage à créer (Figure 2) :

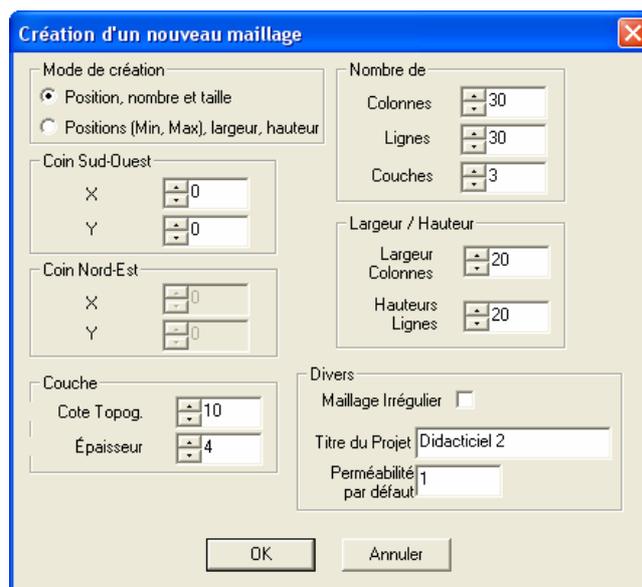


Figure 2 - Boîte de dialogue de création du maillage.

On introduit les données suivantes :

- Titre du projet : **Didacticiel 2** ;
- Valeur par défaut = **1** (c'est-à-dire **perméabilité** uniforme = 1) ;
- Coin Sud Ouest : X = **0** Y = **0** ;
- Coin Nord Est : X = **+600** Y = **+600** ;
- Largeur des colonnes = **20** ; Hauteur des lignes = **20** ;

ou bien :

- Coin Sud Ouest : $X = 0$ $Y = 0$;
- Nombre de colonnes = **30** ; Nombre de lignes = **30** ;
- Largeur des colonnes = **20** ; Hauteur des lignes = **20** ;

puis :

- Cote topog. = **10** c'est-à-dire « topographie = 10 » ;
- Épaisseur = **4**. L'épaisseur (de chaque couche) est égale à 4 (mètres), le substratum de la première couche sera donc à la cote 6 (mètres).
- Cliquer sur **OK** : le maillage régulier est généré et se dessine à l'écran.

Le fichier projet *Didact2.rma* est généré ainsi que les fichiers de Perméabilité (*Didact2.permh*), de Topographie (*Didact2.topog*), de Substratum (*Didact2.hsubs*) et de Couches (*Didact2.layer*).

N.B. : Pour créer un maillage irrégulier il aurait fallu cocher « maillage irrégulier » dans le cadre « Divers ». Les informations sur les coordonnées des coins ou le nombre de mailles n'auraient pas été nécessaires. Elles auraient pu être redéfinies dans les menus suivants.

3.2. DÉFINITION DES ÉPAISSEURS

La première couche est bien définie : toit (« Topographie ») à +10 m, et substratum à +6 m. Pour définir les paramètres des autres couches :

On sélectionne le champ des Substratums (« Choix paramètre F3 ») sur la barre du haut), ce qui fait apparaître la boîte de dialogue de la Figure 3.

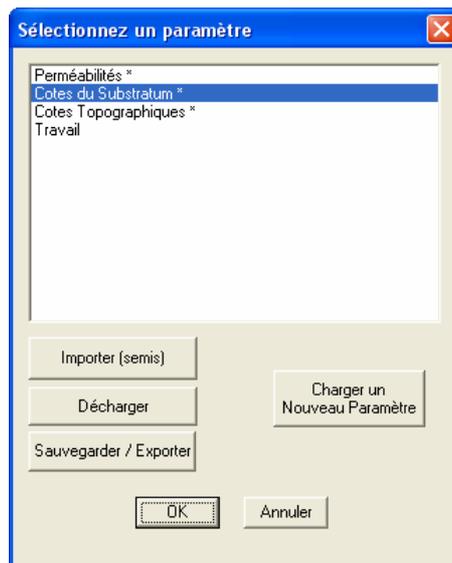


Figure 3 - Boîte de dialogue de sélection d'un paramètre.

On choisit le champ « Cotes du Substratum » puis on actionne l'icône  de « sélection par couche » (barre du bas). On utilise alors les flèches de déplacement  sur cette même barre pour passer à la couche n°2. On double clique dans le maillage. Comme on vient de choisir l'icône  de « sélection par couche », toutes les mailles de cette couche sont sélectionnées. Elles apparaissent en rouge. On utilise alors l'icône  « Affecte une valeur aux mailles sélectionnées » : on donne la valeur **3** qui est la cote du substratum de la 2^{ème} couche (les mailles sont alors désélectionnées automatiquement). On fait ensuite apparaître la couche n°3, et de la même manière on sélectionne toutes les mailles et on leur donne la valeur 0 qui est la cote du substratum de cette 3^{ème} couche. En cliquant sur l'icône  en forme de bâtons « Visualiser en coupe verticale style modèle » de la barre de gauche, on peut vérifier en coupe que la géométrie est bien définie, Figure 4. (On retourne à la vue en plan par l'icône  = « Visualisation en plan »).

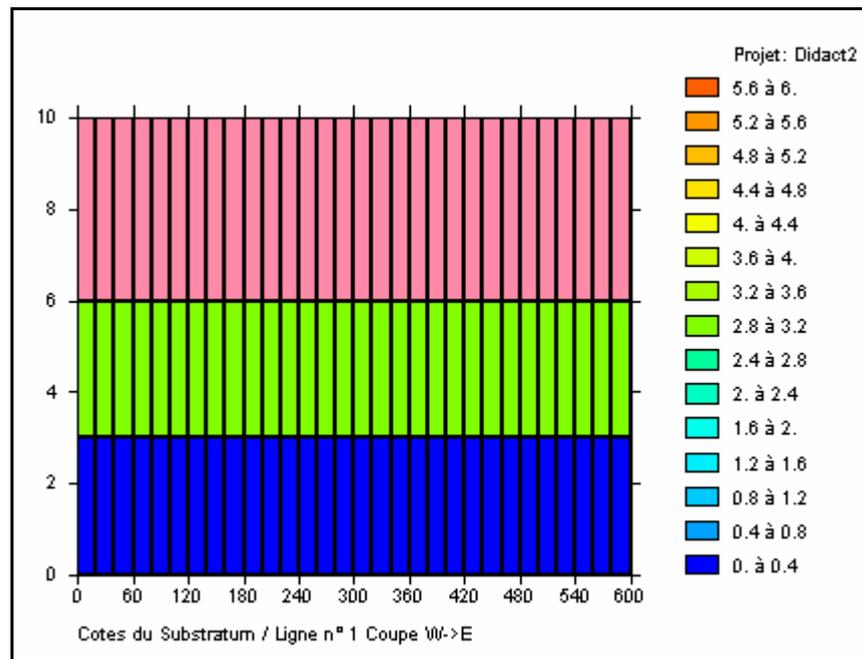


Figure 4 – Visualisation en coupe des épaisseurs.

Il convient de noter que dans le code Marthe, contrairement à d'autres logiciels, il n'y a pas de notion de « couches captives » ou de « couche à surface libre », ou de « couches convertibles ». Chaque maille peut à tout moment être devenir libre, captive ou dénoyée.

4. Définition des paramètres pour le calcul de l'hydrodynamique

4.1. DÉFINITION DES LIMITES À CHARGE IMPOSÉE

Pour définir une limite étanche, en bordure du modèle, il n'y a rien à faire, car c'est bien évidemment l'option par défaut. Pour fixer une limite à charge imposée (appelée aussi « à potentiel imposé »), il suffit d'affecter un débit codé à la valeur 9999 sur les mailles de cette limite. On procède donc comme suit :

On sélectionne le champ des Substratums (« Choix paramètre F3 » sur la barre du haut), puis on clique sur le bouton « Charger un nouveau paramètre », on désigne « Débits d'eau » et on accepte la création de ce nouveau paramètre.

Pour affecter les valeurs 9999., on utilise le bouton  « Sélection par colonne » (situé sur la barre du bas). On double-clique sur la colonne n°1 (à gauche). La colonne est sélectionnée (dans toutes les couches) et elle se colore en rouge. Par l'icône , on lui affecte la valeur = 9999. Cette colonne se colore en gris, car la valeur 9999 est une valeur « code ». On fait la même chose sur la colonne de droite (colonne n°30).

Il faut maintenant affecter la valeur des charges qui sont imposées. Pour cela on crée le champ des charges (« Choix paramètre F3 » → « Charger un nouveau paramètre », puis on désigne « Charges » et on accepte la création). On affecte la valeur initiale égale à 8 mètres. Dans ce but on utilise l'icône  « Sélectionner tout » et on double-clique dans le domaine => Toutes les mailles sont sélectionnées (et colorées en rouge). Par l'icône , on leur affecte la valeur = 8. On sélectionne ensuite la colonne n°1 et on lui affecte la valeur = 9 mètres.

4.2. DÉFINITION DES AUTRES CHAMPS

4.2.1. Débit de pompage

On affecte le débit de pompage (donc négatif) égal à $-12 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ au point de coordonnées 490 m, 310 m. On va affecter ce débit dans la couche n°3, et on montrera comment faire en sorte que ce débit se répartisse correctement dans les 3 couches.

On re-sélectionne le champ des débits (« Choix paramètre F3 » → « Débits d'eau »). On se positionne alors dans la maille de coordonnées 490 m, 310 m de la couche n°3.

Pour cela on utilise, sur la barre du haut, le menu « Outils » → « Aller à x/y/couche » et on fixe $x=490$, $y=310$, couche=3. On valide : la maille (Col=25, Lign=15, Couche=3)

se colore en rouge. On lui donne alors la valeur -12 par l'icône . On rentre -12 , et non pas -0.0012 , car il sera plus agréable et plus lisible de fixer que les débits sont en $10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, c'est-à-dire que l'unité des débits est 10^{-4} .

4.2.2. Perméabilités

On sélectionne le champ des perméabilités (« Choix paramètre F3 » → « Perméabilités »). Et de la même manière qu'on avait défini les substratums, on

sélectionne la couche n°1 (c'est la couche supérieure), on active l'icône  de « sélection par couche », on double-clique dans le domaine => Toutes les mailles de la

couche sont sélectionnées. Par l'icône , on leur affecte la valeur = 1. On rentre « 1 », et non pas 0.0001, car il sera plus agréable et plus lisible de fixer que les perméabilités sont en 10^{-4} m/s , c'est-à-dire que l'unité des perméabilités est 10^{-4} . Il est utile de noter que MARTHE offre la souplesse de définir des unités indépendantes pour les débits, les perméabilités, les charges, les coordonnées horizontales. Il n'est aucunement nécessaire d'avoir un système cohérent. Par exemple on peut avoir des perméabilités en 10^{-4} m/s , des débits en m^3/h , des charges en cm, des coordonnées horizontales en km, et des temps en jours.

On se place alors dans la couche n°2, en utilisant l'icône «  » située sur la barre du bas, on double-clique dans le domaine => Toutes les mailles de la couche n°2 sont sélectionnées. On leur affecte la valeur = 5. Puis on sélectionne la couche n°3 et on lui affecte de la même manière la valeur 5.

4.2.3. Champs uniformes : porosité, zones de recharge

On procède comme précédemment pour définir ces champs uniformes. (« Choix paramètre F3 » → « Charger un nouveau paramètre » → « Porosité »). On définit alors une valeur égale à 25 (%) dans tout le domaine. Puis on crée le champ « Zones de sol, Pluie, ETP, Infiltration » et on affecte à tout le domaine la valeur 1 pour affecter à toutes les mailles le numéro de zone 1. En fait, seules les mailles qui affleurent, ici les mailles de la couche n°1 seront concernées. Il convient de noter que Marthe offre la souplesse très importante de permettre à certaines couches de disparaître (couches qui se biseautent, permettant des courts-circuits, et permettant par exemple à la couche n°2 ou n°3 d'affleurer).

La valeur de la recharge affectée à cette zone n°1 sera affectée ultérieurement, car le paramètre « recharge » ne peut pas, en utilisation classique, être affecté par maille, mais par zone.

A ce stade il est conseillé de sauvegarder les données introduites dans le modèle, en activant l'icône . Il est conseillé de faire cette opération régulièrement, car il n'y a pas de fonction « Undo » pour annuler une opération erronée. Quand on sauvegarde les données, les symboles « * » placés à côté des champs modifiés, ainsi que le symbole « * » situé dans la barre de titre disparaissent. Les fichiers de débits et limites (*Didact2.debit*) et de charges initiales (*Didact2.charg*) sont créés. En revanche, les fichiers de porosité (*Didact2.poros*) et de Zones de recharge (*Didact2.zonep*) ne sont pas créés car ils sont uniformes. Leurs noms apparaissent respectivement sous la forme « =25 » et « =1 » dans le fichier projet *Didact2.rma*.

4.3. DÉFINITION DES PARAMÈTRES NON MAILLÉS

On accède aux paramètres de modélisation non maillés par l'icône  située sur la première barre du bas. On voit alors apparaître le menu général représenté sur la Figure 5.

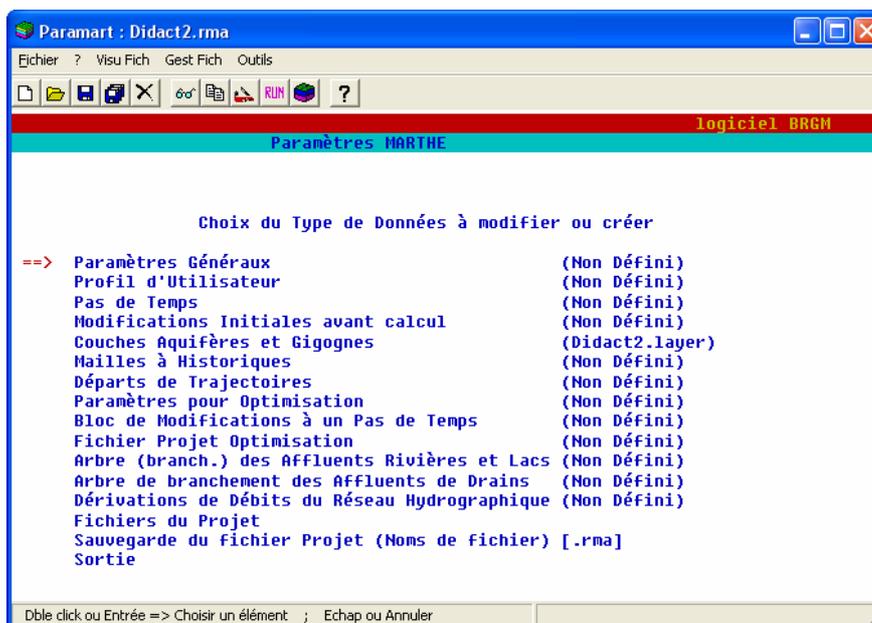


Figure 5 – Menu des paramètres non maillés.

4.3.1. Profil d'utilisateur

Le fichier « Profil d'utilisateur » permet de fixer le type de modélisation de façon à appliquer un masque sur les paramètres et fichiers qui n'auront *a priori* pas besoin d'être définis par l'utilisateur. Ce fichier est facultatif ; s'il n'est pas défini tous les paramètres et fichiers seront visibles. La définition de ce profil permet de trouver plus rapidement les paramètres et surtout facilite l'utilisation du logiciel pour les utilisateurs

non experts. Le fichier « Profil d'utilisateur » n'est pas exploité par le moteur de calcul. Il est exploité par le module de définition des paramètres de modélisation non maillés (« Par » et par WinMarthe *sensu stricto*). La prise en compte de ce fichier par WinMarthe se fait uniquement à l'ouverture d'un projet. Si on modifie ce fichier, il faut donc rouvrir le projet pour qu'il soit pris en compte.

Dans notre exemple on double-clique sur la ligne « Profil d'utilisateur » puis « Créer un nouveau profil d'utilisateur » on sélectionne (en donnant la valeur « 1 ») les lignes : « Régime Transitoire » et « Transport de masse Classique » puis on valide par OK et on confirme.

4.3.2. Paramètres généraux

Toujours dans ce module « Par » on double-clique sur la première ligne « Paramètres généraux », puis « Pré-processeur », puis « Créer un nouveau fichier de paramètres ». On voit apparaître 12 lignes permettant chacune de sélectionner un paragraphe de paramètres généraux (Figure 6). Si on n'avait pas défini de profil d'utilisateur, il y aurait eu 22 paragraphes, chacun comportant beaucoup plus de paramètres.

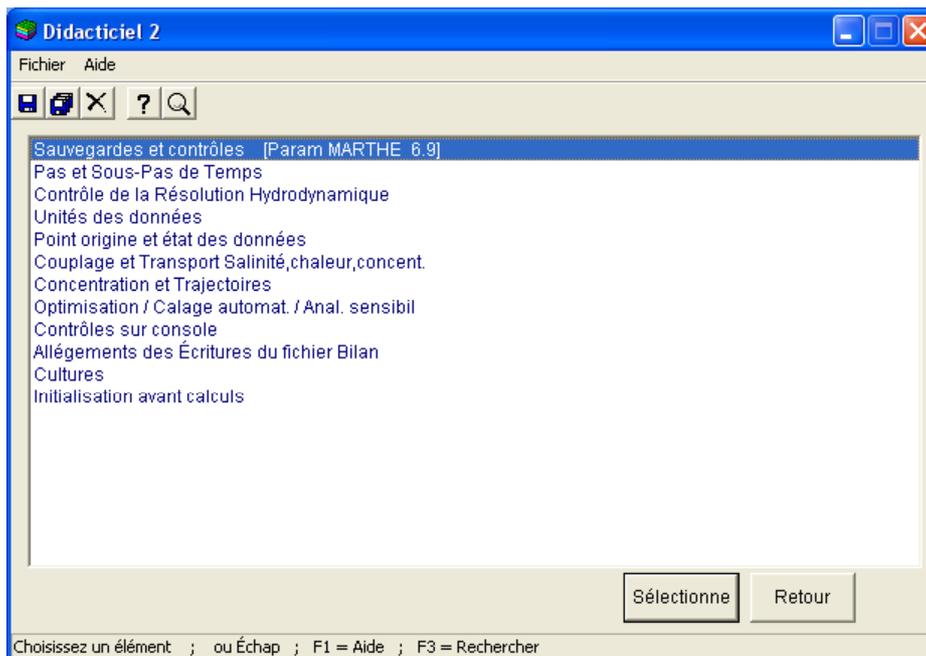


Figure 6 – Menu du fichier des paramètres généraux.

Seuls quelques paramètres sont à définir, les autres sont laissés à leur valeur par défaut (c'est-à-dire « espace » ou « 0 »). Dans tous les cas « espace » ou 0 signifie « **Non** ». On donnera la valeur 1 pour indiquer « **Oui** », d'autres options sont également possibles.

Paragraphe : « Édition et contrôles » :

Sélectionner :

1 = Fichier Liste détaillé
1 = Sauvegarde des Historiques de Bilans Hydrodynamiques.

Paragraphe « Contrôle de la Résolution Hydrodynamique »

20 = Nombre maxi d'itérations pour le pas de temps n°0 (Permanent Initial)
Perman = Régime Hydrodynamique [0=Transitoire 1=Permanent]

Paragraphe « Unités des données »

1e-4 = Unité des Perméabilités des Aquifères en m/s (ou m2)
1e-4 = Unité des Débits en m3/s (kg/s si Gaz)
ANN = Unité des Durées Hydroclimatiques (SEC,MIN,HEU,JOU,MOI,ANN)
JOU = Unité de Temps (des Pas de modèle) (SEC,MIN,HEU,JOU,MOI,ANN)
0.1 = Coefficient d'Anisotropie Verticale Kv/Kh des Perméabilités
% = Unité des Porosités = Teneurs en Eau en [-] [% si en %]

Les unités laissées « vides » ou égales à 0 seront en Système International (à l'exception des « hauteurs hydrologiques » qui sont par défaut en mm) : charges et coordonnées horizontales en mètres, stocks d'eau en m³. Les hauteurs hydrologiques seront laissées en mm, et comme les durées hydroclimatiques sont en années, les recharges seront exprimées en mm/an. Le coefficient d'anisotropie verticale Kv / Kh est fixé à 0.1.

Paragraphe « Concentration et Trajectoires »

Invers = Calcul de Trajectoires (1 = Oui ; -1 = Trajectoires inverses)

Paragraphe « Contrôles sur console »

1 = Contrôle des itérations Externes de résolution

Paragraphe « Allègements des Écritures du fichier Bilan »

1 = Suppression de l'écriture des itérations Internes de résolution

Paragraphe « Initialisation avant calculs »

C'est dans ce paragraphe qu'on peut définir des modifications ponctuelles dans le maillage. Comme ce paragraphe correspond au pas de temps n°0, c'est-à-dire au régime hydraulique permanent, c'est ici aussi qu'on peut demander l'édition de champs calculés au pas de temps n°0.

Flux d'infiltration :

Après avoir sélectionné le paragraphe « Initialisation avant calculs », on sélectionne « Nouvelles Modifications », puis on choisit le thème « Bilan Hydroclimatique, Cultures ». On choisit alors l'objet « FLUX_INFILTR » (ou l'objet « RECHARGE ») et on choisit l'action « ZONEP = Modification par zone de Sol ». On fixe alors : Numéro de zone = 1, Valeur (de recharge) = 252.46 (mm/an). (Voir Figure 7). Cette modification apparaît en clair sous la forme « /FLUX_INFILTR/ZONEP Z= 1V= 252.46; » dans le paragraphe « Initialisation avant calculs » du fichier des paramètres.

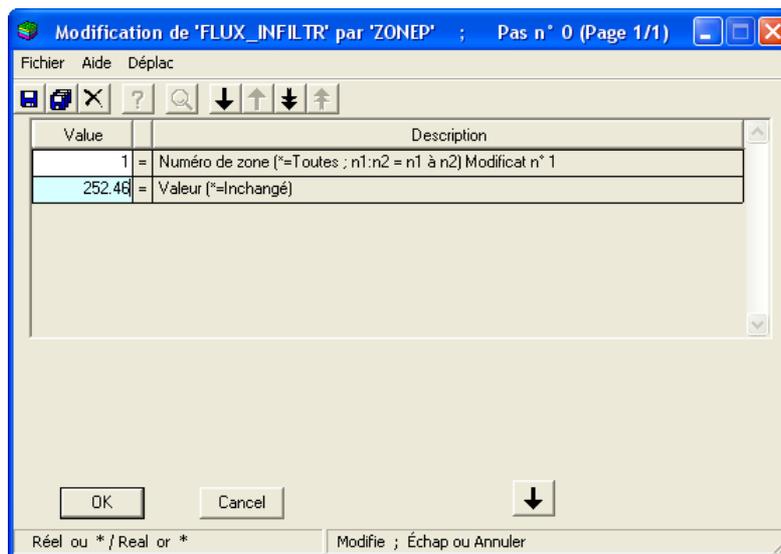


Figure 7 – Affectation d'une recharge de 252.46 mm/an dans la zone de sol n°1.

Édition des champs de charges calculées et du champ des débits calculés :

On choisit le thème « Paramètres hydrodynamiques classiques » puis l'objet « CHARGE = Charges » et l'action « EDITI = édition » et on choisit l'option 1 = édition en format texte. Dans ce même thème « Paramètres hydrodynamiques classiques », on choisit alors l'objet « DEBIT » et l'action « EDITI = édition » et on choisit l'option « 1= Indice d'édition en format texte ».

La demande d'édition du champ des charge apparaît en clair sous la forme « /CHARGE/EDITI I= 1; ». La demande d'édition du champ des débits apparaît sous une forme similaire (avec cependant quelques options de plus). Les charges seront éditées en clair dans le fichier générique *chasim.out*, et les débits dans le fichier de nom *debsim.out*.

Il convient de remarquer que, contrairement à d'autres logiciels de modélisation, le choix a été fait pour Marthe de ne pas systématiquement sauvegarder tous les champs à tous les pas de temps, car il peut y avoir un très grand nombre de champs qui peuvent être sauvegardés (teneurs en eau, températures, densités, pressions, etc.) ce

qui représente un volume de données considérable, et non gérable pour les gros maillages avec de nombreux pas de temps, et la plupart du temps inutile. C'est donc à l'utilisateur de choisir les champs qu'il souhaite éditer et d'indiquer à quels pas de temps il souhaite le faire.

Anisotropie verticale de perméabilité dans le puits :

Le puits de pompage est crépiné sur les 3 couches. Pour le simuler précisément on veut avoir la même charge (inconnue) sur les 3 mailles des 3 couches correspondant à la colonne n°25, ligne n°15. Dans ce but on va définir une forte anisotropie verticale, d'une valeur de 500 par exemple, dans ces mailles. La perméabilité verticale sera donc égale à la perméabilité horizontale multipliée par 500. À titre de démonstration on suppose qu'on ne sait pas dans quel thème ou champ se trouve ce paramètre anisotropie verticale. On se place dans le thème « Tous les paramètres ». Il y a environ 45 objets, et on ne voit a priori pas d'« Anisotropie verticale ». On clique alors sur « Aide » puis « Rechercher » ou bien directement sur la touche « F3 ». On recherche alors la chaîne de caractères « Anisotropie verticale », sans tenir compte des éventuels accents ou majuscules, On appuie sur « Chercher » et on ne trouve aucune réponse (« non trouvé » : Figure 8 [En fait à partir de la version 6.9, ce paramètre est dans tous les profils utilisateurs]).

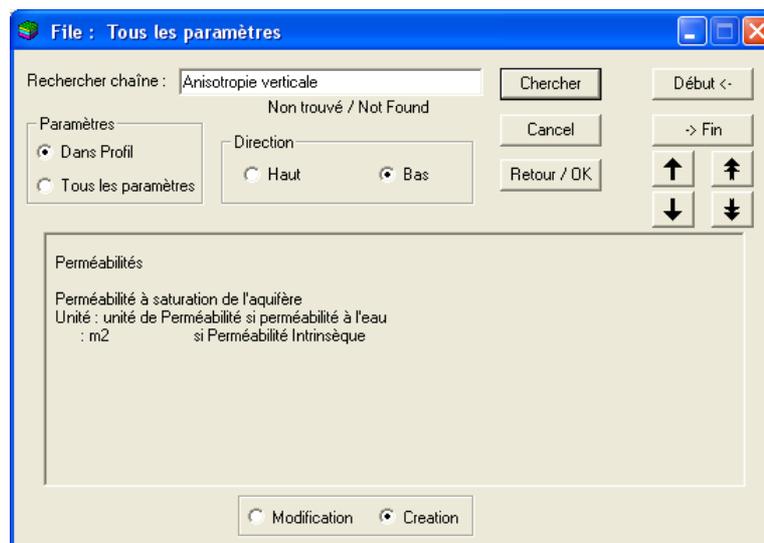


Figure 8 – Recherche de l'objet « Anisotropie verticale ».

On sélectionne alors « Tous les paramètres » dans cette boîte de dialogue, ce qui fait apparaître tous les objets (il y en a environ 200). Et on appuie à nouveau sur « F3 » pour rechercher « Anisotropie verticale » puis sur « Chercher » et on trouve immédiatement la réponse « Anisotropie verticale K_vertic. / K_horizont. ». On n'avait pas trouvé ce paramètre dans notre profil utilisateur, car c'est un paramètre du profil « Avancé »

On appuie donc sur le bouton « Retour / OK » et on arrive sur l'objet « ANISO_VERTI = Anisotropie verticale ... ». On sélectionne cet objet. Puis l'action « MAILL = modifications par mailles ». On donne alors le numéro de colonne = 25, le numéro de ligne = 15, et le numéro de couche = 1:3 (c'est-à-dire « 1 à 3 »), ou bien « * » (c'est à dire « toutes »), et fixe la valeur 500. (Figure 9)

Cette modification apparaît en clair sous la forme :

```
/ANISO_VERTI/MAILL C= 25 L= 5 P= 1:3 V= 500;
```

N.B. Pour se remettre dans le profil utilisateur, on appuie sur « F3 », puis « Dans le profil » puis « Retour ».

Comme on a fini la définition des paramètres généraux, on appuie sur retour (2 fois) puis sur « enregistrer ». On est alors retourné dans le menu des paramètres non maillés. Un fichier de nom *Didact2.mart*, contenant les paramètres généraux a été créé et son nom a été ajouté au fichier projet *Didact2.rma*.

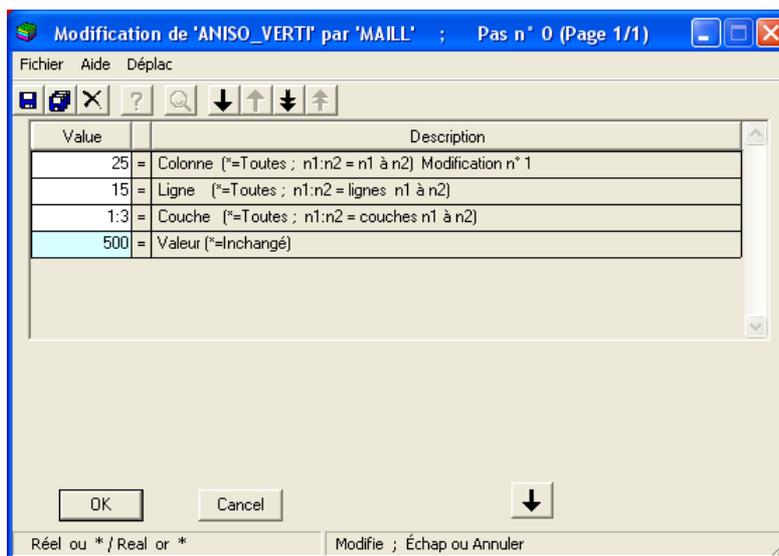


Figure 9 – Affectation d'une anisotropie verticale égale à 500 dans les 3 couches de la maille de pompage.

4.3.3. Départs de trajectoires

A partir du menu des paramètres non maillés, on sélectionne « Départs de trajectoires ». (Figure 10).

On clique sur « Pré-processeur » puis « Créer un nouveau fichier de Départs de trajectoires ». On définit simplement des départs sur des cercles centrés sur les 3 mailles du pompage (colonne n°25, ligne n°15, couches n°1 à n°3). On choisit un rayon de 15 mètres pour être un peu à l'extérieur de la maille de pompage, et 28 points de

départs répartis sur chaque cercle. On coche la colonne « Maille » pour indiquer que les valeurs données sont des numéros de colonne, ligne, couche et non pas des coordonnées x, y et z. Le numéro de groupe donné, qui est facultatif, peut servir à identifier des faisceaux différents. (Figure 11).

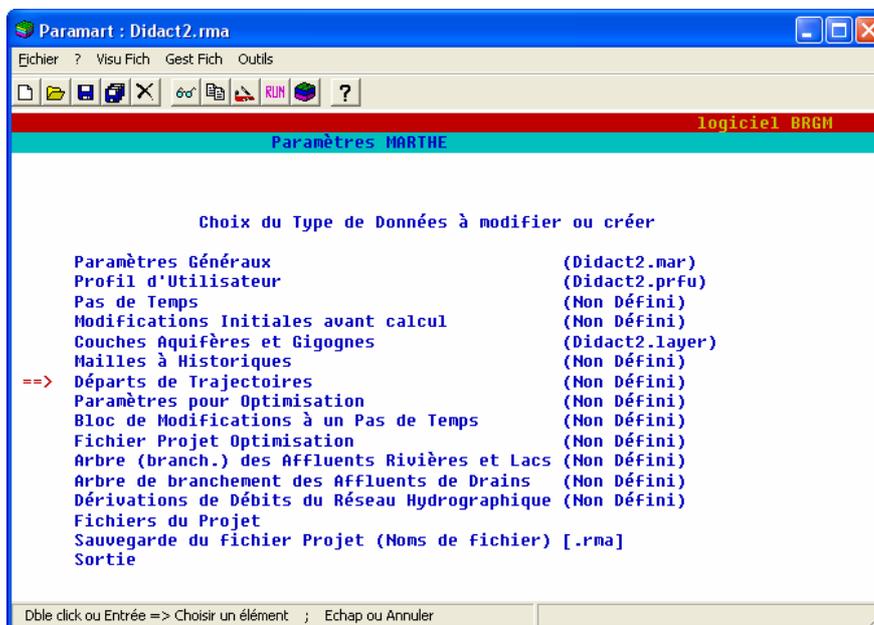


Figure 10 – Sélection du fichier des départs de trajectoires.

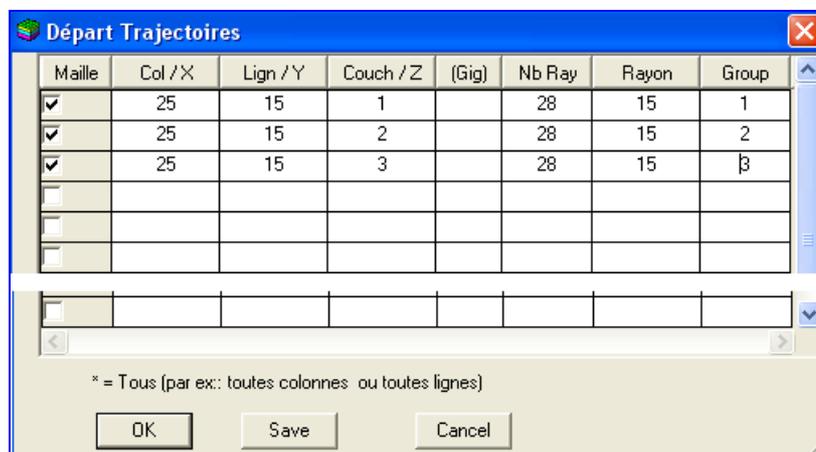


Figure 11 – Définition des départs de trajectoires.

On sort alors du tableur de définition des départs de trajectoires. Puis on sort du menu des paramètres non maillés, après avoir sauvegardé le fichier projet. Un fichier de nom *Didact2.deptr*, contenant les départs de trajectoires a été créé, et son nom a été ajouté dans le fichier projet *Didact2.rma*.

On est alors retourné dans WinMarthe *sensu stricto*.

5. Lancement du calcul et examen des résultats

Pour lancer les calculs il suffit de cliquer sur l'icône  située sur la première ligne de la barre du bas. Le calcul s'effectue en une fraction de seconde.

5.1. VÉRIFICATION PRÉLIMINAIRE DES BILANS

En tout premier, avant un quelconque examen des charges ou débits calculés, surtout lors du premier « run », il convient de vérifier que les calculs itératifs ont bien convergé. Dans ce but, on examine rapidement le fichier « bilandeb.txt » : c'est-à-dire **bilan**(des **deb**(its). Pour cela on utilise l'icône  en forme de lunettes, située sur la barre du bas et on sélectionne le fichier de nom bilandeb.txt. Un examen rapide montre que le calcul s'est arrêté après 6 itérations (externes). La « convergence globale », c'est-à-dire l'écart entre les entrées et les sorties est égal à $2.5 \cdot 10^{-6} \%$ (par rapport au plus grand terme). La « convergence interne » - critère plus sévère – qui est la somme des valeurs absolues des écarts entrée-sortie de chaque maille, est égale à $4.8 \cdot 10^{-5} \%$. Cette convergence est parfaite, puisqu'en pratique il est généralement suffisant d'avoir une convergence interne à environ 1 %.

La Figure 12 montre le bilan global dans les 3 couches, exprimé en $10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ qui est l'unité de débits choisie. La Figure 13 présente les échanges entre couches. Par exemple : la couche n°1 reçoit 28.8 unités de débits dont 26.3 passent dans la couche n°2. La couche n°2 reçoit 26.3 unités de débits (de la couche n°1) dont 19.1 passent dans la couche n°3, le reste étant le bilan sortant par les limites à charge imposée. La couche n°3 reçoit 19.1, (dont 12 sortent dans le pompage et le reste par les limites).

```

=====
                        Bilan Global : Pas de temps n° 0
=====
- Bilan en unités de Débit : Pas de temps n° 0 - t= 0.000 -----
Débits Entrant /Charges Impos. =      21.291
Débits Sortant /Charges Impos. =                                -38.088
Débits Entrant dans les Mailles=  1.115E-05
Débits Sortant des Mailles      =                                -12.000 (-12.000 Imposé)
Débit d'Infiltration/Évaporat. =      28.798
-----
                        Bilan Global =  1.247E-06

```

Figure 12 – Bilan global des 3 couches.

Débits échangés entre les 3 couches					
Num Couc	Contribution des couches (> 0 si la couche exporte ; < 0 si elle reçoit)				
	1	2	3	Recharg	Total
1	*	-26.27	0	28.798	2.5234
2	26.274	*	-19.06	0	7.2193
3	0	19.055	*	0	19.055

Figure 13 – Débits échangés entre les 3 couches.

5.2. EXAMEN DES RÉSULTATS OBTENUS

On quitte l'éditeur (qui avait été lancé par l'icône ) et on est retourné dans WinMarthe.

5.2.1. Charges calculées

On active le menu « Fichier » → « Fichier de semis simulés », ou plus simplement on frappe Contr+R (« R » comme Résultats), et on choisit le fichier de nom *chasim.out*. Le champ des charges calculées, le seul qui avait été demandé, à part les débits, est alors placé dans le paramètre « Travail », et apparaît à l'écran, pour la couche courante. (Figure 14). On peut faire défiler les couches avec les flèches (, ) , ou examiner une coupe verticale. On peut également changer la répartition des plages colorées (éQui-réparties = Contr+Q, ou Linéaires = Contr+L, ou logariThme = Contr+T). On peut faire disparaître les limites de mailles, on peut places des points d'identification (forages, etc.), ...

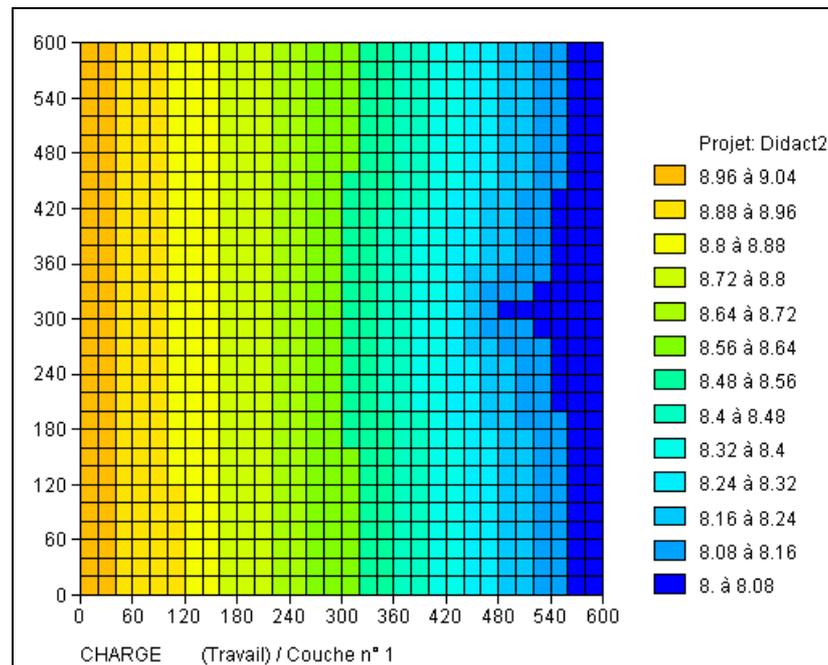


Figure 14 – Champ des charges calculées (couche n°1).

5.2.2. Isovaleurs des charges calculées

Pour tracer les isovaleurs, il faut utiliser le menu « Outils » → « isovaleurs » → « Simples », ou directement frapper Control+I, et on peut accepter ou modifier les valeurs par défaut. (Figure 15).

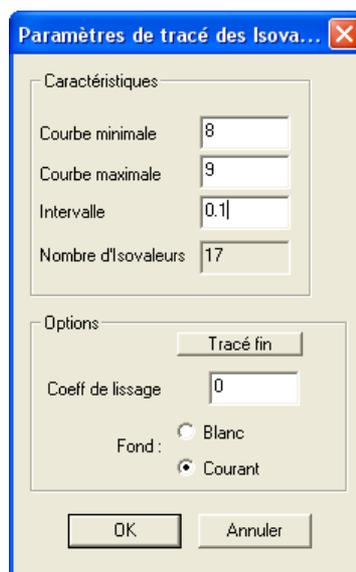


Figure 15 – Champ des charges calculées (couche n°1).

On obtient alors les isovaleurs, dont on peut adapter les couleurs, épaisseurs et visibilité dans le menu « Gestion des polygones » (icône ). (Figure 16).

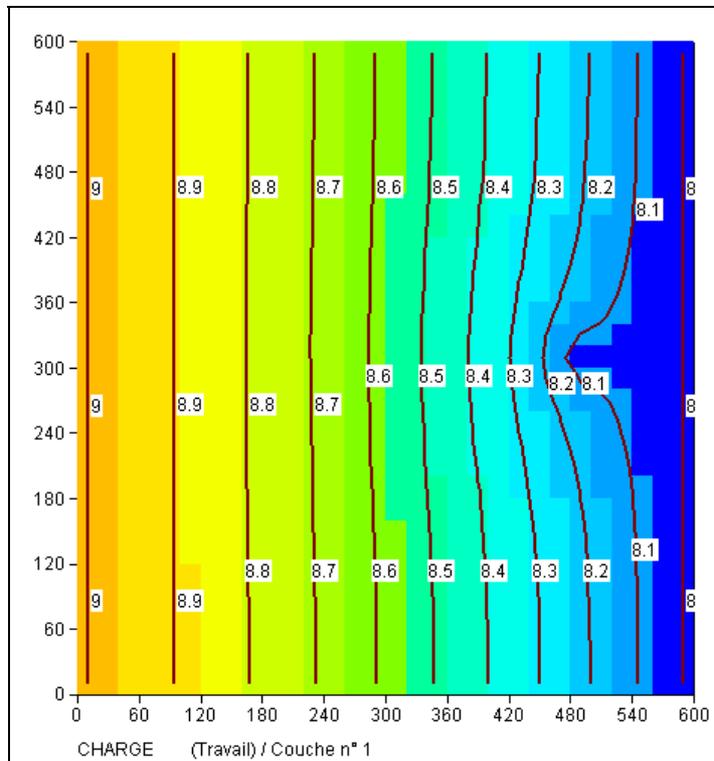


Figure 16 – Isovaleurs des charges calculées (couche n°1).

5.2.3. Trajectoires

Les trajectoires sont éditées dans deux fichiers : le fichier *trajmar.out* (coordonnées, numéro de couche, et temps) et le fichier *trajmar.blm*, qui étant un fichier (x,y) peut être visualisé directement sous forme de polygones.

Pour visualiser les trajectoires, cliquer sur l'icône  « Gestion des polygones » puis sur le bouton « Charger des polygones blm », et sélectionner le fichier *trajmar.blm*. On voit apparaître les trajectoires tracées pour un temps infini, puisque le calcul est réalisé en régime permanent. (Figure 17).

Pour visualiser les trajectoires jusqu'à une date donnée, par exemple 100 jours, ce qui correspondrait à un périmètre de protection de 100 jours, il suffit de faire un calcul en régime transitoire (non décrit ici) tout en conservant le calcul de l'hydrodynamique en régime permanent. On définit par exemple un pas de temps de 100 jours. Les trajectoires sont alors calculées en régime transitoire, jusqu'à la date de fin de simulation. On pourrait également faire apparaître les isochrones qui sont les points

d'arrivées des trajectoires (en rouge dans la couche n°1, moins perméable donc moins rapide, et en bleu dans la couche n°2). (Figure 18)

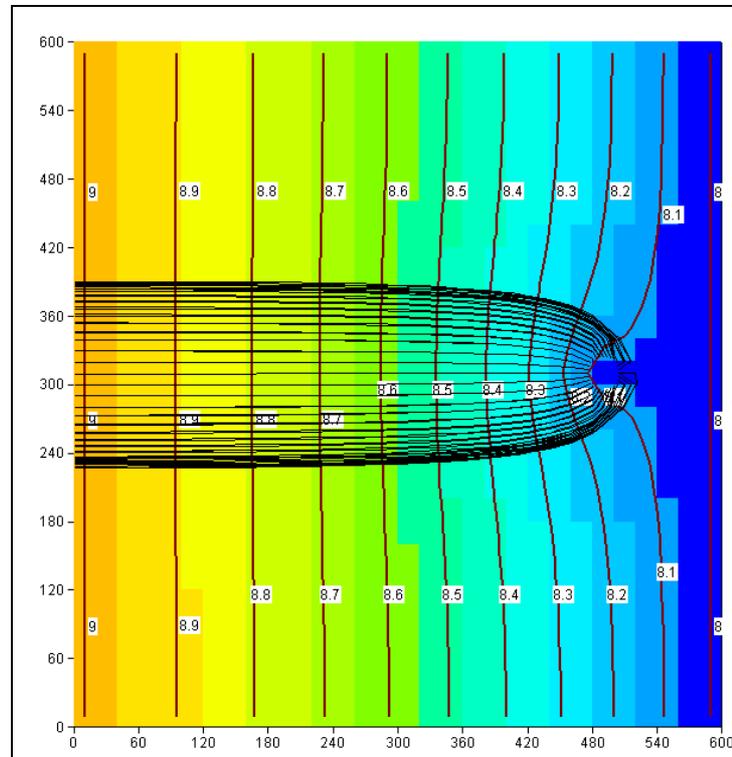


Figure 17 – Trajectoires (régime permanent).

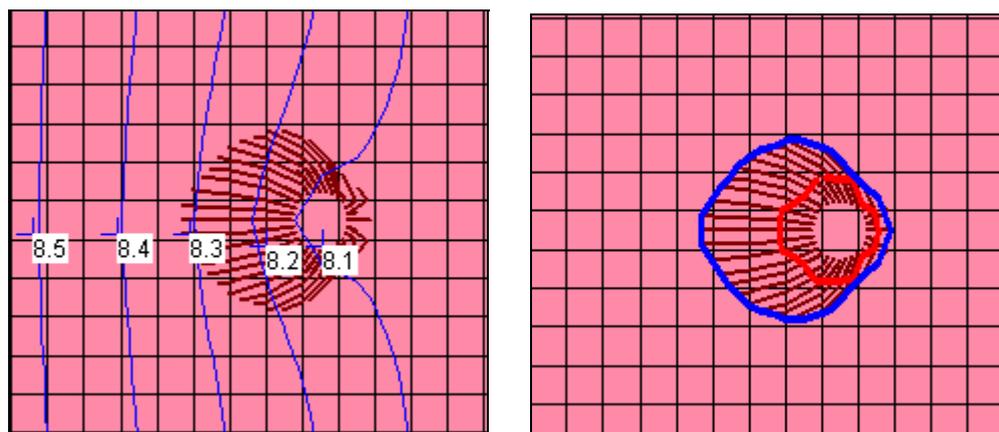


Figure 18 – Trajectoires pendant une durée de 100 jours.

Marthe permet également de calculer automatiquement et de visualiser les trajectoires correspondant à un champ de charges calculées en régime transitoire.

6. Simulation du transfert de masse

Contrairement à d'autres logiciels de modélisation, le code de calcul Marthe permet un calcul du transport de masse totalement couplé avec le calcul de l'hydrodynamique, ce qui est optimal pour les schémas complexes, en nappe libre avec dénoiements ou en zone non saturée, et surtout quand il y a des interactions entre le transport et le champ de vitesse : densité du fluide modifiée par la salinité et la température, viscosité influencée par la température, etc.

La mise en œuvre des calculs de transferts de masse avec le code Marthe est décrite par Thiéry (1995 a)

On va donc définir les paramètres supplémentaires nécessaires pour poursuivre le calcul d'hydrodynamique par un calcul de transport en régime transitoire. Par sécurité, on va conserver le projet *Didact2.rma* inchangé, et en réaliser automatiquement une copie sous le nom *Didact3* qui sera le nouveau projet avec transport. Pour faire cette opération, on utilise le menu « Fichier » → « Faire une copie du projet » et on choisit le nom *Didact3*. On pourrait choisir de créer cette copie dans un dossier différent, mais ce n'est pas nécessaire. (Cette opération de copie est également pratique pour conserver un projet dans un état donné pour archivage, pour exporter tous les fichiers relatifs à un projet pour transmission à un autre modélisateur, et pour réécrire au format d'une nouvelle version de Marthe/WinMarthe les fichiers d'un modèle créé avec une version antérieure).

On ferme alors le projet courant et on ouvre le projet *Didact3.rma*.

6.1. DÉFINITION DES PARAMÈTRES NON MAILLÉS

On actionne l'icône  pour faire apparaître le menu général.

6.1.1. Paramètres généraux

On double-clique sur la première ligne « Paramètres généraux », puis « Pré-processeur ». On apporte alors, comme illustré ci-dessous, quelques modifications, puis des ajouts dans le paragraphe « Couplage et Transport » et « Concentration et Trajectoires »

Paragraphe « Pas et Sous-Pas de temps »

12 = Nombre de Sous-Pas de temps de modèle
--

[Défaut=1]

(Puisque, pour simplifier on va créer ultérieurement 3 pas de durée 12 mois subdivisés chacun en 12 sous-pas de modèles égaux)

Paragraphe « Unités des données »

<p>MOI = Unité de Temps (des Pas de modèle) (SEC,MIN,HEU,JOUE,MOI,ANN)</p> <p>mug/m3 = Unité des Concentrations en kg/m3</p> <p>mug = Unité des Masses en kg</p>

Les unités « mug » correspondent à « µg », on pourrait les remplacer par $1. 10^{-9}$.

Paragraphe « Couplage et Transport »

<p>TVD = Schéma de Transport [0=D_Finies 1=Rand_W 2=Caract=MOC 3=TVD]</p> <p>10 = Dispersivité Longitudinale (m) [* = Spatialisée]</p> <p>1 = Dispersivité Transversale (m) [* = Spatialisée]</p>
--

On utilise donc la méthode TVD, qui est très performante. On conserve le nombre d'itération par défaut qui est égal à 20.

Paragraphe « Concentration et Trajectoires »

<p>1 = Calcul de Concentration</p> <p>2 = Coefficient de Retard [-] si pas ZNS (éventuellement < 0) [Def=1]</p>
--

Par défaut le transport est en régime transitoire.

On clique successivement 2 fois sur retour et on sauvegarde les modifications de paramètres généraux.

6.1.2. Pas de temps

On veut définir 36 pas de temps de modèle sous forme de 3 pas de temps de 12 mois (chacun étant subdivisé en 12 sous-pas de modèle égaux).

Dans le menu général des paramètres non maillés, on double-clique sur la ligne « Pas de temps ». On clique alors sur « Pré-Processeur » puis « Créer un nouveau fichier des Pas de temps ». On accepte 0.0 comme date de début de la simulation (c'est la date du pas de temps n°0). On donne la valeur 12 (mois) comme « Durée des pas de temps s'ils constants ». On demande la création automatique de 3 pas de temps.

On demande alors la consultation du pas de temps n°1, pour introduire le flux massique dans la zone contaminée. On choisit alors « Nouvelle Modification » (Figure 19), ➔ *Thème* « Transport, Densité, Trajectoires ».

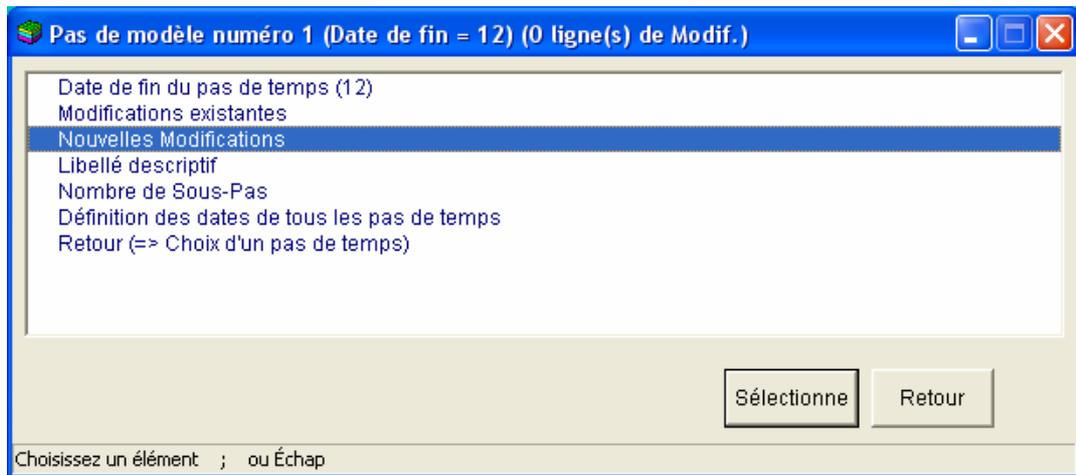


Figure 19 – Création d'une modification au pas de temps n°1.

Puis l'objet « QMASS_CONC = Débit Massique Concentration » (Figure 20) → « Modifications par Mailles ». On fixe alors la valeur 262.98 ($\mu\text{g}/\text{mois}/\text{m}^2$) dans le pavé « Colonnes 5 à 11, Lignes 12 à 18, Couche 1) (Figure 21) et on clique OK. Cette modification sera introduite à partir du début du premier sous-pas de temps de modèle de ce pas n°1.

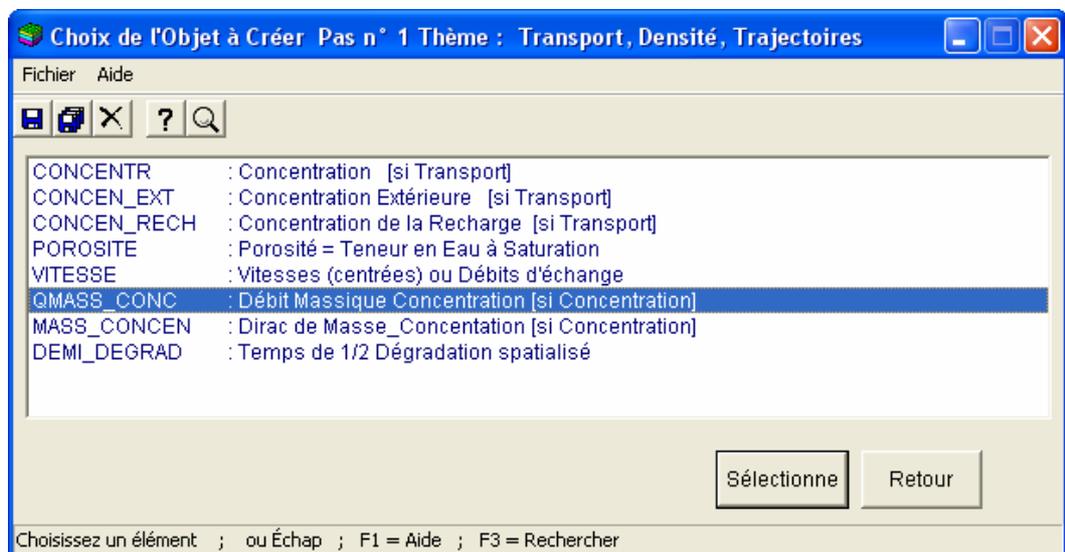


Figure 20 – Définition du Débit Massique Concentration au pas de temps n°1.

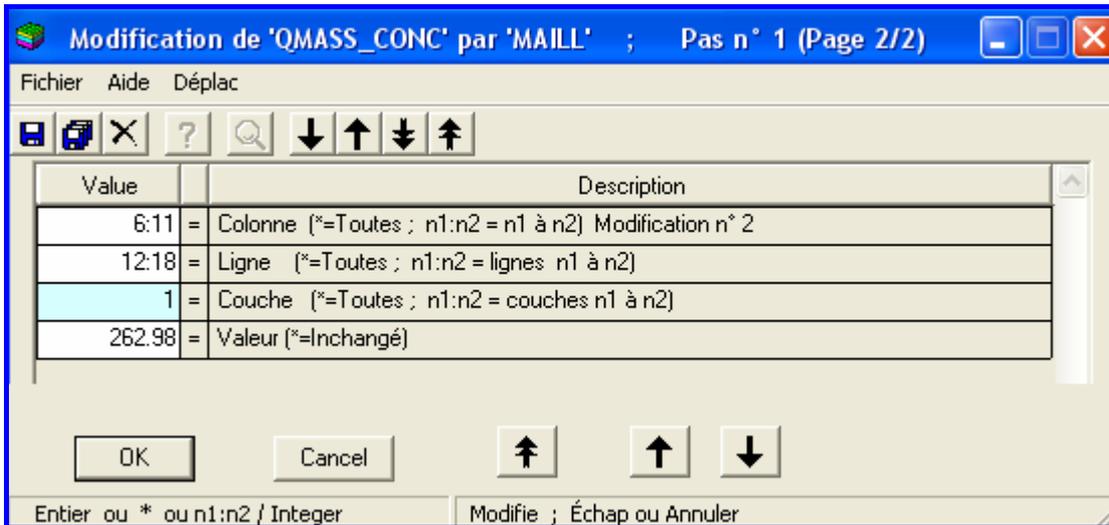


Figure 21 – Définition de la valeur du Débit Massique Concentration au pas de temps n°1.

On va également demander l'édition du champ des concentrations calculées aux pas de temps n°1, 2 et 3, c'est-à-dire après 12, 24 et 36 mois. Les concentrations seront éditées en clair, en format texte, dans le fichier générique *chasim.out*. On clique à nouveau sur le thème « Transport ... », on choisit alors l'objet « CONCENTR = Concentration », puis on choisit l'action « EDITI » et on donne 1 comme valeur d'indice d'édition (édition en format texte), en laissant inchangés les autres champs.

On va répéter cette opération de demande d'édition du champ des concentrations calculées au pas de temps n°2 et n°3 (On ne redéfinira pas « QMASS_CONC = Débit Massique Concentration » à ces pas de temps, car dans Marthe, toutes les affectations subsistent jusqu'à ce qu'elles soient éventuellement modifiées).

Pour changer de pas de temps, on appuie sur le bouton « Retour », puis on choisit l'option « Retour (=» Choix d'un pas de temps) » dans le menu qui apparaît (Figure 22).

On choisit le pas de temps n°2 et on introduit alors la même demande d'édition du champ « CONCENTR », et on fait la même opération pour le pas de temps n°3.

Puis on choisit « Retour » deux fois et on sauvegarde la description des pas de temps qui apparaîtra en clair dans le fichier *Didact3.pastp*.

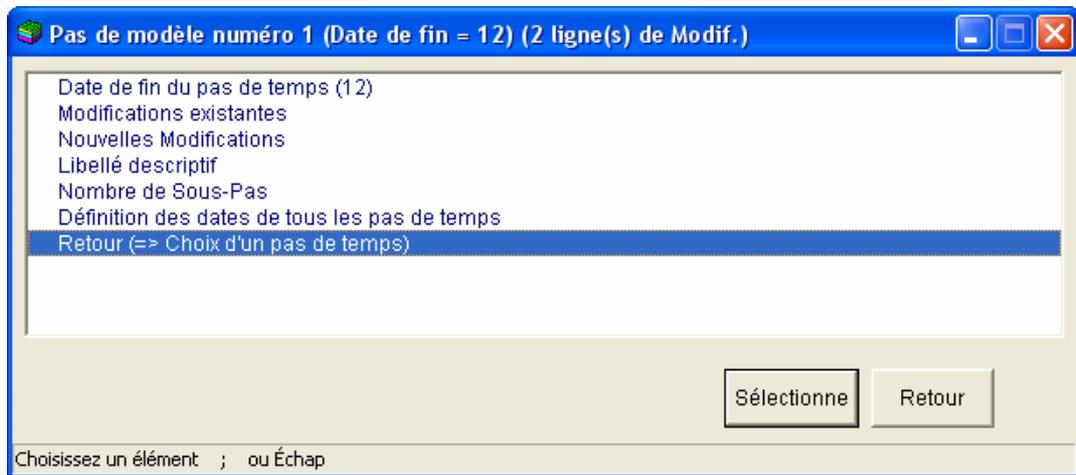


Figure 22 – Changement de pas de temps.

6.1.3. Mailles à historiques

On va définir les emplacements où on veut mémoriser l'évolution temporelle des valeurs calculées au cours du temps.

Dans le menu général des paramètres non maillés, on clique sur la ligne « Mailles à Historiques » (Figure 23). On clique alors sur « Pré-Processeur » puis « Créer un nouveau fichier des Historiques ».

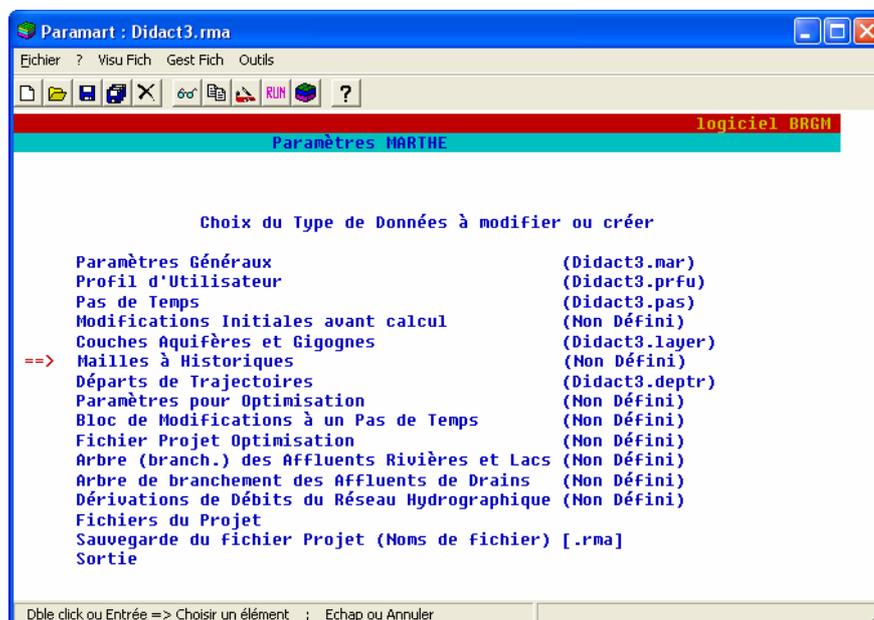


Figure 23 – Définition des mailles à historiques.

On voit apparaître une liste des paramètres, correspondant au profil utilisateur, pour lesquels on peut demander un historique dans certains points du domaine. On choisit le paramètre « Concentrations ». On clique alors sur « Ajout » pour ajouter des points pour ce paramètre.

On choisit alors « Point exact défini par X, Y, Couche » puisque les points choisis ne sont pas situés exactement au centre d'une maille (Figure 24).

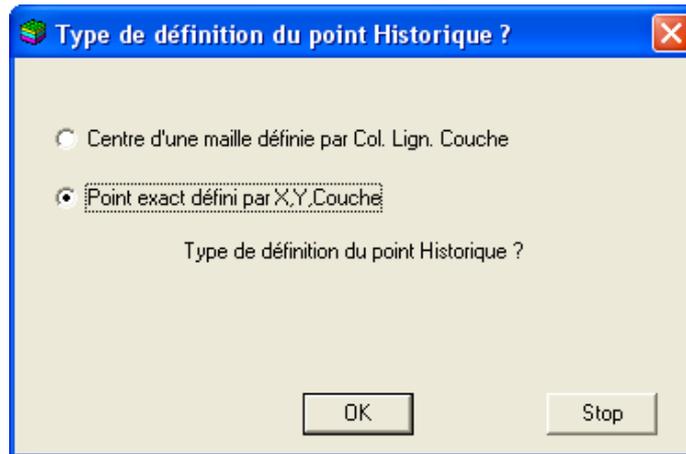


Figure 24 – Type de définition d'un historique.

On introduit alors les coordonnées du premier point pour lequel on souhaite mémoriser l'évolution des concentrations et on lui donne l'identificateur « P1 » (Figure 25).

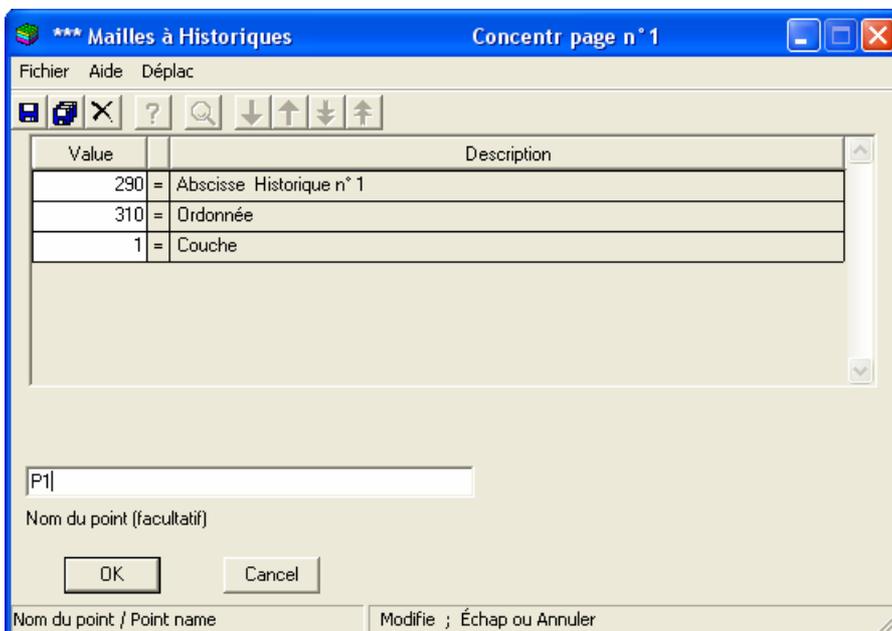


Figure 25 – Définition des coordonnées d'un emplacement d'historique.

On fait la même opération « Ajout » → « Point exact » puis (390, 310 Couche 1) pour le point P2, puis on continue en fixant ces mêmes coordonnées mais pour la couche n°2 (P3 et P4), puis pour la couche n°3 (P5 et P6).

On clique alors sur « Retour » deux fois et on sauvegarde. Les coordonnées des mailles à historique sont sauvegardées, en clair, dans le fichier *Didact3.histo* (Figure 26).

/Concentr	/HISTO/	=	/XCOO:X=	290Y=	310P=	1;P1
/Concentr	/HISTO/	=	/XCOO:X=	390Y=	310P=	1;P2
/Concentr	/HISTO/	=	/XCOO:X=	290Y=	310P=	2;P3
/Concentr	/HISTO/	=	/XCOO:X=	390Y=	310P=	2;P4
/Concentr	/HISTO/	=	/XCOO:X=	290Y=	310P=	3;P5
/Concentr	/HISTO/	=	/XCOO:X=	390Y=	310P=	3;P6
*** Fin du fichier des 'Mailles à Historique'						***

Figure 26 – Fichier «Mailles à Historiques ».

Après avoir sauvegardé le fichier projet, on double-clique sur « Sortie » dans le menu général des paramètres non maillés. On est alors retourné dans WinMarthe *sensu stricto*.

7. Lancement du calcul de transport et examen des résultats

Pour lancer les calculs on clique sur l'icône  située sur la première ligne de la barre du bas. Le calcul s'effectue en quelques secondes.

7.1. VÉRIFICATION PRÉLIMINAIRE DES BILANS

Comme précédemment, on examine rapidement le fichier « bilandeb.txt », en utilisant l'icône . Un examen rapide montre que le calcul s'est effectué correctement. Pour respecter les contraintes de la méthode TVD (nombre de Courant ne dépassant pas 1), chacun des 36 pas de temps de modèle a été automatiquement subdivisé en 3, soit 108 pas de temps de calcul. À la fin du calcul le bilan global entrées – sorties est équilibré à moins de 1/1000 de pourcent (Figure 27). On voit aussi que le régime permanent est loin d'être atteint, car au dernier pas seuls 0.5 % de la masse provenant de la zone contaminée est captée par le puits.

```

===== Pas de temps n° 36 - t= 36.000

----- Cumul des masses "Concentration"      Dans le pas      Depuis début simul.
          Sortant par les Limites = -5.123      -15.78
          Entrant dans les mailles Internes = 4.4181E+06      1.5905E+08
          Sortant par les mailles Internes = -2.4315E+04      -1.0839E+05
          Stockage = 4.3939E+06      1.5894E+08
          [Stockage Positif (Entrant)] = 4.3939E+06      1.5894E+08
          [Stockage Négatif (Sortant)] = -2.1984E-09      -3.4768E-02
          Écart de bilan de masse = -185.6      -1175.
          (%) = 4.2019E-03      7.3852E-04

Masse ou Énergie totale (phase mobile) = 1.5894E+08

```

Figure 27 – Bilan de masse cumulé après 3 ans.

7.2. EXAMEN DES CONCENTRATIONS CALCULÉES

On quitte l'éditeur (qui avait été lancé par l'icône ) et on est retourné dans WinMarthe.

7.2.1. Champ des concentrations calculées

On active le menu « Fichier » → « Fichier de semis simulés », ou plus simplement on frappe Contr+R), et on choisit le fichier de nom *chasim.out*. Ce fichier contient le champ des charges calculées au pas n°0 et les concentrations des pas 12, 24 et 36. On choisit la paramètre « CONCENTR », puis le pas n°36, à la date 36 mois, en double-cliquant sur cette date, ou en appuyant sur le bouton « Visualiser » (Figure 28). Le champ de concentration est alors placé dans le paramètre « Travail », et apparaît à l'écran, pour la couche courante, qu'on peut modifier en se plaçant par exemple dans la couche n°3 (Figure 29).

On peut immédiatement tracer les isovaleurs de concentration, par le menu « Outils » → « Isovaleurs » → « Simples », ou en frappant directement le raccourcis Control+I, dont la Figure 30 présente un extrait.

Il est également possible en 2 clics de souris d'examiner le champ des concentrations en coupe verticale. On utilise l'icône  pour sélectionner une ligne et on double-clique sur la ligne dans l'axe du puits → On actionne l'icône  pour passer en coupe verticale (Figure 31). (Pour repasser en visualisation en plan, on utilisera l'icône ).

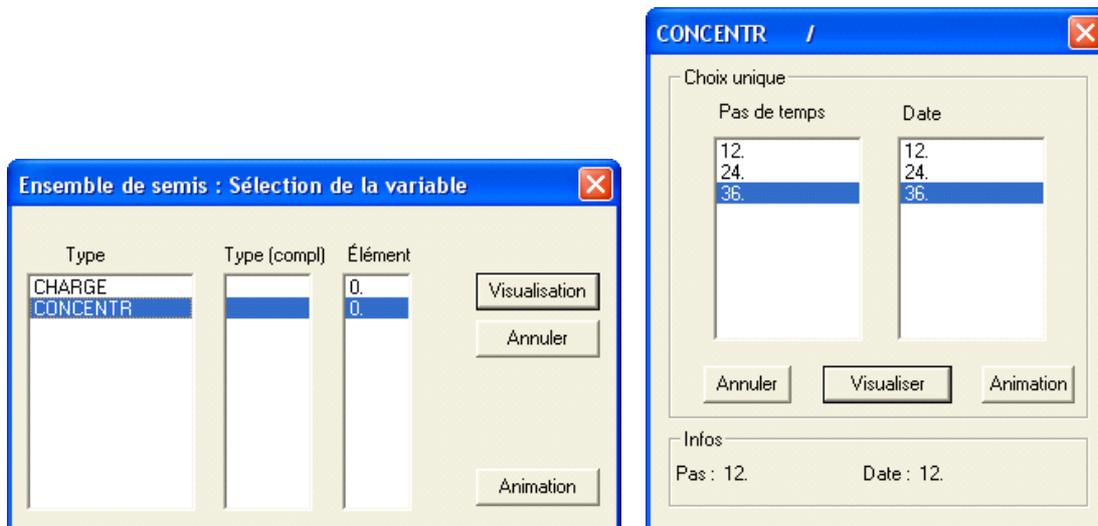


Figure 28 – Choix du paramètre et du pas de temps.

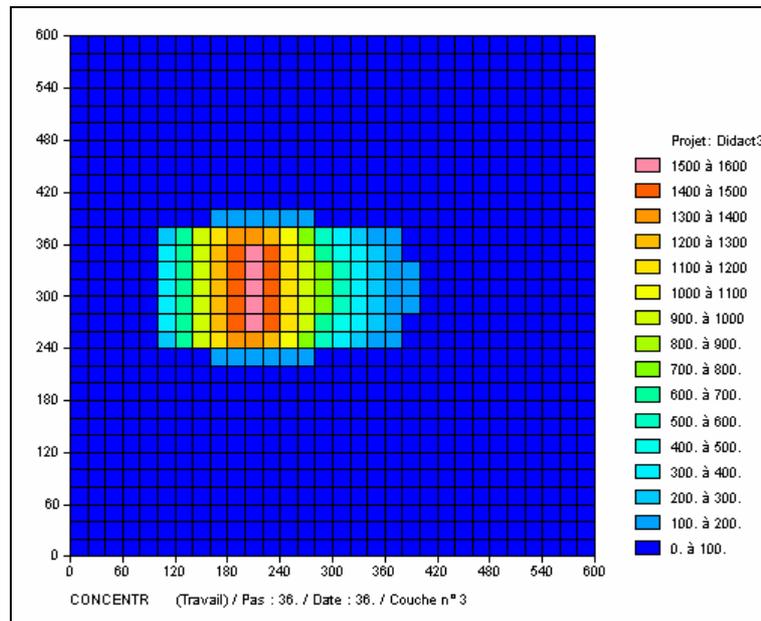


Figure 29 – Concentrations après 3 ans dans la couche n°3.

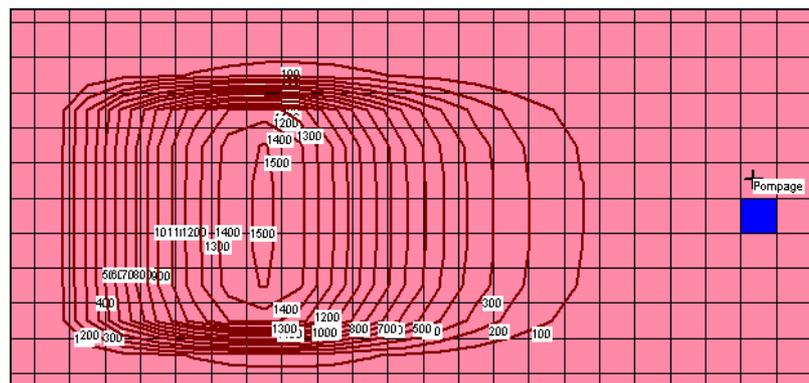


Figure 30 – Isovaleurs des concentrations après 3 ans dans la couche n°3.

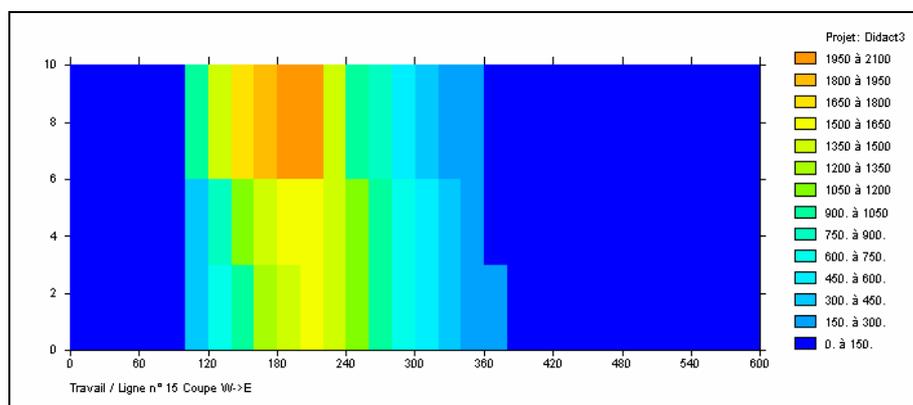


Figure 31 – Concentrations après 3 ans en coupe verticale dans l'axe du puits.

7.2.2. Évolution temporelle aux points à historiques

La simulation a généré un fichier de nom générique *historiq.prn* qui est directement compatible avec Excel. Il suffit de double-cliquer dessus (ou de l'*ouvrir avec Excel*), et on peut obtenir automatiquement un diagramme en 3 ou 4 clics de souris (Figure 32). La méthode TVD permet d'obtenir une simulation rapide, avec très peu de dispersion numérique, et ne présentant pas d'oscillations. Marthe permet également, en changeant simplement la sélection (méthode 0, 1 ou 2 au lieu de méthode 3) de faire un calcul de transport par la méthode des différences finies, par la méthode « Random Walk », ou par la méthode MOC.

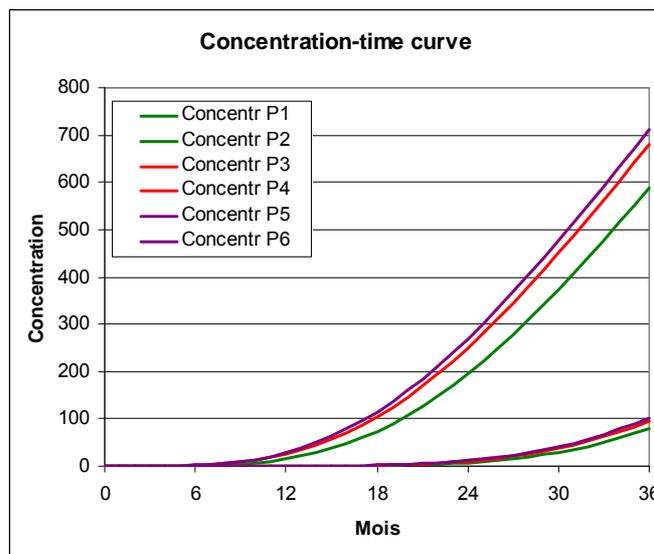


Figure 32 – Évolution temporelle des concentrations dans les 6 points à historiques.

7.3. CALCUL PAR LA MÉTHODE DES CARACTÉRISTIQUES (MÉTHODE MOC)

On peut réaliser ce même calcul en utilisant comme schéma de transport la méthode des caractéristiques MOC. On utilise l'icône «  » pour faire apparaître le menu général, puis → « Paramètres Généraux », on sélectionne la méthode MOC, on attribue à chaque particule une masse de 500 µg, et on fixe, par sécurité, un nombre maximal de particules égal à 200 000.

Paragraphe « Couplage et Transport »

MOC = Schéma de Transport [0=D_Finies 1=Rand_W 2=Caract=MOC 3=TVD]

Paragraphe « Concentration et Trajectoires »

500	= Masse de chaque Particule de Concentration (si particules)
200000	= Nombre maxi possible de Particules (MOC or R.W.)

Le calcul s'effectue comme précédemment en quelques secondes, et donne des résultats comparables (Figure 33 et Figure 34). On remarque en particulier que les évolutions temporelles sont très régulières, sans oscillations sensibles.

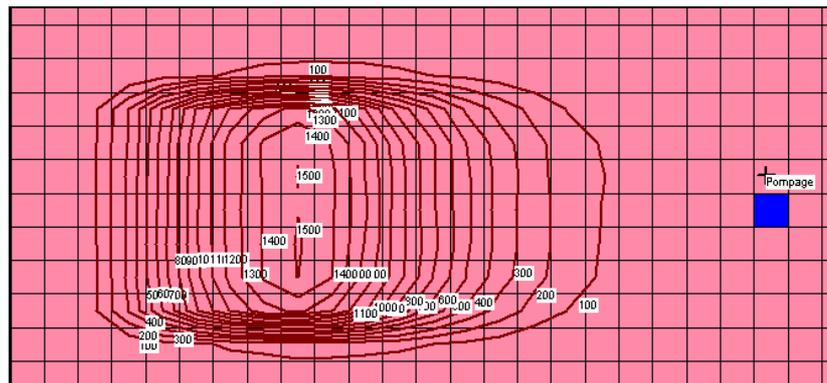


Figure 33 – Concentrations après 3 ans dans la couche n°3, Méthode MOC.

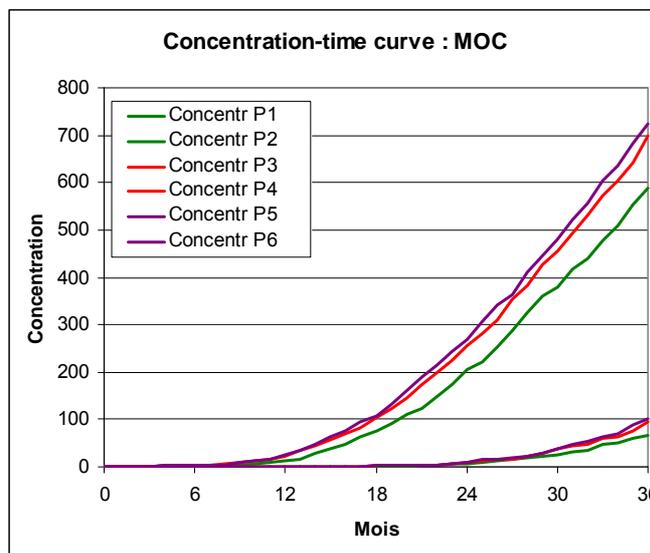


Figure 34 – Évolution temporelle des concentrations dans les 6 points à historiques. Méthode MOC.

7.4. VARIANTE DANS LA DÉFINITION DE LA ZONE CONTAMINÉE

Au lieu d'introduire un flux massique égal à ou 262.98 ($\mu\text{g}/\text{mois}/\text{m}^2$), on aurait pu introduire une concentration égale à 12 500 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) dans la recharge, en procédant de la manière suivante.

7.4.1. Définition de la zone contaminée

La zone contaminée s'étend dans le rectangle : $[100 \text{ m} < x < 220 \text{ m}]$, et $[240 \text{ m} < y < 380 \text{ m}]$. À titre didactique, pour visualiser cette zone on va dessiner le rectangle avec

l'icône  situé sur la barre du haut. On sélectionne le champ « Zones de sol, Pluie, ETP, Infiltration », qui apparaît en bleu. Pour davantage de visibilité, on choisit des plages de couleurs équi-réparties par le menu « vue » → « Plages de couleurs » → « Équi-réparties », ou plus directement par le raccourci « Control+Q ». Le fond

apparaît alors en rose pâle. On clique sur l'icône , et on dessine un rectangle sur la limite de la zone : $x = 100$ à 220 m , $y = 240$ à 380 m (c'est-à-dire colonnes 6 à 11, lignes 12 à 18). On termine en double-cliquant sur le dernier point, pour fermer le contour. On lui donne le nom « Zone_Contam », il se dessine dans le maillage. En

accédant au menu de « Gestion des polygones » par l'icône , on voit que ce contour est la « couche de polygones » de nom « dessin ». Par le bouton « Enregistrer » situé complètement à sa droite, on sauvegarde ce polygone sous le nom « Zone_Contam.blm ». On peut changer sa couleur (en rouge par exemple et son épaisseur (6 unités par exemple).

On va affecter le numéro de zone n°2 à l'intérieur de cette zone contaminée, car on donnera la concentration $12500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à la recharge de cette zone. On choisit l'icône

 « Sélection des mailles contenues dans le contour fermé » et on double-clique à proximité du contour. On confirme que c'est bien l'intérieur du polygone « Zone_Contam » et toutes les mailles à l'intérieur du rectangle sont sélectionnées (en

rouge). Par l'icône  on leur donne le numéro de zone = 2. (On peut frapper Contr+L pour revenir à des plages linéaires)

Le flux d'infiltration de 252.46 mm/an était défini dans la zone n°1, maintenant qu'il y a 2 zones de recharge, il faut définir ce flux dans les 2 zones. On peut faire cette définition dans le fichier des paramètres généraux.

On actionne l'icône  pour faire apparaître le menu général. On double-clique sur la première ligne « Paramètres généraux », puis « Pré-processeur ». On sélectionne alors le paragraphe « Initialisation avant calculs ».

On sélectionne « Modifications existantes » puis « Bilan Hydroclimatique, Cultures ». On remplace alors le numéro de zone « 1 » par le numéro de zone « * » (toutes les zones) ou « 1 :2 » (numéros zones de 1 à 2).

7.4.2. Définition de la concentration dans la recharge

Dans le menu général des paramètres non maillés, on double-clique sur la ligne « Pas de temps » → « Pré-Processeur » → On sélectionne le pas de temps n°1 → « Nouvelle Modification » → *Thème* « Transport, Densité, Trajectoires » → *objet* « CONCEN_RECH = Concentration de la Recharge » (Figure 35). On fixe alors la valeur 12500 dans la zone de sol n°2 et on clique OK.

Il faut retirer le flux massique de 262.98 qui avait été introduit : pour cela, après avoir cliqué sur « Retour » on choisit « Modifications existantes » → *Thème* « Transport, Densité, Trajectoires » → *Objet* « QMASS_CONC = Débit Massique Concentration ». On remplace la valeur 262.98 par 0.

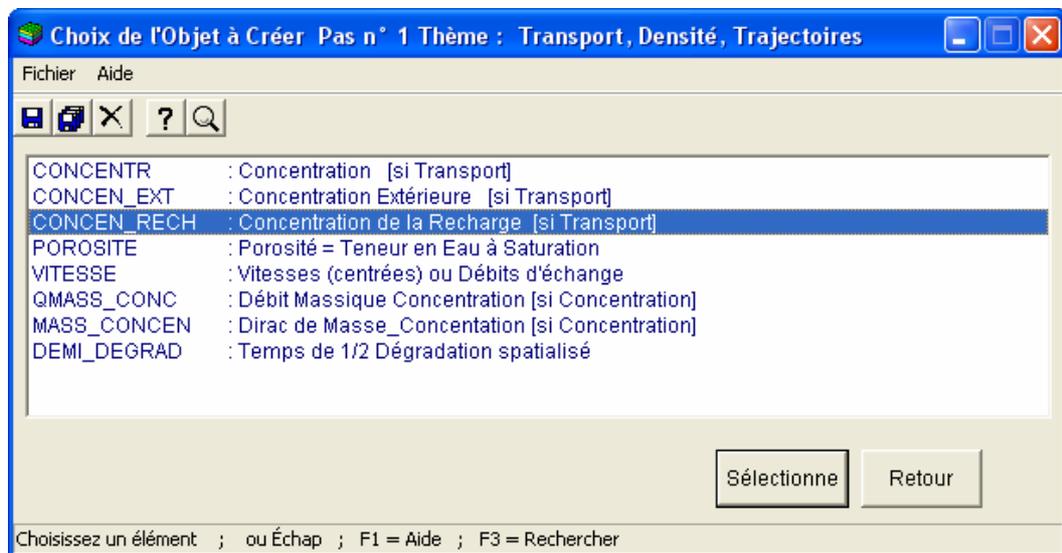


Figure 35 – Définition de la Concentration de la Recharge au pas de temps n°1.

8. Insertion d'un maillage gigogne

Pour améliorer la précision au voisinage du puits de pompage, on va introduire un sous-maillage gigogne. Ce maillage gigogne aura une extension de 7 colonnes et 7 lignes centrées sur le puits de pompage (colonne n°25, ligne n°15). Il remplacera donc les colonnes n°22 à n°28 des lignes n°12 à n°18. Le maillage gigogne aura des lignes et colonnes 2 fois plus fines (soit 10 mètres) sauf dans la maille du puits qui sera subdivisée en 25 mailles de 4 m de coté.

8.1. CRÉATION DU SOUS-MAILLAGE

Pour conserver l'exemple précédent intact, on fait tout d'abord une copie du projet sous le nom *Didact3_Gig* en utilisant comme précédemment le menu « Fichier » → « Faire une copie du projet ». Puis on ferme le projet *Didact3* et on ouvre le projet *Didact3_Gig(.rma)*.

Il faut vérifier que tous les champs (non uniformes) du projet sont bien chargés avant la modification du maillage, car seuls les champs chargés seront modifiés. (Ces champs sont les 5 suivants : *Didact3.permh*, *.charg*, *.debit*, *.hsubs*, *.zonep*).

On sélectionne alors le champ des perméabilités et on se place sur la couche n°1. On

sélectionne alors, impérativement avec le « rectangle extensible » , la zone comprise entre les colonnes n°22 à n°28 des lignes n°12 à n°18. On appuie alors sur le

bouton  (création d'un gigogne). On confirme (on ou ajuste) les coordonnées dans le dialogue qui apparaît Figure 36. On va alors définir les dimensions des colonnes et des lignes du gigogne. Dans le cas le plus simple, il suffit de donner le nombre de sous-colonnes et le nombre de sous-lignes subdivisant chaque colonne et ligne de la fenêtre gigogne. Dans notre exemple, les nombre de sous-lignes et de sous-colonnes ne sont pas uniformes. On fixe 2 sous colonnes pour les colonnes sauf pour la colonne centrale n°25 qui aura 5 sous-colonnes. De la même manière, on fixe 2 sous-lignes pour toutes les lignes et 5 sous-lignes pour la ligne centrale n°15. (Figure 37). On voit alors apparaître le sous-maillage (Figure 38). Dans Marthe, ce sous-maillage concerne toujours toutes les couches.

8.2. AJUSTEMENT DES DONNÉES MAILLÉES

Les données du maillage principal ont été reportées automatiquement dans les mailles correspondantes du maillage gigogne. En fait toutes ces données sont constantes au niveau du gigogne, à l'exception des débits du puits de pompage. En se plaçant dans la couche n°3 du champ des débits, au voisinage du pompage, on voit que les 25 petites mailles ont chacune un débit égal à -12. On supprime ces valeurs, sauf la valeur centrale (par exemple en sélectionnant les 25 mailles avec le « rectangle

extensible », en y mettant la valeur 0, et en refixant un débit de -12 dans la maille du centre).

Figure 36 – Définition de l’extension du maillage gigogne.

Figure 37 – Définition des dimensions des sous- colonnes et sous- lignes.

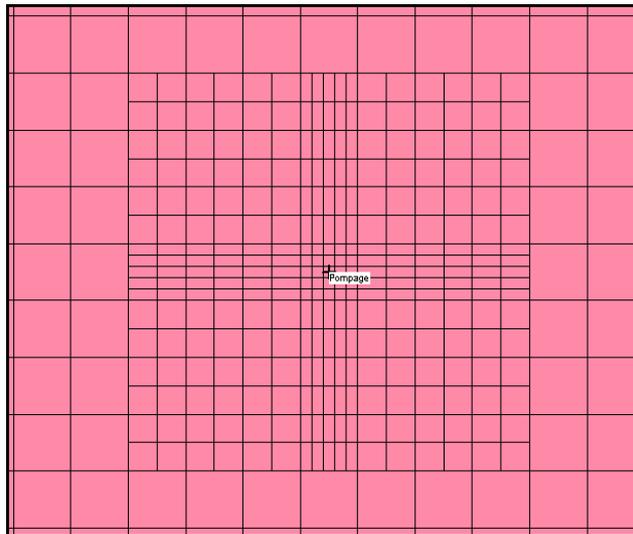


Figure 38 – Sous-maillage gigogne au voisinage du puits de pompage.

Par sécurité, on sauvegarde () les modifications.

8.3. AJUSTEMENT DES PARAMÈTRES NON MAILLÉS

8.3.1. Anisotropie verticale de perméabilité

Dans notre exemple, on a défini une anisotropie verticale de perméabilité égale à 500 dans la maille [col=25, Lig=15, Couches 1 à 3]. Il faut la remplacer par la maille du centre du gigogne [col=10, Lig=10, Couches 1 à 3, Gigogn=1]. On actionne l'icône  pour faire apparaître le menu général, puis → « Paramètres Généraux » → « Pré-Processeur » → Paragraphe « Initialisation avant calculs » → « Nouvelles Modifications » → « Paramètres Avancés » → « Aniso_Verti » → « Maill »

On sélectionne alors le gigogne n°1, puis [col=10, Lig=10, Couch=1:3] et on fixe la valeur 500.

(On pourrait, par élégance, supprimer la valeur 500 de la maille [col=25, Lig=15, Couch=1:3] du maillage principal en choisissant « Modifications Existantes » → « Paramètres Avancés » et en donnant les coordonnées [col=0, Lig=0, Couch=0], mais ce n'est pas vraiment nécessaire, car les mailles [col=25, Lig=15] du maillage principal ne sont pas actives).

8.3.2. Schéma de calcul du transport

On utilise la méthode des caractéristiques MOC, car **la méthode TVD est opérationnelle uniquement pour les maillages sans gigognes.**

Départs de trajectoires

On va faire partir les trajectoires sur un cercle de 3 mètres de rayon (c'est-à-dire un cercle qui inclut juste la maille centrale de 4 m de côté) : Figure 39.

Maille	Col / X	Lign / Y	Couch / Z	(Gig)	Nb Ray	Rayon	Group
<input checked="" type="checkbox"/>	10	10	1	1	28	3.000	1
<input checked="" type="checkbox"/>	10	10	2	1	28	3.000	2
<input checked="" type="checkbox"/>	10	10	3	1	28	3.000	3
<input type="checkbox"/>							

Figure 39 – Départs de trajectoires inverses à partir du puits.

8.4. LANCEMENT DES CALCULS ET EXAMEN DES RÉSULTATS

Comme précédemment on lance les calculs par l'icône «  » et on examine les résultats. La Figure 40 montre le tracé très précis des isovaleurs et des trajectoires de la couche n°3.

En revanche, les concentrations calculées, qui sont loin de la zone de maillage raffiné, sont quasiment inchangées par l'ajout du gigogne

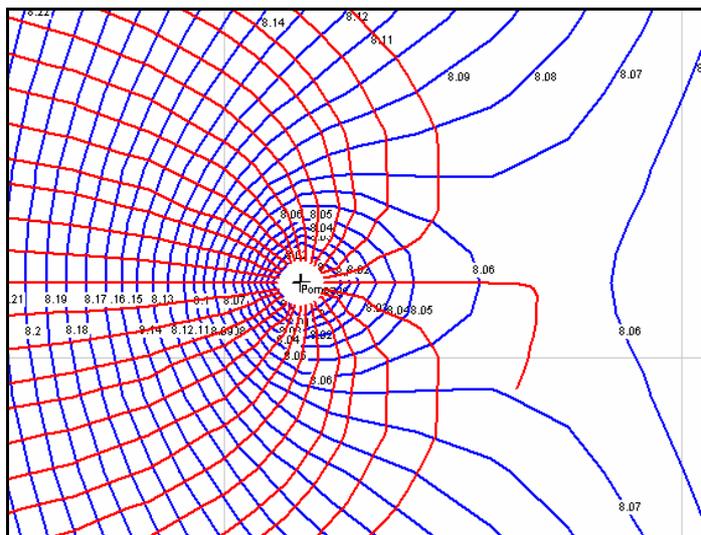


Figure 40 – Isovaleurs et lignes de courant : calcul avec un sous-maillage gigogne au voisinage du puits de pompage.

9. Calage automatique des paramètres

On va montrer sur cet exemple comment on peut caler automatiquement des paramètres hydrodynamiques (perméabilités) et des paramètres de transport (dispersions, etc.) de manière à obtenir une simulation la plus proche possible d'historiques d'observations de charges et de concentrations. Pour simplifier la mise en œuvre de cet exemple, on va tout d'abord réaliser un calcul puis conserver des historiques calculés et considérer que sont des « observations ». On va alors partir de paramètres différents (perméabilités différentes, dispersivités différentes) et laisser le modèle les « optimiser » pour retrouver les perméabilités et dispersivités de référence. Le calcul préliminaire correspond au projet **Didact3.rma**, avec la méthode TVD, qu'on avait conservé. On fait tout d'abord deux petites modifications :

- On ajoute la demande d'historiques de charge en 4 points de la couche n°3, comme illustré ci-dessous.

/Charge	/HISTO/	=	/XCOO:X=	130Y=	200P=	3;CH1
/Charge	/HISTO/	=	/XCOO:X=	200Y=	400P=	3;CH2
/Charge	/HISTO/	=	/XCOO:X=	480Y=	250P=	3;CH3
/Charge	/HISTO/	=	/XCOO:X=	460Y=	450P=	3;CH4

- On sélectionne un format d'édition des historiques sous une forme directement compatible avec les fichiers « d'historiques observés » :

« Paramètres Généraux » → « Pré-Processeur » → Paragraphe « Sauvegardes et contrôles »

`2 = Format d'écriture des Histo., Profils (0='Excel' -1=Successifs 2=Les 2)]`

On fait tourner le modèle et on obtient en particulier le fichier *historiq.out* qui contient les historiques de référence.

Pour conserver l'exemple courant intact, on fait tout d'abord une copie du projet sous le nom *Didact3_Opt* en utilisant comme précédemment le menu « Fichier » → « Faire une copie du projet ». Puis on ferme le projet *Didact3* et on ouvre le projet *Didact3_Opt(.rma)*.

9.1. PARAMÈTRES DE MODÉLISATION À OPTIMISER

Les 4 paramètres de modélisation suivants seront optimisés :

- La perméabilité de la couche n°3 (Variable PERMEAB). Il faudra donc préparer un champ de zones dans lequel toutes les mailles de la couche n°3 auront par exemple la valeur 3.
- La dispersion longitudinale (constante DISPER_LONGI)

- La dispersion transversale (constante DISPER_TRANSV)
- L'anisotropie verticale de perméabilité (constante ANISO_VER_GLO)

9.2. DÉFINITION DES ZONES DE PERMÉABILITÉ

On doit créer un champ avec un numéro de zone égal à 3 dans toutes les mailles de la couche n°3. Dans WinMarthe, on sélectionne (touche F3) le champ « Travail », On se place alors sur la couche n°3, on sélectionne toutes les mailles et on leur donne la valeur 3. On sélectionne alors à nouveau le champ « Travail » (touche F3) et on active le bouton « Sauvegarder / Exporter » → « Exporter (semis) sous » et on donne le nom *Didact3_opt.zonep*. (« zonep » pour « Zones de Perméabilité »)

9.3. DÉFINITION DES HISTORIQUES D'OBSERVATION

Ces historiques ont la même forme que le fichier historiq.out, mais concernent chacun un seul type d'observation.

- Observations de charges : *Didact3_opt.h_charg*

Ce fichier contient les 4 historiques de charge (sur les 36 pas de temps, bien que les charges soient constantes).

```

Didacticiel 2 : Hydraulique Permanent + Transport [V6.9]
Historiques de CHARGES : Dates et <Charge> <HISTO> 4 mailles
!Maille Colonne= 7, Ligne= 20, Couche= 3
! Coordonnées exactes : X= 130.0000 Y= 200.0000 =====
! Localisat = CH1 ;
0.000 8.8497
1.000 8.8497
2.000 8.8497
..... etc .....
36.000 8.8497
!Maille Colonne= 10, Ligne= 10, Couche= 3
! Coordonnées exactes : X= 200.0000 Y= 400.0000 =====
! Localisat = CH2 ;
0.000 8.7443
1.000 8.7443
..... etc .....
36.000 8.7443
!Maille Colonne= 24, Ligne= 18, Couche= 3
! Coordonnées exactes : X= 480.0000 Y= 250.0000 =====
! Localisat = CH3 ;
..... etc .....
36.000 8.1806
!Maille Colonne= 23, Ligne= 8, Couche= 3
! Coordonnées exactes : X= 460.0000 Y= 450.0000 =====
! Localisat = CH4 ;
..... etc .....
36.000 8.2604

```

- Observations de concentrations : Didact3_opt.h_conce

```

Didacticiel 2 : Hydraulique Permanent + Transport [V6.9]
Historiques de CONCENTR. : Dates et <Concentr> <HISTO> 6 mailles
!Maille Colonne= 15, Ligne= 15, Couche= 1
! Coordonnées exactes : X= 290.0000 Y= 310.0000 =====
! Localisat = P1 ;
    0.000 0.000000
    1.000 5.9969372E-05
    2.000 1.8772781E-03
    3.000 0.0156
    ..... etc .....
    14.000 27.7869
    ..... etc .....
    36.000 585.8584
!Maille Colonne= 20, Ligne= 15, Couche= 1
! Coordonnées exactes : X= 390.0000 Y= 310.0000 =====
! Localisat = P2 ;
    0.000 0.000000
    ..... etc .....
    36.000 78.0304
    ..... etc .....
!Maille Colonne= 20, Ligne= 15, Couche= 3
! Coordonnées exactes : X= 390.0000 Y= 310.0000 =====
! Localisat = P6 ;
    0.000 0.000000
    1.000 1.3737145E-10
    36.000 100.8566

```

9.4. DÉFINITION DES PARAMÈTRES POUR L'OPTIMISATION

On actionne l'icône  pour faire apparaître le menu général, puis → « Paramètres pour Optimisation » → « Pré-Processeur » → « Créer un nouveau fichier Optimisation ». Ce fichier comporte 5 paragraphes. On définit les valeurs suivantes :

9.4.1. Paramètres généraux d'optimisation

Paragraphe « Paramètres Généraux Optimisation [Simul,Incrém.] »

```

1 = Optimisat. 0=Non ; 1=Optimis/Zones ; 3=Modèle Inverse ; 4=Coef. Influence
27 = Nombre Maximal de Simulations pour l'optimisation

```

On a choisit un nombre de 27 simulations maximum. En effet il y a 4 paramètres à optimiser soit 5 simulations par passe d'optimisation. On estime qu'il faut 4 à 5 passes d'optimisation soit un nombre de 20 à 25 simulations, nombre qu'on majore un peu par sécurité.

Paragraphe « Paramètres Généraux Optimisation [pondérations]»

On laisse les valeurs par défaut :

0 = Poids sur les Historiques de Charges obs. % (0<=>100%)
0 = Poids sur les Historiques de Concent obs. % (0<=>100%)

Les historiques d’observations de charges et les historiques d’observations de concentrations auront donc un même poids (50 % chacun).

Paragraphe « Écarts-type, Intervalles de confiance »

1 = Calcul des Écarts-type des Paramètres

9.4.2. Variables à optimiser

On sélectionne le 5^{ème} paragraphe « Paramètres à optimiser ou analyser ». On voit apparaître une boîte de dialogue pour choisir les variables, dont la Figure 41 montre un extrait.



Figure 41 – Choix des variables à optimiser.

On choisit la variable PERMEAB (Perméabilité), on accepte la création de cette variable qui n’existait pas encore. On définit alors le numéro de la zone dont on veut optimiser la perméabilité : la zone n° 3 dans notre application. On définit alors les 3 paramètres suivants (Figure 42) :

- Valeur initiale = 15
- Valeur minimale = 1.
- Valeur maximale = 100

Value	Description
3	= Numéro de Zone correspondante (si applicable) [-1 => Retire la zone]
0	= Transformation (0=Logarith. 1=Arithm. 2=Inverse) (Def=Logarit.)
0	= Num de la Zone (précéd.) qui est Identique (Def = 0 ; 9999 = Pas Optimis)
15	= Valeur Initiale du Paramètre
1	= Valeur Minimale permise pour le Paramètre
100	= Valeur Maximale permise pour le Paramètre
0	= Variation du Param. pour Dérivées. Def = Ampl/100 (% si Logar Def = 5%)
0	= Effet Correcteur (0=Non 1 = Fact. Multiplic. ; 2 = Fact. Additif)

Figure 42– Paramètres de la perméabilité de la zone n°3

C'est-à-dire qu'on cherche la valeur optimale de la perméabilité comprise entre 1 et 100 (10^{-4} m/s) en partant d'une estimation initiale égale à 15 [la valeur vraie est égale à 5 (10^{-4} m/s)].

On procède de la même manière avec les 3 autres variables.

- DISPER_LONGI : Val init = 3, Mini = 1, Maxi = 50 [vraie valeur = 10 m]
- DISPER_TRANSV: Val init = 0.3, Mini = 0.1, Maxi = 10 [vraie valeur = 1 m]
- ANISO_VER_GLO: Val init = 0.3, Mini = 0.02, Maxi = 1 [vraie valeur = 0.1]

Ces 3 dernières variables étant spatialement uniformes, elles n'ont pas de numéro de « zones », il n'est donc pas nécessaire d'en définir une. On peut donc laisser le numéro de zone à 0.

On enregistre alors ce paramètre (*Didact3_opt.paropt*) et on est retourné dans le menu général des paramètres non maillés.

9.5. MISE À JOUR DU « FICHER PROJET OPTIMISATION »

Pour introduire les 3 autres fichiers créés pour l'optimisation : (*Didact3_opt.zonep*, *Didact3_opt.h_charg*, *Didact3_opt.h_conce*), on choisit « Fichier Projet Optimisation », puis, à l'aide des boutons « Parcourir » on sélectionne ces fichiers respectivement comme « Zones de perméabilité », « Historiques de charges obs. », « Historiques de concentrations obs. ». (Figure 43).

On accepte de sauvegarder le « fichier Projet Optimisation » (*Didact3_opt.namopt* qui contiendra les noms des 4 fichiers optimisation : (*Didact3_opt.paropt*, *.zonep*, *.h_charg*, *.h_conce*). Puis on sort après avoir accepté de mettre à jour le fichier Projet Marthe (*Didact3_opt.rma* qui contiendra maintenant le nom *Didact3_opt.namopt*).

On est alors retourné à WinMarthe *sensu stricto*.

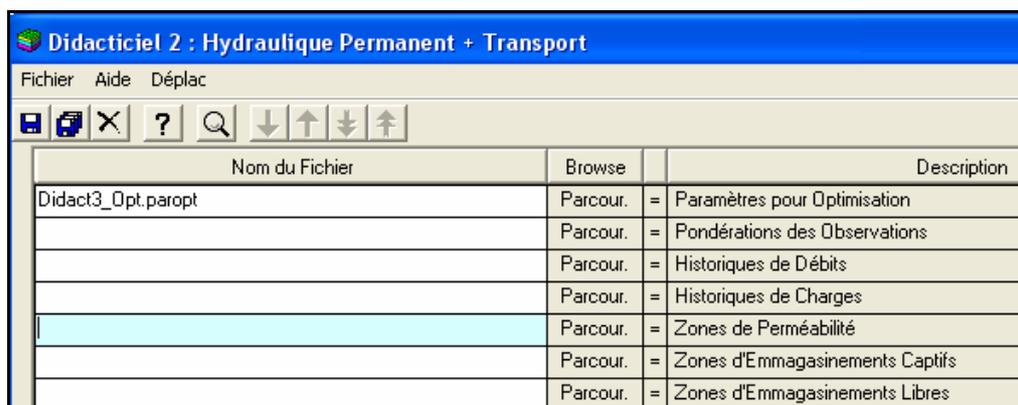


Figure 43 – Mise à jour du fichier Projet Optimisation

9.6. LANCEMENT DES CALCULS ET EXAMEN DES RÉSULTATS

On lance les calculs qui se terminent après quelques minutes car 30 simulations doivent être réalisées successivement.

À l'issue des calculs on obtient bien les valeurs de référence comme le montre le Tableau 1 ci-dessous.

Variable	Init	Pass 1	Pass 2	Pass 3	Pass 4	Pass 5	Vraie
PERMEAB 3	15	7.78	3.99	5.08	4.989	5.00	5
DISPER_LONGI	3	49.98	28.0	11.98	10.22	10.00	10
DISPER_TRANSV	0.3	0.92	1.15	0.87	0.995	1	1
ANISO_VER_GLO	0.3	0.02	0.02	1.00	0.02	0.046	0.1
Critère erreur (%)	14.96	12.01	1.06	0.04	0.0017	0.00001	0

Tableau 1- Calage automatique de 4 paramètres hydrauliques et hydrodispersifs

Un examen de la matrice de corrélation montre que le paramètre d'anisotropie est fortement corrélé aux autres, il est donc moins bien identifié :

- $\text{Corrél}(\text{ANISO_VER_GLO}, \text{PERMEAB } 3) = -0.956$
- $\text{Corrél}(\text{ANISO_VER_GLO}, \text{DISPER_TRANSV}) = -0.867$

10. Écoulement sous un barrage

Ce nouvel exemple montre comment réaliser un modèle coupe pour calculer les écoulements sous un barrage, ainsi que les lignes de courant (c'est-à-dire les trajectoires).

Les caractéristiques du système sont les suivantes :

- Épaisseur de l'aquifère = 9 mètres (substratum = 0, topographie = 9 m)
- Perméabilité = $5 \cdot 10^{-4}$ m/s
- Anisotropie verticale de perméabilité = 0.2
- Largeur du barrage = 13 m
- Charge en surface à l'amont du barrage = 12 m, charge à l'aval du barrage = 10 m
- Pénétration du barrage dans l'aquifère = 1 m
- Extension latérale modélisée = 65 m, limitée par des limites étanches.
- Calcul en régime permanent

10.1. MODÉLISATION

Pour modéliser ce système, on adopte un schéma en coupe. Le maillage sera formé de 65 colonnes de 1 m de largeur et 9 lignes de 1 m d'épaisseur. Les 9 lignes représentent en fait les 9 couches de modélisation. L'extension verticale modélisée s'étend donc de 0 à 9 m. L'extension latérale s'étend de -32.5 m à +32.5 m. Le barrage, situé dans la couche n°1 (ligne n°1), s'étend sur les 13 colonnes centrales. Il est représenté par 13 mailles de perméabilité égale à 0.

La mise en œuvre de la modélisation est extrêmement simple et ne pose aucun problème. Pour indiquer qu'on réalise une modélisation en coupe verticale il faut valoriser un paramètre dans les « paramètres Généraux » : dans le paragraphe « Point origine et état des données »

Paragraphe : « Point origine et état des données » :

<p>Coupe = Orientat. maillage : 0=Standard ; 1=Coupe Verticale : Pesant. sur Oy ou bien</p> <p>Vertic = Orientat. maillage : 0=Standard ; 1=Coupe Verticale : Pesant. sur Oy</p>
--

On peut également préciser (bien que ce soit la valeur par défaut) :

1 = Épaisseur Tranche de coupe (Unité de Coordonnées de Mailles ou Degrés)

Pour fixer le coefficient d'anisotropie verticale de perméabilité, il faut bien définir un coefficient d'anisotropie *verticale* (et non horizontale), bien que les couches soient représentées *graphiquement* par des lignes.

Paragraphe : « Unités des données » :

0.2 = Coefficient d'Anisotropie Verticale Kv/Kh des Perméabilités

Pour définir simplement les départs de trajectoires : on fait démarrer les trajectoires à l'aplomb du centre du barrage (colonne n°33) successivement dans les 8 couches, n°2 à 9. Pour être cohérent avec le maillage, elles peuvent également être définies *Lignes* n°2 à 9, ou bien encore plus simple « Toutes les lignes » en utilisant le « joker « * » (Figure 44).

Départs Trajectoires							
Maille	Col / X	Lign / Y	Couch / Z	(Gig)	Nb Ray	Rayon	
<input checked="" type="checkbox"/>	33	1	2				
<input checked="" type="checkbox"/>	33	1	3				
<input checked="" type="checkbox"/>	33	1	4				
<input checked="" type="checkbox"/>	33	1	5				
<input checked="" type="checkbox"/>	33	1	6				
<input checked="" type="checkbox"/>	33	1	7				
<input checked="" type="checkbox"/>	33	1	8				
<input checked="" type="checkbox"/>	33	1	9				
Ou bien :							
<input checked="" type="checkbox"/>	33	2					
<input checked="" type="checkbox"/>	33	3					
<input checked="" type="checkbox"/>	33	4					
<input checked="" type="checkbox"/>	33	5					
<input checked="" type="checkbox"/>	33	6					
<input checked="" type="checkbox"/>	33	7					
<input checked="" type="checkbox"/>	33	8					
<input checked="" type="checkbox"/>	33	9					
Ou bien, plus simplement :							
<input checked="" type="checkbox"/>	33	*					

Figure 44 – Définition des départs de trajectoires sous le barrage

Dans un premier calcul on calcule les trajectoires directes :

1 = Calcul de Trajectoires (1 = Oui ; -1 = Trajectoires inverses)

On renomme le fichier trajmar.bln, par exemple en trajmar_aval.bln, puis on réalise un second calcul avec des trajectoires inverses à partir de ces mêmes points de départs :

Invers = Calcul de Trajectoires (1 = Oui ; -1 = Trajectoires inverses)

10.2. RÉSULTATS

La Figure 45 montre les équipotentiels et les lignes de courant obtenues. Le débit total d'écoulement calculé dans le domaine souterrain est égal à $2.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ par mètre d'épaisseur de tranche.

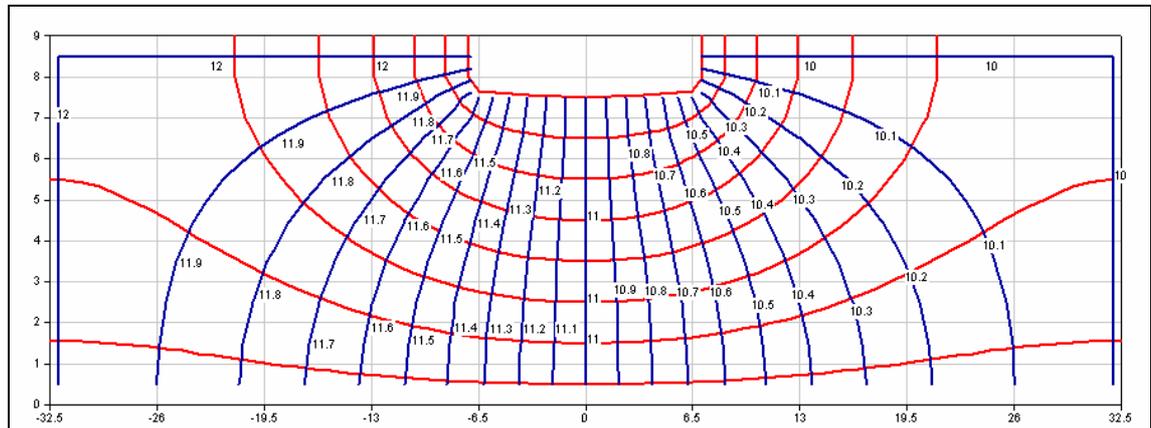


Figure 45 – Écoulement sous un barrage : équipotentiels (en bleu) et lignes de courant (en rouge)

Remarque : Pour la simplicité, cet exemple est traité en coupe, mais MARTHE permet de le traiter en 3D.

11. Écoulement à surface libre à travers un barrage avec surface de suintement

Cet exemple, adapté d'un exemple de calcul en zone non saturée cité par Cooley, R.L. (1983), montre comment utiliser un modèle coupe pour calculer les écoulements à surface libre à travers un barrage en prenant en compte une surface de suintement.

Les caractéristiques du système sont les suivantes :

- Substratum = 0 m
- Perméabilité = $1 \cdot 10^{-5}$ m/s
- Largeur du barrage = 10 m
- Charges imposées : à l'amont du barrage = 10 m, à l'aval du barrage = 2 m
- Calcul en régime permanent

11.1. MODÉLISATION

La modélisation de ce système ne pose pas de problèmes. On adopte un schéma en coupe verticale. Le maillage sera formé de 21 colonnes de 0.5 m de largeur et 20 lignes de 0.5 m d'épaisseur qui représentent 20 couches de modélisation. L'extension verticale modélisée s'étend donc de 0 à 10 m et l'extension latérale de -0.25 à 10.25 m compte tenu du fait que les potentiels sont imposés au milieu des colonnes, c'est-à-dire aux abscisses 0 m et 10 m.

11.1.1. Charges imposées et conditions de suintement

On impose normalement une charge égale à +10 m sur toutes la colonne n°1 qui constitue la limite amont. Sur la limite aval, colonne n°21, on impose une charge égale à +2 m sur les 4 lignes inférieures dont les altitudes sont inférieures à 2 m. Sur les 16 autres mailles, on impose un « index de suintement » (champ « IND_SUINTEM ») égal à 1, ce qui impose automatiquement un débit sortant si la charge dépasse le toit de chaque couche.

11.1.2. Schéma de calcul

Le schéma de calcul par défaut de Marthe est le schéma en « Pseudo Non saturé » qui permet de prendre en compte la gestion des surfaces libres et des dénoiements sans problèmes.

Pour indiquer qu'on réalise une modélisation en coupe verticale il faut valoriser un paramètre dans les « paramètres Généraux » : dans le paragraphe « Point origine et état des données »

Paragraphe : « Point origine et état des données » :

Coupe = Orientat. maillage : 0=Standard ; 1=Coupe Verticale : Pesant. sur Oy

On peut également préciser (bien que ce soit la valeur par défaut) :

1 = Épaisseur Tranche de coupe (Unité de Coordonnées de Mailles ou Degrés)

Compte tenu des non linéarités, la convergence des calculs rend nécessaire un coefficient de sous-relaxation. On choisit initialement un coefficient égal à 0.7.

Paragraphe : « Contrôle de la Résolution Hydrodynamique » :

0.7 = Coefficient de Relaxation des calculs [Def=1]

11.2. RÉSULTATS

Les calculs se terminent en moins de 1/10 seconde et convergent parfaitement (à $3 \cdot 10^{-5}$ %) en 30 itérations. En fait, il apparaît que la convergence est quasiment aussi rapide avec un coefficient de relaxation compris entre 0.5 et 0.9. En revanche sans sous-relaxation (coefficient de relaxation = 1), la convergence est légèrement plus lente.

Les calculs ne posent aucun problème, en particulier, contrairement à certains modèles, il n'y a ni coefficient de re-noiement ni seuil de re-saturation à définir.

La Figure 46 montre les équipotentielles et la surface libre de courant obtenues. On voit que le schéma en « Pseudo Non Saturé » calcule des charges également dans la zone située au dessus de la surface libre, mais ces charges sont inférieures à l'altitude du substratum, ce qui correspond à des pressions négatives comme dans la réalité. Les écoulements à travers les mailles de cette zone sont extrêmement faibles car elles ont un taux de saturation résiduelle très faible. Le débit total d'écoulement calculé à travers le massif est égal à $4.73 \cdot 10^{-5}$ m³/s par mètre d'épaisseur de tranche.

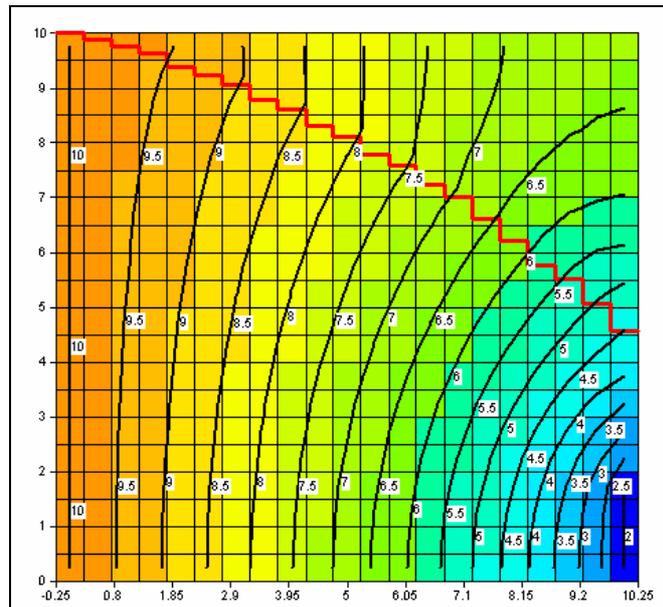


Figure 46 – Écoulement à surface libre à travers un barrage avec surface de suintement

Remarque : Pour la simplicité cet exemple est traité en coupe, mais MARTHE permet de le traiter en 3D.

12. Simulation fine en radial d'une remontée de la surface libre résultant d'une recharge locale à travers la zone non saturée

Cet exemple montre comment utiliser un modèle en radial pour calculer finement la remontée de la surface libre d'une nappe résultant d'une recharge locale à travers la zone non saturée.

Les caractéristiques du système sont les suivantes :

- Épaisseur de l'aquifère = 70 pieds (substratum = 0, topographie = 70 pieds)
 - Extension latérale 5000 pieds
 - Perméabilité horizontale = 5 pieds/jour = $5 \times 3.57278 \cdot 10^{-6}$ m/s
 - Anisotropie verticale de perméabilité = 0.05
 - Largeur du barrage = 10 m
 - Charges imposées sur la limite latérale = 25 pieds (jusqu'à l'altitude 25 pieds)
 - Coefficient d'emmagasinement en nappe libre = 20 % (emmagasinement captif négligeable = 0.001 m^{-1}).
 - Débit de recharge = $254 \text{ m}^3/\text{j}$ sur une surface d'environ 24281 m^2 .
 - Calcul en régime transitoire
- (N.B. 1 pied = 0.3048 mètre).

12.1. MODÉLISATION

On va discrétiser ce système en 14 couches de 5 pieds d'épaisseur et avec des mailles d'extension latérale de 125 pieds.

Pour modéliser efficacement ce système, en profitant de la symétrie on utilise la possibilité de Marthe de gérer un maillage en radial.

- Abscisses : Les abscisses correspondent à la distance radiale depuis l'origine, les colonnes correspondent donc à des couronnes dont le rayon est l'abscisse
- Ordonnées : Les ordonnées correspondent à l'angle (en degré), les lignes correspondent à un secteur d'angle.

Compte tenu de la symétrie, on pourrait représenter chaque couche par une ligne de largeur 360° et de longueur 5000 pieds, divisée en 40 colonnes de 125 pieds. On aurait alors 14 couches composées chacune d'une ligne de 40 colonnes.

En fait, il est encore beaucoup plus simple de réaliser une « coupe verticale en radial ».

Le maillage est alors composé de 40 colonnes de 125 pieds de largeur et de 14 lignes de 5 pieds qui représentent les 14 couches. On indique que la tranche de coupe est de 360°.

12.1.1. Paramètres généraux

Paragraphe : « Unités des données » :

3.57278e-6 = Unité des Perméabilités des Aquifères en m/s (ou m2)
 m3/j = Unité des Débits en m3/s (kg/s si Gaz)
 0.3048 = Unité des Charges, Altitudes en m
 1e-3 = Unité des coefficients d'Emmagasinement Captifs en [-] ou 1/m
 % = Unité des coefficients d'Emmagasinement Libre en [-] [% si en %]
 0.3048 = Unité des Coordonnées Horizontales des mailles en m
 5e-2 = Coefficient d'Anisotropie Verticale Kv/Kh des Perméabilités
 % = Unité des Porosités = Teneurs en Eau en [-] [% si en %]

Paragraphe : « Point origine et état des données » :

Coupe = Orientat. maillage : 0=Standard ; 1=Coupe Verticale : Pesant. sur Oy
 360 = Épaisseur Tranche de coupe (Unité de Coordonnées de Mailles ou Degrés)

12.1.2. Définition du type de maillage : Radial


 Icône pour faire apparaître le menu général, puis → « Couches Aquifères et Gigognes » → « Pré-Processeur » → Paragraphe « Sous-maillages Gigognes, Coupe, Radial » (fichier de description des couches [.layer]).

Paragraphe : « Sous-maillages Gigognes, Coupe, Radial » :

0 = Nombre de sous-maillages Gigognes
 0 = Coupe Verticale à Substratums Irréguliers (0=Non 1=Oui)
 1 = Maillage Radial [Rayon , Angle] (0=Non 1=Oui)

12.1.3. Débit de percolation

On applique le débit de percolation de 254 m³/j réparti sur les deux premières mailles, c'est-à-dire sur un disque de rayon 125 pieds et sur la couronne de rayons 125 à 250 pieds, soit une surface totale d'environ 18 241 m². On introduit ¼ du débit sur la maille n°1 et ¾ du débit sur la maille n°2 qui a une surface 3 fois plus grande.

12.2. MODÉLISATION EN RÉGIME PERMANENT

On réalise un premier calcul en régime permanent avec les paramètres de résolution suivants :

Paragraphe : « Contrôle de la Résolution Hydrodynamique » :

60 = Nombre maxi d'Itérations pour le pas de temps n°0 (Permanent Initial)
 1e-7 = Variat. Moy. de Charge entre 2 Itérations pour Convergence [Def=1e-8]
 0 = Coefficient de Relaxation des calculs [Def=1]
Perman = Régime Hydrodynamique [0=Transitoire 1=Permanent]
 1 = Perméabilité Verticale nominale si Pseudo-Zns [1=Oui ; 0=Selon satur]

N.B. Le dernier paramètre « Perméabilité Verticale nominale » permet de gérer plus efficacement la percolation à travers les couches dénoyées.

12.3. RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION EN RÉGIME PERMANENT

Les calculs s'effectuent extrêmement rapidement en 16 itérations, en 1/10 de seconde, sans aucune difficulté, avec une convergence parfaite :

- Écart de convergence globale = $1 \cdot 10^{-4} \%$
- Écart de convergence interne = $2 \cdot 10^{-10} \%$

La Figure 47 montre la position de la surface libre calculée.

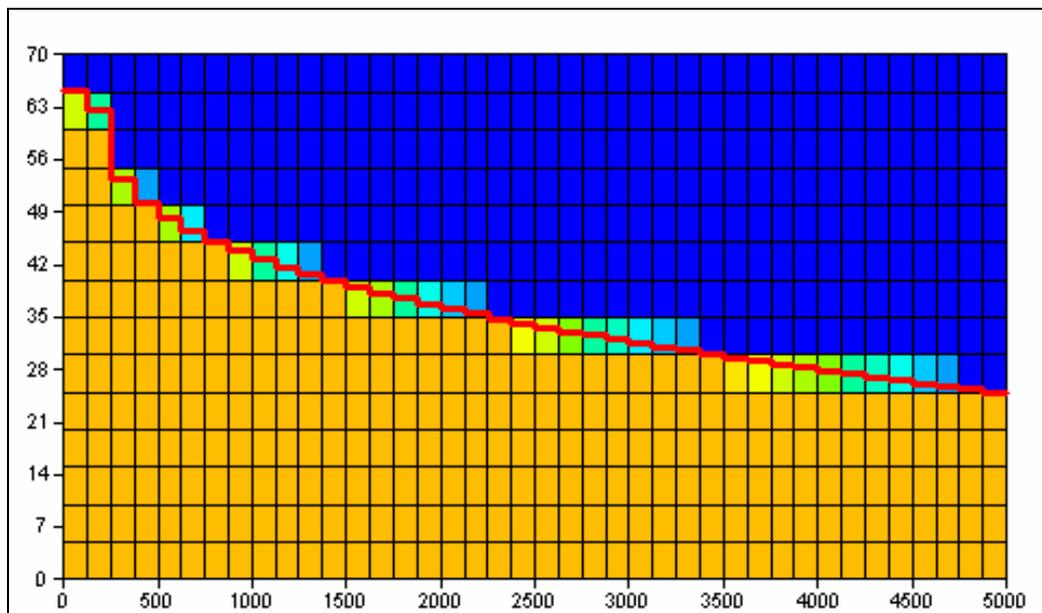


Figure 47 – Remontée de la surface libre : régime permanent

12.4. MODÉLISATION EN RÉGIME TRANSITOIRE

On part d'un niveau piézométrique horizontal à l'altitude 25 pieds et on calcule l'évolution de la surface libre au cours du temps. On modélise une période totale de 498 000 jours en utilisant des pas de temps dont la durée suit une croissance géométrique de raison 1.3. Le premier pas de temps a une durée de 0.3 jour, le 2^{ème} une durée 1.39 jour et le 50^{ème} une durée de 114 906 jours.

Le calcul en régime transitoire est réalisé avec les paramètres de résolution suivants :

Paragraphe : « Contrôle de la Résolution Hydrodynamique » :

100 = Nombre Maxi d'Itérations par pas de temps Calcul suivant le Pas n°0
 0 = Nombre maxi d'Itérations pour le pas de temps n°0 (Permanent Initial)
 1e-7 = Variation Moy. de Charge entre 2 Itérations pour Convergence [Def=1e-8]
 0.2 = Coefficient de Relaxation des calculs [Def=1]
 0 = Régime Hydrodynamique [0=Transitoire 1=Permanent]
 1 = Perméabilité Verticale nominale si Pseudo-Zns [1=Oui ; 0=Selon satur]

En régime transitoire, compte tenu des non-linéarités, il est nécessaire d'utiliser un coefficient de sous-relaxation des calculs. Avec ces paramètres on obtient une très bonne convergence et les 50 pas de temps de modèle sont calculés en quelques secondes. La convergence des calculs est très bonne. La Figure 48 montre l'évolution de la surface libre après 12 j, 50 j, 111 j, 190 j, 700 j, 2600 j, 9700 j et 36000 j

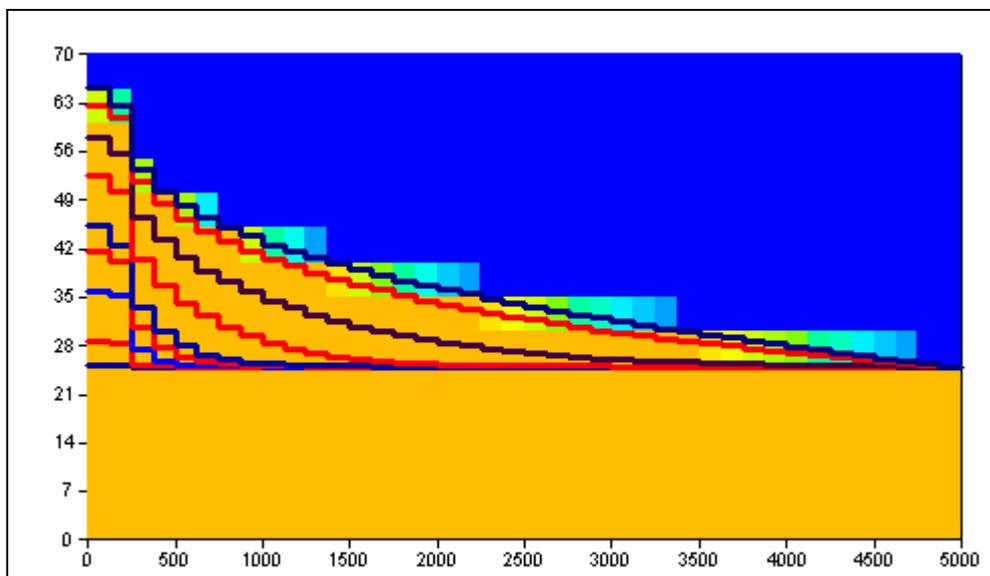


Figure 48 – Remontée de la surface libre : régime transitoire

Remarque : Pour la simplicité cet exemple est traité en 2D radial, mais MARTHE permet de le traiter en 3D.

13. Écoulement avec effets de densité à proximité de la mer : Biseau salé de Henry

Cet exemple classique de la littérature montre comment prendre en compte simplement les effets de densité liés aux variations de salinité dans un aquifère côtier. La mise en œuvre de la prise en compte des effets densitaires avec le code Marthe est décrite par Thiéry (2007).

Le système aquifère de 200 cm de large sur 100 cm de haut, sera modélisé en coupe verticale. La mer est située sur la limite droite, et un débit d'eau douce de $660 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$, par m d'épaisseur de coupe, arrive par la limite gauche.

Les caractéristiques du système sont les suivantes :

Paramètres hydrodynamiques et hydrodispersifs :

- Perméabilité : $K = 1 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$
- Porosité : $\omega = 35 \%$
- Diffusion : $D = 6.6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- Dispersivités = 0
- Loi de densité : Loi linéaire $\rho = 1000 + 1 \cdot C$

Conditions aux limites :

- Limite ouest : Salinité extérieure = 0, débit d'eau douce = $660 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ répartis sur 20 mailles.
- Limite est : Salinité extérieure = 25 kg/m^3 , charge imposée = 0. sur chaque maille.

État initial :

- Salinité = 0 partout sauf 25 kg/m^3 sur la limite est
- Hydrodynamique : Charges = 0 partout.

Maillage :

On adopte un schéma en coupe. Le maillage sera formé de 41 colonnes de 5 cm de large (La colonne n°41, la limite à la mer, a une largeur différente égale à 0.1 cm) et 20 lignes de 5 cm de haut.

13.1. MODÉLISATION EN RÉGIME PERMANENT

La première modélisation de ce système se fait sans difficulté avec une hydrodynamique en régime permanent et un transport en régime permanent. Comme le régime est permanent, on fixe un maximum de 25 itérations de couplage entre l'hydrodynamique et le transport de la salinité. Pour l'hydrodynamique, on fixe un maximum de 3 itérations externes (à chaque itération de couplage). La nappe étant captive, 1 ou 2 itérations externes sont en effet suffisantes, à condition d'avoir un nombre suffisant d'itérations internes (fixé ici à 50).

Compte tenu de la forte diffusion, le transport est calculé avec la méthode par défaut : des différences finies.

En résumé, les paramètres sont les suivants :

Couplage :

- Nombre d'itérations de couplage = 25

Hydrodynamique :

- Régime = Permanent
- Méthode = Calcul en charge d'eau douce
- Nombre maximal d'itérations = 3 (et 50 itérations internes au maximum)

Transport :

- Régime = Permanent
- Méthode = Différences Finies

13.1.1. Définition du maillage

On crée un nouveau projet, puis on commence par définir un maillage régulier de 41 colonnes de 5 cm et 20 colonnes de 5 cm, avec pour origine le point (0., -100.).

On ajuste alors la largeur de la 41^{ème} colonne de la manière suivante :

On sélectionne la 41^{ème} colonne, puis on utilise l'icône «  = Modifie la largeur de la colonne sélectionnée » pour modifier sa largeur de 5 cm à 0.1 cm. La largeur de la colonne est réduite et, étant devenue très petite devient à peine visible.

13.1.2. Définition des données maillées

On peut procéder comme dans les exemples précédents et définir :

- Une porosité égale à 35 (%) dans tout le domaine
- Un champ de « Débits » avec +33 (10^{-7} m³/s) sur chacune des 20 lignes de la colonne n°1, et « 9999 » sur les 20 lignes de la colonne n°41. Cette colonne étant très mince, il faut zoomer fortement pour pouvoir la sélectionner.
- Un champ de « Salinité » avec uniquement des valeurs égales à 25 (kg/m³) sur la colonne n°41.
- Un champ de « Salinité Extérieure » avec également uniquement des valeurs égales à 25 (kg/m³) sur la colonne n°41.

On verra qu'il est également possible de définir toutes ces données sous forme « d'initialisation avant calcul » avec le module de gestion des paramètres non maillés. Cette deuxième approche, quoique légèrement moins graphique, est tout à fait adaptée aux cas simples. Elle a l'avantage de générer uniquement un seul champ maillé : le champ des perméabilités ce qui facilite fortement une éventuelle modification de maillage, et permet d'examiner facilement toutes les données d'un coup d'œil.

13.1.3. Définition des paramètres non maillés

On procède comme dans les exemples précédents.

On actionne l'icône  pour faire apparaître le menu général, puis → « Profil d'utilisateur ». On choisit alors :

<p>1 = Régime Transitoire 2 = Densité (1=Oui ; 2=Calcul de la Densité)</p>
--

(On choisit « Régime transitoire », car on réalisera ultérieurement un calcul en régime transitoire.)

Après avoir sauvegardé, on retourne au menu général des paramètres puis on choisit « Paramètres généraux ». On définit alors les paramètres suivants.

Paragraphe : « Contrôle de la Résolution Hydrodynamique » :

<p>3 = Nombre maxi d'Itérations pour le pas de temps n°0 (Permanent Initial) 5e-6 = Variation Moyenne de Charge entre 2 Itérations pour Convergence 50 = Nombre d'Itérations Internes pour le solveur [Def=10] Perman = Régime Hydrodynamique [0=Transitoire 1=Permanent]</p>

Paragraphe : « Unités des données » :

<code>cm/s</code> = Unité des Perméabilités des Aquifères en m/s (ou m2)
<code>1e-7</code> = Unité des Débits en m3/s (kg/s si Gaz)
<code>cm</code> = Unité des Charges, Altitudes en m
<code>%</code> = Unité des coefficients d'Emmagasinement Libres en [-] [% si en %]
<code>cm</code> = Unité des Coordonnées Horizontales des mailles en m
<code>%</code> = Unité des Porosités = Teneurs en Eau en [-] [% si en %]
<code>1e-6</code> = Unité des Masses en kg

Paragraphe : « Point origine et état des données » :

<code>100</code> = Épaisseur Tranche de coupe (Unité de Coordonnées de Mailles ou Degrés)
<code>Coupe</code> = Orientat. maillage : 0=Standard ; 1=Coupe Verticale : Pesant. sur Oy

Paragraphe : « Couplage et Transport Salinité, chaleur, concent. » :

<code>25</code> = Nombre maximal d'Itérations pour *Couplage* Densité/Pression
<code>6.6e-6</code> = Diffusion moléculaire (m2/s) [* = Spatialisée]

Paragraphe : « Densité » :

<code>DOUCE</code> = Effet de la Densité (0=Non 1=Charge 2=Pression 3=Charg Douce)
<code>LIN</code> = Loi Densité = F(Salinité) (0=Non 1=Linéaire 3=Schlum_VDB)
<code>1</code> = Dérivée de la loi Densité/Salinité [si loi Linéaire] [Def=0.7]
<code>1e-4</code> = Variation moy de Salinité entre 2 itérations pour convergence
<code>Perman</code> = Régime Transport Salinité [0=Transitoire 1=Permanent]
<code>1</code> = Calcul de la Salinité (Transport)

Il est indispensable de sélectionner « 1 = Calcul de la Salinité » sinon la salinité est uniquement « prise en compte » mais pas « calculée » à partir des fonctionnalités de transport couplé.

Paragraphe « Initialisation avant calculs »

Comme nous l'avons rappelé, c'est dans ce paragraphe qu'on peut définir des modifications ponctuelles dans le maillage avant calculs. C'est ici aussi qu'on peut demander l'édition de champs calculés au pas de temps n°0 c'est-à-dire en régime permanent. Au lieu de définir graphiquement les champs de Débit, de Salinité, et de Salinité Extérieure, on peut les définir ici, de la même manière :

On sélectionne le Paragraphe « Initialisation avant calculs » puis :

« Nouvelle Modification » → *Thème* « Transport, Densité, Trajectoires » → *objet* « POROSITE » → *action* « SEMIS » et on lui affecte la valeur « =35 » (sans oublier le signe « = »).

Puis dans ce même thème : *objet* « SALINITE » → *action* « MAILL » et choisit : *Col 41, Ligne 1, Couche **, *Valeur 25*.

Puis *objet* « SALIN_EXT » → *action* « MAILL » et choisit : *Col 41, Ligne 1, Couche **, *Valeur 25*.

Puis dans le thème « Paramètres Hydrodynamiques classiques » *objet* « CHARGE » → *action* « SEMIS » et on lui affecte la valeur « 0 » (qui était de toute façon la valeur par défaut).

Puis *objet* « DEBIT » → *action* « MAILL » et choisit : *Col 1, Ligne 1, Couche **, *Valeur 33*.

Puis *objet* « DEBIT » → *action* « MAILL » et choisit : *Col 41, Ligne 1, Couche **, *Valeur 9999*.

Pour les éditions on choisit :

- *objet* « CHARGE » → *action* « EDITI » *indice 1*
- *objet* « SALINITE » → *action* « EDITI » *indice 1*
- *objet* « VITESSE » → *sauvegarde 1* = « Vitesse centrée »

13.2. RÉSULTATS

Les calculs se terminent en une seconde et convergent très bien.

La Figure 49 présente les isosalinités (kg/m^3) qui forment un biseau salé avec une bande de mélange due à la diffusion. Les flèches indiquent la direction et l'intensité de la vitesse locale. On voit que l'eau douce provenant de la gauche, étant plus légère, s'écoule en passant au dessus du biseau. On voit apparaître un mouvement de circulation de l'eau salée qui rentre en bas à droite et se mélange à l'eau douce. La Figure 50 présente les charges réelles (en cm). Elle montre nettement que les vitesses ne sont pas perpendiculaires aux isocharges.

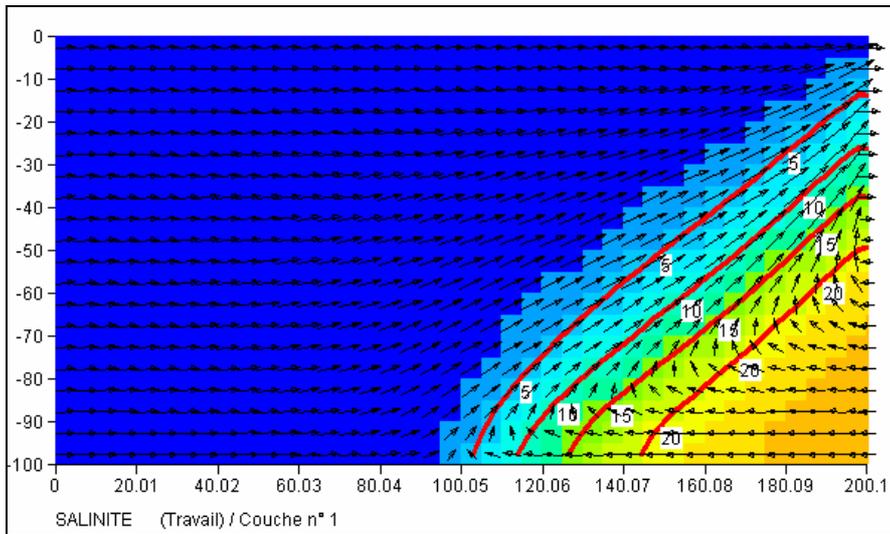


Figure 49 – Champ de Salinité calculée

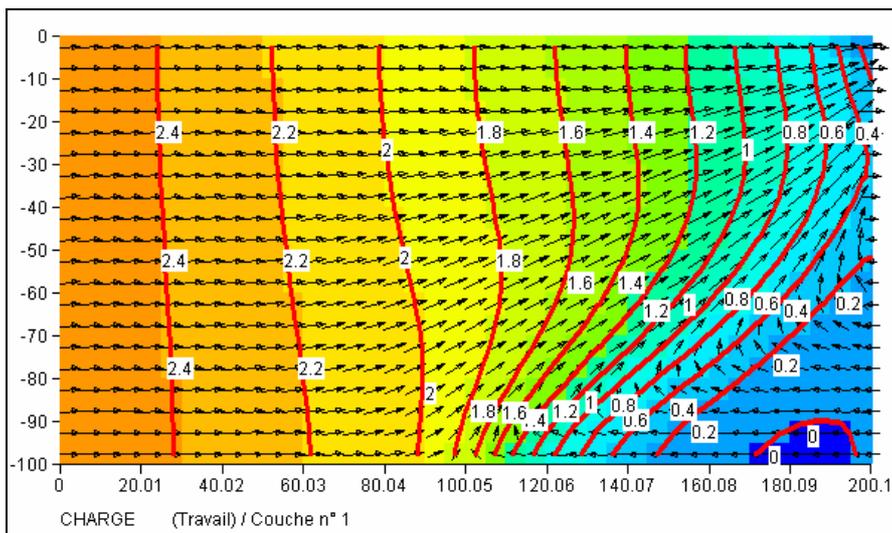


Figure 50 – Champ de Charges réelles calculées

13.3. MODÉLISATION EN RÉGIME TRANSITOIRE, SANS DIFFUSION

La deuxième modélisation de ce système est faite en régime transitoire et sans diffusion ni dispersion, ce qui générera une interface abrupte. Pour un système sans diffusion, à interface abrupte, on utilise la méthode TVD. Le transport est calculé en régime transitoire. En revanche les calculs hydrodynamiques sont réalisés en régime permanent puisque le système étant captif, les coefficients d'emmagasinement captifs

sont négligeables. La simulation est réalisée pendant 15 pas de temps de durées croissantes, de 1 mn au début à 10 mn à la fin, qui représentent une durée cumulée égale à 80 minutes. Pour mieux suivre l'évolution du biseau, chacun de ces 15 pas de temps de modèle a été découpé en 5 sous pas de temps. Les paramètres hydrodynamiques et les conditions aux limites sont identiques à ceux du régime permanent : le système est initialement rempli d'eau douce, un biseau salé se développera donc progressivement vers la gauche. Pour ce calcul on a légèrement modifié le maillage. On utilise un maillage régulier avec 40 colonnes égales de 5 cm (au lieu de 41 colonnes avec la 41^e colonne de 0.1 cm). En effet, la méthode TVD serait pénalisée par les très petites mailles. Comme le transport est en régime transitoire, on fixe un maximum de 10 itérations de couplage entre l'hydrodynamique et le transport de la salinité.

En résumé, les paramètres sont les suivants :

Couplage :

- Nombre maximum d'itérations de couplage = 10
- Coefficient de sous-relaxation = 0.7 (mais sans sous-relaxation on obtient également des résultats corrects).

Hydrodynamique :

- Régime = Permanent
- Méthode = Calcul en charge d'eau douce
- Nombre maximal d'itérations à chaque pas de temps = 3 (et 50 itérations internes au maximum)

Transport :

- Régime = Transitoire.
- Méthode = TVD (Total Variation Diminishing).
- Diffusion = 0
- Dispersion = 0

La Figure 51 et la Figure 52 présentent les isosalinités (kg/m^3) respectivement après 15 mn et après 80 mn. On voit que l'interface est bien abrupte, sans dispersion numérique.

Paragraphe : « Pas et Sous-Pas de Temps » :

15 = Nombre max possible de Pas de temps de Modèle en Transitoire
5 = Nombre de Sous-Pas de temps de modèle

Paragraphe : « Couplage et Transport Salinité, chaleur, concent. » :

10 = Nombre maximal d'itérations pour *Couplage* Densité/Pression
0.7 = Coef de Relaxation pour Couplage Densité/Pression [Def=1]
TVD = Schéma de Transport [0=D_Finies 1=Rand_W 2=Caract=MOC 3=TVD]
0 = Diffusion moléculaire (m2/s) [* = Spatialisée]

Paragraphe : « Densité » :

0 = Régime Transport Salinité [0=Transitoire 1=Permanent]

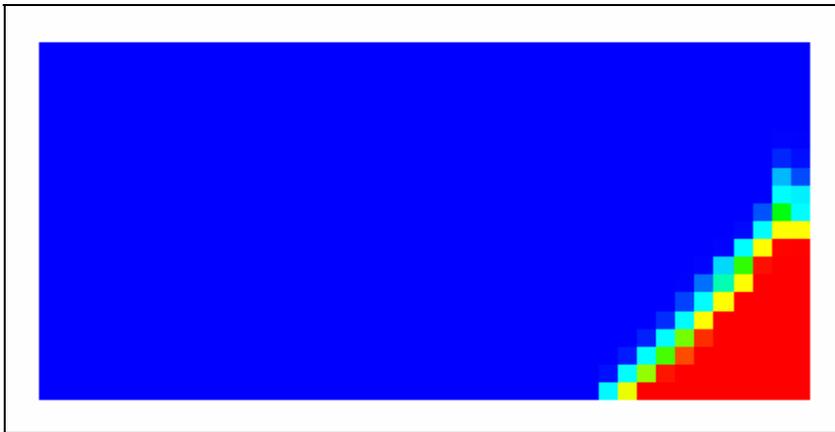


Figure 51 – Champ de Salinité calculée après 15 minutes

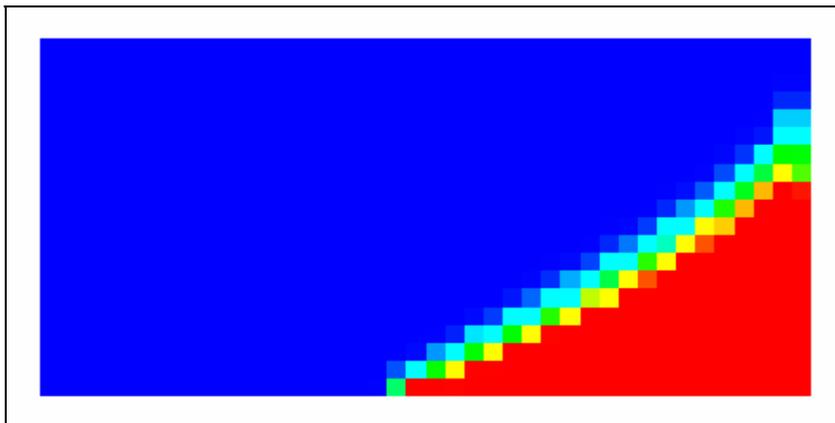


Figure 52 – Champ de Salinité calculée après 80 minutes

14. Simulation d'un doublet géothermique

Un aquifère profond de 100 m d'épaisseur et de grande extension latérale a une température initiale égale à 72 °C. Dans cet aquifère on réalise un doublet thermique avec deux forages séparés de 500 m de distance latérale. Le puits de production pompe à un débit de 50 m³/h l'eau à 72°C. Une fois la chaleur extraite, l'eau est réinjectée, au même débit, à la température de 12 °C dans le deuxième puits. Une bulle d'eau froide se forme et le but du calcul est de prévoir la diminution de température au puits de production quand la bulle d'eau froide à 12 °C se rapprochera de ce puits. La couche aquifère est comprise entre une éponte supérieure et une éponte inférieure de grandes épaisseurs. Pour la modélisation on considère que le puits de réinjection est situé à 500 m à l'est du puits de production. On remarque que le système présente d'une part une symétrie par rapport à la ligne Ouest-Est contenant les deux forages, et une symétrie par rapport au plan horizontal médian situé à mi hauteur de l'aquifère. Il suffira donc de modéliser uniquement ¼ du domaine, par exemple la partie sud située en dessous du plan médian, avec l'éponte inférieure.

Les caractéristiques du système sont les suivantes :

Paramètres hydrodynamiques et hydrodispersifs :

- Perméabilité de l'aquifère : $K = 2 \cdot 10^{-4}$ m/s (à 72 °C)
- Perméabilité de l'éponte : $K = 1 \cdot 10^{-15}$ m/s (c'est-à-dire imperméable, mais faisant partie du domaine de calcul thermique)
- Porosité : $\omega = 15$ % dans l'aquifère, 0.01 % dans l'éponte
- Diffusion : $D = 0$ m²/s
- Dispersivité longitudinale : $\alpha_L = 10$ m (dispersivité transversale = 0)
- Débits de pompage et de réinjection = 50 m³/h (soit 12.5 m³/h dans le ¼ du domaine modélisé)

Paramètres thermiques :

- Conductivité thermique : $\lambda = 2.5$ W/m/°C
- Chaleur spécifique des terrains = $2.2 \cdot 10^6$ J/m³/°C dans l'aquifère, $2.1 \cdot 10^6$ J/m³/°C dans les épontes.
- Température initiale = Température extérieure au domaine = 72 °C

Conditions aux limites :

- Limite nord : Imperméable par raison de symétrie.
- Limite sud : Imperméable car située loin de la perturbation due au doublet.
- Limites ouest et est : Charges imposées. Ces limites sont situées loin de la perturbation due au doublet.
- Température extérieure sur les limites ouest et est = 72°C

État initial :

- Température = 72 °C partout, y compris dans les épontes.
- Hydrodynamique : Charges = 100 partout (juste pour assurer que la nappe est captive).

Maillage :

On adopte un maillage irrégulier avec des mailles de 20 mètres de côté dans la zone du doublet, des mailles de 50 m dans la zone périphérique et des mailles plus grandes pour atteindre les limites éloignées.

On a choisi un maillage s'étendant de -1810 m à + 1810 m dans la direction ouest-est et s'étendant de -1200 m à 0 m dans la direction sud-nord.

Le maillage est formé de :

- 76 colonnes de dimensions : 600 m, 250 m, 8 fois 50 m, 28 fois 20 m, puis à nouveau 28 fois 20 m, 8 fois 50 m, 250 m et 600 m.
- 35 lignes (à partir du Nord) : 30 fois 20 m, 3 fois 50 m, 150 m, 300 m.
- 6 couches : une couche aquifère de 50 m (de ½ épaisseur) et 5 couches d'épontes d'épaisseurs respectivement : 25 m, 25 m, 25 m, 25 m et 50 m.

On a donc choisi une « topographie » à l'altitude 0 m, et les substratums des 6 couches respectivement aux altitudes : -50 m, -75 m, -100 m, -125 m, -150 m, -200 m. L'épaisseur totale d'éponte est donc égale à 150 mètres.

Pour créer un maillage irrégulier on peut procéder comme suit : on clique sur l'icône



ou bien sur **Fichier → Nouveau**. On donne alors un nom de fichier pour le projet à créer et on précise le nombre de couches. On coche alors « maillage irrégulier » dans le cadre « divers » avant de valider par le bouton « OK ». Des menus apparaissent alors pour définir les coordonnées de l'origine et les largeurs des lignes et des colonnes.

L'hydrodynamique est supposée en régime permanent, car l'aquifère est captif. Les calculs thermiques sont réalisés en régime transitoire pendant 35 ans avec un pas de temps de 2.5 ans. Pour calculer l'hydrodynamique en régime permanent (au pas de temps n° zéro) on fixe un nombre maximal d'itérations externes égal à 2 et un nombre maximal d'itérations internes égal à 300.

On néglige l'influence des variations de la température sur la viscosité et donc sur la perméabilité.

Paragraphe « Contrôle de la Résolution Hydrodynamique »

<p>0 = Nombre Maxi d'Itérations par pas de temps Calcul suivant le Pas n°0</p> <p>2 = Nombre maxi d'Itérations pour le pas de temps n°0 (Permanent Initial)</p> <p>2e-6 = Variation Moyenne de Charge entre 2 Itérations pour Convergence</p> <p>300 = Nombre d'Itérations Internes pour le solveur [Def=10]</p> <p>Perman = Régime Hydrodynamique [0=Transitoire 1=Permanent]</p>

Paragraphe : « Couplage et Transport Salinité, chaleur, concent. » :

<p>0 = Nombre maximal d'Itérations pour *Couplage* Densité/Pression</p> <p>0 = Nombre maxi d'Itérat *Transport* Salinité/Chaleur/Concentr. [Def=20]</p> <p>TVD = Schéma de Transport [0=D_Finies 1=Rand_W 2=Caract=MOC 3=TVD]</p>
--

Paragraphe : « Température , effets Thermiques » :

<p>5e-4 = Variation moy. de Température entre 2 itérations pour convergence</p> <p>0 = Régime Transferts Thermiques [0=Transitoire 1=Permanent]</p> <p>2.5 = Conductiv. Therm. du minéral (W/m/deg) [Def=1.5] [* = Spatialisée]</p> <p>10 = Dispersivité Longitud. Thermique (m) [* = Spatialisée]</p> <p>0 = Dispersivité Transvers. Thermique (m) [* = Spatialisée]</p> <p>0 = Chaleur Spécifique Eau (J/kg/deg) [Def=4185]</p> <p>* = Chaleur Spécif Volum Minéral (J/m3/deg) [Def=2E6] [* = Spatialisée]</p> <p>0 = Conductivité Thermique Eau (W/m/deg) [Def=0.6]</p> <p>1 = Calcul du champ de Température (Transport)</p>
--

14.1. RÉSULTATS

Les calculs se terminent en quelques minutes.

La Figure 53 présente une vue en plan des températures dans l'aquifère après 17.5 ans et après 35 ans. Les forages de pompage et de réinjection sont marqués par un petit carré rouge. On voit nettement une bulle froide (bleue) se développer vers la gauche et commencer à refroidir le puits de pompage après 35 ans. La Figure 54

montre une vue en coupe verticale de la température dans l'axe des puits après 35 ans à travers l'aquifère et les 150 mètres d'éponte inférieure. Cette figure montre le net refroidissement des épontes qui jouent un rôle de tampon. La Figure 55 montre la température calculée dans l'aquifère si on néglige l'influence des épontes, c'est-à-dire si on considère qu'elles sont adiabatiques. Dans ce cas le refroidissement est beaucoup rapide (Figure 56).

Un autre calcul a été réalisé en supposant un faible écoulement régional vers l'Est (vers la droite). On a supposé que le gradient de charge était égal à 0.25 ‰ ($2.5 \cdot 10^{-4}$). Dans ce but on a imposé une surcharge de 0.755 m au centre de la colonne n°1 située à 3020 m à l'Ouest du centre de la colonne la plus à l'Est. La Figure 56 montre que, bien que le gradient soit très faible, le refroidissement est alors significativement plus long.

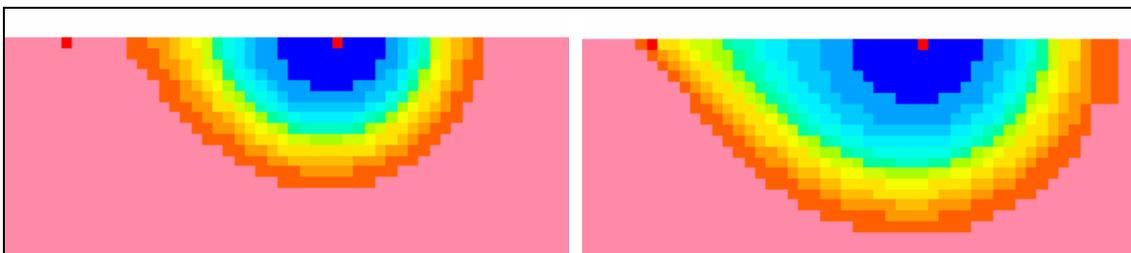


Figure 53 – Vue en plan de la température dans l'aquifère après 17.5 et 35 ans

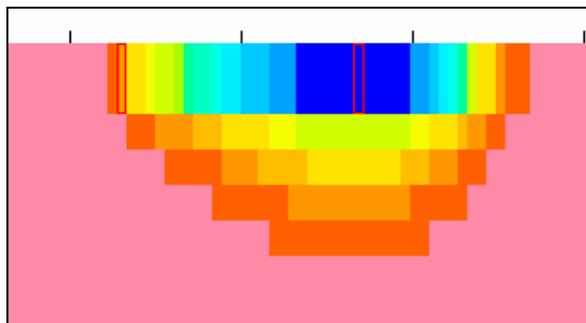


Figure 54 – Vue en coupe verticale de la température dans l'aquifère et les épontes après 35 ans

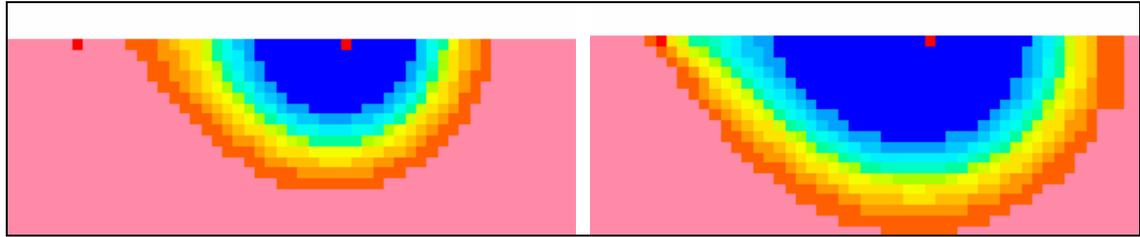


Figure 55 – Vue en plan de la température dans l'aquifère après 17.5 et 35 ans en supposant des épontes adiabatiques.

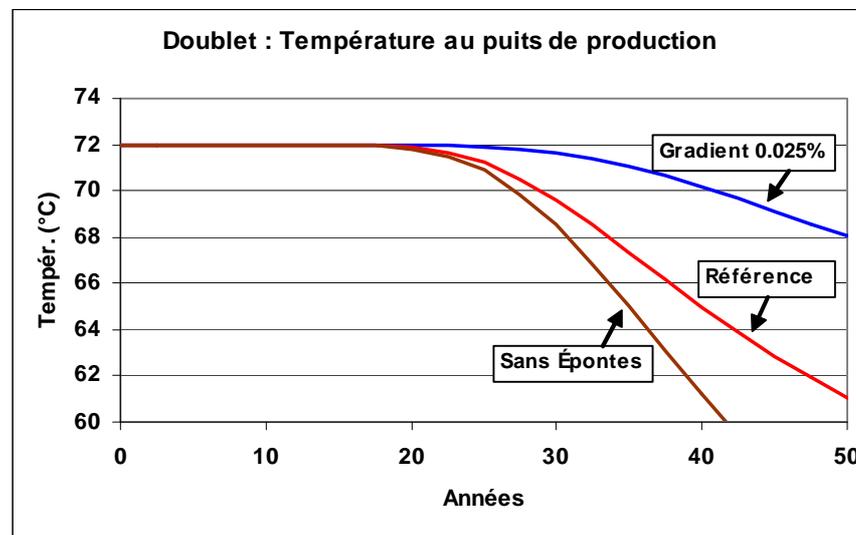


Figure 56 – Évolution de la température au puits de pompage (avec ou sans prise en compte des épontes, avec ou sans écoulement régional)

15. Écoulement à travers la Zone Non Saturée sous un cours d'eau

Cet exemple, est adapté de l'exemple n°6 de calcul en zone non saturée cité par Cooley, R.L. (1983). Il montre comment réaliser un calcul en Zone Non Saturée pour calculer l'évolution du profil de saturation sous le cours d'eau et la réponse de la nappe. La mise en œuvre des calculs en Zone Non saturée avec le code Marthe est décrite par Thiéry (1994). Le système à modéliser est constitué d'une nappe et d'un cours d'eau de largeur 12 mètres dont le fond du lit est situé 14 mètres plus haut que la surface libre de la nappe.

Initialement tout le système, zone saturée et zone non saturée, est à la charge +2 mètres. Le cours d'eau est alors brutalement rempli d'une hauteur d'eau de 2 mètres au fond de son lit et maintenu à cette hauteur. On calcule alors en coupe verticale l'évolution du front d'humidification.

Les caractéristiques du système sont les suivantes :

Géométrie :

- Altitude du substratum de la nappe = 0 m
- Altitude de la surface libre initiale de la nappe = +2 m
- Altitude du fond du lit du cours d'eau = +16 m
- Largeur du cours d'eau = 12 m

État initial :

- Charge uniforme dans tous le domaine = 2 m
- Charge dans le fond du lit et sur les berges (jusqu'à l'altitude 18 m) = 18 m

Conditions aux limites :

- Charge imposée dans la nappe (à 2 m) à l'abscisse 17 mètres de l'axe du cours d'eau, de l'altitude 0 m à l'altitude 2 m.
- Charge imposée dans le cours d'eau

Paramètres hydrodynamiques :

- Perméabilité à saturation : $K_s = 1 \cdot 10^{-2}$ m/h (soit $2.778 \cdot 10^{-6}$ m/s)

- Coefficient d'emmagasinement spécifique = $1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$.
- Teneur en eau à saturation (porosité efficace) : $\theta_S = 25 \%$
- Teneur en eau résiduelle : $\theta_R = 5 \%$
- Loi de rétention = Homographique : $\frac{h}{h_t} = \left[\frac{(\theta_S - \theta)}{(\theta - \theta_R)} \right]^{b_t}$ (en notant h la pression et θ la teneur en eau).
- « Succion à demi-saturation » : $h_t = 1.778 \text{ m}$
- Exposant de la loi de rétention : $b_t = 0.25$
- Loi de Perméabilité relative = Puissance : $Kr = \left[\frac{(\theta - \theta_R)}{(\theta_S - \theta_R)} \right]^{b_k}$
- Exposant de la loi de perméabilité relative : $b_k = 4$
- Calcul en régime transitoire

15.1. MODÉLISATION

La modélisation de ce système ne pose pas de problèmes. On adopte un schéma en coupe verticale et compte tenu de la symétrie du système on modélise uniquement la partie droite du domaine, à partir de l'axe du cours d'eau. Le maillage est formé de 34 colonnes de 0.5 m de largeur et de 40 lignes de 0.5 m d'épaisseur qui représentent 40 couches de modélisation. L'extension verticale modélisée s'étend donc de 0 à 20 m et l'extension latérale de 0 à 17 m.

Dans le « Profil utilisateur » on sélectionne « Zone Non-Saturée »

L'hydrodynamique est supposée en régime transitoire pendant une période de 400 heures, et on édite les champs de teneurs en eau et de pressions calculés toutes les 10 heures. Compte tenu du caractère très non linéaire du système on fixe un nombre maximal d'itérations externes égal à **150** et un coefficient de sous-relaxation égal à 0.7 puis ajusté à **0.5**. Compte tenu de la perméabilité relative initiale extrêmement faible, on choisit une pondération « Amont » (on obtient une simulation équivalente avec une pondération « Arithmétique »).

Paragraphe « Contrôle de la Résolution Hydrodynamique »

150 = Nombre Maxi d'Itérations par pas de temps Calcul suivant le Pas n°0
0 = Nombre maxi d'Itérations pour le pas de temps n°0 (Permanent Initial)

2e-5 = Variation Moyenne de Charge entre 2 Itérations pour Convergence
0.5 = Coefficient de Relaxation des calculs [Def=1]
AMONT = Pondéra. Perméab. Voisines (1=Géomét 3=Amont 4=Harmo 5=Arith Def=Opti)

Paragraphe : « Unités des données » :

m/h = Unité des Perméabilités des Aquifères en m/s (ou m2)
1e-8 = Unité des Débits en m3/s (kg/s si Gaz)
heu = Unité de Temps (des Pas de modèle)
SPECIF = Emmag. Captif lus (0=Hydrogéol. 1=Spécif 2=Comprs)
% = Unité des Porosités = Teneurs en Eau en [-] [% si en %]

Paragraphe : « Point origine et état des données » :

Coupe = Orientat. maillage : 0=Standard ; 1=Coupe Verticale : Pesant. sur Oy

Paragraphe : « Prise en compte de la Zone Non-Saturée » :

1 = Calcul en Zone Non Saturée [0=Non 1=Oui]
0.1 = Pas de Temps Interne minimum
20 = Pas de Temps Interne Maximum
5 = Variat Maxi de Teneur en Eau pendant le Pas de temps de calcul
0.5 = Erreur de Bilan maximale acceptée [% ou Stock]
0 = Type d'Erreur Bilan [0=% CVG_Int 1=Bil Glob Stock 2=Bil Glob %]
50 = Succion Maximale <==> Assèchement maximal
1e-8 = Perméabilité Minimale (sécurité numérique)
HOMOG = Loi Rétention [1=Homogr 2=Puiss 3=Logar 4=Van-Gen 5=B&C etc]
PUISS = Loi Permé [1=Homogr(prs) 2=Puiss(Satur) 4=Expon(prs) 5=V.G. etc.]
1.778 = Succion à Demi-Saturation
0.25 = Exposant de la Loi de Rétention
4 = Exposant de la Loi de Perméabilité (sauf si loi Exponentielle ou V.G.)

15.2. RÉSULTATS

Les calculs se terminent en quelques secondes et convergent parfaitement (écart de bilan de 10^{-3} % soit 10^{-5}).

La Figure 57 montre l'évolution de la saturation calculée sous le cours d'eau. À titre de vérification, un calcul avec des mailles de dimension 4 fois plus petites (0.125 m au lieu de 0.5 m, soit 16 fois plus de mailles) a également été réalisé (Figure 58). Les calculs sont plus longs et durent plusieurs minutes, mais les résultats sont extrêmement proches ce qui permet de vérifier que le maillage de 0.5 m était adapté. La Figure 58 montre l'évolution de la surface libre (pression = 0). On voit que la nappe remonte après 160 h et le font de saturation rejoint la nappe après 170 h.

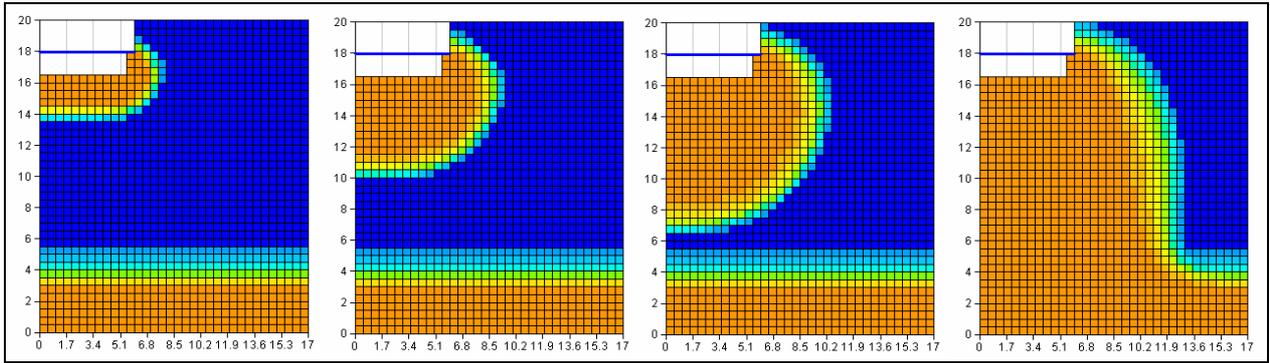


Figure 57 – Profil de teneur en eau après 10 h, 50 h, 100 h et 300 h (maillage de 0.5 m)

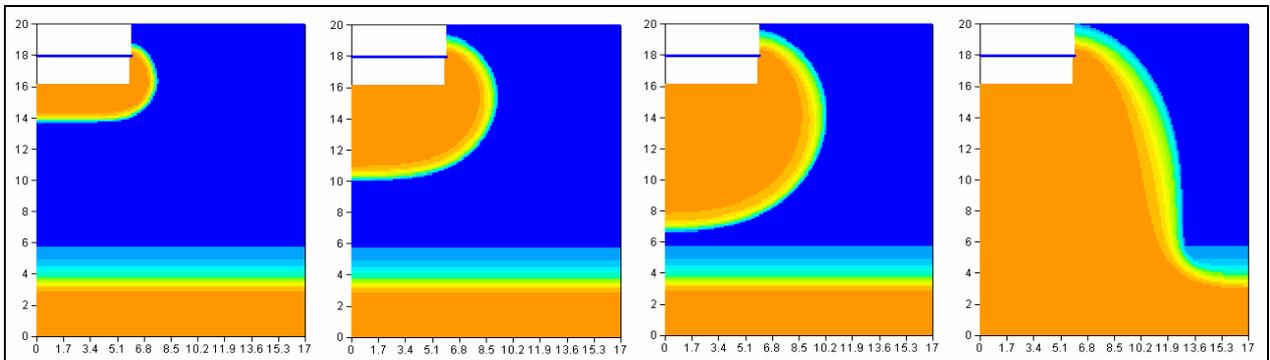


Figure 58 – Profil de teneur en eau après 10 h, 50 h, 100 h et 300 h (maillage de 0.125 m)

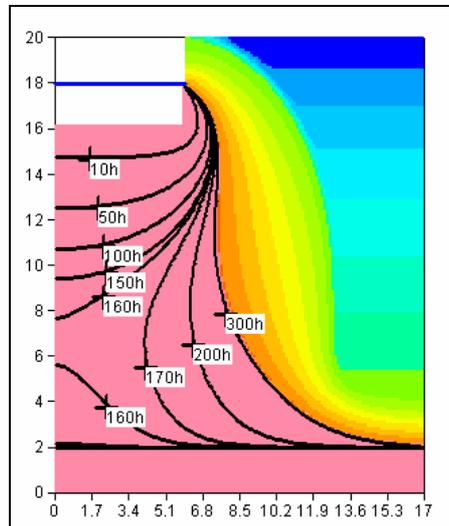


Figure 59 – Évolution au cours du temps de la surface libre (pression = 0)

15.3. CALCUL EN RADIAL

Il est quasi immédiat de refaire ce calcul en radial, c'est-à-dire pour calculer le front d'infiltration sous un bassin circulaire de diamètre 12 mètres. Il suffit comme

précédemment de choisir « maillage radial » dans le fichier des couches [.layer]. On obtient alors en quelques secondes la simulation correspondante. Les résultats sont peu différents, comme le montre la Figure 60. La « bulle » de saturation est seulement un peu moins large, car elle diffuse en radian, donc dans les deux directions au lieu de diffuser uniquement dans la direction ox perpendiculaire à l'axe du cours d'eau.

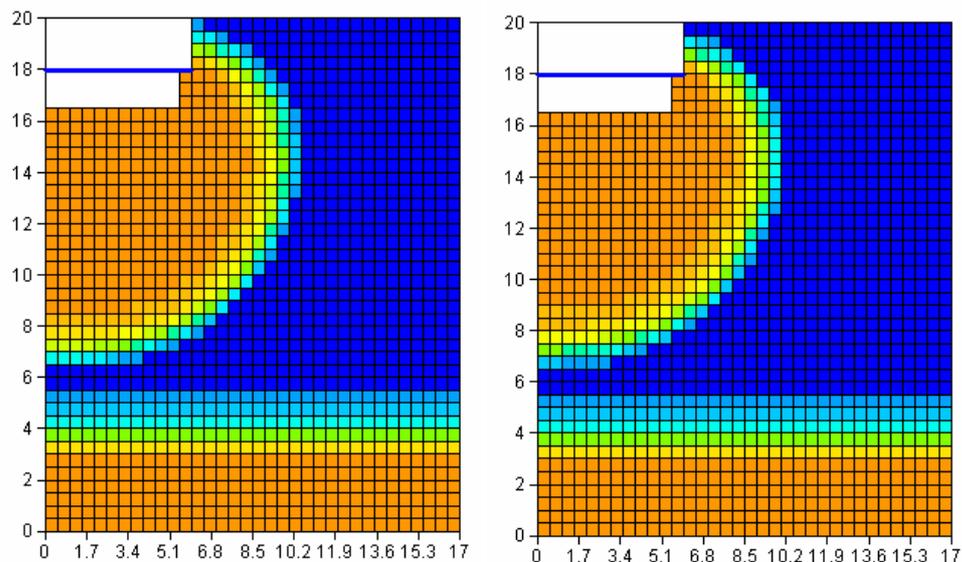


Figure 60 – Profil de teneur en eau après 100 h : à gauche canal, à droite bassin circulaire

15.4. TRANSPORT DE MASSE EN ZONE NON SATURÉE

Il est possible de réaliser très simplement en quelques clics un calcul de transport en zone non saturée en régime hydraulique transitoire. On procède comme dans les exemples précédents de calcul transport. On modifie tout d'abord dans le fichier profil d'utilisateur [.prfu] en sélectionnant « Transport de masse classique ». Puis on définit les quelques paramètres suivants :

Paragraphe « Couplage et Transport »

```
TVD = Schéma de Transport [0=D_Finies 1=Rand_W 2=Caract=MOC 3=TVD]
1.5 = Dispersivité Longitudinale (m) [* = Spatialisée]
0.2 = Dispersivité Transversale (m) [* = Spatialisée]
```

On utilise donc la méthode TVD, qui est très performante. On conserve le nombre d'itération par défaut qui est égal à 20.

Paragraphe « Concentration et Trajectoires »

```
1 = Calcul de Concentration
(Par défaut le transport est en régime transitoire)
```

On pense également :

- À mettre une concentration initiale égale à 1000 unités dans les mailles représentant le fond et les berges de la rivière (les mailles dans lesquelles on a imposé une charge de 18 m) et à mettre également une « concentration extérieure » égale à 1000 dans ces mêmes mailles.
- À demander dans le fichier des pas de temps [.pastp] l'édition du champ de concentration calculé à certaines dates.

On lance alors la simulation qui s'effectue en quelques secondes. La Figure 61 montre les concentrations calculées après 300 heures.

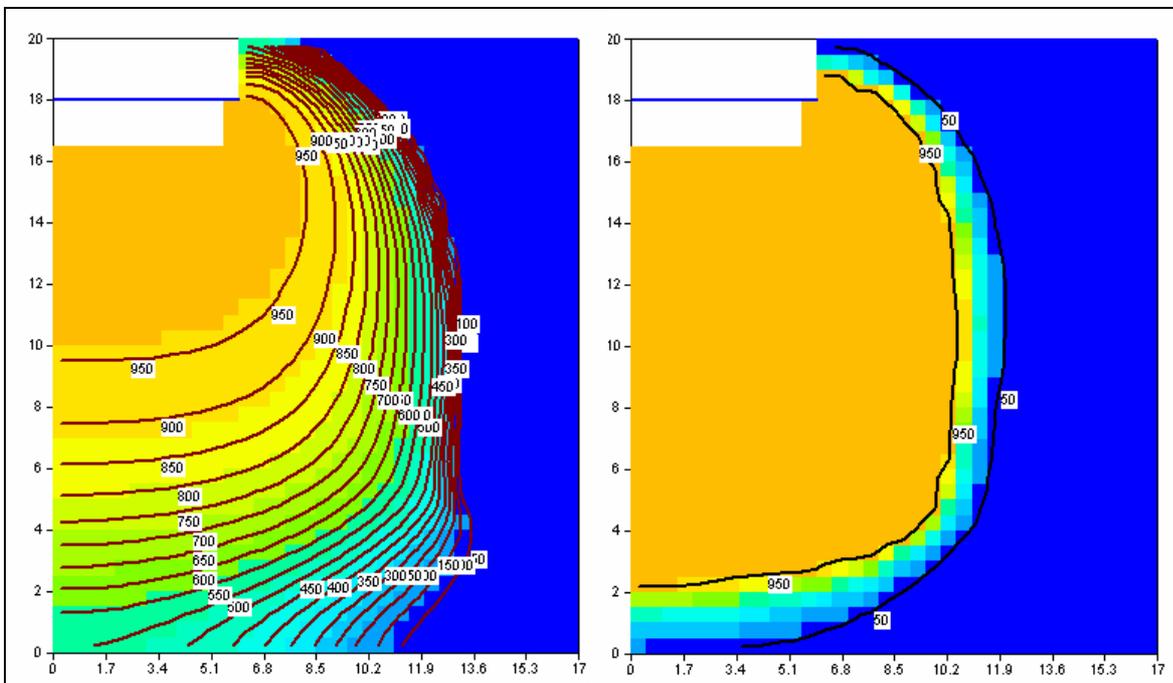


Figure 61 – Concentration après 300 h : à gauche : avec dispersivité, à droite sans dispersivité.

16. Écoulement à travers la Zone Non Saturée en milieu hétérogène à surfaces libres multiples

Cet exemple, est adapté de l'exemple n°4 de calcul en zone non saturée cité par Cooley, R.L. (1983). Il montre comment réaliser un calcul en Zone Non Saturée dans un système hétérogène complexe à fort contraste de perméabilité présentant plusieurs surfaces libres. La mise en œuvre des calculs en Zone Non saturée avec le code Marthe est décrite par Thiéry (1994). Le schéma à modéliser concerne l'écoulement à travers la berge d'un cours d'eau qui entaille un système aquifère composé de deux couches perméables séparées par une couche 1000 fois moins perméable. Une charge de 26 m est imposée sur la limite droite (et une charge de 0 m au fond du cours d'eau, à gauche) comme le montre la Figure 62.

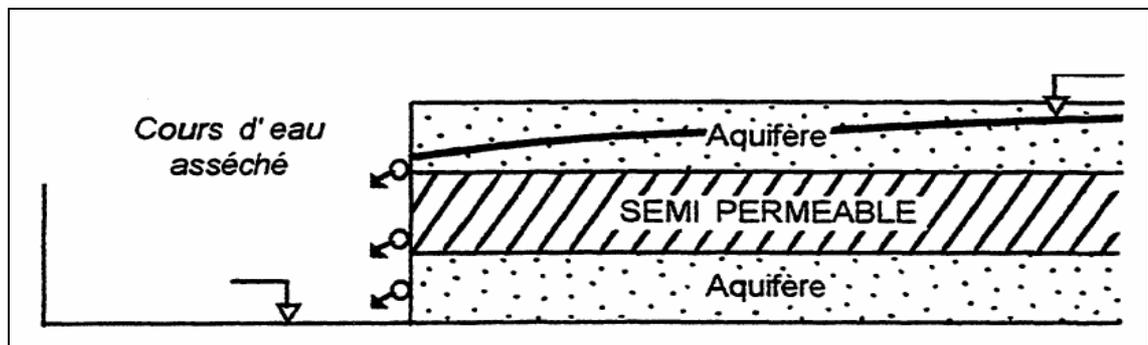


Figure 62 – Écoulement en zone non saturée dans un milieu hétérogène.

On calcule alors en coupe verticale l'état d'équilibre en régime permanent.

Les caractéristiques du système sont les suivantes :

Géométrie :

- Largeur du domaine = 200 m ($x = 0$ à 200 m)
- Hauteur du domaine = 26 m ($y = 0$ à 26 m)
- Altitudes du bas de chaque « couche » = 0 m, 8 m et 18 m
- Modélisation en coupe verticale

Conditions aux limites :

- Charge imposée sur la limite droite : charge = 26 m
- Surface de suintement possible sur toute la limite gauche.

- Charge imposée à 18 m sur la maille du bas de la « couche » n°1 sur la limite de gauche

Paramètres hydrodynamiques :

- Loi de Perméabilité relative = Puissance : $Kr = \left[\frac{(\theta - \theta_R)}{(\theta_S - \theta_R)} \right]^{b_k}$
- Loi de rétention = Homographique : $\frac{h}{h_t} = \left[\frac{(\theta_S - \theta)}{(\theta - \theta_R)} \right]^{b_t}$ (en notant h la pression et θ la teneur en eau).
- Perméabilité à saturation :
 - Couches n°1 et n°3 : $K_s = 1. 10^{-2}$ m/s
 - Couche n°2 (semi-perméable) : $K_s = 1. 10^{-5}$ m/s
- Teneur en eau à saturation (porosité efficace) : θ_S et teneur en eau résiduelle : θ_R
 - Couches n°1 et n°3 : $\theta_S = 18.75$ % et $\theta_R = 3.75$ %
 - Couche n°2 : $\theta_S = 10$ % et $\theta_R = 5$ %
- « Succion à demi-saturation » :
 - Couches n°1 et n°3 : $h_t = 2.1147$ m
 - Couche n°2 : $h_t = 4.4721$ m
- Exposant de la loi de rétention : $b_t = 0.25$ (0.5 dans le semi-perméable)
- Exposant de la loi de perméabilité relative : $b_k = 4$
- Calcul en régime permanent

16.1. MODÉLISATION

Pour modéliser ce système en régime permanent on adopte un schéma en coupe verticale.

Dans le « Profil utilisateur » on sélectionne « Zone Non-Saturée ».

Le maillage est formé de 100 colonnes de 2 m de largeur et de 72 lignes de largeurs variables.

- La couche n°1 est représentée par les lignes n°1 à n°16 de 0.5 m d'épaisseur
- La couche n°3 est représentée par les lignes n°57 à n°72 également de 0.5 m d'épaisseur.
- La couche n°2 (semi-perméable) est représentée par les lignes n°17 à n°56 de 0.25 m d'épaisseur.

Pour créer un tel maillage irrégulier, on peut procéder comme suit : on clique sur

l'icône  ou bien sur **Fichier → Nouveau**. On donne alors un nom de fichier pour le projet à créer et on précise le nombre de couches (1 couche, cote topogr. = 0 ; épaisseur = 1). On coche alors « maillage irrégulier » dans le cadre « divers », puis on valide par le bouton « OK ». Des menus apparaissent alors pour définir les coordonnées de l'origine et les largeurs des lignes et des colonnes.

Une fois le maillage créé, on définit les paramètres spatialisés :

Perméabilité : Valeur 1000 dans les lignes n°1-16 et n°57-72, valeur 1 dans lignes n°17-56 (on choisira une unité de perméabilité en 10^{-5} m/s).

Charges initiales : Valeur initiale fixée partout à 20 m (pour faciliter l'initialisation des calculs). Sur toute la limite droite, on impose la valeur 26 m. Dans la maille (col=1, ligne=16) de la limite gauche, on impose une charge égale à 18 m.

Débits = 9999 pour imposer la charge : sur toute la limite droite et dans la maille (col=1, ligne=16) de la limite gauche.

Index de suintement = 1 sur la limite gauche (sauf dans la maille col=1, ligne=16 où la charge est imposée).

Zones de Géométrie : Valeur 1 dans les lignes n°1-16 et n°57-72, valeur 2 dans lignes n°17-56 qui correspondent au semi-perméable.

Paramètres généraux :

Compte tenu du caractère non linéaire du système on fixe un nombre maximal d'itérations externes égal à **60** et un coefficient de sous-relaxation égal à **0.3**.

Paragraphe « Contrôle de la Résolution Hydrodynamique »

<p>0 = Nombre Maxi d'Itérations par pas de temps Calcul suivant le Pas n°0</p> <p>60 = Nombre maxi d'Itérations pour le pas de temps n°0 (Permanent Initial)</p> <p>1e-5 = Variation Moyenne de Charge entre 2 Itérations pour Convergence</p> <p>0.3 = Coefficient de Relaxation des calculs [Def=1]</p>

0 = Pondéra. Perméab. Voisines (1=Géomét 3=Amont 4=Harmo 5=Arith Def=Opti)
Perman = Régime de l'Hydrodynamique [0=Transitoire 1=Permanent]

Paragraphe : « Unités des données » :

1e-5 = Unité des Perméabilités des Aquifères en m/s (ou m2)
 1e-5 = Unité des Débits en m3/s (kg/s si Gaz)
 % = Unité des Porosités = Teneurs en Eau en [-] [% si en %]

Paragraphe : « Point origine et état des données » :

Coupe = Orientat. maillage : 0=Standard ; 1=Coupe Verticale : Pesant. sur Oy

Paragraphe : « Prise en compte de la Zone Non-Saturée » :

1 = Calcul en Zone Non Saturée [0=Non 1=Oui]
 50 = Succion Maximale <==> Assèchement maximal
 1e-8 = Perméabilité Minimale (sécurité numérique)

On ne définit pas dans ce paragraphe les paramètres des lois de perméabilité et de rétention car ils sont spatialisés. On définit ces paramètres dans le paragraphe « Initialisation avant calculs » du fichier des paramètres.

Dans le menu « Paramètres généraux » → Paragraphe « Initialisation avant calculs » → « Nouvelles Modifications » → *Thème* « Zone Non Saturée, Eau salée, Multiphasique » → *Objet* « Paramètres des lois Non Saturé » (PARA_NON_SATU) → Action « Modification par Zones de Non Saturé ». On définit les paramètres des deux zones :

- Zone n°1 :

1 = Numéro de la Zone de paramètres Zone Non Saturée
HOMOG = Loi de Rétention [1=Homogr. 2=polyn 3=loga 4=Van_G 5=B&C ,etc]
2.1147 = Succion à 1/2 Saturation de la loi de Rétention
 0.25 = Exposant de la loi de Rétention
Puiss = Loi de Perméab. [1=Homogr. 2=puiss 4=expon 5=Van_G ,6=B&C, etc]
 4 = Exposant de la loi de Perméa. (sans objet si Loi expon ou V.G.)

- Zone n°2 (semi-perméable) :

2 = Numéro de la Zone de paramètres Zone Non Saturée
Homog = Loi de Rétention [1=Homogr. 2=polyn 3=loga 4=Van_G 5=B&C ,etc]
4.4721 = Succion à 1/2 Saturation de la loi de Rétention
 0.5 = Exposant de la loi de Rétention
Puiss = Loi de Perméab. [1=Homogr. 2=puiss 4=expon 5=Van_G ,6=B&C, etc]
 4 = Exposant de la loi de Perméa. (sans objet si Loi expon ou V.G.)

On demande (au pas de temps n°0) l'édition des champs de charges, de teneurs en eau et de pressions.

16.2. RÉSULTATS

Les calculs se terminent en quelques secondes et convergent parfaitement (écart de bilan interne de 10^{-2} % soit 10^{-4} ; écart de bilan global de 10^{-3} % soit 10^{-5}).

Compte de la géométrie qui est un rectangle 8 fois plus large que haut, on utilise l'icône  pour définir une exagération d'un facteur 3 des coordonnées y qui représentent les altitudes. La Figure 63 présente le champ des teneurs en eau ainsi que la limite de saturation définie par l'isovaleur de pression nulle. On remarque que dans la partie gauche de la couche intermédiaire (semi-perméable) la « surface libre » est inversée puisque la saturation est plus faible (couleur verte) au dessus de la surface libre qu'en dessous (couleur bleue). La Figure 64 présente le champ des charges qui montre un écoulement quasi horizontal dans les couches n°1 et 3, et relativement vertical dans la couche semi-perméable.

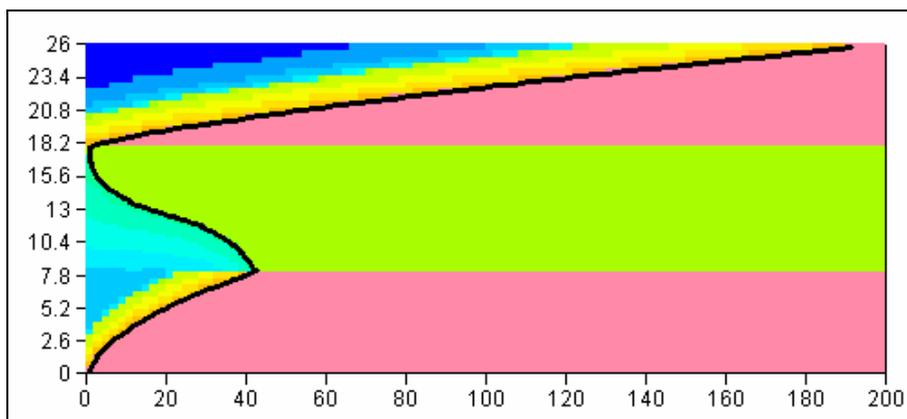


Figure 63 – Teneurs en eaux. La ligne noire représente la limite de pression nulle, donc la surface libre.

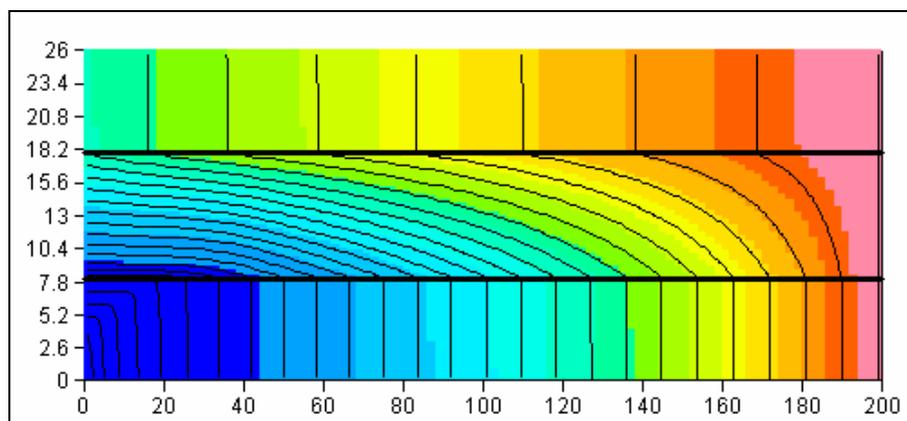


Figure 64 – Champ des charges et isovaleurs tous les 1 m de charge.

17. Aquifère côtier avec intrusion saline

Cet exemple, montre comment réaliser simplement un calcul en multiphasique pour prendre en compte un biseau salé dans une île située dans la mer. Le calcul est réalisé en triphasique car il y a 3 phases : l'air (quand la nappe est libre), l'eau douce, et l'eau salée qui joue ici le rôle de phase non aqueuse. L'intérêt de l'approche multiphasique est de permettre, dans les cas simples, une simulation monocouche, alors qu'une approche avec « effets densitaires » nécessiterait obligatoirement une simulation 3D ou multicouche beaucoup plus lourde. En revanche l'approche multiphasique considère une interface abrupte entre l'eau douce et l'eau salée, sans zone de mélange.

Cet exemple est librement inspiré de l'île de Marie Galante (Guadeloupe). Il s'agit d'une île schématisée par un carré de 14 km de côté. Le domaine comporte deux zones : La première zone est formée des bandes de 3 km de large le long des 4 côtes. La deuxième zone est formée du carré de 8 km de côté restant. La deuxième zone (la zone centrale) est moins perméable et reçoit davantage de recharge. Un premier calcul qui comporte un champ captant est réalisé en régime permanent. Un deuxième calcul, réalisé en régime transitoire, montre l'influence d'une réduction importante de la recharge.

Les caractéristiques du système sont les suivantes :

Géométrie :

- L'île est formée d'un carré de 14 km de coté
- La zone n°2 est formée du carré de 8 km de côté au centre du domaine
- La zone n°1 est formée de la « couronne » restante de 3 km de large
- Altitude du substratum = -100 m
- Cotes topographiques = 50 m (la nappe est libre).

État initial :

- Charge d'eau douce uniforme dans tout le domaine = 2 m (sauf sur les 4 côtés)
- Charges d'eau salée équilibrées selon le schéma de Ghyben-Herzberg, donc à la valeur -80 m

Conditions aux limites :

- Les 4 côtés de l'île sont en contact avec la mer :

- Charge d'eau douce imposée = 0 m
- Charge d'eau salée imposée = 0 m

Paramètres hydrodynamiques :

- Perméabilité = $16 \cdot 10^{-5}$ m/s dans la zone n°1 et $8 \cdot 10^{-5}$ m/s dans la zone n°2
- Coefficient d'emménagement spécifique = $1 \cdot 10^{-4}$ m⁻¹.
- Porosité = 10 %
- Densité de l'eau salée = 1.025
- (Il n'y a pas de coefficient d'emménagement en nappe libre à définir. C'est la porosité qui est utilisée)

Maillage :

- Maillage grossier : 28 lignes et 28 colonnes de mailles carrées 0.5 km de côté.
- Maillage plus fin : 112 lignes et 112 colonnes de mailles carrées de 125 m de côté.

17.1. CALCUL EN RÉGIME PERMANENT

Pour ce calcul en régime permanent on a supposé les valeurs suivantes des recharges par les précipitations et des pompages :

- Recharge : 4.2 mm/an dans la zone n°1 et 90 mm/an dans la zone n°2
- Quatre pompages à l'abscisse $x = -312.5$ m. Les débits pompés sont respectivement :
 - $35 \text{ m}^3/\text{h}$ aux ordonnées -312.5 m et $+312.5$ m
 - $50 \text{ m}^3/\text{h}$ aux ordonnées -812.5 m et $+812.5$ m

Les coordonnées sont données par rapport au centre de l'île.

Compte tenu du caractère non linéaire du système on fixe un nombre maximal d'itérations externes égal à 50 et un coefficient de sous-relaxation égal à 0.7.

Paragraphe « Contrôle de la Résolution Hydrodynamique »

50 = Nombre maxi d'Itérations pour le pas de temps n°0 (Permanent Initial)

1e-7 = Variation Moyenne de Charge entre 2 Itérations pour Convergence

0.7 = Coefficient de Relaxation des calculs [Def=1]

Perman = Régime de l'Hydrodynamique [0=Transitoire 1=Permanent]

Paragraphe : « Unités des données » :

1e-5 = Unité des Perméabilités des Aquifères en m/s (ou m2)

m3/h = Unité des Débits en m3/s (kg/s si Gaz)

ann = Unité des Durées Hydroclimatiques (SEC,MIN,HEU,JOI,MOI,ANN)

ann = Unité de Temps (des Pas de modèle) (SEC,MIN,HEU,JOI,MOI,ANN)

km = Unité des Coordonnées Horizontales des mailles en m

SPECIF = Emmag. Captif lus (0=Hydrogéol. 1=Spécif 2=Comprs)

% = Unité des Porosités = Teneurs en Eau en [-] [% si en %]

Paragraphe : « Eau, Gaz, Huile, Eau Salée » :

2 = Calcul de la Phase Huile, Eau Salée (NAQ) [0=Non 1=Oui 2=Eau Salée]

Paragraphe : « Écoulement d'Huile, Eau Salée, NAQ » :

1.025 = Densité de l'Huile, Eau Salée, NAQ [Défaut=1]

Grandeurs utilisées :

- « CHARGE » = Charge de l'eau douce
- « CHARGE_HUILE » = Charge de l'eau salée
- « DEBIT » = Débit de l'eau douce. Valeur = 9999 impose la charge de l'eau douce.
- « DEBIT_HUILE » = Débit de l'eau salée. Valeur = 9999 impose la charge de l'eau salée.
- « SATURAT » = Teneur en eau douce = Porosité x Épaisseur_Douce / Épaisseur_Aquifère.
- « SATUR_NAQ » = Teneur en eau salée = Porosité x Épaisseur_Salée / Épaisseur_Aquifère.
- « SATUR_LIQ » = Teneur en liquide = Porosité x Épaisseur_Liquide / Épaisseur_Aquifère.
- « INTERFACE » = Altitude de l'interface (9999 là où il n'est pas présent)

17.2. RÉSULTAT DU CALCUL EN RÉGIME PERMANENT

Les calculs avec le maillage fin s'effectuent en une fraction de seconde et convergent parfaitement. Pour visualiser les résultats, on a demandé, dans le fichier [.past] l'édition sur fichier des champs calculés de « CHARGE », « SATURAT », « INTERFACE ». La Figure 65 présente les charges d'eau douce calculées (de 0 à 2.8 m) et l'altitude de l'interface. La couleur grise correspond aux régions dans lesquelles il n'y a pas d'eau salée. On voit nettement le biseau qui s'étend sur une couronne de 5 km environ, et est repoussé au centre par la recharge. À proximité des forages, la nappe est déprimée et l'eau salée est attirée vers les pompages (Figure 66).

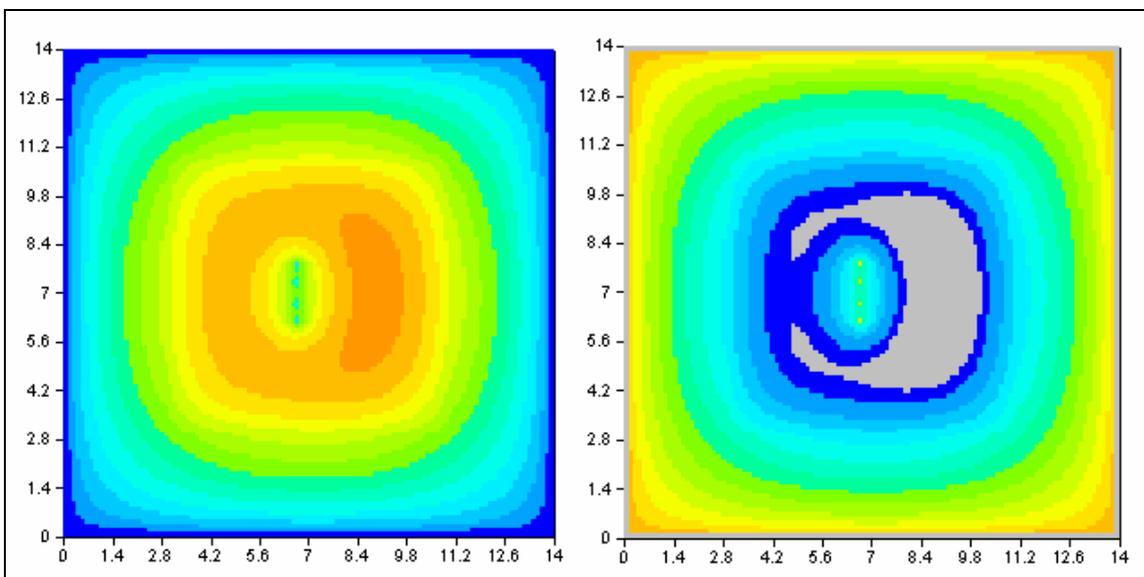


Figure 65 – À gauche : charges d'eau douce. À droite : altitude de l'interface salée.

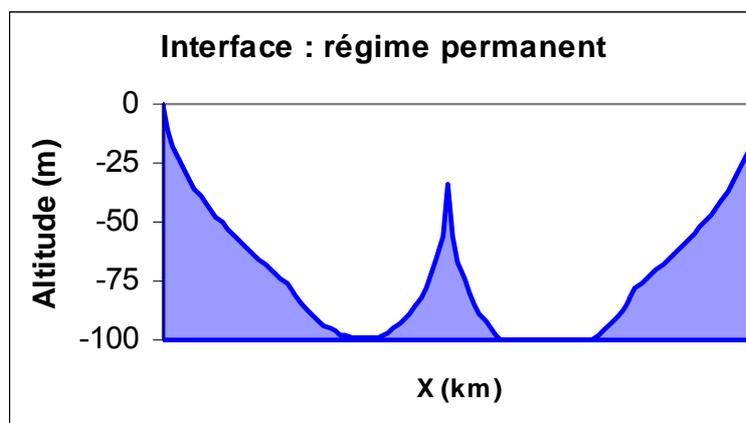


Figure 66 – Vue en coupe Ouest-Est de l'altitude de l'interface salée (ordonnée = 0 km).

17.3. CALCUL EN RÉGIME TRANSITOIRE

Pour ce calcul en régime transitoire, on suppose qu'il n'y a pas de pompages.

Les recharges en régime permanent sont initialement de :

- 9 mm/an dans la zone n°1 et 200 mm/an dans la zone n°2

Puis pour le régime transitoire on suppose que les recharges sont (brutalement) réduites de 70%, soit les valeurs suivantes :

- 2.7 mm/an dans la zone n°1 et 60 mm/an dans la zone n°2

Les paramètres de calcul sont les suivants (les paragraphes identiques au régime permanent ne sont pas répétés ici) :

Paragraphe « Contrôle de la Résolution Hydrodynamique »

75 = Nombre Maxi d'Itérations par pas de temps Calcul suivant le Pas n°0
50 = Nombre maxi d'Itérations pour le pas de temps n°0 (Permanent Initial)
1e-7 = Variation Moyenne de Charge entre 2 Itérations pour Convergence
0.3 = Coefficient de Relaxation des calculs [Def=1]
0 = Régime de l'Hydrodynamique [0=Transitoire 1=Permanent]

Paragraphe : « Prise en compte de la Zone Non-Saturée » :

2 = Pas de Temps Interne minimum
25 = Pas de Temps Interne Maximum
10 = Variation Maximale de Teneur en Eau pendant le Pas de temps de calcul
1 = Erreur de Bilan maximale acceptée [%]
0 = Type d'Erreur Bilan [0=% CVG_Int 1=Bil Glob Stock 2=Bil Glob %]

Les calculs avec le maillage fin s'effectuent en quelques minutes et convergent bien (bilan cumulé équilibré à moins d'1/10 %). Les calculs avec le maillage grossier convergent en quelques secondes et donnent sensiblement les mêmes résultats. La Figure 67 montre l'interface salé calculé en début de calcul, puis après respectivement 50 ans et 300 ans. On voit que la réduction de recharge permet au biseau salé de s'étendre considérablement, passant de 1.6 km de large à 3.8 km après 300 ans. Les charges maximales passent de +6.97 m à +2.98 m en fin de simulation. Le calcul montre cependant que les réactions du biseau sont très lentes. Si le substratum était plus profond, ou si la recharge était encore plus faible, on observerait une lentille d'eau douce flottant sur l'eau salée.

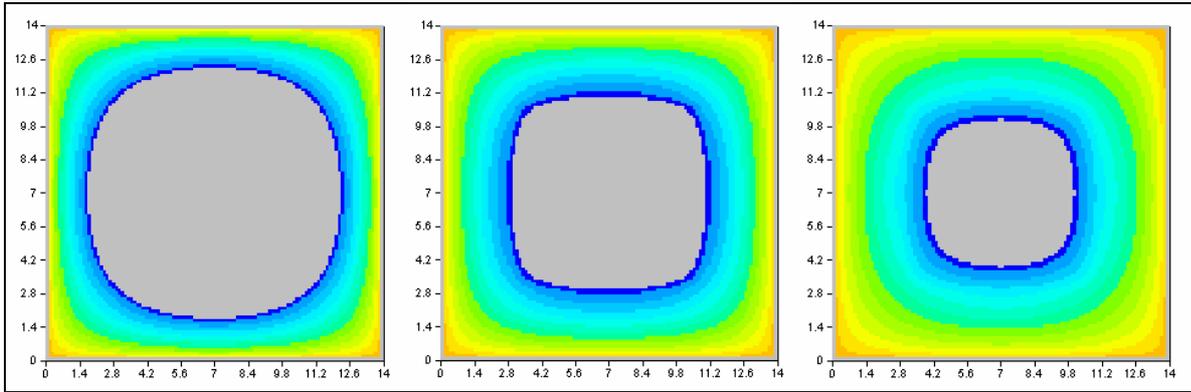


Figure 67 – Altitude de l'interface salée à $t=0$, $t=50$ ans et $t=300$ ans.

18. Annexe

Icônes et boutons du pré processeur WinMarthe

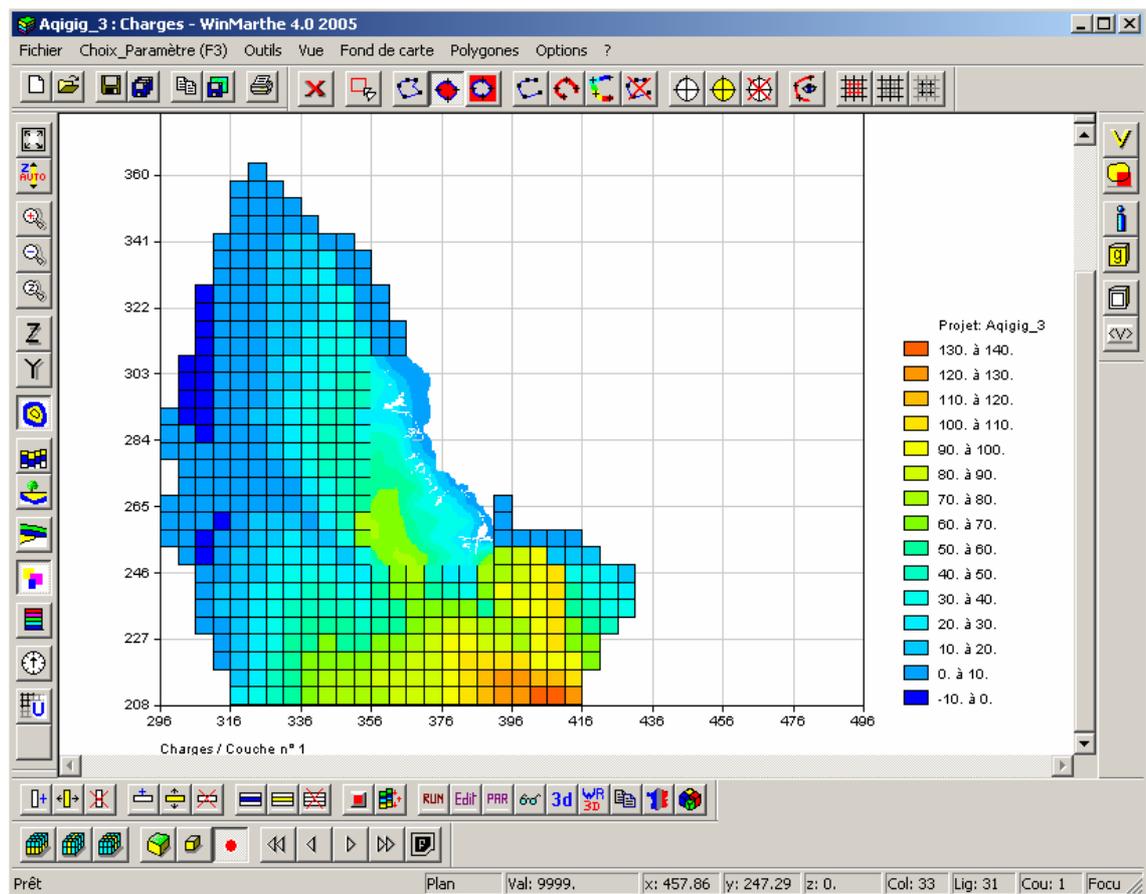


Figure 68 - Fenêtre principale du préprocesseur graphique WinMarthe.

18.1. BOUTONS DE LA BARRE DU HAUT



Crée un nouveau projet.



Ouvre un projet existant, fichier [.rma].



Enregistre le projet en cours (enregistre les fichiers modifiés).

-  Enregistre le projet en cours sous un nouveau nom (enregistre les fichiers modifiés).
-  Copie la vue dans le presse-papier.
-  Enregistre la vue dans un fichier bitmap [.bmp].
-  Imprime l'image visible à l'écran, pour des documents de travail.
-  Désélectionne l'ensemble des mailles du modèle (dans toutes les couches).
-  Sélectionne les mailles à l'intérieur d'un domaine rectangulaire défini par un rectangle extensible.

Ctrl+ Rectangle_Extensible = Alt Gr+Rectangle_Extensible = Désélection.

Majusc. + Rectangle_Extensible = Inverse la sélection.
-  Digitalise un contour fermé (double-cliquer pour terminer et fermer le contour).
-  Sélectionne les mailles à l'intérieur du contour sélectionné ou d'un contour à sélectionner.
-  Sélectionne les mailles à l'extérieur du contour sélectionné ou d'un contour à sélectionner.
-  Crée une courbe (double-cliquer pour terminer).
-  Sélectionne les mailles situées sur la courbe ou le contour sélectionné.
-  Interpole ou numérote des valeurs le long d'une courbe (ouverte).
-  Supprime la courbe ou le contour fermé sélectionné.
-  Crée des points servant à « habiller » le dessin.
-  Modifie le point sélectionné.
-  Supprime le point sélectionné.
-  Affiche la boîte de dialogue de gestion des polygones
-  Crée un nouveau gigogne.
-  Pour un gigogne : fait disparaître les mailles gigognes sélectionnées (et y fait apparaître le maillage principal) => Réalise un gigogne « partiel ».



Pour un gigogne « partiel » : fait apparaître les mailles gigognes cachées sous les mailles sélectionnées.

18.2. BOUTONS DE LA BARRE DE GAUCHE

Ces boutons concernent la visualisation en plan ou en coupe :



« Fit to page » : La vue remplit tout l'écran de WinMarthe.



Détermine une échelle verticale automatique (pour les coupes verticales).



Augmente la taille de l'image (Zoom in).

Possibilité également de définir une zone à zoomer avec le bouton droit de la souris (en maintenant le bouton enfoncé pour définir un rectangle extensible)



Réduit la taille de l'image (Zoom out).



Définit un facteur de zoom. Un cm sur l'écran représentera $100 / \text{Fact. Zoom}$ unités de coordonnées. Par exemple avec un facteur de zoom égal à 5, 1 cm sur l'écran représentera $100 / 5 = 20$ unités de coordonnées.



Modifie le coefficient d'amplitude des Z : pour les visualisations en coupe verticale.



Distord les ordonnées Y par rapport aux abscisses X (pour les vues en plan).



Visualisation en plan.



Visualise en coupe verticale style « modèle » suivant une colonne ou une ligne précédemment sélectionnée.



Visualise en coupe verticale style « réel » (interpolée), suivant une colonne ou une ligne précédemment sélectionnée.



Colorie les mailles selon le numéro de la couche.



Colorie les mailles selon la valeur du paramètre.



Définit des plages de couleurs personnalisées.



Passe d'une coupe Ouest Est (suivant OX) à une coupe Sud Nord (suivant OY) ou inversement.



Rafraîchit le dessin : recoloré.

18.3. BOUTONS DE LA BARRE DE DROITE

Ces boutons concernent principalement les actions relatives aux valeurs des paramètres : sélection par valeur/ affectation/modifications.

 Affecte une valeur à une maille ou à une zone de mailles précédemment sélectionnée.

 Donne accès aux mailles extérieures au domaine.

 Affiche les valeurs des différents champs chargés dans une maille et ses voisines. Après avoir cliqué sur , il suffit de double-cliquer sur une maille pour la sélectionner. Si on modifie des valeurs, ne pas oublier alors de cliquer sur « **Appliquer les modifications** » dans la boîte de dialogue.

 Donne les informations sur la géométrie du modèle : cotes du toit et du substratum des différentes couches. Après avoir cliqué sur , il suffit de double-cliquer sur une maille pour la sélectionner. Il est possible de modifier des valeurs.

 Permet de définir des « liaisons étanches ». Après avoir cliqué sur , il suffit de double-cliquer sur une maille. Une boîte de dialogue apparaît alors qui permet de sélectionner les côtés de la maille sur lesquels on veut imposer une liaison étanche.

 Sélectionne les mailles dont la valeur du paramètre est comprise entre une valeur mini et une valeur maxi. Ou bien sélectionne les mailles dont la valeur est différente d'une valeur donnée. Sélection au choix dans la couche affichée ou bien dans toutes les couches.

18.4. BOUTONS SUR LES BARRES DU BAS

18.4.1. Première ligne : boutons concernant la construction du maillage et son raffinement ainsi que le lancement des modules externes

 Ajoute une colonne : partage la colonne sélectionnée en deux colonnes de même largeur. Il faut au préalable être en mode « Sélection par colonne » et avoir sélectionné une colonne.

 Modifie la largeur de la colonne sélectionnée.

-  Supprime la colonne sélectionnée : regroupement avec la colonne suivante.
-  Ajoute une ligne : partage la ligne sélectionnée en deux lignes de même hauteur.
-  Modifie la largeur de la ligne sélectionnée.
-  Supprime la ligne sélectionnée : regroupement avec la ligne suivante.
-  Ajoute une couche : intercale une couche au-dessus de la couche courante.
-  Modifie l'épaisseur d'une couche.
-  Supprime la couche courante.

Attention : l'ensemble des opérations de définition du maillage doit être réalisé avant l'introduction des paramètres. WinMarthe ne permet pas de gérer le transfert des paramètres d'un maillage dans un autre maillage différent. Il est cependant possible d'utiliser l'outil de modification de maillage (Outils => Autre => Modification de maillage ou de coordonnées). **Si on souhaite construire un maillage irrégulier, il est plus aisé d'utiliser directement l'option de « création d'un maillage irrégulier », plutôt que de modifier un maillage régulier.**

-  Contrôle la cohérence de la géométrie (comparaison des cotes de toit et de substratum), offre la possibilité de corriger les incohérences.
-  Mise à jour des altitudes des mailles à partir de la topographie et des substratum. Cette opération peut exceptionnellement être rendue nécessaire à la suite de certaines importations ou transformations qui modifient la topographie ou les substratums.
-  Lance le moteur de calcul MARTHE.
-  Éditeur des valeurs numériques du champ et de la couche sélectionnés.
-  Lance le module PARAMART qui permet d'introduire les paramètres et options de calcul du moteur de calcul MARTHE.
-  Examen de fichiers ([.txt] , [.out] , [.avi] , [.pdf] , [.hlp] , [.htm], etc. Permet en particulier d'examiner les résultats de convergence et de bilans à l'issue d'un calcul (fichiers bilandeb.txt, mart_ver.txt) ou tout autre fichier texte.
-  Visualisation en 3D.
-  Visualisation VRML en 3D.
-  Gestion de fichiers : Copie / Supprime / Renomme / Édite.
-  Exportation de résultats vers le logiciel MAPINFO®. Les fichiers qui peuvent être

exportés sont des fichiers semis, des fichiers [.bln] (courbes, contours, vitesses, etc.), des fichiers trajectoires (trajmar.out), des fichiers de particules. Également transformation de fichiers de courbes ou contours [.mif] de MAPINFO vers WinMarthe en format [.bln] avec changement de repère.

18.4.2. Seconde ligne : boutons concernant les différents modes de sélection des couches / lignes / colonnes / mailles



Passes en mode sélection par couche. Pour sélectionner toute la couche : double-cliquer sur la couche, qui apparaît alors en rouge.



Passes en mode sélection par colonne. Pour sélectionner une colonne : double-cliquer sur la colonne, qui apparaît alors en rouge.



Passes en mode sélection par ligne. Pour sélectionner une ligne : double-cliquer sur la ligne, qui apparaît alors en rouge.



Sélectionne tout le domaine (sélectionne toutes les mailles dans toutes les couches).



Passes en mode sélection maille par maille. Double-cliquer sur une maille pour inverser sa sélection (sélectionne la maille si elle n'était pas sélectionnée ; la désélectionne si elle était sélectionnée). Les mailles sélectionnées apparaissent en rouge (ou en violet si elles sont à l'extérieur du maillage).



Déplacement avec ou sans sélection en coupe verticale (peu utile).



Revient à la première ligne / colonne / couche du maillage. (selon que la vue est en coupe verticale Sud Nord, en coupe verticale Ouest Est, ou en plan).



Reculer d'une ligne / colonne / couche du maillage.



Avance d'une ligne / colonne / couche du maillage.



Se déplace à la dernière ligne / colonne / couche du maillage.

18.5. RACCOURCIS CLAVIER

- **F3** : Choix d'un champ
- **Control_R** : Ouvre un fichier Résultat (semis simulés)
- **Control_I** : Isovaleurs simples

- Control_D : Isovaleurs **D**oubles

- Control_Q : Plages de coupures é**Q**ui-réparties
- Control_T : Plages de coupures logari**T**hmiques
- Control_L : Plages de coupures **L**inéaires
- Control_U : Plages de coupures **U**tilisateur

- Control_E : **É**diteur de semis
- Control_A : Select **A**ll (Sélectionner tout)
- Control_P : Imprimer (**P**rint) la fenêtre
- Control_S : **S**auvegarder le projet
- Maj+Control_S : **S**auvegarder le projet sous

- Majusc. **F5** : Lancement de la simulation (Run)
- Control **F** : **F**it to Page (Le dessin remplit au mieux l'écran)
- Control_B : Ouvrir un champ « Travail » (anciennement « **B**rouillon »)
- Control_H : Position des mailles à **H**istoriques
- Alter_S : **S**tatistiques
- Alter_T : **T**ransformation numérique
- Alter_O : **O**opération entre paramètres
- Control_C : **C**opie la vue (ou une partie) dans le presse-papier
- Alter_P : **P** gestion des **P**olygones

- Alter_C : Dessin des **C**ontours de mailles (remet/retire)
- Alter_M : Affichage du **M**aillage
- Alter_F : Affichage du **F**ond de carte
- Control_G : Aller à : colonne, ligne, couche (**G**o to)

- Contr+Alter_T : Plages de couleurs pour **T**out le domaine

19. Bibliographie

- Cooley, R.L. (1983) - Some new procedures for numerical solution of variably saturated flow problems. *Water Resour. Res.*, 19(5), 1271-1285.
- Chiang, W., Kinzelbach, W., (1998). Processing MODFLOW, A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Pollution, User's Manual, 325 pp.
- Kinzelbach W., Aeschbach W., Alberich C., Goni I.B., Beyerle U., Brunner P., Chiang W.-H., Rueedi J., and Zoellmann K. (2002) - A Survey of Methods for Groundwater Recharge in Arid and Semi-arid regions. Early Warning and Assessment: Appendix: Your First Groundwater Model with PMWIN. Report Series, UNEP/DEWA/RS.02-2. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya. ISBN 92-80702131-3.
- Thiéry D. (1990 a) - Logiciel MARTHE. Modélisation d'Aquifère par un maillage rectangulaire en régime transitoire pour un calcul hydrodynamique des écoulements - version 4.3. Rapport BRGM R 32210 EAU 4S 90. 356 pp.
- Thiéry, D. (1990 b) - Software MARTHE. Modelling of Aquifers with a Rectangular Grid in Transient state for Hydrodynamic calculations of hEads and flows. Release 4.3. Rap. BRGM 4S/EAU n° R 32548.
- Thiéry, D., (1993) - Modélisation des aquifères complexes - Prise en compte de la zone non saturée et de la salinité. Calcul des intervalles de confiance. *Revue Hydrogéologie*, 1993, n° 4 pp. 325-336.
- Thiéry D. (1994) - Modélisation 3D des écoulements en Zone Non Saturée avec le logiciel MARTHE version 5.4. Rapport BRGM R 38108 DR/HYT 94. , 114 pp.
- Thiéry D. (1995 a) - Modélisation 3D du transport de masse avec le logiciel MARTHE version 5.4. Rapport BRGM R 38149 DR/HYT 95. , 171 pp.
- Thiéry, D. (1995 b) - Modélisation des écoulements avec interactions chimiques avec le logiciel MARTHE. Version 5.5, Rapport BRGM n° R 38463 HYT/DR 95.
- Thiéry, D., Golaz, C., Azaroual, M. (2002) - Mise en œuvre et tests d'application du code MARTHE – PHREEQC Version 6.2, Rapport BRGM/RP-51905-FR. 67 pp.
- Thiéry, D., Golaz, C. (2002) - Consideration of vegetation effects in version 6.2 of the MARTHE model. Consequences for water and mass uptake. Rapport BRGM/RP-51988-FR. 48 pp.
- Thiéry, D. (2004) – Modélisation 3D du transport de masse avec double porosité. Logiciel MARTHE – version 6.4. Rapp. BRGM/RP-52811-FR. 39 pp.

Thiéry, D. (2006) – Didacticiel du pré-processeur WinMarthe v4.0. Rapport final. BRGM/RP-54652-FR, 83 p., 48 fig.

Thiéry, D. (2007a) - Tutorial for the WinMarthe v4.0 pre-processor. BRGM/RP-54652-EN, 89 p., 48 figs.

Thiéry, D. (2007b) - Modélisation 3D des écoulements à densité variable avec le logiciel MARTHE version 6.9. Rap. BRGM/RP-55871-FR, 88 p., 23 fig.



**Centre scientifique et technique
Service EAU**

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34