

# Didacticiel du code de calcul MARTHE v7.4

## Exploration des principales fonctionnalités de modélisation des hydrosystèmes

Rapport final

BRGM/RP-62798-FR

Avril 2014

Dominique THIÉRY



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**



# Didacticiel du code de calcul MARTHE v7.4

## Exploration des principales fonctionnalités de modélisation des hydrosystèmes

Rapport final

**BRGM/RP-62798-FR**  
Avril 2014

**Dominique Thiéry**

**Vérifié par :**

Nom : Y. Barthélemy



Date : 22/03/2014

**Approuvé par :**

Nom : S. Lallier



Date : 31/03/2014

**Mots clés** : Code de calcul MARTHE, Modélisation des hydrosystèmes, Nappes souterraines, Didacticiel, Préprocesseur, Manuel d'utilisation, WinMarthe

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

Thiéry D. (2014) - Didacticiel du code de calcul MARTHE v7.4. Exploration des principales fonctionnalités de modélisation des hydrosystèmes. Rapport BRGM/RP-62798-FR. 223 p., 131 fig.

## 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 et b, 2009, 2010a, b et c), 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 7.4 sous forme d'un didacticiel appliqué à un certain nombre d'exemples de difficultés croissantes, mais pour des géométries simples. 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 préprocesseur WinMarthe v4.0. Rapport final. BRGM/RP-54652-FR » (Thiéry 2006) présente en détail le préprocesseur WinMarthe.



## Sommaire

1.	<b>Introduction.....</b>	<b>13</b>
2.	<b>Description de l'exemple d'application n°1 .....</b>	<b>19</b>
3.	<b>Définition du maillage .....</b>	<b>21</b>
4.	<b>Définition des paramètres pour le calcul de l'hydrodynamique.....</b>	<b>27</b>
5.	<b>Lancement du calcul et examen des résultats .....</b>	<b>35</b>
6.	<b>Calcul des charges en régime transitoire .....</b>	<b>45</b>
7.	<b>Simulation du transfert de masse .....</b>	<b>51</b>
8.	<b>Lancement du calcul de transport et examen des résultats.....</b>	<b>59</b>
9.	<b>Insertion d'un maillage gigogne .....</b>	<b>69</b>
10.	<b>Calage automatique des paramètres.....</b>	<b>73</b>
11.	<b>Exemple n°2 : Écoulement sous un barrage.....</b>	<b>81</b>
12.	<b>Exemple n°3 : Écoulement à surface libre à travers un barrage avec surface de suintement .....</b>	<b>85</b>
13.	<b>Exemple n°4 : Simulation fine en radial d'une remontée de la surface libre résultant d'une recharge locale à travers la zone non saturée .....</b>	<b>89</b>
14.	<b>Exemple n°5 : Écoulement avec effets de densité à proximité de la mer. Biseau salé de Henry.....</b>	<b>95</b>
15.	<b>Exemple n°6 : Simulation d'un doublet géothermique.....</b>	<b>105</b>
16.	<b>Exemple n°7 : Écoulement sous un cours d'eau, à travers la Zone Non Saturée .....</b>	<b>115</b>
17.	<b>Exemple n°8 : Écoulement à travers la Zone Non Saturée en milieu hétérogène à surfaces libres multiples.....</b>	<b>121</b>
18.	<b>Exemple n°9 : Aquifère côtier avec intrusion saline .....</b>	<b>127</b>
19.	<b>Exemple n°10 : Hydrosystème multicouche avec rivières.....</b>	<b>133</b>
20.	<b>Exemple n°11 : Hydrosystème simple avec bilan hydroclimatique GARDÉNIA .....</b>	<b>161</b>

21.	Exemple n°12 : Simulation en radial d'un puits à pénétration partielle ....	173
22.	Exemple n°13 : Simulation d'écoulement de gaz pour réaliser du « venting »	181
23.	Exemple n°14 : Transport avec adsorptions de Langmuir et de Freundlich	189
24.	Exemple n°15 : Transport multicomposant avec dégradation en chaîne ..	195
25.	Bibliographie.....	213

## Liste des annexes

Annexe 1 Icônes et boutons du préprocesseur WinMarthe.....	217
--	-----

## Liste des illustrations

Figure 1 – Vue 3D du modèle nord-aquitain montrant la succession des 15 couches aquifères modélisées (Saltel et Pédron, 2012) .....	13
Figure 2 – Vue 3D du modèle Jurassique de Poitou-Charentes, 8 couches, 4 aquifères (Douez et al. 2011) .....	14
Figure 3 – Vue 3D du système à modéliser.....	19
Figure 4 - Boîte de dialogue pour la création du dossier de travail .....	21
Figure 5 - Boîte de dialogue de création du maillage. ....	22
Figure 6 – Premières lignes du fichier projet Didact2.rma.....	23
Figure 7 - Boîte de dialogue de sélection d'un champ.....	24
Figure 8 – Visualisation en coupe des épaisseurs. ....	25
Figure 9 – Menu des paramètres non maillés.....	29
Figure 10 – Menu du fichier des paramètres généraux. ....	30
Figure 11 – Affectation d'une recharge de 252.46 mm/an dans la zone climatique n°1 (c'est-à-dire ici dans la zone de sol n°1). ....	33
Figure 12 – Dernières lignes du fichier des paramètres Didact2.mart .....	33
Figure 13 – Bilan global des 3 couches. ....	35
Figure 14 – Débits échangés entre les 3 couches.....	36
Figure 15 – Champ des charges hydrauliques calculées (couche n°1) .....	36
Figure 16 – Boîte de dialogue pour le calcul des isovaleurs. ....	37
Figure 17 – Isovaleurs des charges hydrauliques calculées (couche n°1).....	38
Figure 18 – Sélection du fichier des départs de trajectoires.....	39
Figure 19 – Définition des départs de trajectoires. ....	39
Figure 20 – Trajectoires (régime permanent). ....	40
Figure 21 – Trajectoires pendant une durée de 100 jours.....	41
Figure 22 – Recherche de l'objet « Anisotropie verticale ». ....	42
Figure 23 – Affectation d'une anisotropie verticale égale à 500 dans les 3 couches de la maille de pompage. ....	43
Figure 24 – Charges hydrauliques dans la couche n°3. À gauche : sans pompage, après le régime permanent. À droite : après 500 jours de pompage.....	49
Figure 25 – Pourcentage de saturation en eau après 500 jours de pompage. À gauche : dans la couche n°1 ; à droite : dans la couche n°2. La couleur bleu foncé indique les mailles dénoyées.....	49
Figure 26 – Évolution du débit de déstockage de la nappe.....	50
Figure 27 – Évolution des charges hydrauliques dans la couche n°1 à l'aplomb du puits central (en rouge) et d'un des deux puits voisins. ....	50

Figure 28 – Création d'une « Action » ou « Modification » au pas de temps n°1. ....	53
Figure 29 – Sélection de l'objet 'Débit Massique Concentration' au pas de temps n°1. ....	53
Figure 30 – Définition de la valeur du Débit Massique Concentration au pas de temps n°1 .....	54
Figure 31 – Changement de pas de temps. ....	55
Figure 32 – Définition des mailles à historiques. ....	55
Figure 33 – Type de définition d'un historique. ....	56
Figure 34 – Définition des coordonnées d'un emplacement d'historique.....	56
Figure 35 – Fichier des «Mailles à Historiques ». ....	57
Figure 36 – Bilan de masse cumulé après 3 ans. ....	59
Figure 37 – Choix du champ et du pas de temps à visualiser.....	60
Figure 38 – Concentrations après 3 ans dans la couche n°3. ....	61
Figure 39 – Isovaleurs des concentrations après 3 ans dans la couche n°3. ....	61
Figure 40 – Concentrations après 3 ans en coupe verticale dans l'axe du puits. ....	61
Figure 41 – Évolution temporelle des concentrations dans les 6 points à historiques.....	62
Figure 42 – Concentrations après 3 ans dans la couche n°3, Méthode de transport MOC.....	63
Figure 43 – Évolution temporelle des concentrations dans les 6 points à historiques. Méthode de transport MOC.....	63
Figure 44 – Définition de la Concentration de la Recharge au pas de temps n°1. ....	65
Figure 45 – Évolution temporelle des concentrations dans les 6 points. À gauche Rho x kd = 0.25 ; à droite Rho x kd = 0.50. ....	67
Figure 46 – Définition de l'extension du maillage gigogne. ....	70
Figure 47 – Définition des dimensions des sous-colonnes et sous-lignes.....	70
Figure 48 – Sous-maillage gigogne au voisinage du puits de pompage.....	71
Figure 49 – Départs de trajectoires inverses à partir du puits.....	72
Figure 50 – Isovaleurs et lignes de courant : calcul avec un sous-maillage gigogne au voisinage du puits de pompage. ....	72
Figure 51 – Choix des variables à optimiser. ....	77
Figure 52 – Paramètres de la perméabilités de la zone n°3 .....	77
Figure 53 – Mise à jour du fichier Projet Optimisation.....	78
Figure 54 – Définition des départs de trajectoires sous le barrage .....	82
Figure 55 – Écoulement sous un barrage : équipotentielles (en bleu) et lignes de courant (en rouge).....	83
Figure 56 – Écoulement à surface libre à travers un barrage avec surface de suintement : isovaleurs de charges hydrauliques et surface libre (en rouge) .....	87
Figure 57 – Remontée de la surface libre : régime permanent. Champ du taux de saturation avec profil de la surface libre en rouge. ....	92

Figure 58 – Remontée de la surface libre : régime transitoire. Champ du taux de saturation en fin de calcul et profils successifs de la surface libre de bas en haut.....	93
Figure 59 – Champ de Salinité calculée .....	100
Figure 60 – Champ des Charges hydrauliques réelles calculées.....	100
Figure 61 – Champ de Salinité calculée après 15 minutes .....	102
Figure 62 – Champ de Salinité calculée après 80 minutes .....	103
Figure 63 – Vue en plan de la température dans l'aquifère après 17.5 et 35 ans .....	108
Figure 64 – Vue en coupe verticale de la température dans l'aquifère et les épontes après 35 ans.....	109
Figure 65 – Vue en plan de la température dans l'aquifère après 17.5 et 35 ans en supposant des épontes adiabatiques.....	109
Figure 66 – Évolution de la température au puits de pompage (avec ou sans prise en compte des épontes, avec ou sans écoulement régional).....	109
Figure 67 – Définition d'un « indice d'éponte thermique analytique » dans la couche n°2. ....	110
Figure 68 – Évolution de la température au puits de pompage : comparaison de la méthode approchée de Vinsome avec le calcul de référence avec 6 couches d'épontes.....	111
Figure 69 – Création d'un fichier d'asservissements de température.....	112
Figure 70 – Définition d'asservissements de température entre un puits de production et un puits d'injection.....	112
Figure 71 – Asservissements de température : évolution des températures de production et d'injection.....	113
Figure 72 – Mise en évidence de l'influence de l'asservissement de la température d'injection.....	113
Figure 73 – Profil de teneur en eau après 10 h, 50 h, 100 h et 300 h (maillage de 0.5 m) .....	118
Figure 74 – Profil de teneur en eau après 10 h, 50 h, 100 h et 300 h (maillage de 0.125 m).....	118
Figure 75 – Évolution au cours du temps de la surface libre (pression = 0).....	118
Figure 76 – Profil de teneur en eau après 100 h : à gauche canal, à droite bassin circulaire .....	119
Figure 77 – Concentration après 300 h : à gauche avec dispersivité, à droite sans dispersivité.....	120
Figure 78 – Écoulement en zone non saturée dans un milieu hétérogène.....	121
Figure 79 – Teneurs en eau. La ligne noire représente la limite de pression nulle, donc la surface libre.....	125
Figure 80 – Champ des charges hydrauliques et isovaleurs tous les 1 m de charge.....	125
Figure 81 – À gauche : charges d'eau douce. À droite : altitude de l'interface salée.....	130
Figure 82 – Vue en coupe Ouest-Est de l'altitude de l'interface salée (ordonnée = 0 km). ....	130
Figure 83 – Altitude de l'interface eau douce-eau salée à t=0, t=50 ans et t=300 ans. ....	132

Figure 84 – Hydrosystème multicouche avec rivières.....	135
Figure 85 – Géométrie de l'hydrosystème multicouche avec rivières. En haut : vue en plan ; en bas : vue en coupe verticale. ....	135
Figure 86 – Description du réseau hydrographique et des zones de sol.....	136
Figure 87 – Création d'un fichier d'arbre de branchement des affluents de rivière. ....	140
Figure 88 – Définition de l'arbre de branchement des affluents de rivière.....	140
Figure 89 – Hydrosystème multicouche avec rivières : charges hydrauliques calculées. ....	146
Figure 90 – Hydrosystème multicouche avec rivières : Paragraphe « Initialisation avant calcul » à la fin du fichier des paramètres [.mart]. ....	148
Figure 91 – Hydrosystème multicouche avec rivières : Fichier des pas de temps : extrait. ....	150
Figure 92 – Hydrosystème multicouche avec rivières : Bilan hydroclimatique. ....	152
Figure 93 – Hydrosystème multicouche avec rivières : Bilan global de la nappe.....	152
Figure 94 – Hydrosystème multicouche avec rivières : Historiques de débits dans 4 tronçons de rivières.....	153
Figure 95 – Hydrosystème multicouche avec rivières. Historiques de la cote de l'eau dans 4 tronçons de rivière.....	153
Figure 96 – Hydrosystème multicouche avec rivières : Historiques de niveau de nappe.....	154
Figure 97 – Profil en long du débit dans l'affluent n°10 à la date 10 jours.....	154
Figure 98 – Profil en long du débit d'échange Nappe-> Rivière de l'affluent n°10 à la date 10 jours.....	155
Figure 99 – Pollution dans un affluent de rivière : Fichier des pas de temps : extrait.....	158
Figure 100 – Pollution dans un affluent de rivière : Concentration dans la nappe après 5 ans.....	159
Figure 101 – Pollution dans un affluent de rivière : Évolution de la concentration dans la rivière au cours des 5 premiers jours.....	159
Figure 102 – Pollution dans un affluent de rivière : Évolution de la concentration dans la nappe en quelques points proches de la rivière pendant 5 ans (1800 jours).....	160
Figure 103 – Géométrie de l'hydrosystème, avec un cours d'eau orienté Nord-Sud au milieu du domaine.....	161
Figure 104 – Hydrosystème avec bilan hydroclimatique GARDÉNIA : Fichier temporel de données climatiques : extrait.....	166
Figure 105 – Hydrosystème avec bilan hydroclimatique GARDÉNIA : Création d'un nouveau fichier de pas de temps de durée 1 mois.....	167
Figure 106 – Au pas de temps n°0 : Définition du flux de pluie avec lecture des données dans la colonne n°1 d'un fichier externe.....	168
Figure 107 – Au pas de temps n°0 : Définition du flux d'ETP avec lecture des données dans la colonne n°2 d'un fichier externe.....	169
Figure 108 – Définition du format d'écriture des dates dans le fichier des pas de temps résultant.....	169

Figure 109 – Hydrosystème avec bilan hydroclimatique GARDÉNIA : Extrait du fichier pas de temps «Didact_Chennetr.pastp» résultant. ....	170
Figure 110 – Simulation avec le code MARTHE du débit de la Voulzie à Jutigny et au niveau du piézomètre St Martin Chennetron. ....	171
Figure 111 – Flux de ruissellement et flux d'infiltration résultant du bilan hydroclimatique GARDÉNIA couplé. ....	171
Figure 112 – Pourcentage de flux de ruissellement résultant du bilan hydroclimatique GARDÉNIA couplé. ....	172
Figure 113 – Puits en coupe verticale : charges calculées au voisinage du puits jusqu'à une distance radiale de 3 mètres. Le puits est situé à gauche, en bleu foncé, et l'échelle radiale est dilatée d'un facteur 10. Les courbes sont les isovaleurs de charge. ....	176
Figure 114 – Charges calculées au voisinage du puits jusqu'à une distance radiale de 25 mètres. Isovaleurs de charge et trajectoires. ....	176
Figure 115 – Profils de débit dans le puits. à gauche : débit vertical dans le puits ; à droite débit venant de la nappe. ....	177
Figure 116 – Introduction d'une liaison étanche à l'Est de la maille supérieure du puits. ....	178
Figure 117 – Puits en coupe verticale, en rose, avec liaisons étanches à l'Est des quatre mailles supérieures. ....	178
Figure 118 – Charges au voisinage du puits. Dessin de gauche : jusqu'à une distance radiale de 3 mètres (échelle radiale dilatée). Dessin de droite : jusqu'à une distance radiale de 25 mètres avec visualisation des trajectoires. ....	179
Figure 119 – Profils de débit dans un puits crépiné de 10 m à 20 m de profondeur : à gauche : débit vertical dans le puits ; à droite débit venant de la nappe. ....	179
Figure 120 – Venting en régime permanent : pressions du gaz calculées en kPa. ....	183
Figure 121 – Venting : masse volumique du gaz calculées en kg/m <sup>3</sup> . ....	184
Figure 122 – Venting : amplitude relative de la vitesse du gaz. ....	184
Figure 123 – Venting avec un maillage radial : pressions du gaz calculées en kPa. (Distances radiales en abscisses et angles, de 0° à 120° en ordonnées). ....	187
Figure 124 – Venting avec un maillage radial : profils de pressions du gaz jusqu'au voisinage du puits. ....	187
Figure 125 – Transport avec adsorption selon l'isotherme de Langmuir. ....	193
Figure 126 – Transport avec adsorption selon l'isotherme de Freundlich. ....	194
Figure 127 – Définition d'une concentration ou d'une concentration extérieure en précisant le composant. ....	199
Figure 128 – Introduction de fichiers de données non maillées : fichier de temps de ½ dégradation multicomposant, de temps de retard multicomposant, de noms des composants. ....	201
Figure 129 – Nitrification : Concentrations simulées par Marthe (trait continu) comparées à la solution analytique (symboles). ....	202

Figure 130 – Injection instantanée d’une masse en milieu infini dégradation en chaîne à 4 composants. Comparaison des concentration simulées (en rouge) avec la solution analytique (en bleu). .....	206
Figure 131 – Réaction en chaîne Uranium ->Thorium-> Radium en milieu semi infini Concentration simulées par Marthe (trait continu) comparées à la solution analytique (symboles). .....	211
Figure 132 – Fenêtre principale du préprocesseur graphique WinMarthe. ....	217

## Liste des tableaux

Tableau 1 – Liste des exemples qui utilisent chaque fonctionnalité. ....	17
Tableau 2 – Dates des 36 pas de temps de la simulation de l’hydrodynamique en régime transitoire.....	47
Tableau 3- Calage automatique de 4 paramètres hydrauliques et hydrodispersifs .....	79
Tableau 4 - Coordonnées en km des extrémités des 6 affluents, et largeurs en m.....	136
Tableau 5 – Début, fin et durée en jours des pas de temps.....	149
Tableau 6 – Transport avec rivières : dates de fin des pas de temps en jours.....	156
Tableau 7 – Largeurs en mètres des 37 colonnes du maillage radial.....	185

# 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 et b, 2009, 2010a, b et c), 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 tableau). La gestion des couches permet de modéliser des systèmes géologiques complexes (Figure 1) : des couches peuvent disparaître localement, ce qui peut provoquer des courts-circuits, des couches profondes peuvent affleurer en surface, etc.

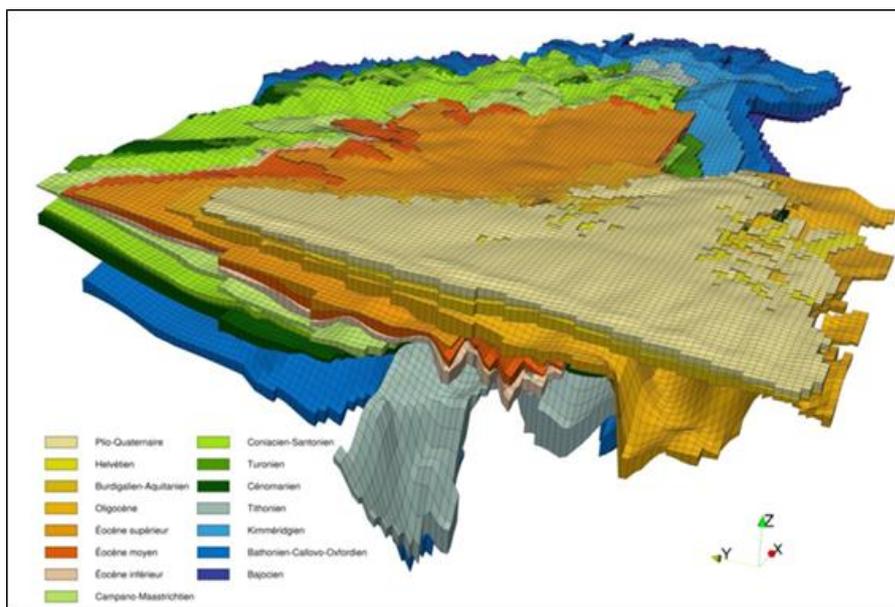


Figure 1 – Vue 3D du modèle nord-aquitain montrant la succession des 15 couches aquifères modélisées (Saltel et Pédron, 2012)

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 7.4 sous forme d'un didacticiel appliqué à un certain nombre d'exemples de difficultés croissantes. On a volontairement choisi des exemples avec des géométries simples, mais MARTHE permet également de modéliser de grands systèmes aquifères (Figure 1 et Figure 2)

de plus d'un million de mailles. 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 préprocesseur WinMarthe v4.0. Rapport final. BRGM/RP-54652-FR » (Thierry 2006) présente en détail le préprocesseur WinMarthe.

Merci à Yves Barthélémy pour sa relecture attentive de ce rapport et pour ses suggestions d'améliorations.

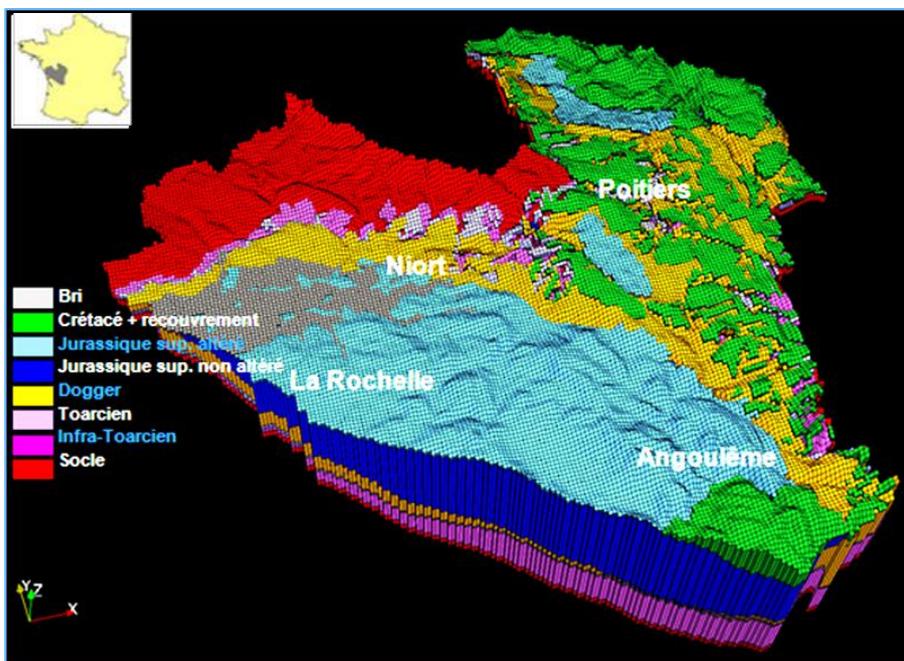


Figure 2 – Vue 3D du modèle Jurassique de Poitou-Charentes, 8 couches, 4 aquifères (Domez et al. 2011)

Quinze exemples d'application sont présentés :

- Exemple d'application n°1 : Écoulement et transport de masse dans un système aquifère formé de 3 couches.
  - Anisotropie verticale de perméabilité.
  - Trajectoires.
  - Recharge par la pluie.
  - Calcul hydrodynamique en régime transitoire.
  - Transfert de masse : méthode TVD et méthode MOC.
  - Définition d'une zone contaminée.

- *Coefficient de partage kd.*
- *Insertion d'un maillage gigogne.*
- *Calibration (calage) automatique des paramètres.*
- Exemple d'application n°2 : Écoulement sous un barrage.
  - *Calcul en coupe verticale.*
  - *Trajectoires et isovalues.*
- Exemple d'application n°3 : Écoulement à surface libre à travers un barrage avec surface de suintement.
  - *Écoulement en Zone Non Saturée.*
  - *Coupe verticale.*
  - *Coefficient de sous-relaxation.*
  - *Surface libre*
  - *Surface de suintement.*
- Exemple d'application n°4 : Simulation fine en radial d'une remontée de la surface libre résultant d'une recharge locale à travers la zone non saturée.
  - *Maillage radial.*
  - *Coupe verticale.*
  - *Surface libre*
  - *Dénoyage - ennoyage en régime transitoire.*
  - *Coefficient de sous-relaxation*
- Exemple d'application n°5 : Écoulement avec effets de densité à proximité de la mer. Biseau salé de Henry.
  - *Calculs avec effets densitaires (variations de salinité).*
  - *Diffusion.*
- Exemple d'application n°6 : Simulation d'un doublet géothermique.
  - *Transfert d'énergie, transferts thermiques.*
  - *Calcul de la température, conduction, convection.*
  - *Doublet géothermique.*
  - *Solution approchée de Vinsome.*
  - *Asservissement de la température d'injection à la température d'un puits de production.*
- Exemple d'application n°7 : Écoulement sous un cours d'eau, à travers la Zone Non Saturée.
  - *Écoulement en Zone Non Saturée en régime transitoire.*
  - *Sous-relaxation.*
  - *Maillage radial*
  - *Transfert de masse en Zone Non Saturée*
- Exemple d'application n°8 : Écoulement à travers la Zone Non Saturée en milieu hétérogène à surfaces libres multiples.
  - *Écoulement en Zone Non Saturée en régime permanent.*
  - *Écoulement en Zone Non Saturée en milieu hétérogène.*
  - *Surface de suintement.*
  - *Surfaces libres multiples.*

- Exemple d'application n°9 : Aquifère côtier avec intrusion saline.
  - *Aquifère côtier.*
  - *Biseau salé.*
  - *Écoulement diphasique eau douce-eau salée.*
  - *Régime permanent et transitoire.*
- Exemple d'application n°10 : Hydrosystème multicouche avec rivières.
  - *Système multicouche à couches biseautées.*
  - *Réseau hydrographique (réseau de rivières).*
  - *Loi hauteur-débit par la formule de Manning-Strickler.*
  - *Crue en rivière en régime transitoire.*
  - *Transfert de masse dans les rivières et dans les rivières.*
- Exemple d'application n°11 : Hydrosystème simple avec bilan hydroclimatique GARDÉNIA.
  - *Bilan hydroclimatique GARDÉNIA couplé.*
  - *Couplage Pluie, Évapotranspiration, Ruissellement, Recharge, Échanges Nappe-Rivière.*
- Exemple d'application n°12 : Simulation en radial d'un puits à pénétration partielle.
  - *Simulation d'un puits en coupe radiale.*
  - *Anisotropie verticale de perméabilité.*
  - *Liaisons étanches.*
  - *Édition des débits haut et bas, édition des débits latéraux.*
- Exemple d'application n°13 : Simulation d'écoulement de gaz pour réaliser du « venting ».
  - *Simulation d'écoulement de gaz.*
  - *Réalisation d'un maillage radial plan (rayon , angle)*
- Exemple d'application n°14 : Transport avec adsorptions selon l'isotherme de Langmuir ou de Freundlich.
  - *Transport avec l'isotherme de Langmuir.*
  - *Transport avec l'isotherme de Freundlich.*
- Exemple d'application n°15 : Transport avec dégradation en chaîne.
  - *Injection d'un flux massique dans un milieu semi infini : 3 composants.*
  - *Injection instantanée de masse en milieu infini : 4 composants.*
  - *Réaction en chaîne de produits radioactifs en milieu semi infini : concentration imposée sur la limite amont.*

Le Tableau 1 donne la liste des exemples qui utilisent chaque fonctionnalité.

<b>Fonctionnalité</b>	<b>Numéros des exemples</b>
Anisotropie verticale	1, 12
Asservissement de température	6
Bilan Gardénia : Pluie – ETP	11
Calibration (calage) automatique des paramètres	1
Coefficient de partage $k_d$	1
Coefficient de sous relaxation	1, 3, 4, 7, 8, 9, 10
Coupe verticale	2, 3, 4
Dégradation en chaîne	15
Dénoyage	1, 4
Doublet géothermique	6
Écoulement en Zone Non Saturée (ZNS)	4, 7, 8
Écoulement de gaz, venting	13
Hydrodynamique en régime transitoire	1, 4, 7, 9
Interface eau douce – eau salée	9
Isotherme de Langmuir, Freundlich	14
Liaisons étanches	12
Maillage gigogne	1
Maillage radial	4, 7, 12, 13
Multicouche à couches biseautées	10
Recharge par la pluie	1
Relation de Manning-Strickler	10
Réseau hydrographique	10
Salinité, effets densitaires	5
Simulation de puits	12
Surface de suintement	3, 8
Surface libre	3, 4, 8
Transferts thermiques	6
Transport de masse méthode MOC	1
Transport de masse	1, 5, 7, 10, 14, 15
Transport de masse en rivière	10
Transport de masse en ZNS	7, 8
Trajectoires	1, 2
Vitesses	5

Tableau 1 – Liste des exemples qui utilisent chaque fonctionnalité.



## 2. Description de l'exemple d'application n°1

L'exemple à modéliser correspond à un système aquifère composé de deux formations géologiques superposées. Les limites nord et sud sont imperméables et les limites ouest et est correspondent chacune à 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 d'Ouest en 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  $1/10^6$  de la perméabilité horizontale. La porosité efficace est égale à 25 %. Les épaisseurs des deux formations sont respectivement de 4 m et 6 m, de haut en bas, et le toit de la première formation est horizontal, à l'altitude 10 m. L'aquifère est alimenté par une recharge constante de 252 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 la zone contaminée en utilisant un puits situé au point de coordonnées 490 m, 310 m et traversant totalement les deux formations. (Figure 3).

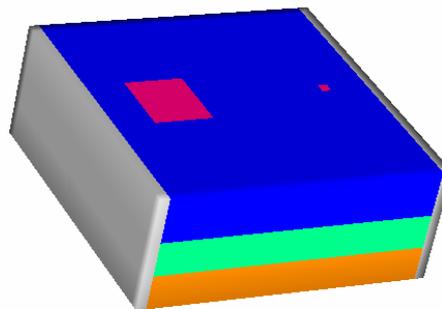


Figure 3 – Vue 3D du système à modéliser  
(NB : La formation inférieure est modélisée par deux couches de mailles)

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  $1.05 \cdot 10^5$   $\mu\text{g/mois}$  par maille de  $400 \text{ m}^2$ ). Compte tenu de la recharge de  $8 \cdot 10^{-9}$  m/s la pollution correspond à une concentration égale à  $1 \cdot 10^{-4} [\mu\text{g/s/m}^2] / 8 \cdot 10^{-9} \text{ m/s} = 1.25 \cdot 10^4 [\mu\text{g/m}^3]$ . 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 concentration 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 (de haut en bas)
- Anisotropie verticale ( $K_v / K_h$ ) : 1/10
- Porosité efficace : 25 %
- Recharge : 252 mm/an, soit  $8 \cdot 10^{-9}$  m/s
- Puits de pompage traversant les 2 formations situé en (490 m, 310 m)
- Régime hydraulique permanent

### **Caractéristique du transport**

- Zone contaminée dans le 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  $1.05 \cdot 10^5 \mu\text{g}/\text{mois}$  par maille de  $400 \text{ m}^2$ )
- Dispersion 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 uniformes de 20 mètres de côté. 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

Double-cliquer sur l'icône  pour lancer WinMarthe, puis cliquer sur l'icône  ou bien sur « Fichier → Nouveau » pour créer un nouveau modèle.

Dans la fenêtre « Définition du fichier projet de Marthe » qui s'ouvre (Figure 4), l'icône  permet de sélectionner le dossier où sera enregistré le modèle. L'icône  permet ensuite de créer un sous-dossier particulier (par exemple, Didactic) dans lequel seront stockés tous les fichiers du modèle.

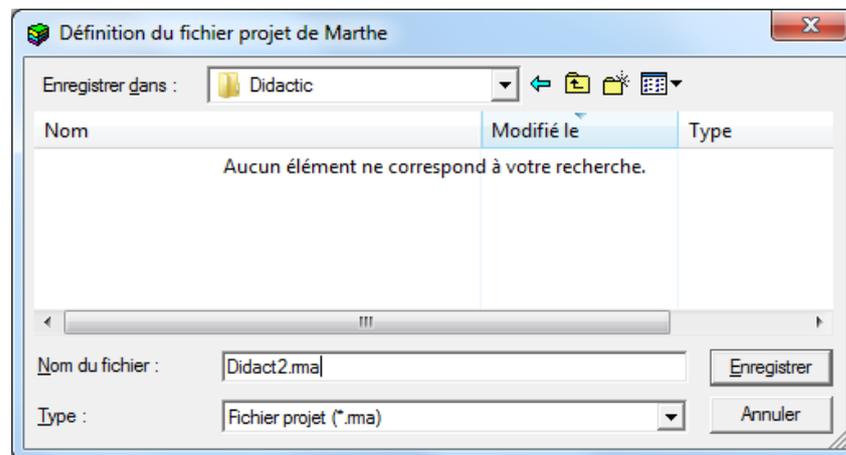


Figure 4 - Boîte de dialogue pour la création du dossier de travail

WinMarthe demande alors un nom de fichier pour le modèle à créer (extension automatique .rma) : on donne par exemple le nom **Didact2** (dans le dossier **Didactic**), et on voit s'ouvrir une boîte de dialogue pour la définition du maillage à créer (Figure 5).

On introduit les données suivantes :

- Titre du projet : **Didacticiel 2** (cadre « Divers » en en bas à droite).
- Perméabilité par défaut = **1** (c'est-à-dire **perméabilité** uniforme = 1).

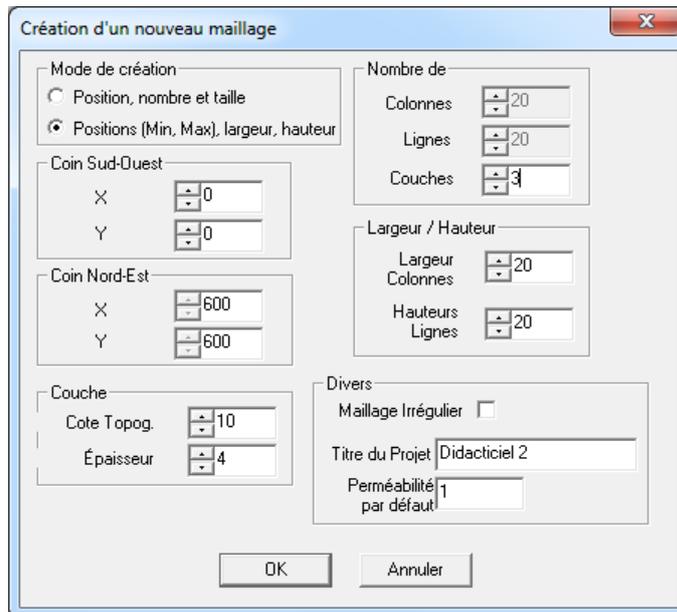


Figure 5 - Boîte de dialogue de création du maillage.

Le cadre « Mode de création » en haut à gauche propose deux options pour définir le maillage :

ou bien on coche « Positions (Min, Max), largeur, hauteur » et on donne l'emprise du maillage en plan, la largeur des colonnes et la hauteur des lignes :

- Coin Sud-Ouest : X = **0** ; Y = **0** ;
- Coin Nord-Est : X = **+600** ; Y = **+600** ;
- Largeur des colonnes = **20** ; Hauteur des lignes = **20** ;

ou bien on coche « Position, nombre et taille » et on indique le nombre de colonnes et de lignes, avec leur largeur et leur hauteur :

- Coin Sud-Ouest : X = **0** ; Y = **0** ;
- Nombre de colonnes = **30** ; Nombre de lignes = **30** ; Nombre de couches = **3** ;
- Largeur des colonnes = **20** ; Hauteur des lignes = **20** ;

Puis, dans le cadre « Couche », on renseigne deux paramètres qui pourront être modifiés ultérieurement :

- Cote topog. = **10** c'est-à-dire « cote topographique uniforme = 10 m » ;
- 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.

**N.B. :** Pour créer un maillage irrégulier on aurait coché « Maillage Irrégulier » dans le cadre « Divers », et défini une à une les largeurs des colonnes successives, de gauche à droite, et les hauteurs des lignes, de haut en bas.

Remarques :

- Dans le maillage, chaque maille est repérée par son numéro de colonne (croissant de gauche à droite), son numéro de ligne (croissant de haut en bas sur la vue en plan), et son numéro de couche (croissant de haut en bas). La maille située dans le coin supérieur gauche du maillage a donc pour coordonnées (1, 1, 1).
- À ce stade il est conseillé de sauvegarder les données introduites dans le modèle, en cliquant sur l'icône . L'explorateur Windows montre que plusieurs fichiers ont été créés dans le dossier Didactic : *Didact2.rma* (fichier projet de MARTHE), *Didact2.permh* (fichier de perméabilité), *Didact2.hsubs* (fichier de substratum), *Didact2.layer* (fichier des couches) et *Didact2.wmi* (fichier configuration de WinMarthe).
- Tous les fichiers créés et utilisés par MARTHE sont des fichiers texte pouvant être lus et modifiés avec un éditeur de texte, par exemple l'éditeur de texte accessible par l'icône  de la barre du bas. Cependant la modification d'un fichier d'entrée avec un éditeur de texte doit être réalisée avec un grand soin et est réservée aux utilisateurs avertis.
- Le fichier \*.rma (pour Répertoire Marthe) contient la liste de l'ensemble des fichiers qui constituent le modèle, liste qui s'actualise à chaque fois que l'on sauvegarde le fichier projet en cliquant sur l'icône . La Figure 6, qui en reproduit les premières lignes, mentionne donc les fichiers *Didact2.permh* et *Didact2.hsubs*. En revanche, le fichier de topographie (*Didact2.topog*) n'a pas été créé car, étant uniforme, il peut se résumer à une valeur unique. D'où sa formulation condensée « =10 » dans le fichier projet *Didact2.rma*.

```

Didacticiel 2 : Hydraulique en régime Permanent [Titre du projet]
Didact2.permh                               = Perméabilités
                                              = Débits d'eau aquifère
                                              = Charges hydrauliques
                                              = Emmagasinement Captif
                                              = Emmagasinement Libre
                                              = Zones de Géométrie
Didact2.hsubs                               = Cotes du Substratum
                                              = Zones Équipotentiellles
=10                                          = Cotes Topographiques

```

Figure 6 – Premières lignes du fichier projet *Didact2.rma*

- Les modèles générés par MARTHE sont géoréférencés, ce qui permet les échanges avec les Systèmes d'Information Géographique, utilisés aussi bien pour préparer les données d'entrée du modèle que pour valoriser les résultats de simulation.

### 3.2. DÉFINITION DES ÉPAISSEURS DES COUCHES

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 « cotes du Substratum ». Pour cela on choisit un champ (« Choix champ F3 ») sur la barre du haut, ce qui fait apparaître la boîte de dialogue de la Figure 7.

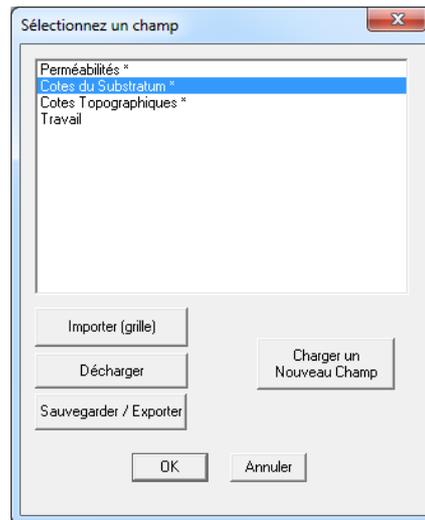


Figure 7 - Boîte de dialogue de sélection d'un champ.

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<sup>ème</sup> 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<sup>ème</sup> couche. En cliquant sur l'icône  en forme de colonnes « Visualiser en coupe verticale style modèle » de la barre de gauche, on peut vérifier en coupe que la géométrie est bien définie, Figure 8. (On retourne à la vue en plan par l'icône  = « Visualisation en plan »).

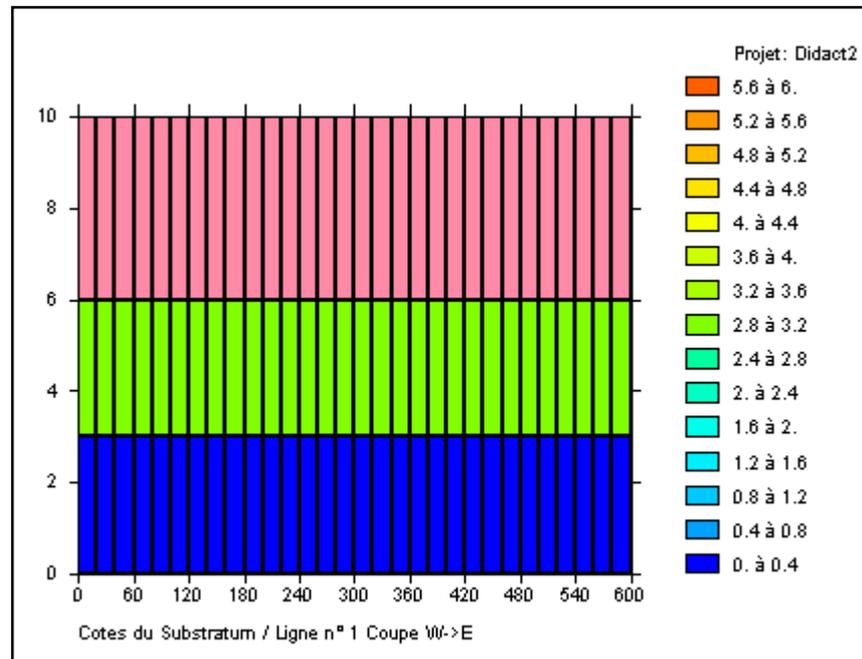


Figure 8 – Visualisation en coupe des épaisseurs.

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 « couches à surface libre », ou de « couches convertibles ». Chaque maille peut à tout moment être libre, captive ou dénoyée, selon l'état piézométrique du moment ; le statut de chaque maille est intégralement géré par les algorithmes de calcul.



## 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 l'option par défaut. Pour fixer une limite à charge imposée (dite aussi « à potentiel imposé »), il faut affecter aux mailles de cette limite un débit fictif égal à la valeur code 9999 ; la charge imposée est alors égale à la charge déclarée dans le champ « Charges » (cf. ci-après).

On procède donc comme suit :

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

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 champ F3 » → « Charger un nouveau champ », puis on désigne « Charges hydrauliques » 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 coloriées 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 commencer par affecter ce débit dans la couche n°3, et on montrera ultérieurement comment faire en sorte que ce débit se répartisse correctement dans les 3 couches.

On re-sélectionne le champ des débits (« Choix champ 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 (Colonne=25, Ligne=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 travailler avec des débits exprimés en  $10^{-4}$  m<sup>3</sup>/s (l'unité des débits sera ultérieurement fixée à  $10^{-4}$  selon la procédure décrite au chapitre 4.3.1).

#### 4.2.2. Perméabilités

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

couche n°1 (c'est-à-dire 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 d'exprimer les perméabilités en  $10^{-4}$  m/s (unité des perméabilités =  $10^{-4}$ , cf. § 4.3.1). Il est utile de noter que MARTHE offre une grande souplesse pour la définition des unités de débit, perméabilité, charge, recharge, temps, coordonnées horizontales, etc., sans qu'il soit nécessaire d'avoir un système cohérent. Par exemple, on peut exprimer les perméabilités en  $10^{-4}$  m/s, les débits en m<sup>3</sup>/h, les charges en cm, les coordonnées horizontales en km, et les 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 champ F3 » → « Charger un nouveau champ » → « Porosité = Teneur en eau à Saturation »). 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. 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, ce qui peut donner lieu à des courts-circuits entre n'importe quelles couches, et permettre par exemple à la couche n°2 ou n°3 d'affleurer).

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

#### 4.2.4. Sauvegarde du modèle

À ce stade il est conseillé de sauvegarder les données introduites dans le modèle, en activant l'icône . Il est conseillé de répéter 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/potentiels imposés (*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 d'outils inférieure. On voit alors apparaître le menu général représenté sur la Figure 9.

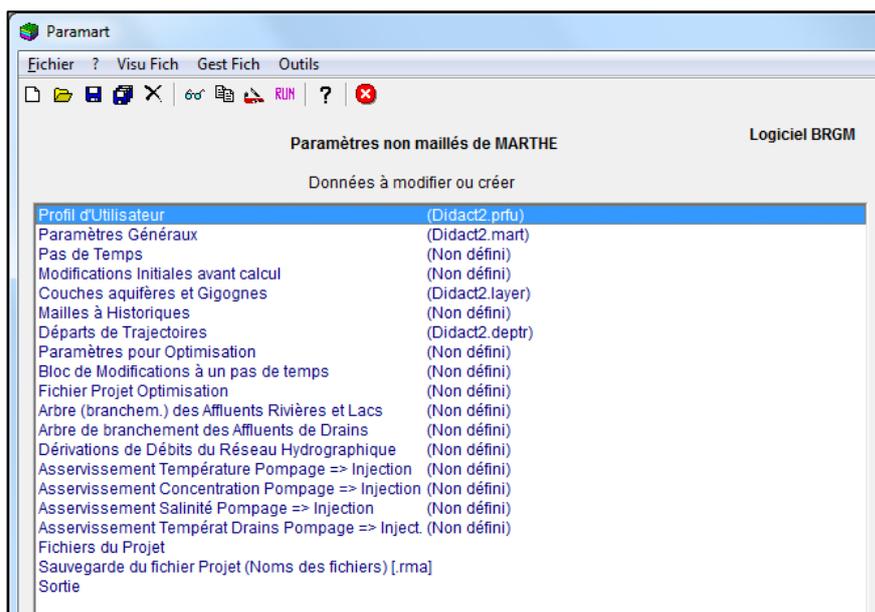


Figure 9 – Menu des paramètres non maillés.

### 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 « Profil d'utilisateur » 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 (bouton « Par » et par WinMarthe *sensu stricto*).

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. On sauvegarde alors ce fichier, en acceptant le nom par défaut proposé.

### 4.3.2. Paramètres généraux

Dans ce module des « paramètres non maillés », on double-clique sur la première ligne « Paramètres généraux », puis « Préprocesseur », puis « Créer un nouveau fichier de paramètres ». On voit apparaître 12 lignes permettant chacune de sélectionner un paragraphe de paramètres généraux (Figure 10). Si on n'avait pas défini de profil d'utilisateur, il y aurait eu 22 paragraphes, chacun comportant beaucoup plus de paramètres.

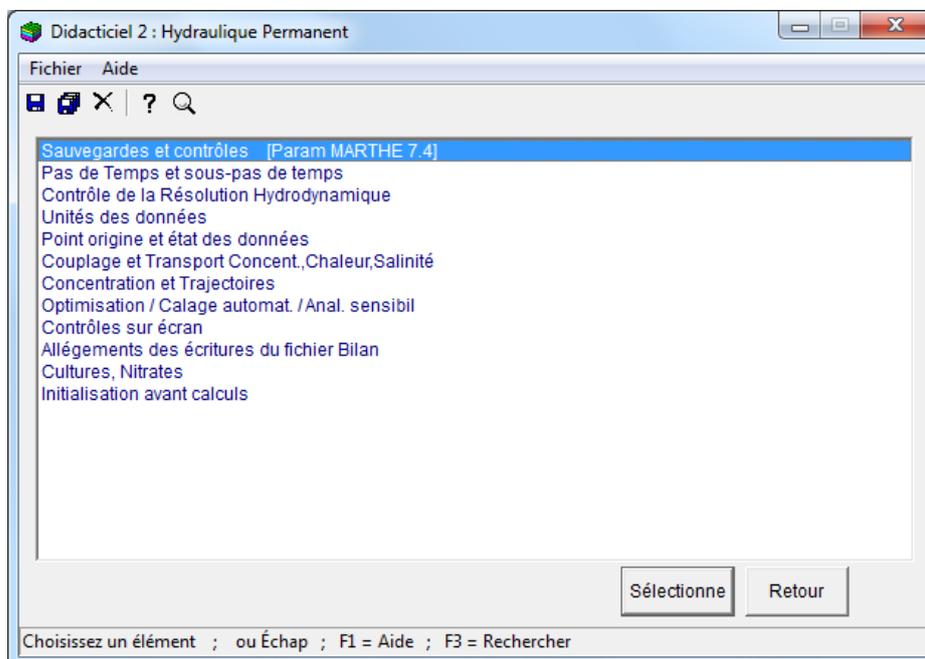


Figure 10 – Menu du fichier des paramètres généraux.

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 : « Sauvegardes et contrôles » :

Sélectionner :

<p><b>1</b> = Fichier Liste détaillé</p> <p><b>1</b> = Sauvegarde des Historiques de Bilans Hydrodynamiques.</p>
--

#### Paragraphe « Contrôle de la Résolution Hydrodynamique »

<p><b>20</b> = Nombre maxi d'itérations pour le pas de temps n°0 (Permanent Initial)</p> <p><b>Perman</b> = Régime Hydrodynamique [0=Transitoire ; 1=Permanent]</p>
---

#### Paragraphe « Unités des données »

<p><b>1e-4</b> = Unité des Perméabilités des Aquifères en m/s (ou m2)</p> <p><b>1e-4</b> = Unité des Débits en m3/s (kg/s si Gaz)</p> <p><b>Ann</b> = Unité des Durées Hydroclimatiques (sec,min,heu, jou, déca, moi, ann)</p> <p><b>Jou</b> = Unité de Temps (des Pas de modèle) (sec,min,heu, jou, déca, moi, ann)</p> <p><b>0.1</b> = Coefficient d'Anisotropie Verticale Kv/Kh des Perméabilités</p> <p><b>%</b> = Unité des Porosités = Teneurs en Eau en [-] [% si en %]</p>
--

Les unités laissées « vides » ou égales à 0 seront en Système International, à l'exception des « hauteurs hydroclimatiques (Pluie, ETP, Infiltrat., Rechar.) » qui sont par défaut en mm : charges hydrauliques et coordonnées horizontales en mètres, stocks d'eau en m<sup>3</sup>. Les hauteurs hydroclimatiques seront laissées en mm : 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 « Contrôles sur écran »

<p><b>1</b> = Contrôle des itérations Externes de résolution</p>
--

#### Paragraphe « Initialisation avant calculs » (dernière ligne de la liste des Paragraphes)

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 la sauvegarde de champs calculés au pas de temps n°0.

### **Flux d'infiltration :**

Après avoir sélectionné le paragraphe « Initialisation avant calculs », on sélectionne « Nouvelles Actions », puis on choisit le *thème* « Paramètres hydrodynamiques classiques », puis l'*objet* « FLUX\_INFILTR » (ou l'*objet* « RECHARGE »), et l'*action* « ZONE\_CLIM = Modification par zone Climatique (Sol ou Météo) ». On fixe alors (Figure 11) : Numéro de zone = 1, Valeur (de recharge) = **252.46** (mm/an).

### **Sauvegarde des champs de charges calculées et du champ des débits calculés :**

Toujours dans le *thème* « Paramètres hydrodynamiques classiques », on choisit l'*objet* « CHARGE = Charges hydrauliques », l'*action* « EDITION = Édition » et l'option « 1 = Indice d'édition en Format Texte ». Dans ce même thème « Paramètres hydrodynamiques classiques », on choisit ensuite l'*objet* « DEBIT », l'*action* « EDITION = Édition », et l'option « 1= Indice d'édition en Format Texte ».

La Figure 12 montre que la demande de sauvegarde du champ des charges hydrauliques apparaît en clair sous la forme « /CHARGE/EDITION I= 1; ». La demande de sauvegarde du champ des débits apparaît sous une forme similaire (avec cependant quelques options de plus)

On clique alors trois fois sur « Retour », puis on sauvegarde les données saisies. Celles-ci sont enregistrées dans le fichier *Didact2.mart*, appelé fichier des paramètres de Marthe. Ce fichier est une composante fondamentale d'un modèle Marthe, regroupant l'ensemble des choix faits pour les options de calcul, unités des données, sauvegardes, contrôles etc.

La Figure 12 présente la fin du fichier *Didact2.mart*, où une rubrique « Initialisation avant calculs » regroupe les informations fournies sur le flux d'infiltration et les demandes d'édition des charges et des débits.

À l'issue des calculs, les charges hydrauliques seront sauvegardées en format texte dans le fichier générique *chasim.out*, et les débits dans le fichier de nom *debsim.out*.

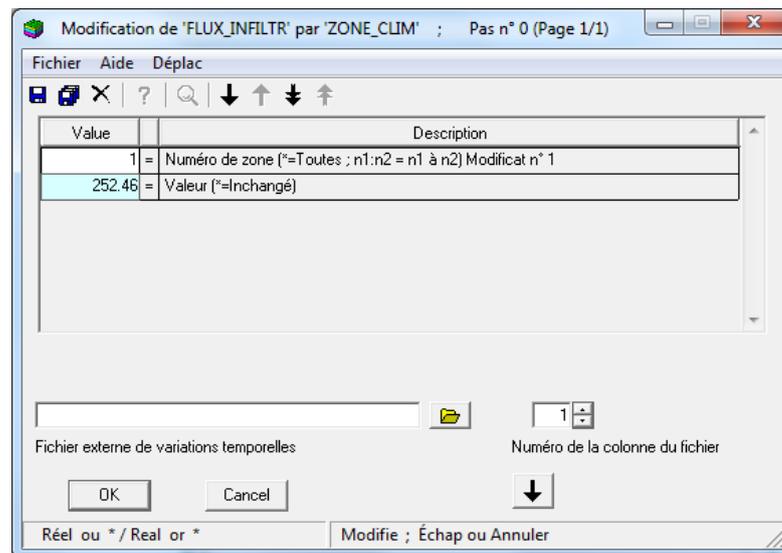


Figure 11 – Affectation d'une recharge de 252.46 mm/an dans la zone climatique n°1 (c'est-à-dire ici dans la zone de sol n°1).

```

*** Initialisation avant calculs ***
/FLUX_INFILTR/ZONE_CLIM Z= 1V= 252.46;
/CHARGE/EDITION I= 1;
/DEBIT/EDITION *= 1;V= 0;L= 0;S= 0;Z= 0;
/***** Fin d'Initialisation
*** Fin du fichier des Paramètres Généraux ***

```

Figure 12 – Dernières lignes du fichier des paramètres Didact2.mart

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. En effet, il y a 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. Avec de gros maillages et de nombreux pas de temps, une sauvegarde générale de tous les champs calculés occuperait un espace disque très important, et la plupart du temps inutile. C'est donc à l'utilisateur de choisir les champs qu'il souhaite éditer, en indiquant à quels pas de temps il souhaite le faire.



## 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 d'outils inférieure, puis de valider le lancement des calculs avec le fichier *Didact2.rma*. Le calcul s'effectue en une fraction de seconde.

### 5.1. VÉRIFICATION PRÉLIMINAIRE DES BILANS HYDRAULIQUES

En premier lieu, avant un quelconque examen des charges hydrauliques et 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* », pour **bilan** (des) **déb**(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 débits d'entrée et de sortie 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 entre entrées et sorties dans chaque maille, est égale à  $4.7 \cdot 10^{-5} \%$ . Cette convergence est parfaite, puisqu'en pratique il est généralement suffisant d'avoir une convergence interne de l'ordre de 1 %.

La Figure 13 montre le bilan global des débits dans les 3 couches, exprimé en  $10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  qui est l'unité choisie pour les débits. La Figure 14 présente les échanges entre couches. Par exemple : la couche n°1 reçoit une recharge de 28.8 unités de débits dont 26.3 passent dans la couche n°2. La couche n°2 reçoit 26.3 unités de débit (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. =          21.290
Débits Sortant /Charges Impos. =                               -38.089
Débits Entrant dans les Mailles=    1.115E-05
Débits Sortant des Mailles         =                               -12.000 (-12.000 Imposé)
Débit d'Infiltration/Évaporat. =          28.800
-----
                               Bilan Global =    1.229E-06

```

Figure 13 – Bilan global des 3 couches.

Débits échangés entre les 3 couches					
Contribution des couches					
Num	(> 0 si la couche exporte ; < 0 si elle reçoit)				
Couche	1	2	3	Recharg	Total
1	*	-26.28	0	28.8	2.5237
2	26.276	*	-19.06	0	7.2201
3	0	19.056	*	0	19.056

Figure 14 – 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 renvoyé à WinMarthe.

### 5.2.1. Charges hydrauliques calculées en régime permanent

On active le menu « Fichier » → « Fichier de champs simulés (Ouvrir) », ou plus simplement on frappe Control+R (« R » comme Résultats), et on choisit le fichier de nom *chasim.out*. Le champ des charges calculées, le seul qui avait été demandé avec celui des débits, est alors copié dans le champ « Travail » et apparaît à l'écran, pour la couche courante (Figure 15).

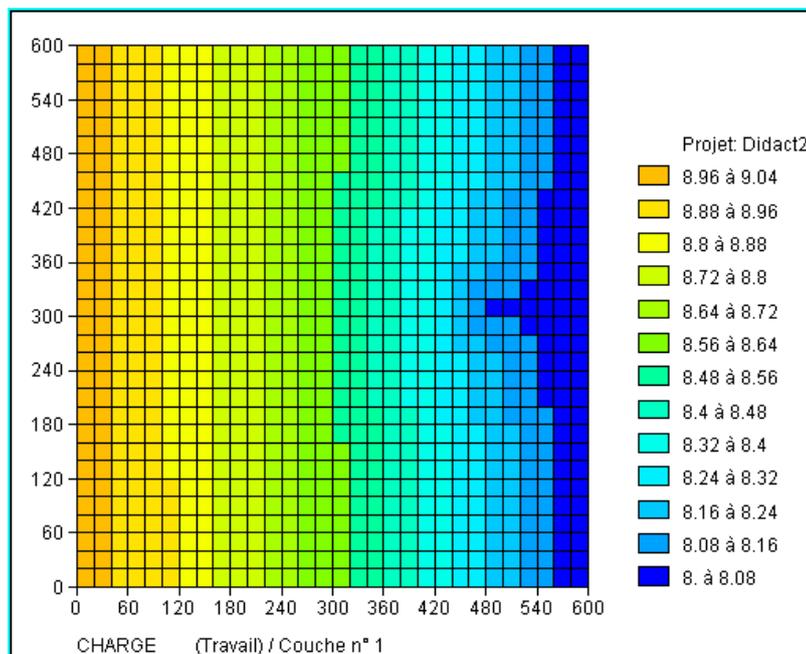


Figure 15 – Champ des charges hydrauliques calculées (couche n°1)

Il est possible de faire défiler les couches avec les flèches (, ... ) d'examiner une coupe verticale, de changer la répartition des plages colorées (équi-réparties = Control+Q, ou Linéaires = Control+L, ou logarithme = Control+T), de masquer les contours de mailles (Vue > Dessin des contours de mailles), de superposer des polygones « d'habillage », de placer des points d'identification (forages, etc.), ...

### 5.2.2. Isovaleurs des charges calculées

Pour tracer les isovaleurs, il faut utiliser le menu « Outils » → « Isovaleurs » → « Simples », ou directement frapper Control+I (« I » comme Isovaleurs), et on peut accepter ou modifier les valeurs par défaut. (Figure 16).

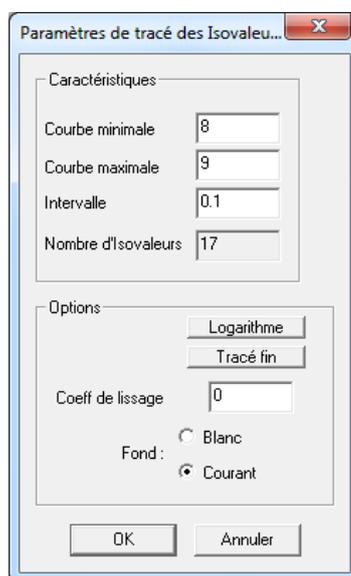


Figure 16 – Boîte de dialogue pour le calcul des isovaleurs.

On obtient alors un tracé des courbes isopièzes (Figure 17), dont on peut adapter les couleurs, épaisseurs et visibilité dans le menu « Gestion des polygones » (icône ).

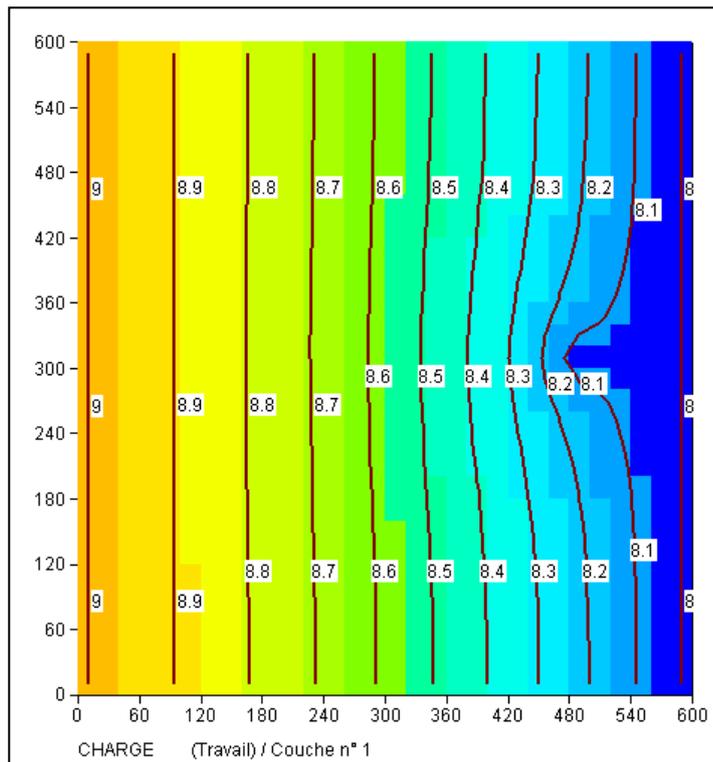


Figure 17 – Isovaleurs des charges hydrauliques calculées (couche n°1).

### 5.3. TRAJECTOIRES

Pour enrichir cette carte, on peut tracer quelques trajectoires d'écoulement, notamment celles qui arrivent au puits de pompage. Cette opération se déroule en quatre étapes : 1) sélection de l'option de calcul de trajectoires inverses (arrivant au puits de pompage), 2) désignation de la maille du puits de pompage comme origine des trajectoires inverses, 3) relance des calculs avec sauvegarde du tracé des trajectoires, 4) dessin des trajectoires en superposition à la carte piézométrique.

#### 5.3.1. Option de calcul de trajectoires

Clic sur l'icône  pour ouvrir le menu des paramètres non maillés, double-clic sur la première ligne « Paramètres généraux », clic sur « Préprocesseur », puis sélection du Paragraphe « Concentration et Trajectoires ». Sélection de l'option « Trajectoires inverses »

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

Clic sur « Retour » et sauvegarde des paramètres modifiés.

### 5.3.2. Départs de trajectoires

On sélectionne ensuite la ligne « Départs de trajectoires », puis on clique sur « Préprocesseur » et « Créer un nouveau fichier Départs de trajectoires ».

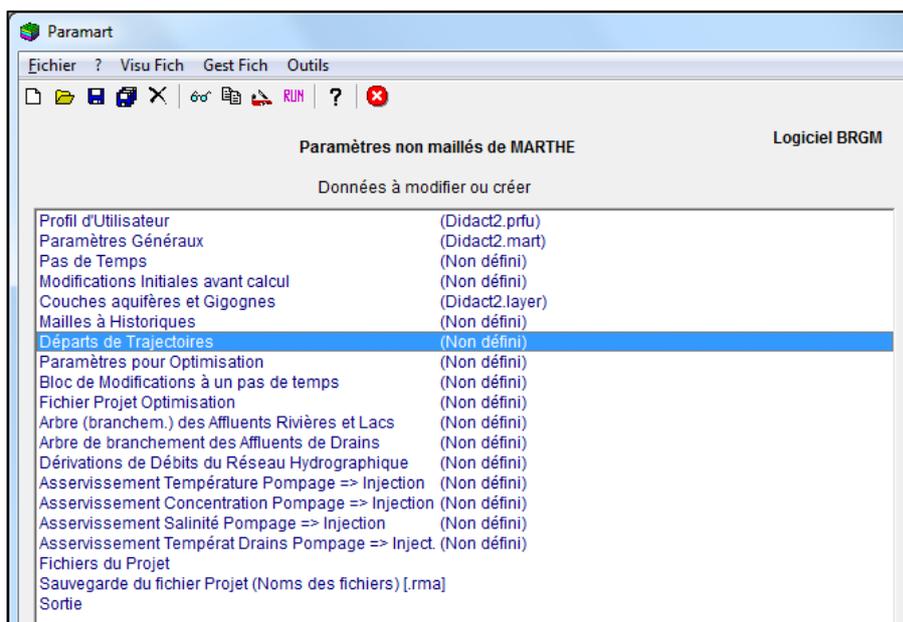


Figure 18 – Sélection du fichier des départs de trajectoires

On positionne les départs de trajectoires 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, avec 28 points de départs répartis sur chaque cercle. On coche la colonne « Maille » (Figure 19) 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, facultatif, sert à regrouper les trajectoires par lots (ici, un groupe de trajectoires par couche de modèle)

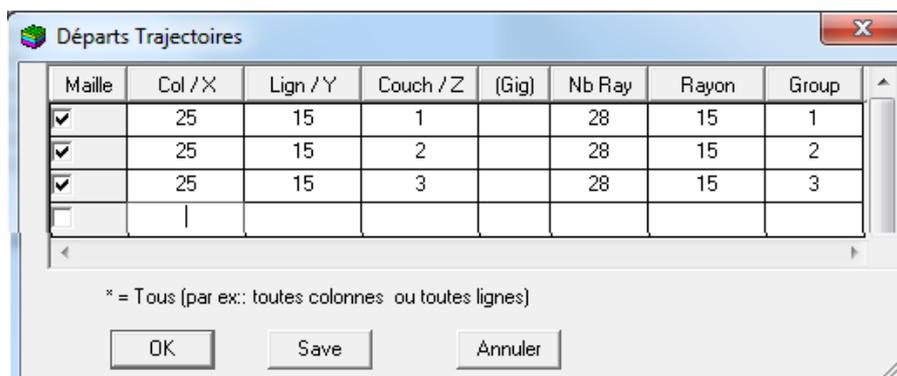


Figure 19 – Définition des départs de trajectoires.

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*.

### 5.3.3. Calcul des trajectoires

On relance les calculs avec l'icône .

### 5.3.4. Tracé des trajectoires

Les trajectoires sont éditées dans deux fichiers : le fichier *trajmar.out* (coordonnées, numéro de couche et temps) et le fichier *trajmar.blm* ; ce dernier est un fichier de points (x,y) qui peut être visualisé directement par WinMarthe, comme un polygone.

Pour tracer 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 20).

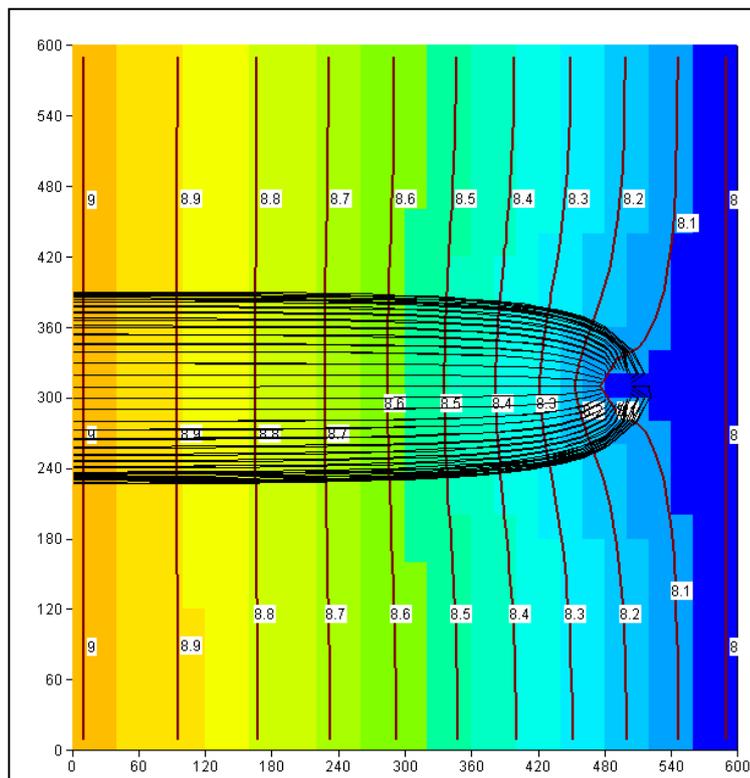


Figure 20 – Trajectoires (régime permanent).

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 faut 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 unique pas de temps de 100 jours. Les trajectoires sont alors calculées en régime transitoire, jusqu'à la date de fin de simulation. On peut également dessiner les isochrones (Figure 21), qui correspondent ici aux 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).

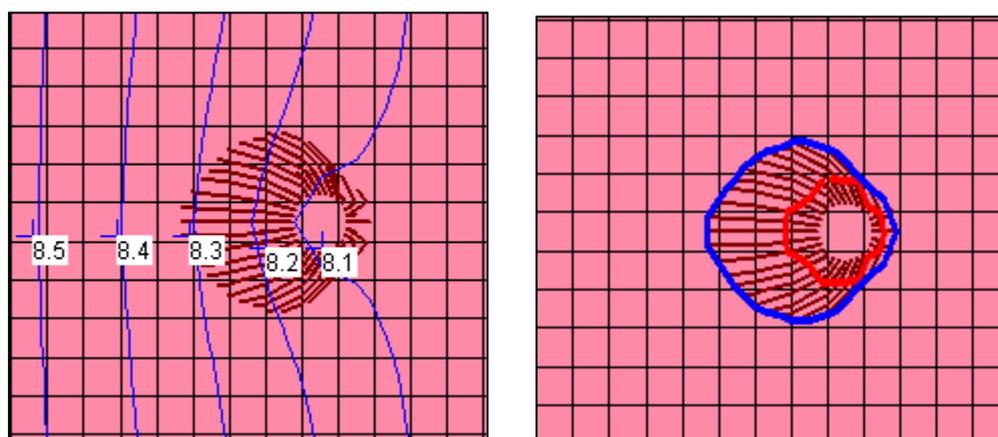


Figure 21 – Trajectoires pendant une durée de 100 jours.

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

#### 5.4. ANISOTROPIE VERTICALE DE PERMÉABILITÉ DANS LE Puits DE POMPAGE

Le puits de pompage est crépiné dans les 3 couches. Pour le simuler précisément on veut avoir la même charge hydraulique (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.

Clic sur l'icône  pour ouvrir le menu des paramètres non maillés, double-clic sur « Paramètres généraux », « Préprocesseur », « Initialisation avant calculs », « Nouvelles Actions ». On se place dans le thème « Paramètres Hydrodynamiques classiques ». Il y a environ 40 objets, et on ne voit a priori pas d'« Anisotropie

verticale ». On clique alors sur l'icône d'« Aide »  ou bien sur la touche « F3 », ce qui provoque l'ouverture de la fenêtre présentée à la Figure 22. On recherche alors la chaîne de caractères « Anisotropie verticale », sans tenir compte des éventuels accents ou majuscules. On appuie sur « Chercher ». On ne trouve aucune réponse (« non trouvé »). Quand on ne trouve pas de réponse on peut appuyer deux fois sur la

touche « Échap » puis sélectionner le thème « Tous les paramètres » ou même « Tous les paramètres : même hors profil utilisateur » ce qui fait apparaître tous les objets (il y en a plus de 200).

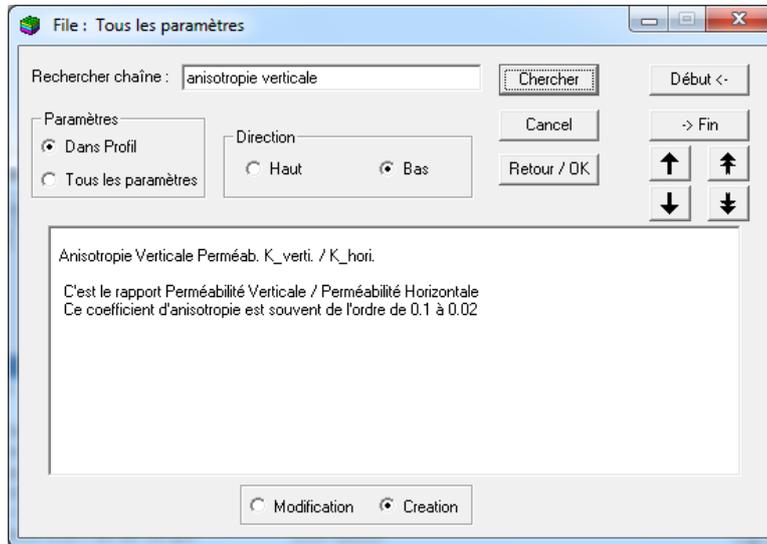


Figure 22 – Recherche de l'objet « Anisotropie verticale ».

On appuie alors à nouveau sur l'icône  pour rechercher « Anisotropie », puis sur « Chercher », et on trouve immédiatement la réponse « Anisotropie Horizontale de Perméabilité  $K_x / K_y$  ». L'icône  permet d'accéder à la rubrique suivante « Anisotropie verticale  $K_{vertic.} / K_{horizont.}$  ».

On appuie donc sur le bouton « Retour / OK » et on arrive sur l'objet « ANISO\_VERTI = Anisotropie verticale ... ». On sélectionne cet objet, puis on choisit l'action « MAILLE = Modifications par mailles ». Dans la fenêtre de la Figure 23, on donne alors le numéro de colonne = 25, le numéro de ligne = 15, et le numéro de couche = 1:3 pour « 1 à 3 », ou bien « \* » pour « toutes », et on fixe la valeur 500.

Cette modification apparaît en clair sous la forme à la fin du fichier *Didact2.mart* :

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

(« C= » désigne la Colonne, « L= » désigne la Ligne, « P= » désigne le Plan, c'est-à-dire la couche, « V= » désigne la Valeur affectée)

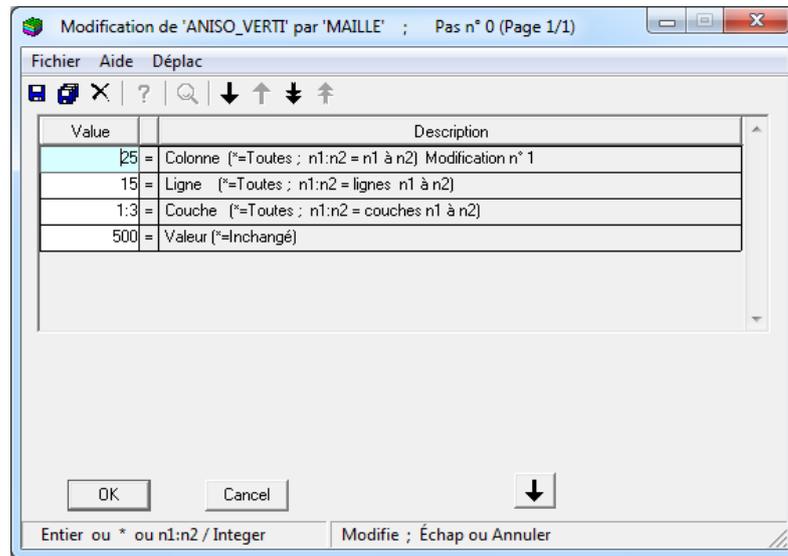


Figure 23 – Affectation d'une anisotropie verticale égale à 500 dans les 3 couches de la maille de pompage.

On relance les calculs avec l'icône .

L'examen des résultats montre que dans cet exemple les résultats sont quasiment inchangés. Dans le puits les charges hydrauliques sont maintenant quasiment identiques dans les trois couches alors qu'elles présentaient une différence d'une dizaine de centimètres.



## 6. Calcul des charges en régime transitoire

À titre d'exemple on va réaliser une simulation hydrodynamique en régime transitoire.

On doit définir des paramètres supplémentaires nécessaires pour réaliser un calcul d'hydrodynamique en régime transitoire. Par sécurité, on va conserver le projet *Didact2.rma* inchangé, et en réaliser automatiquement une copie sous le nom *Didact2\_Transi* qui sera le nouveau projet en régime transitoire. Pour faire cette opération, on utilise le menu « Fichier » → « Faire une copie du projet », et on choisit le nom *Didact2\_Transi*. On ferme alors le projet *Didact2.rma* et on ouvre le projet *Didact2\_Transi.rma*.

Au puits de pompage existant on va adjoindre deux autres puits de pompage situés dans la couche n°3 respectivement aux coordonnées  $x = 450$  m,  $y = 370$  m et  $x = 450$  m,  $y = 250$  m (c'est-à-dire respectivement dans la maille de colonne = 23, ligne = 12 et dans la maille de colonne = 23, ligne = 18). On considère que ces deux nouveaux puits sont crépinés uniquement dans la couche n°3. Dans chacun de ces trois puits on va pomper un débit égal à  $-130$  (en  $10^{-4}$  m<sup>3</sup>/s).

La simulation va commencer par un régime permanent sans aucun pompage, puis on introduira ces débits de pompage au pas de temps n°1. Le pompage sera poursuivi pendant 500 jours, puis les débits de pompage seront mis à zéro et la simulation sera poursuivie pendant 500 jours supplémentaires.

Il y a deux nouveaux champs à définir :

- Le coefficient d'emmagasinement en nappe libre.
- Le coefficient d'emmagasinement en nappe captive.

Par le menu « Choix\_Champ (F3) » → « Charger un nouveau champ » : on charge le champ des coefficients d'« emmagasinement libre », on sélectionne alors les mailles de tout de domaine, et on leur affecte la valeur 25 (en % puisqu'on définira l'unité des coefficients d'emmagasinement libres en %). On charge alors le champ des coefficients d'« emmagasinement captif », et on affecte la valeur  $1e-5$  (en m<sup>-1</sup>) aux mailles de tout le domaine.

### 6.1. DÉFINITION DES PARAMÈTRES NON MAILLÉS

On actionne l'icône  pour faire apparaître le menu général des « paramètres non maillés ».

#### 6.1.1. Paramètres généraux

On double-clique sur la première ligne « Paramètres généraux », puis « Préprocesseur ». On apporte alors, comme illustré ci-dessous, quelques

modifications, puis des ajouts dans les paragraphes « Contrôle de la Résolution Hydrodynamique » et « Unités des données »

**Paragraphe « Contrôle de la Résolution Hydrodynamique »**

20 = Nombre Maxi d'itérati. par pas de temps de calcul suivant le pas n°0  
 20 = Nombre maxi d'itérations pour le pas de temps n°0 (Permanent Init.)  
**Transit** = Régime de l'Hydrodynamique [0=Transitoire ; 1=Permanent]

**Paragraphe « Unités des données »**

0 = Unité des coefficients d'Emmagasinelements Captifs en [-] ou [m-1]  
 % = Unité des coefficients d'Emmagasinelements Libres en [-] ['%' si en %]  
 Jou = Unité de Temps (des Pas de modèle) (sec, min, heu, jou, déca, moi, ann)  
**Spécif** = Emmagasin. Captifs lus (0=Hydrogéol. ; 1=Spécifiques ; 2=Compressib.)

**6.1.2. Mailles à historiques**

On va définir les emplacements dans lesquels 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 ». On clique alors sur « Préprocesseur » puis « Créer un nouveau fichier des Historiques ».

On voit apparaître une liste des champs, correspondant au profil utilisateur, pour lesquels on peut demander un historique dans certains points du domaine. On choisit le champ « Charges hydrauliques ». On clique alors sur « Ajout » pour ajouter des points pour ce champ. On va sélectionner les trois mailles de la couche n°1 situées à l'aplomb des pompes.

On choisit « Centre d'une maille définie par Colonne, Ligne, Couche ». On introduit alors les coordonnées du premier point pour lequel on souhaite mémoriser l'évolution des charges hydrauliques : Colonne = 25, Ligne = 15, Couche = 1, puis Colonne = 23, Ligne = 12, Couche = 1, et enfin Colonne = 23, Ligne = 18, Couche = 1.

**6.1.3. Définition des pas de temps**

Pour simuler les deux périodes de 500 jours, on va faire intervenir 36 pas de temps de modèle dont les dates de fin de pas de temps, exprimées en jours, sont données dans le Tableau 2 (les temps croissent de gauche à droite, et de ligne en ligne).

0.1	0.2	0.5	1	2	5	10	20	50	100	150	200	250
300	350	400	450	500								

500.1	500.2	500.5	501	502	505	510	520	550	600	650	700	750
800	850	900	950	1000								

Tableau 2 – Dates des 36 pas de temps de la simulation de l'hydrodynamique en régime transitoire.

Dans le menu général des « paramètres non maillés », on double-clique sur la ligne « Pas de temps ». On clique alors sur « Préprocesseur » 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 fictive 1 (jour) comme « Durée des pas de temps s'ils sont constants ». On demande la création automatique de 36 pas de temps.

On clique alors sur « Définition des dates de tous les pas de temps » puis « Définition par tableur intégré ». On définit alors les dates des pas de temps n°1 à 36 en leur donnant les valeurs du Tableau 2.

### **Pas de temps numéro zéro**

On est par défaut dans le pas de temps numéro zéro, qui correspond au régime permanent.

- On annule le débit de pompage (qui avait initialement été fixé à -12). On clique donc sur « Nouvelles Actions » puis → « Paramètres hydrodynamiques classiques » → « DEBIT » → « MAILLE » et dans la maille du puits, de colonne = 25, Ligne = 15, Couche = 3, on met la valeur **0**.
- On demande la sauvegarde du champ des charges calculées. On clique sur → « Paramètres hydrodynamiques classiques » → « CHARGE » → « EDITION », et on donne la valeur « 1 » pour avoir une sauvegarde. On clique alors sur « Retour ».

### **Pas de temps numéro 1 (date = 0.1 jour)**

C'est le début du régime transitoire. On va introduire les trois débits de pompage égaux à  $-130 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ .

On demande la consultation du pas de temps n°1 :

- Choix d'un pas de temps → *Numéro 1*.
- « Nouvelles Actions » puis → « Paramètres hydrodynamiques classiques » → « DEBIT » → « MAILLE » et dans la maille de colonne = 25, ligne = 15, couche = 3 : on met la valeur -130. On fait la même opération dans les mailles colonne = 23, ligne = 12, couche = 3, puis dans la maille de colonne = 23, ligne = 18, couche = 3.

### **Pas de temps numéro 18 (date = 500 jours)**

On demande la sauvegarde des champs de « CHARGE », « %SATURAT » et « EPAISSEUR\_EAU »

### **Pas de temps numéro 19 (date = 500.1 jours)**

On arrête le pompage, pour observer la remontée. On introduit donc un « DEBIT » égal à 0 dans les 3 mailles correspondant aux pompages (dans lesquelles on avait introduit un débit de -130).

### **Pas de temps numéro 36 (date = 1000 jours)**

On demande la sauvegarde du champ des charges calculées.

## **6.2. LANCEMENT DES CALCULS**

Les calculs se réalisent en quelques instants. L'examen du fichier « *histobil\_debit.prn* » (historique du bilan des débits), avec Excel ou son équivalent, montre que la convergence est très bonne : le taux de non convergence interne est toujours inférieur à  $10^{-4}$  %, sauf au début de la remontée où il atteint 4 %. Ceci est dû au choc résultant de l'arrêt brutal des pompages et aux fortes variations de charges qui en résultent. On voit également dans ce fichier qu'en fin de pompage il y a 56 mailles dé-saturées.

On introduit donc un coefficient de sous-relaxation égal à 0.3, et on augmente parallèlement les nombres maximum d'itérations.

### **Paragraphe « Contrôle de la Résolution Hydrodynamique »**

<pre>90 = Nombre Maxi d'itérations par pas de temps de calcul suivant le pas n°0 50 = Nombre maxi d'itérations pour le pas de temps n°0 (Permanent Initial) 0.3 = Coefficient de sous-Relaxation des calculs [Déf=1]</pre>
--

Après avoir relancé les calculs, l'examen du fichier « *histobil\_debit.prn* » montre que la convergence est très bonne : le taux de non convergence interne est toujours inférieur à  $10^{-3}$  %, sauf au début de la remontée où il atteint 0.3 % (pendant une très courte durée).

## **6.3. RESULTATS OBTENUS**

La Figure 24 montre le champ des charges hydrauliques simulées dans la couche n°3 après le régime permanent initial et après 500 jours de pompage. Après 500 jours de pompage (Figure 25) on remarque que :

- Dans la couche n°1 : une large zone du domaine est dénoyée
- Dans la couche n°2 : la maille du pompage central est dénoyée

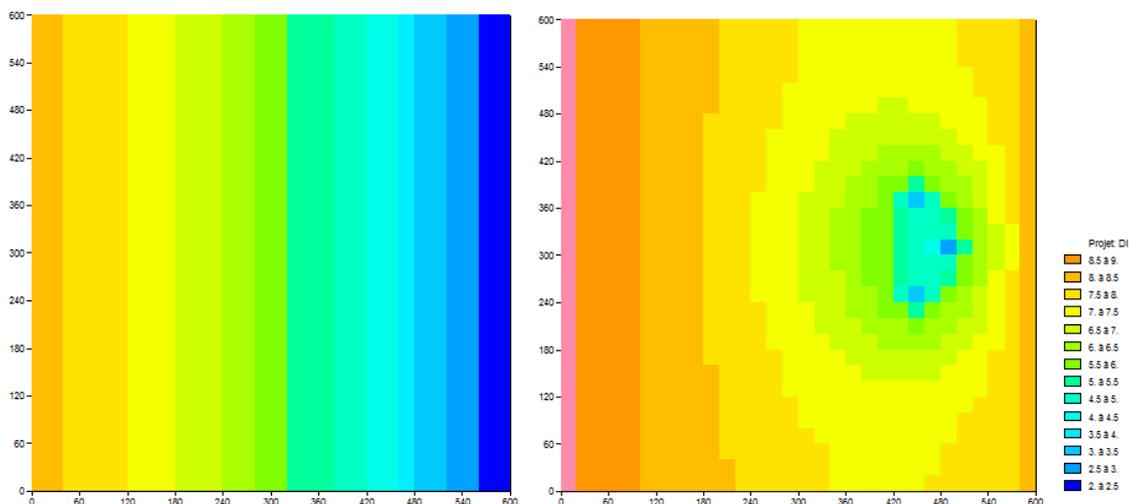


Figure 24 – Charges hydrauliques dans la couche n°3. À gauche : sans pompage, après le régime permanent. À droite : après 500 jours de pompage.

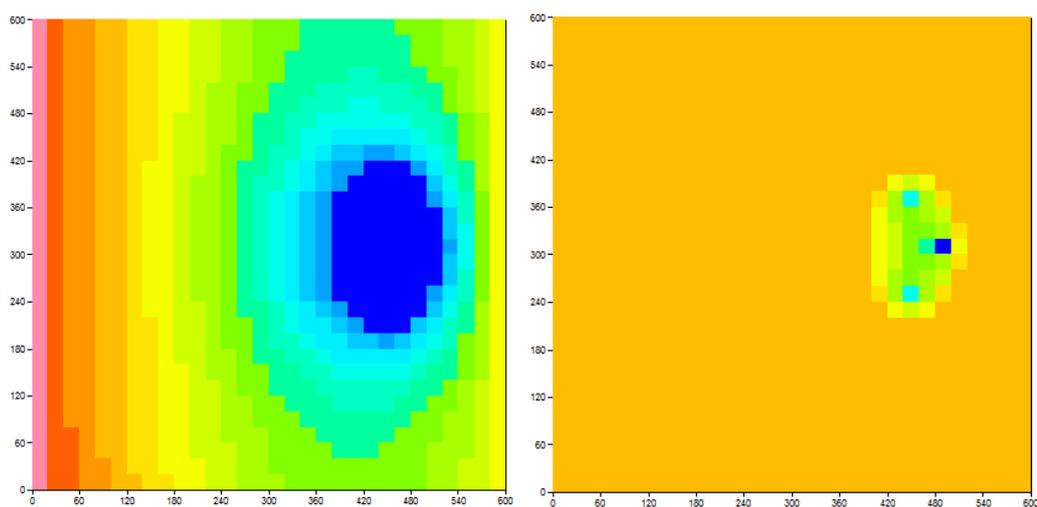


Figure 25 – Pourcentage de saturation en eau après 500 jours de pompage. À gauche : dans la couche n°1 ; à droite : dans la couche n°2. La couleur bleu foncé indique les mailles dénoyées.

La Figure 26 réalisée à partir du fichier « histobil\_debit.prn » montre l'évolution du débit de déstockage dans la nappe. Ce débit devient quasi nul après 250 jours, date à laquelle un régime permanent est quasi atteint.

La Figure 27 réalisée à partir du fichier « historiq.prn » montre l'évolution des charges hydrauliques dans la couche n°1 à l'aplomb du puits central et d'un des deux puits voisins : il apparaît que les évolutions sont régulières malgré des dénoyages de la couche n°1 et de la couche n°2 pour le puits central. On a vu que la convergence des débits était très bonne, avec le schéma « Pseudo-Non-Saturé » utilisé par défaut.

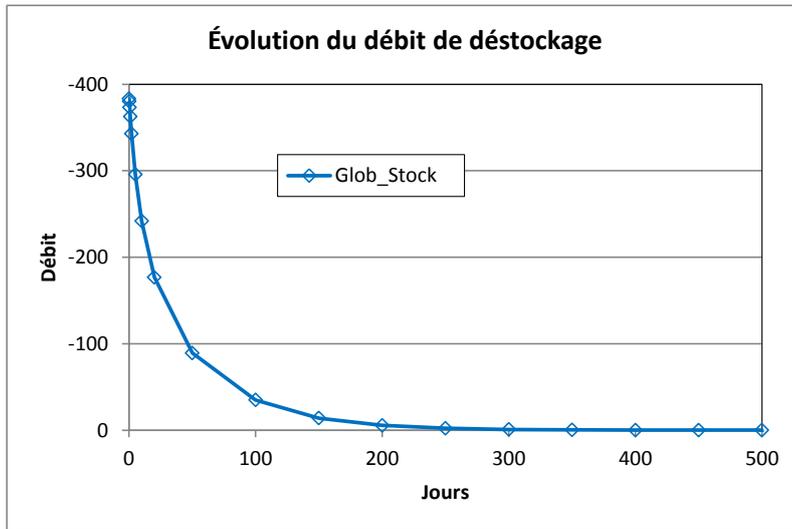


Figure 26 – Évolution du débit de déstockage de la nappe.

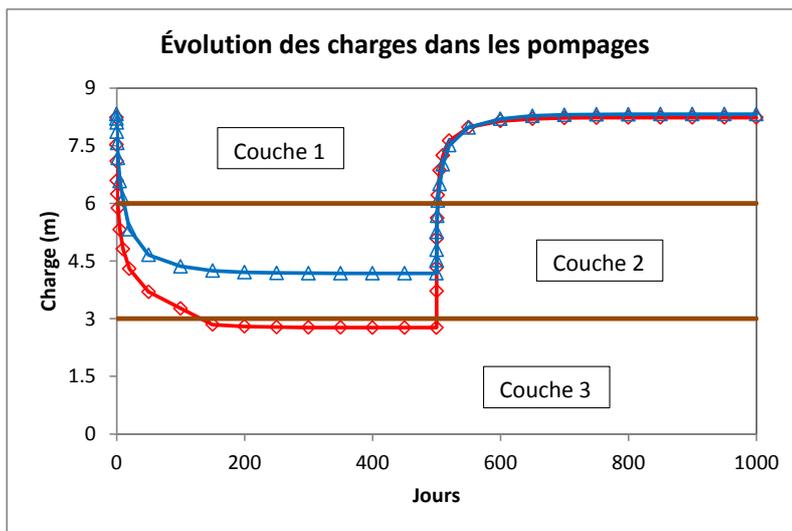


Figure 27 – Évolution des charges hydrauliques dans la couche n°1 à l'aplomb du puits central (en rouge) et d'un des deux puits voisins.

## 7. 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 transfert de masse avec le code MARTHE est décrite par Thiéry (1995a).

On va repartir de l'exemple de calcul d'hydrodynamique en régime permanent : projet *Didact2.rma*. On ferme donc le projet courant et on ouvre le projet *Didact2.rma* qui avait été sauvegardé.

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.

Tous les fichiers du projet *Didact2.rma* sont copiés, dans l'état, sous le nom *Didact3*. En revanche les éventuels fichiers inclus, par exemple dans un fichier de pas de temps [.pastp], ne sont pas copiés.

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 ou vers un autre ordinateur.

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

### 7.1. DÉFINITION DES PARAMÈTRES NON MAILLÉS

On actionne l'icône  pour faire apparaître le menu général des paramètres non maillés.

#### 7.1.1. Paramètres généraux

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

**Paragraphe « Pas de temps et sous-pas de temps »**

<b>12</b> = Nombre de sous-pas de temps de modèle	[Défaut=1]
---	------------

(Pour simplifier, on va créer ultérieurement 3 pas de temps de modèle de durée 12 mois, subdivisés chacun en 12 sous-pas de temps d'une durée d'un mois).

**Paragraphe « Unités des données »**

<b>Moi</b> = Unité de Temps (des Pas de modèle) (sec,min,heu, jou, déca, moi, ann)
<b>mug/m3</b> = Unité des Concentrations en kg/m3
<b>mug</b> = Unité des Masses en kg

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

**Paragraphe « Couplage et Transport »**

<b>TVD</b> = Schéma de Transport [0=Diff_Finies ; 1=Random_W ; 2=Caract=MOC ; 3=TVD]
<b>10</b> = Dispersivité Longitudinale (m) [* = Spatialisée]
<b>1</b> = Dispersivité Transversale (m) [* = Spatialisée]

On utilise la méthode de transport TVD, qui est très performante. On conserve le nombre maximal d'itérations par défaut qui est égal à 20.

**Paragraphe « Concentration et Trajectoires »**

<b>1</b> = Calcul de Concentration
<b>Transit</b> = Régime du Transport de Concentration [0=Transitoire ; 1=Permanent]
<b>2</b> = Coefficient de Retard (sauf si calcul en ZNS) [Déf=1]

Par défaut le transport est en régime transitoire, mais il est plus lisible de le préciser.

On clique sur « retour » 2 fois de suite et on sauvegarde les modifications de paramètres généraux.

**7.1.2. Définition des pas de temps**

On veut définir 36 pas de temps de modèle sous forme de 3 'pas de temps de modèle' de 12 mois (chacun étant subdivisé en 12 sous-pas de temps égaux). Un 'pas de temps de modèle', contrairement à un 'pas de temps interne de calcul', est un pas de temps lors duquel on peut introduire des actions : modification de débits de pompage par exemple, ou sauvegarde de résultats de calcul.

Dans le menu général des paramètres non maillés, on double-clique sur la ligne « Pas de temps ». On clique alors sur « Préprocesseur » 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 demande la création automatique de 3 pas de temps, et on donne la valeur 12 (mois) comme « Durée des pas de temps s'ils sont constants ».

On demande alors la consultation du pas de temps n°1 pour introduire le flux massique dans la zone contaminée : on sélectionne « => Choix d'un pas de temps » et on incrémente à 1 le « numéro du pas de temps à consulter » On choisit alors « Nouvelles Actions » (Figure 28), puis → *Thème* « Transport, Densité, Trajectoires ».

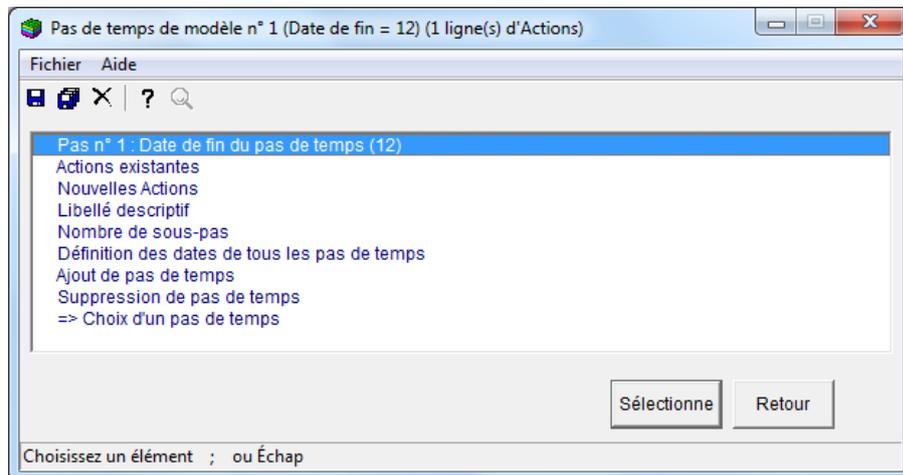


Figure 28 – Création d'une « Action » ou « Modification » au pas de temps n°1.

Puis l'objet « QMASS\_CONC = Débit Massique Concentration » (Figure 29) → « Modifications par Mailles ». On fixe alors la valeur  $1.0519 \cdot 10^5$  ( $\mu\text{g}/\text{mois}$  par maille de  $400 \text{ m}^2$ ) dans le pavé « Colonnes 5 à 11, Lignes 12 à 18, Couche 1 » (Figure 30) et on clique OK. Cette modification sera prise en compte à partir du début du premier sous-pas de temps de ce pas de temps de modèle n°1.

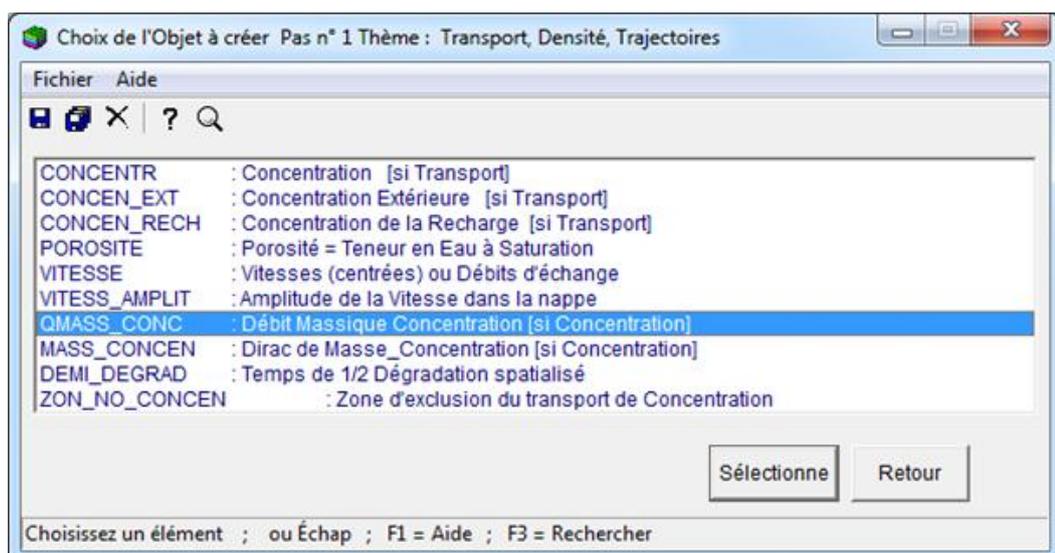


Figure 29 – Sélection de l'objet 'Débit Massique Concentration' au pas de temps n°1.

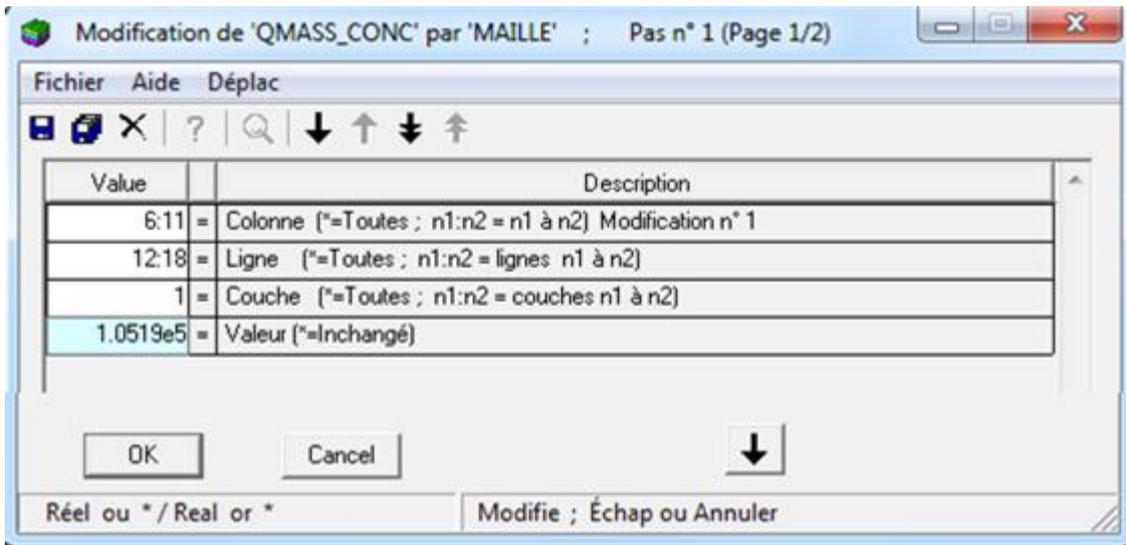


Figure 30 – Définition de la valeur du Débit Massique Concentration au pas de temps n°1.

On va également demander la sauvegarde 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 de nom générique *chasim.out*. On clique à nouveau sur le thème « Transport ... », on choisit alors l'objet « CONCENTR = Concentration », puis on choisit l'action « EDITION » 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 de sauvegarde 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 dans le menu qui apparaît (Figure 31), on choisit l'option « => Choix d'un pas de temps ».

On choisit le pas de temps n°2 et on introduit alors la même demande de sauvegarde 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*.

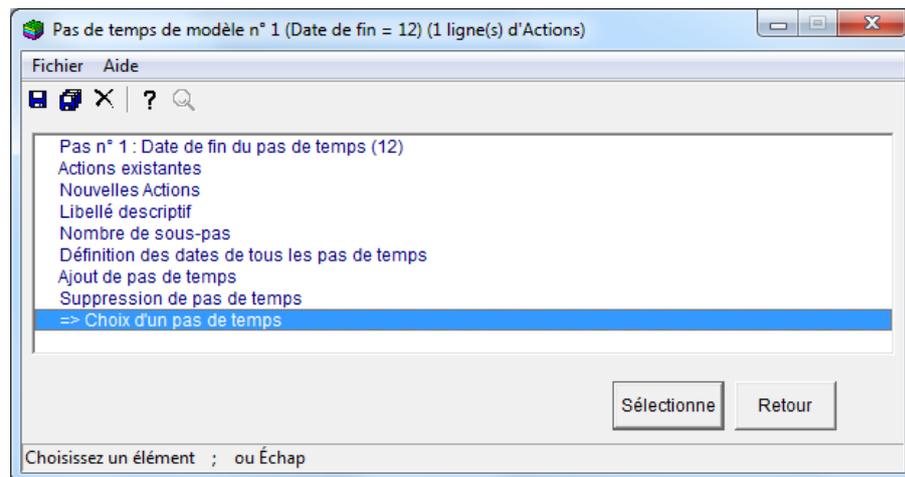


Figure 31 – Changement de pas de temps.

### 7.1.3. Définition des 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 32). On clique alors sur « Préprocesseur » puis « Créer un nouveau fichier des Historiques ».

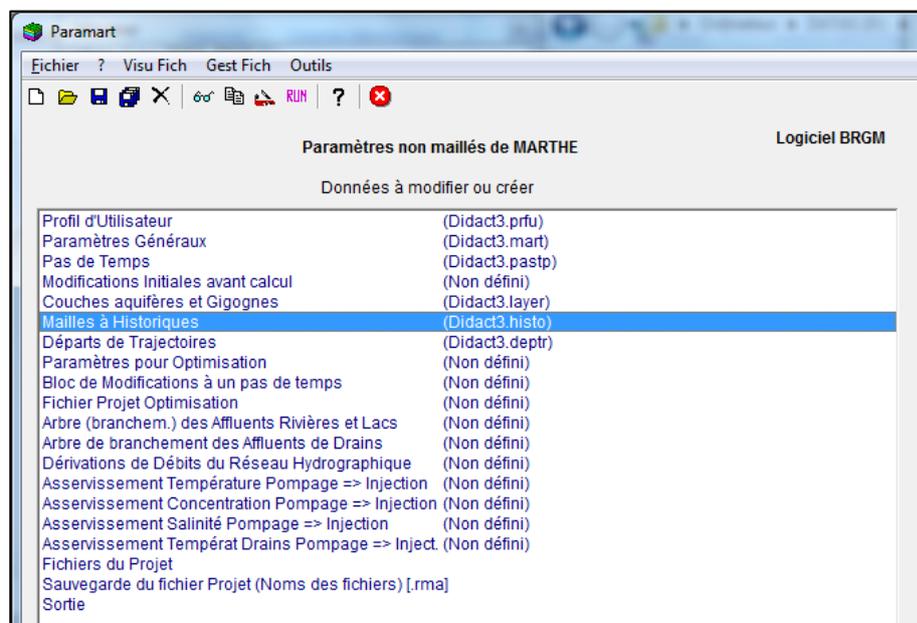


Figure 32 – Définition des mailles à historiques.

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

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 33).

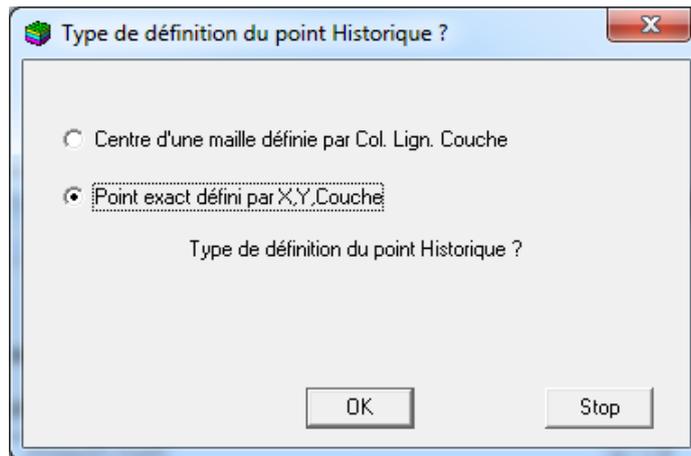


Figure 33 – Type de définition d'un historique.

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 34).

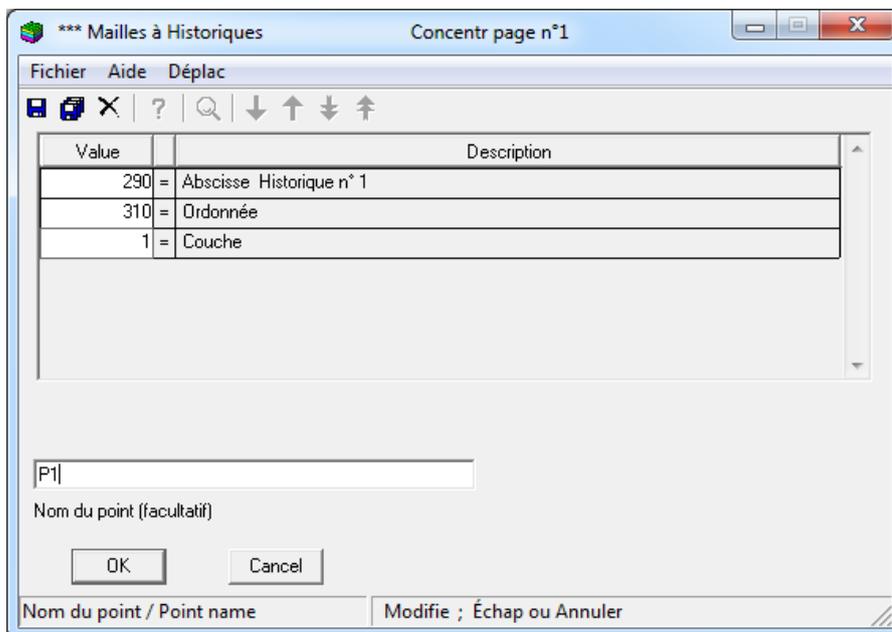


Figure 34 – Définition des coordonnées d'un emplacement d'historique.

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 35).

/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 35 – Fichier des «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*.



## 8. 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.

### 8.1. 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 débit d'entrée – débit de sortie est équilibré à moins de 1/1000 de pourcent (Figure 36). On voit aussi que le régime permanent est loin d'être atteint, car au dernier pas de temps seule 0.5 % de la masse provenant de la zone contaminée ( $4.4181E+06$ ) est captée par le puits ( $-2.5538E+04$ ).

===== Pas de temps n° 36 - t= 36.000		
----- Cumul des masses 'Concentration'	Dans le pas	Depuis début simul.
Sortant par les Limites	= -6.362	-19.70
Entrant dans les mailles Internes	= $4.4181E+06$	$1.5905E+08$
Sortant par les mailles Internes	= $-2.5538E+04$	$-1.1482E+05$
Stockage	= $4.3927E+06$	$1.5894E+08$
[Stockage Positif (Entrant)]	= $4.3927E+06$	$1.5894E+08$
[Stockage Négatif (Sortant)]	= $-3.1091E-10$	$-2.9156E-02$
Écart de bilan de masse ou d'énergie	= -182.0	-1166.
(%)	= $4.1191E-03$	$7.3306E-04$
Masse totale (phase mobile)	= $1.5894E+08$	

Figure 36 – Bilan de masse cumulé après 3 ans.

### 8.2. EXAMEN DES CONCENTRATIONS CALCULÉES

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

### 8.2.1. Champ des concentrations calculées

On active le menu « Fichier » → « Fichier de champs simulés », ou plus simplement on frappe Contr+R), et on choisit le fichier de nom *chasim.out*. Ce fichier contient le champ des charges hydrauliques calculées au pas de temps n°0 et les concentrations des pas de temps n°12, 24 et 36. On choisit le champ « CONCENTR », puis le pas de temps n°36, à la date 36 mois, en double-cliquant sur cette date, ou en appuyant sur le bouton « Visualiser » (Figure 37). Le champ de concentration est alors placé dans le champ « 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 38).

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 39 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 clique sur l'icône  pour passer en coupe verticale (Figure 40).

(Pour repasser en visualisation en plan, on utilise l'icône ).

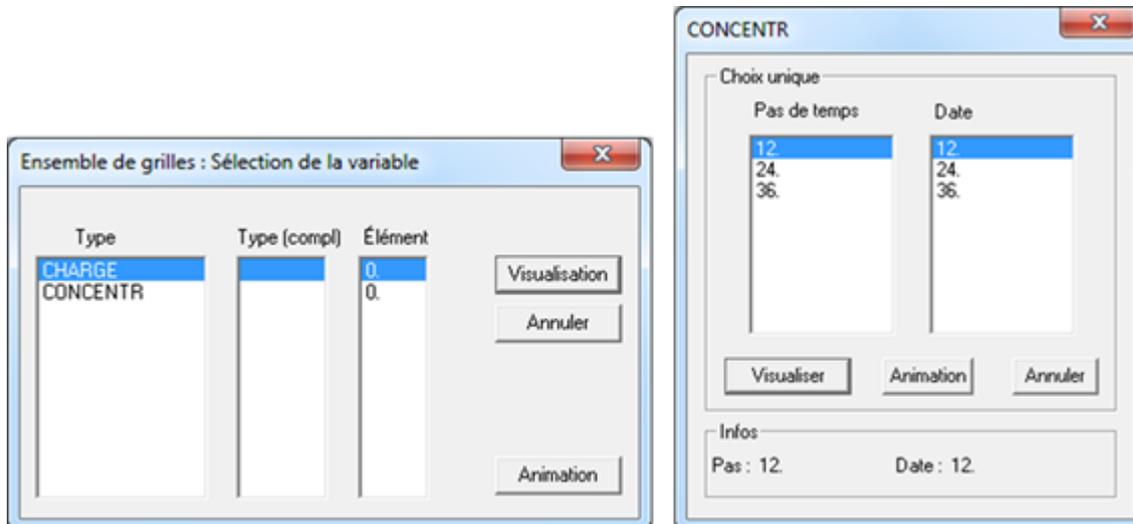


Figure 37 – Choix du champ et du pas de temps à visualiser.

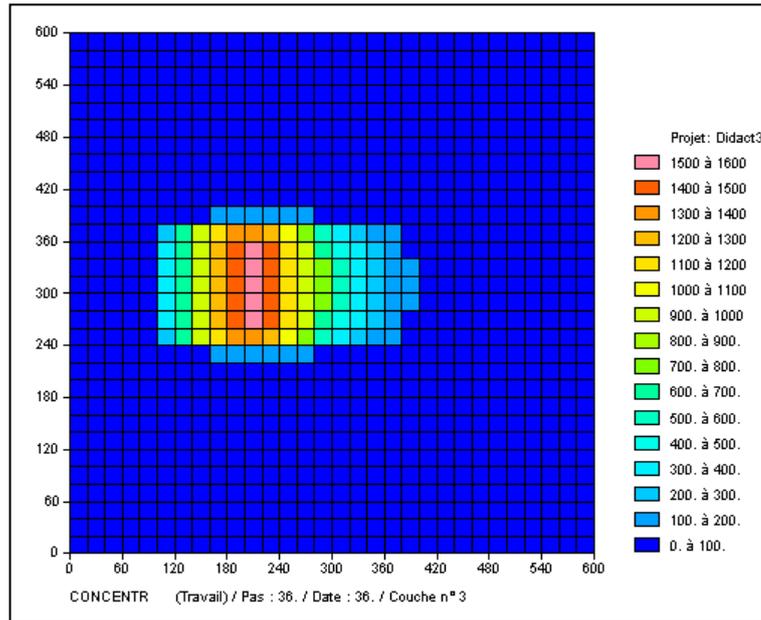


Figure 38 – Concentrations après 3 ans dans la couche n°3.

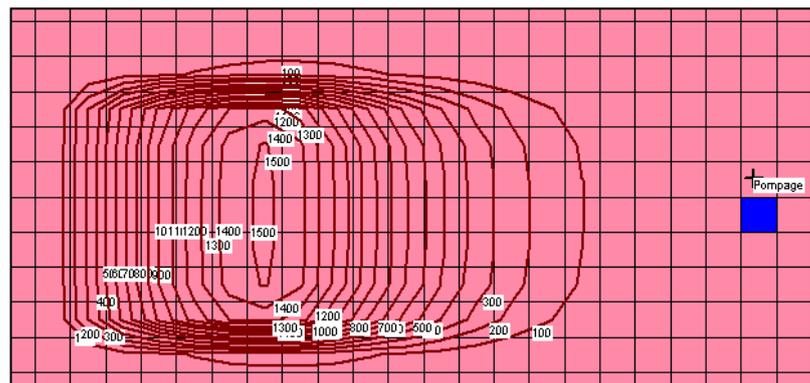


Figure 39 – Isovaleurs des concentrations après 3 ans dans la couche n°3.

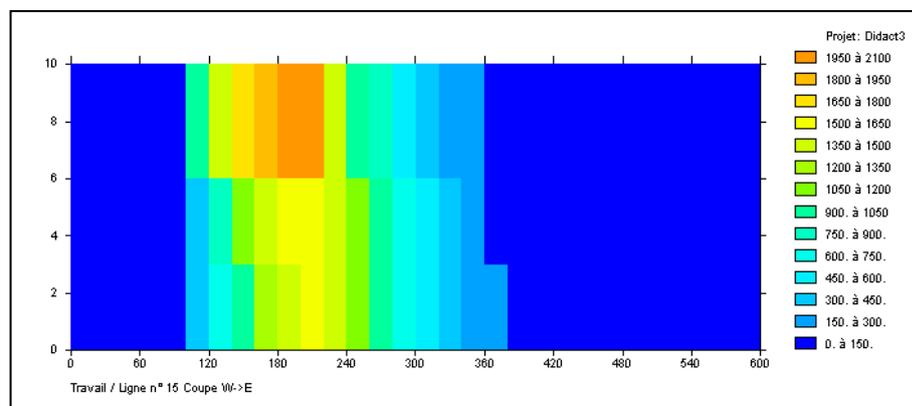


Figure 40 – Concentrations après 3 ans en coupe verticale dans l'axe du puits.

### 8.2.2. Évolution temporelle aux points à historiques

La simulation a généré un fichier de nom générique *historiq.prn* qui est directement compatible avec le tableur Excel ou son équivalent de Open Office. Il suffit de double-cliquer dessus (ou de l'*ouvrir avec Excel*), et on peut obtenir rapidement un diagramme en 3 ou 4 clics de souris (Figure 41). La méthode de transport 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 de transport des différences finies, par la méthode de transport « Random Walk », ou par la méthode de transport MOC.

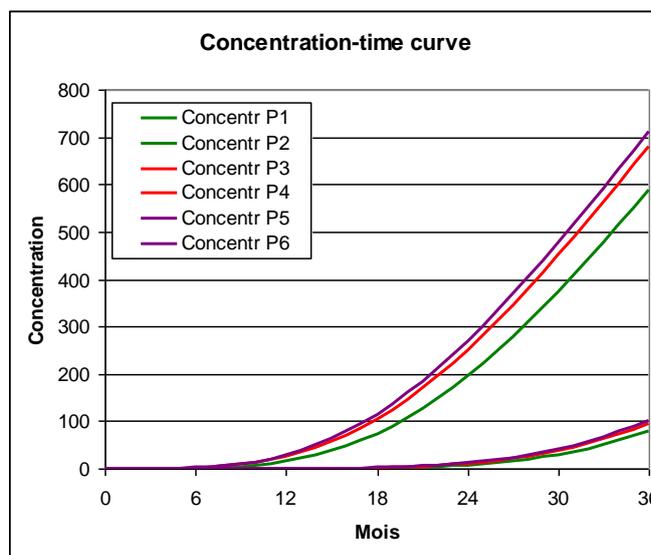


Figure 41 – Évolution temporelle des concentrations dans les 6 points à historiques.

### 8.3. TRANSPORT 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 des paramètres non maillés, puis → « Paramètres Généraux », puis « Couplage et Transport Concentration, Chaleur, Salinité », et on sélectionne la méthode de transport MOC :

#### Paragraphe « Couplage et Transport »

**MOC** = Schéma de Transport [0=Diff\_Finies ; 1=Random\_W ; 2=Caract=MOC ; 3=TVD]

**Paragraphe « Concentration et Trajectoires »**

Ensuite, dans le paragraphe « Concentration et Trajectoires », on attribue à chaque particule une masse de 500 µg, et on fixe, par sécurité, un nombre maximal de particules égal à 200 000 :

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

Le calcul s'effectue comme précédemment en quelques secondes, et donne des résultats comparables (Figure 42 et Figure 43). On remarque en particulier que les évolutions temporelles sont très régulières, quasiment sans oscillations.

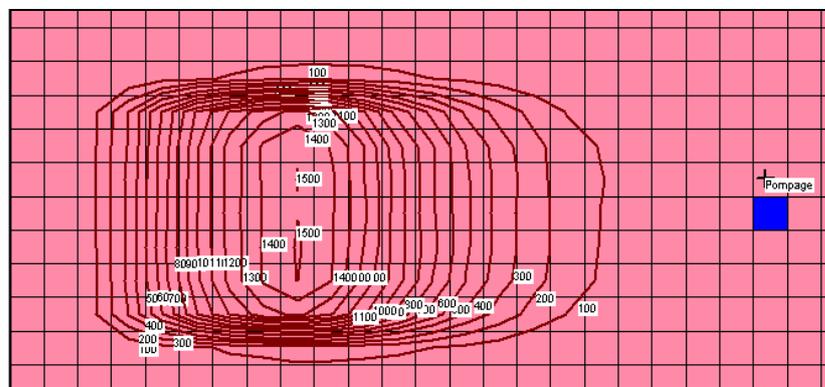


Figure 42 – Concentrations après 3 ans dans la couche n°3, Méthode de transport MOC.

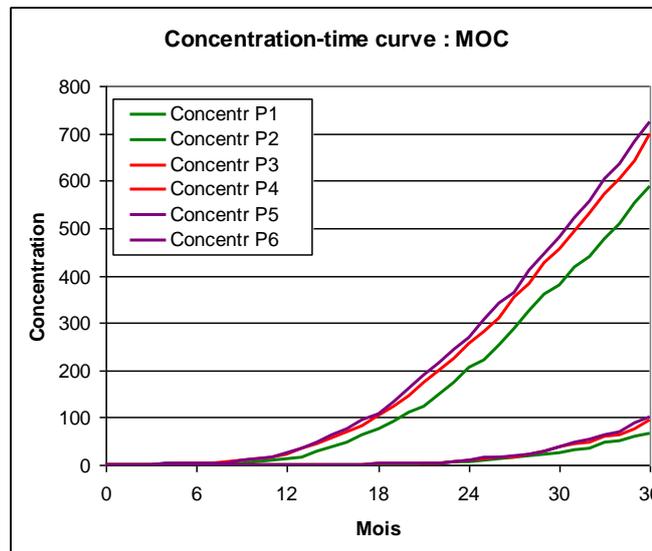


Figure 43 – Évolution temporelle des concentrations dans les 6 points à historiques. Méthode de transport MOC.

## 8.4. VARIANTE DANS LA DÉFINITION DE LA ZONE CONTAMINÉE

Au lieu d'introduire un flux massique égal à  $1.0519 \cdot 10^5$  ( $\mu\text{g}/\text{mois}$  par maille de  $400 \text{ m}^2$ ), on aurait pu introduire sur les mailles concernées une concentration égale à  $12\,500$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) dans la recharge, en procédant de la manière suivante.

### 8.4.1. 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 clique sur l'icône « Choix\_champ » puis 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 délimitant la zone :  $x = 100$  à  $220 \text{ m}$ ,  $y = 240$  à  $380 \text{ m}$  (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 droite de cette couche, on sauvegarde ce polygone sous le nom « Zone\_Contam.bln ». 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 dans 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 Control+L pour revenir à des plages linéaires)

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



On clique sur l'icône  pour faire apparaître le menu général des paramètres non maillés. On double-clique sur la première ligne « Paramètres généraux », puis « Préprocesseur ». On sélectionne alors le paragraphe « Initialisation avant calculs ».

On sélectionne « Actions 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).

### 8.4.2. Définition de la concentration dans la recharge

Dans le menu général des paramètres non maillés, on double-clique sur la ligne « Pas de temps » → « Préprocesseur » → « Choix d'un pas de temps » → On sélectionne le pas de temps n°1 → « Nouvelles Actions » → *Thème* « Transport, Salinité, Trajectoires » → *objet* « CONCEN\_RECH = Concentration de la Recharge » (Figure 44). On fixe alors la valeur 12500 dans la zone de sol n°2 et on clique OK.

Il faut retirer le flux massique de  $1.0519 \cdot 10^5 \mu\text{g}/\text{mois}$  qui avait été introduit : pour cela, après avoir cliqué sur « Retour » on choisit « Actions existantes » → *Thème* « Transport, Salinité, Trajectoires » → *Objet* « QMASS\_CONC = Débit Massique Concentration ». On remplace la valeur  $1.0519 \cdot 10^5$  par la valeur 0.

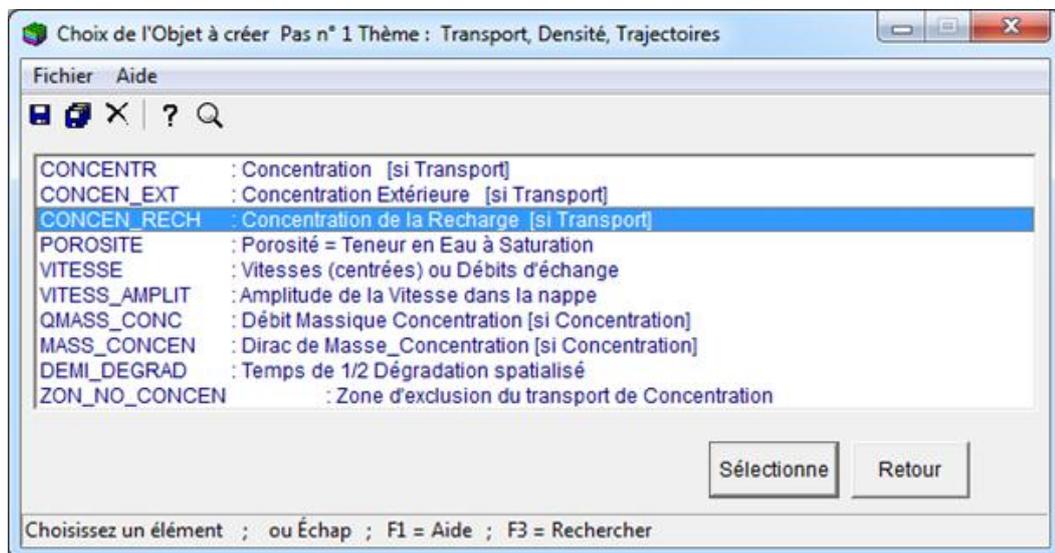


Figure 44 – Définition de la Concentration de la Recharge au pas de temps n°1.

### 8.5. VARIANTE : UTILISATION D'UN COEFFICIENT DE PARTAGE KD

Au lieu d'introduire un coefficient de retard, qui n'est qu'une approximation, on peut utiliser un « coefficient de partage »  $k_d$ . Dans le code de calcul MARTHE on introduit un tel coefficient de partage sous la forme d'un champ de « Rho x kd ». Le paramètre « Rho x kd » est le produit du  $k_d$  par la masse volumique sèche du sol (souvent de l'ordre de  $1600 \text{ kg}/\text{m}^3$ ). Dans le code de calcul MARTHE, « Rho x kd » qui est adimensionnel est représenté par le champ « RHO\_KD », exprimé en unité de porosité, accessible avec un profil d'utilisation avancé.

On suppose que la valeur du  $k_d$  est égale à  $0.1563 \text{ cm}^3/\text{g}$  dans tout le domaine et que la densité sèche est égale à  $1600 \text{ kg/m}^3$ . Le produit  $\text{Rho} \times k_d$  est donc égal à  $0.1563 \text{ cm}^3/\text{g} \times 1.6 \text{ g/cm}^3 = 0.25$ , soit 25 % puisque l'unité de porosité choisie dans cet exemple est le %. Pour cette simulation on procède de la manière suivante :

- Dans le menu général des paramètres non maillés, accessible par l'icône  de WinMarthe, on double-clique sur la première ligne « Paramètres généraux » → « Préprocesseur » → Paragraphe « Concentration et Trajectoires ». On retire alors le coefficient de retard qui était égal à 2 et on le met à 0. On remet également le transport par la méthode TVD dans le paragraphe « Couplage et Transport ... ».
  - Puis dans le paragraphe « Initialisation avant calculs » → « Nouvelles Actions » → on clique sur « Transport, Salinité, Trajectoires ». On ne voit pas « RHO\_KD » car on n'avait pas choisi un « profil d'utilisation avancée ». On clique donc sur l'icône « Rechercher » en forme de loupe et on sélectionne « Tous les paramètres ». On voit alors apparaître l'objet « RHO\_KD :  $k_d$  Volumique  $\text{Rho} \times k_d$  ». (On aurait pu trouver directement cet objet dans le thème « Tous les paramètres : même hors profil utilisateur »). On sélectionne cet objet « RHO\_KD » puis → action « GRILLE » et on lui affecte le nom de fichier « =25 » (sans oublier le signe « = ») ce qui signifie une valeur uniforme égale à 25. On sauvegarde le fichier des paramètres et on sort. On est alors retourné dans WinMarthe *sensu stricto*.
- Note : On aurait pu également modifier le fichier profil d'utilisateur en sélectionnant « Utilisation Avancée » puis retourner dans WinMarthe.
- On utilise la procédure « Choix champ F3 » → « Charger un nouveau champ » → Thème « Transport, Salinité, Trajectoire » → «  $k_d$  Volumique  $\text{Rho} \times k_d$  ». On sélectionne alors toutes les mailles (de toutes les couches) et on leur affecte une valeur égale à 25 (%).

On lance alors les calculs et la Figure 45 (à gauche) montre qu'on obtient des concentrations très semblables au calcul précédent puisqu'un  $\text{Rho} \times k_d$  égal à 25 % avec une teneur en eau de 25 % (quand la nappe est saturée) correspond à un coefficient de retard égal à 2. La partie droite de la figure montre les concentrations obtenues avec un  $\text{Rho} \times k_d$  égal à 0.50 (ce qui correspond approximativement à un facteur de retard égal à 3).

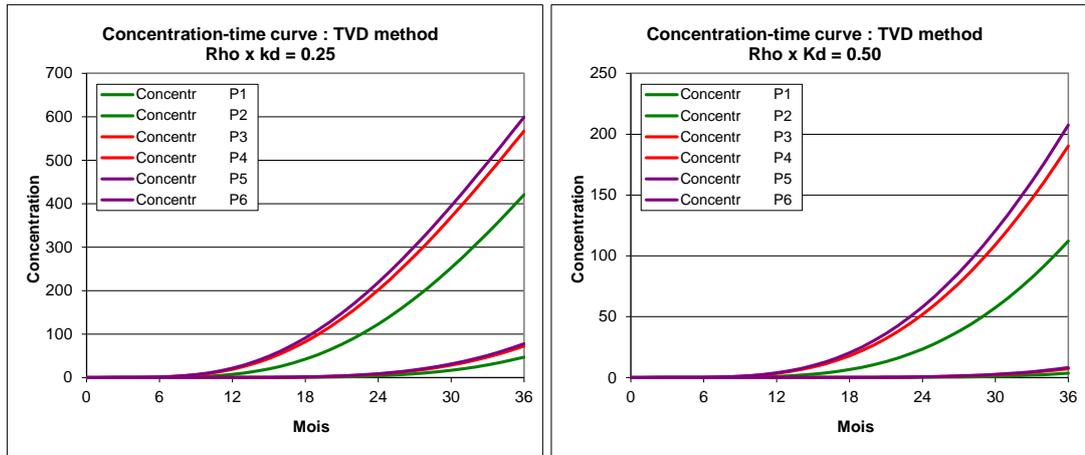


Figure 45 – Évolution temporelle des concentrations dans les 6 points. À gauche  $Rho \times kd = 0.25$  ; à droite  $Rho \times kd = 0.50$ .



## 9. 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 côté.

### 9.1. 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\_Gig.permh*, *.charg*, *.debit*, *.hsubs*, *.zonep*).

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

sélectionne ensuite, 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 la fenêtre qui apparaît Figure 46. 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 nombres 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 47). On voit alors apparaître le sous-maillage (Figure 48). Dans MARTHE, ce sous-maillage concerne toujours toutes les couches.

### 9.2. 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 uniformes 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 46 – Définition de l’extension du maillage gigogne.

Figure 47 – Définition des dimensions des sous- colonnes et sous- lignes.

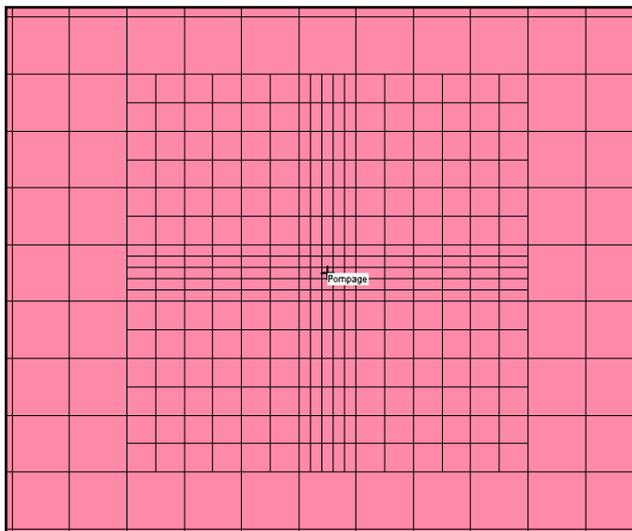


Figure 48 – Sous-maillage gigogne au voisinage du puits de pompage.

Par sécurité, on sauvegarde () les modifications.

### 9.3. AJUSTEMENT DES PARAMÈTRES NON MAILLÉS

#### 9.3.1. Anisotropie verticale de perméabilité

Dans notre exemple, on a défini une anisotropie verticale de perméabilité égale à 500 dans la maille [Colonne=25, Ligne=15, Couches 1 à 3]. Il faut la remplacer par la maille du centre du gigogne [Colonne=10, Ligne=10, Couches 1 à 3, Gigogne=1]. On

actionne l'icône  pour faire apparaître le menu général, puis → « Paramètres Généraux » → « Préprocesseur » → Paragraphe « Initialisation avant calculs » → « Nouvelles Actions » → « Paramètres Avancés » → « Aniso\_Verti » → « MAILLE »

On sélectionne alors le gigogne n°1, puis [Colonne=10, Ligne=10, Couche=1:3] et on fixe la valeur 500.

(On pourrait, par élégance, supprimer la valeur 500 de la maille [Colonne=25, Ligne=15, Couche=1:3] du maillage principal en choisissant « Actions existantes » → « Paramètres Avancés » et en donnant les coordonnées [Colonne=0, Ligne=0, Couche=0], mais ce n'est pas vraiment nécessaire, car les mailles [Colonne=25, Ligne=15] du maillage principal ne sont pas actives car recouvertes par le gigogne).

#### 9.3.2. Schéma de calcul du transport

On utilise la méthode des caractéristiques MOC, car **la méthode de transport TVD n'est pas opérationnelle pour les maillages avec 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 49.

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

Figure 49 – Départs de trajectoires inverses à partir du puits.

## 9.4. LANCEMENT DES CALCULS ET EXAMEN DES RÉSULTATS

Comme précédemment on lance les calculs par l'icône «  » et on examine les résultats. La Figure 50 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.

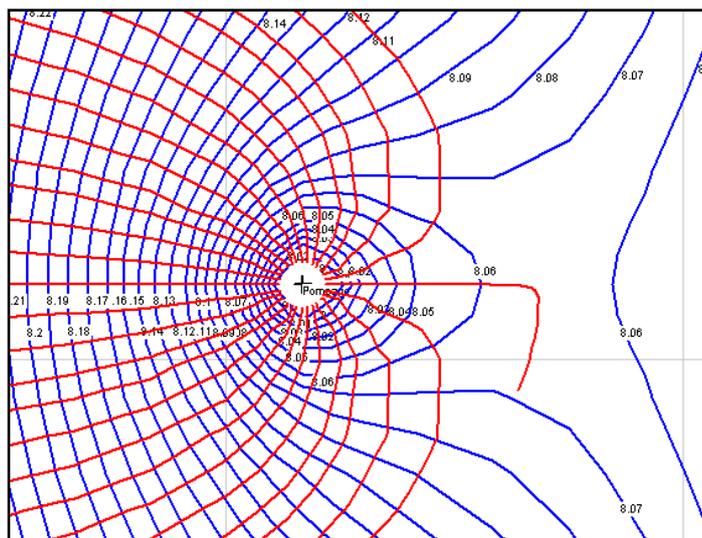


Figure 50 – Isovaleurs et lignes de courant : calcul avec un sous-maillage gigogne au voisinage du puits de pompage.

## 10. 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 hydrauliques 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 de transport TVD, qu'on avait conservé. On fait tout d'abord deux petites modifications :

- On ajoute la demande d'historiques de charge hydrauliques 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
/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

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

« Paramètres Généraux » → « Préprocesseur » → 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 charges hydrauliques et de concentrations calculées aux points 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)*.

## 10.1. 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)

## 10.2. 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 (grilles) sous » et on donne le nom *Didact3\_opt.zo\_perm*. (« zo\_perm » pour « Zones de Perméabilité »)

## 10.3. DÉFINITION DES HISTORIQUES D'OBSERVATIONS

Ces historiques ont la même forme que le fichier *historiq.out*, mais concernent chacun un seul type d'observation. Il faut créer les deux fichiers suivants :

- Fichier des observations de charges hydrauliques : *Didact3\_opt.h\_charg*

Ce fichier contient les 4 historiques de charge hydraulique (sur les 36 pas de temps, bien que les charges soient constantes car l'hydrodynamique est en régime permanent).

Pour constituer ce fichier, le plus simple est de copier le fichier *historiq.out* sous le nom *Didact3\_opt.h\_charg*, puis d'effacer dans ce fichier tout ce qui ne concerne pas les historiques de charge (c'est-à-dire à partir d'environ la ligne 163). On remplacera alors, avec un éditeur de texte classique, dans la colonne de droite les valeurs de charges simulées par les valeurs de charges observées (8.8497, 8.7443, 8.1806, 8.2604).

```

Didacticiel 2 : Hydraulique Permanent + Transport [V7.4]
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

```

- Fichier des observations de concentrations : Didact3\_opt.h\_conce

Pour constituer ce fichier, le plus simple est de copier le fichier *historiq.out* sous le nom *Didact3\_opt.h\_conce*, puis de conserver dans ce fichier uniquement ce qui concerne les historiques de concentration (c'est-à-dire la ligne n°1 puis environ les lignes 167 à 407). On remplacera alors, avec un éditeur de texte classique, dans la colonne de droite les valeurs de concentrations simulées par les valeurs de concentrations observées.

```

Didacticiel 2 : Hydraulique Permanent + Transport [V7.4]
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 3.4672853E-05
2.000 1.1089010E-03
3.000 9.4495119E-03
..... etc .....
14.000      21.3299
..... etc .....
36.000      526.8006
!Maille Colonne= 20, Ligne= 15, Couche= 1
! Coordonnées exactes : X=      390.0000 Y=      310.0000 =====
! Localisat = P2 ;
0.000 0.000000
..... etc .....
36.000      69.2056
..... etc .....
!Maille Colonne= 20, Ligne= 15, Couche= 3
! Coordonnées exactes : X=      390.0000 Y=      310.0000 =====
! Localisat = P6 ;
0.000 0.000000
1.000 1.1949521E-10
36.000      101.4803

```

## 10.4. DÉFINITION DES PARAMÈTRES POUR L'OPTIMISATION

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

### 10.4.1. Paramètres généraux d'optimisation

#### Paragraphe « Paramètres Généraux Optimisation [Simul, Increm.] »

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

On a choisi 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 observées % (0<=>100%)  
0 = Poids sur les Historiques de Concentrations observées % (0<=>100%)

Les historiques d'observations de charges hydrauliques 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

### 10.4.2. Variables à optimiser

On sélectionne le 5<sup>ème</sup> paragraphe « Paramètres à optimiser ou analyser ». On voit apparaître une boîte de dialogue pour choisir les variables, dont la Figure 51 montre un extrait.

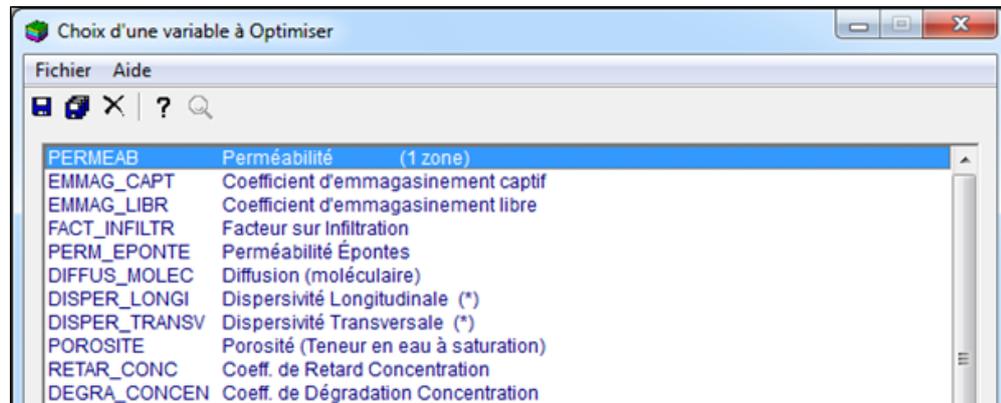


Figure 51 – Choix des variables à optimiser.

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 52) :

- 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 52 – Paramètres de la perméabilités 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 la valeur 0.

On enregistre alors ce fichier (*Didact3\_opt.paropt*) et on est retourné dans le menu général des paramètres non maillés.

### 10.5. MISE À JOUR DU « FICHIER PROJET OPTIMISATION »

Pour introduire les 3 autres fichiers créés pour l'optimisation : (*Didact3\_opt.zo\_perm*, *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 53).

On accepte de sauvegarder le « fichier Projet Optimisation » *Didact3\_opt.namopt* qui contiendra les noms des 4 fichiers optimisation : (*Didact3\_opt.paropt*, *Didact3\_opt.zo\_perm*, *Didact3\_opt.h\_charg*, *Didact3\_opt.h\_conce*). Puis on sort après avoir accepté de mettre à jour le fichier Projet MARTHE *Didact3\_opt.rma* qui contiendra maintenant le nom du fichier *Didact3\_opt.namopt*.

On est alors retourné à WinMarthe *sensu stricto*.



Figure 53 – Mise à jour du fichier Projet Optimisation

### 10.6. LANCEMENT DES CALCULS ET EXAMEN DES RÉSULTATS

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

La progression de l'optimisation peut être analysée dans le fichier texte *optimis.txt*. À l'issue des calculs on obtient bien les valeurs de référence comme le montre le Tableau 3.

Variable	Init	Pass 1	Pass 2	Pass 3	Pass 4	Pass 5	Vraie
PERMEAB 3	15	7.66	3.76	5.18	4.99	5.00	5
DISPER_LONGI	3	49.98	26.68	11.45	10.20	10.00	10
DISPER_TRANSV	0.3	0.74	0.97	0.96	0.998	1	1
ANISO_VER_GLO	0.3	0.02	0.02	1.00	0.02	0.045	0.1
Critère erreur (%)	12.58	9.87	0.80	0.059	0.0013	0.0001	0

Tableau 3- 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 :

- Corrélation (ANISO\_VER\_GLO , PERMEAB 3) = -0.966
- Corrélation (ANISO\_VER\_GLO , DISPER\_TRANSV) = -0.803



## 11. Exemple n°2 : 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 (Figure 55) :

- 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 à charge imposée.
- Calcul en régime permanent

### 11.1. 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 de cet exemple simple 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><b>Coupe</b> = Orientat. maillage : 0=Standard ; 1=Coupe Verticale : Pesant. sur Oy ou bien</p> <p><b>Vertic</b> = 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 54).

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 54 – Définition des départs de trajectoires sous le barrage

Dans un premier calcul on calcule les trajectoires directes :

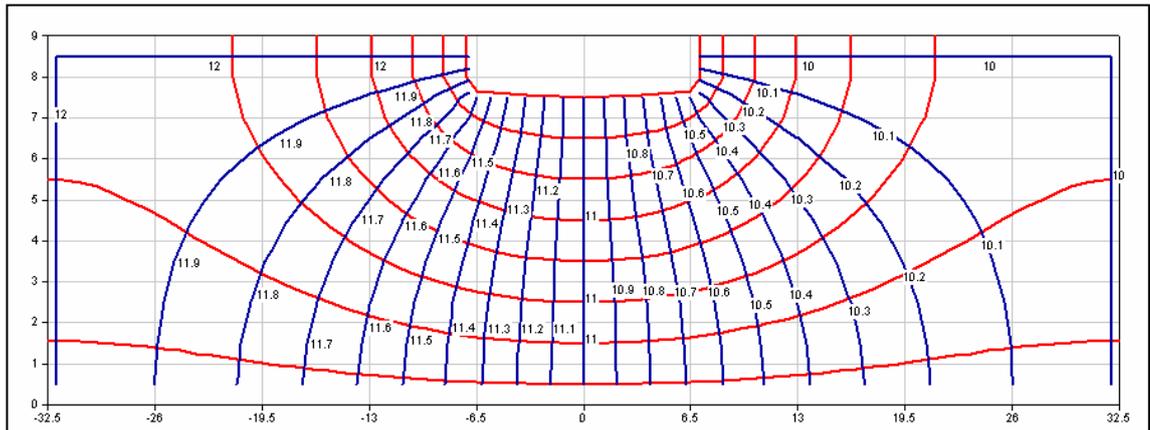
**1** = Calcul de Trajectoires (1 = Oui ; -1 = Trajectoires inverses)

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)

## 11.2. RÉSULTATS

La Figure 55 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 55 – 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.



## 12. Exemple n°3 : 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 (Figure 56) :

- 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

### 12.1. 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.

#### 12.1.1. Charges hydrauliques imposées et conditions de suintement

On impose normalement une charge hydraulique 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 hydraulique 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.

#### 12.1.2. Schéma de calcul

Le schéma de calcul par défaut de MARTHE est le schéma en « Pseudo Non saturé ». C'est le schéma par défaut. Il 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 [Déf=1]

## 12.2. 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 56 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  $4.73 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  par mètre d'épaisseur de tranche.

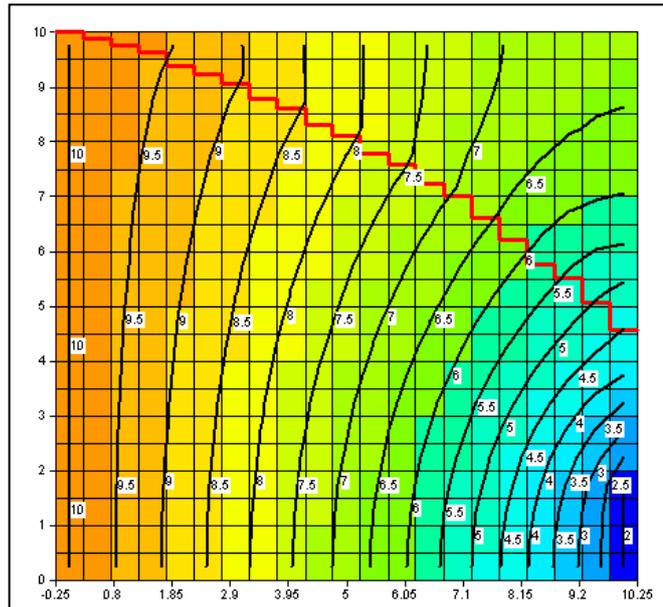


Figure 56 – Écoulement à surface libre à travers un barrage avec surface de suintement : isovaleurs de charges hydrauliques et surface libre (en rouge)

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



## 13. Exemple n°4 : 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 (Figure 57) :

- 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
  - Charges imposées sur la limite latérale = 25 pieds (jusqu'à l'altitude 25 pieds)
  - Coefficient d'emmagasinement en nappe libre = 20 % (emmagasinement captif négligeable =  $0.001 \text{ m}^{-1}$ ).
  - Débit de recharge =  $254 \text{ m}^3/\text{jour}$  sur une surface d'environ  $24281 \text{ m}^2$ .
  - Calcul en régime transitoire
- (N.B. 1 pied = 0.3048 mètre).

### 13.1. 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  $360^\circ$  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°.

### 13.1.1. Paramètres généraux

**Paragraphe : « Unités des données » :**

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

**Paragraphe : « Point origine et état des données » :**

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

### 13.1.2. Définition du type de maillage : Radial


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

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

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

### 13.1.3. Débit de percolation

On applique le débit de percolation de 254 m<sup>3</sup>/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 m<sup>2</sup>. 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.

## 13.2. 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 = Variation moyenne de Charge entre 2 itérations pour Convergence  
 0 = Coefficient de Relaxation des calculs [Déf=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.

## 13.3. RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION EN RÉGIME PERMANENT

Dans le fichier des pas de temps [.pastp], on demande la sauvegarde du champ des charges hydrauliques et du champ de taux de saturation « %SATURAT/EDITI l= 1; ».

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 =  $2 \cdot 10^{-10} \%$

Comme on est en coupe verticale, on obtient un fichier « surflib.bln » contenant le profil de la surface libre calculée. On obtient également un fichier « surflib.prn » en format compatible avec le tableur Excel ou son équivalent de Open Office. Le champ « Taux de saturation » est sauvegardé dans le fichier « chasim.out ».

La Figure 57 montre le champ du taux de saturation (totalement saturé en couleur orange) avec superposition du profil de la position de la surface libre calculée (trait rouge) du fichier « surflib.bln ».

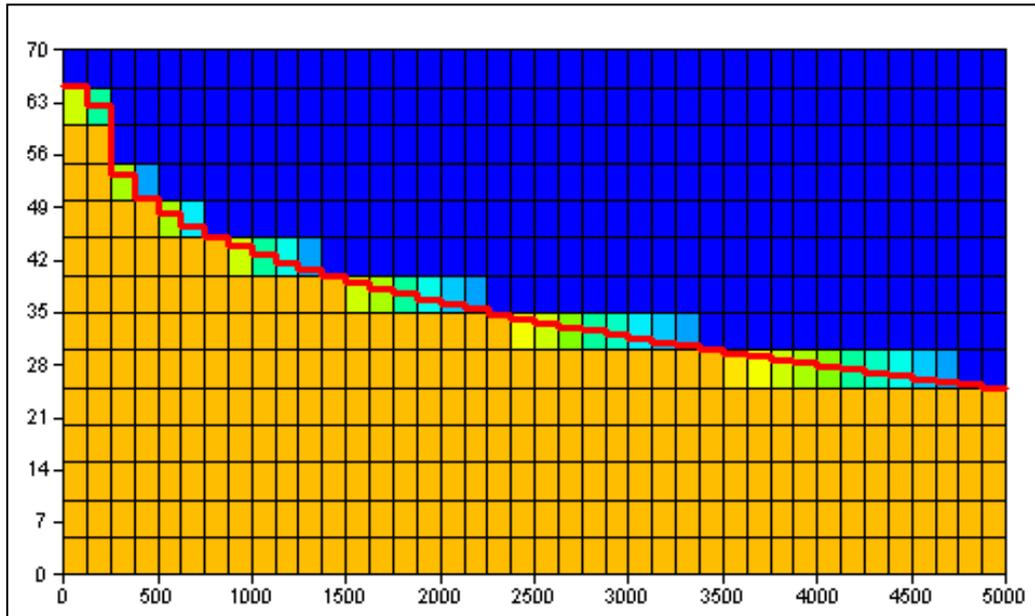


Figure 57 – Remontée de la surface libre : régime permanent. Champ du taux de saturation avec profil de la surface libre en rouge.

### 13.4. 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<sup>ème</sup> une durée 1.39 jour et le 50<sup>ème</sup> 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'itérat. par pas de temps de calcul suivant le pas n°0
  0 = Nombre maxi d'itérations pour le pas de temps n°0 (Perman. Initial)
1e-7 = Variation moyenne de Charge entre 2 itérations pour Convergence
  0.2 = Coefficient de Relaxation des calculs [Déf=1]
Transit = 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. Dans le fichier des pas de temps [.pastp], on demande la sauvegarde du champ des charges hydrauliques après

12 j, 50 j, 111 j, 190 j, 700 j, 2600 j, 9700 j et 36000 j. On obtient donc dans le fichier « surflib.blm » les profils de charge hydraulique pour ces dates.

La Figure 58 montre le champ du taux de saturation au dernier pas de temps, ainsi les profils d'évolution de la surface libre après 12 j, 50 j, 111 j, 190 j, 700 j, 2600 j, 9700 j et 36000 j, de bas en haut. Pour une meilleure visualisation on a extrait avec un éditeur de texte les profils des différentes dates du fichier « surflib.blm » et on les a mis dans des fichiers séparés de façon à pouvoir leurs affecter des couleurs différentes dans le menu « Polygone » de WinMarthe.

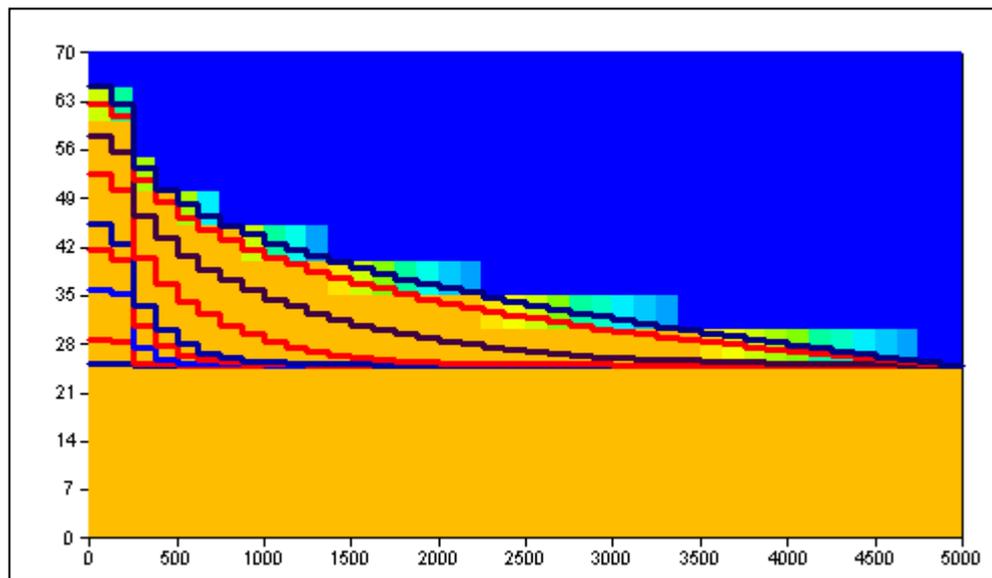


Figure 58 – Remontée de la surface libre : régime transitoire. Champ du taux de saturation en fin de calcul et profils successifs de la surface libre de bas en haut.

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



## 14. Exemple n°5 : 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 (2007b).

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 mètre d'épaisseur de coupe, arrive par la limite gauche (Figure 59).

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  $\rho = 1000 + 1 \cdot \text{Concentration}$   
(concentration en  $\text{kg/m}^3$ )

### 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 =  $25 \text{ kg/m}^3$ , charge imposée = 0. sur chaque maille.

### État initial :

- Salinité = 0 partout sauf  $25 \text{ kg/m}^3$  sur la limite est
- Hydrodynamique : Charge hydraulique uniforme = 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.

## **14.1. 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

### **14.1.1. 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 (x=0, y= -100).

On ajuste alors la largeur de la 41<sup>ème</sup> colonne de la manière suivante :

On sélectionne la 41<sup>ème</sup> 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.

### 14.1.2. 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 ( $10^{-7}$  m<sup>3</sup>/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/m<sup>3</sup>) sur la colonne n°41.
- Un champ de « Salinité Extérieure » avec également uniquement des valeurs égales à 25 (kg/m<sup>3</sup>) 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.

### 14.1.3. Définition des paramètres non maillés

On procède comme dans les exemples précédents.

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

<p>1 = Régime Transitoire</p> <p>2 = Salinité (1=Oui ; 2=Calcul de la Salinité et 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 non maillés, 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)</p> <p>5e-6 = Variation moyenne de charge entre 2 itérations pour Convergence</p>
--

**50** = Nombre d'itérations internes pour le solveur [Déf=10]

**Perman** = Régime Hydrodynamique [0=Transitoire ; 1=Permanent]

**Paragraphe : « Unités des données » :**

**cm/s** = Unité des Perméabilités des Aquifères en m/s (ou m<sup>2</sup>)

**1e-7** = Unité des Débits en m<sup>3</sup>/s (kg/s si Gaz)

**cm** = Unité des Charges, Altitudes en m

**%** = Unité des coefficients d'Emmagasinement Libres en [-] [% si en %]

**cm** = Unité des Coordonnées Horizontales des mailles en m

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

**1e-6** = Unité des Masses en kg

**Paragraphe : « Point origine et état des données » :**

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

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

**Paragraphe : « Couplage et Transport Salinité, chaleur, concentration » :**

**25** = Nombre maximal d'itérations pour \*Couplage\* Densité/Pression

**6.6e-6** = Diffusion moléculaire (m<sup>2</sup>/s) [\* = Spatialisée]

**Paragraphe : « Salinité, Densité » :**

**DOUCE** = Effet de la Densité (0=Non 1=Charge 2=Pression 3=Charge\_eau\_Douce)

**LIN** = Loi Densité = F(Salinité) (0=Non 1=Linéaire 3=Schlum\_VDB)

**1** = Dérivée de la loi Densité = F(Salinité) [si loi Linéaire] [Déf=0.7]

**1e-4** = Variation moyenne de Salinité entre 2 itérations pour convergence

**Perman** = Régime Transport Salinité [0=Transitoire ; 1=Permanent]

**1** = Calcul (Transport) de la Salinité

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 la sauvegarde 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 suivante :

On sélectionne le Paragraphe « Initialisation avant calculs » puis :

« Nouvelles Actions » → Thème « Transport, Salinité, Trajectoires » → objet « POROSITE » → action « GRILLE » et on lui affecte la valeur « =35 » (sans oublier le signe « = »).

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

Puis objet « SALIN\_EXT » → action « MAILLE » et on choisit : Col 41, Ligne 1, Couche \*, Valeur 25.

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

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

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

Pour les sauvegardes, on choisit :

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

## 14.2. RÉSULTATS

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

La Figure 59 présente les courbes d'iso-salinités ( $\text{kg/m}^3$ ) 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 60 présente les charges hydrauliques réelles (en cm). Elle montre nettement que les vitesses ne sont pas perpendiculaires aux iso-charges.

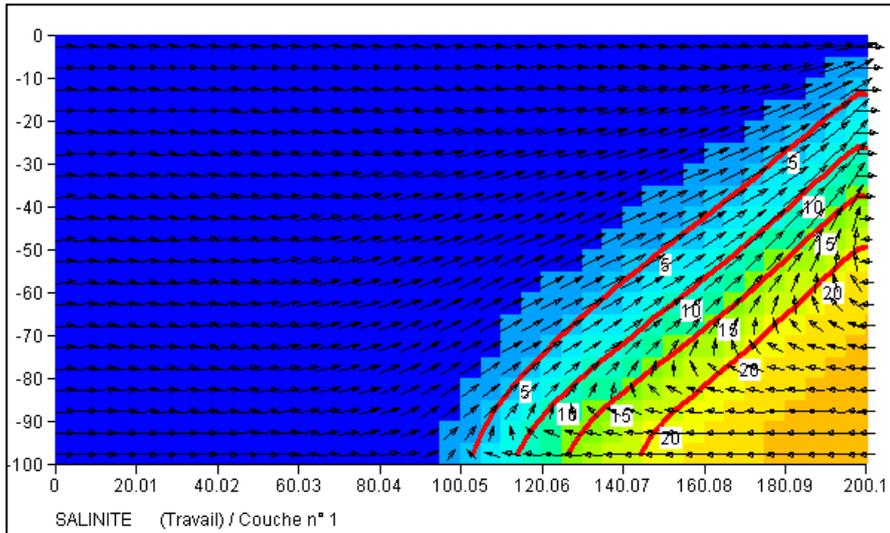


Figure 59 – Champ de Salinité calculée

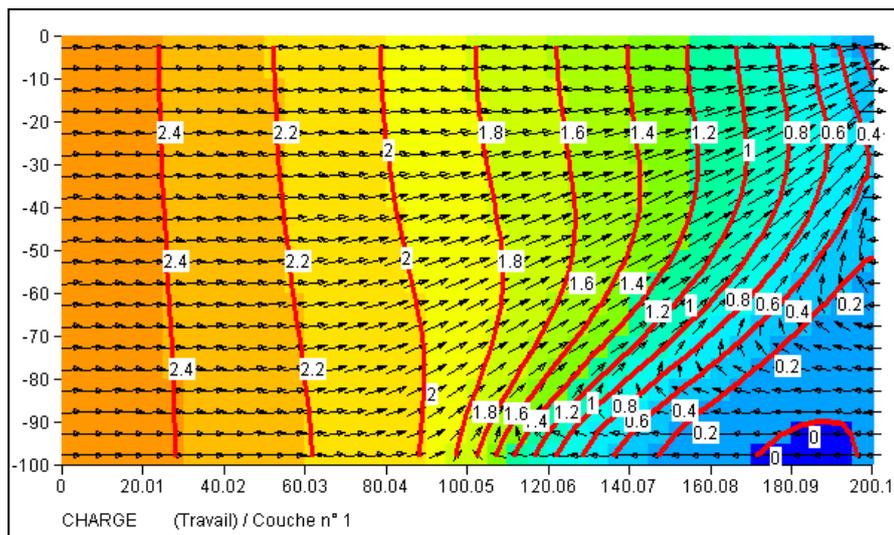


Figure 60 – Champ des Charges hydrauliques réelles calculées

### 14.3. 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 de transport 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 et le champ de vitesse s'établit très rapidement. 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<sup>ème</sup> colonne de 0.1 cm). En effet, la méthode de transport 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 61 et la Figure 62 présentent les courbes d'iso-salinités ( $\text{kg/m}^3$ ) respectivement après 15 mn et après 80 mn. On voit que l'interface est bien abrupte, sans dispersion numérique.

**Paragraphe : « Pas de temps 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, concentration » :**

10 = Nombre maximal d'itérations pour \*Couplage\* Densité/Pression  
0.7 = Coefficient de Relaxation pour Couplage Densité/Pression [Déf=1]  
TVD = Schéma de Transport [0=D\_Finies ; 1=Random\_W ; 2=Caract=MOC ; 3=TVD]  
0 = Diffusion moléculaire (m2/s) [\* = Spatialisée]

**Paragraphe : « Salinité, Densité » :**

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

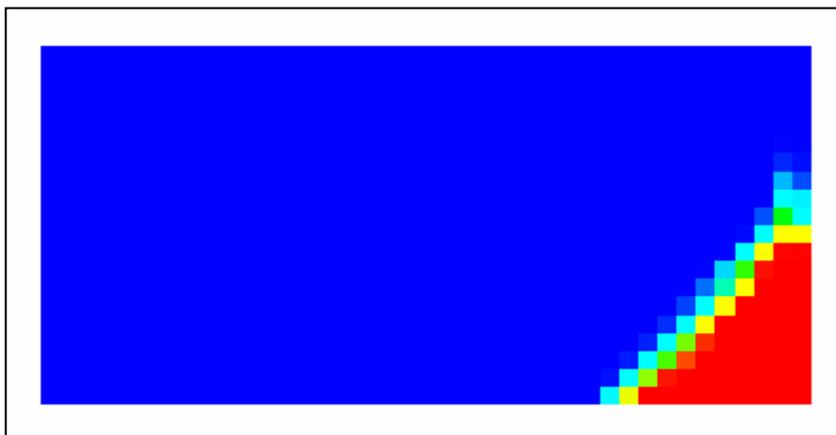
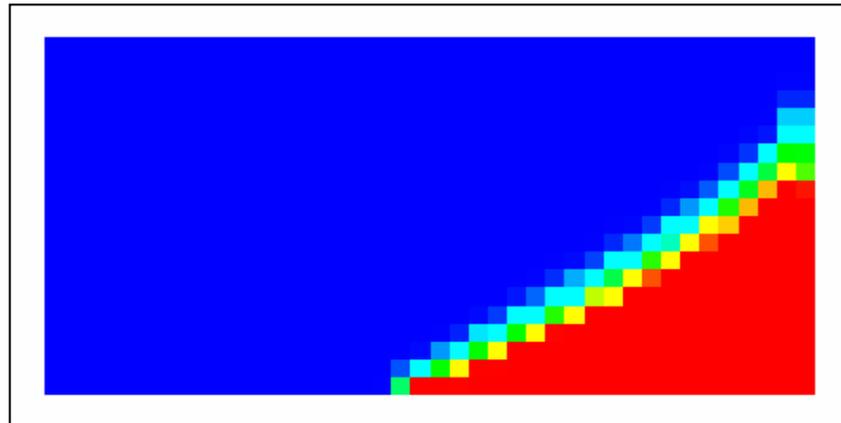


Figure 61 – Champ de Salinité calculée après 15 minutes



*Figure 62 – Champ de Salinité calculée après 80 minutes*



## 15. Exemple n°6 : 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 m<sup>3</sup>/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 passant par les deux forages, et d'autre part 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 quasiment imperméable, mais faisant partie du domaine de calcul thermique)
- Porosité :  $\omega = 15$  % dans l'aquifère, 0.01 % dans l'éponte
- Diffusion :  $D = 0$  m<sup>2</sup>/s
- Dispersivité longitudinale :  $\alpha_L = 10$  m (dispersivité transversale = 0)
- Débits de pompage et de réinjection = 50 m<sup>3</sup>/h (soit 12.5 m<sup>3</sup>/h dans le ¼ du domaine modélisé)

### Paramètres thermiques :

- Conductivité thermique de la matrice poreuse :  $\lambda = 2.5$  W/m/°C
- Chaleur spécifique des terrains =  $2.2 \cdot 10^6$  J/m<sup>3</sup>/°C dans l'aquifère,  $2.1 \cdot 10^6$  J/m<sup>3</sup>/°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 hydrauliques 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 : Charge hydraulique uniforme = 100 m NGF 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'épentes, situées sous l'aquifère, 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'épente 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 »

0 = Nombre maxi d'itérations par pas de temps calcul suivant le pas n°0  
 2 = Nombre maxi d'itérations pour le pas de temps n°0 (Permanent Initial)  
 2e-6 = Variation moyenne de Charge entre 2 itérations pour Convergence  
 300 = Nombre d'itérations internes pour le solveur [Déf=10]  
**Perman** = Régime Hydrodynamique [0=Transitoire ; 1=Permanent]

#### Paragraphe : « Couplage et Transport Salinité, chaleur, concentration » :

0 = Nombre maximal d'itérations pour \*Couplage\* Densité/Pression  
 0 = Nombre maxi d'itérat \*Transport\* Salinité/Chaleur/Concentr. [Déf=20]  
**TVD** = Schéma de Transport [0=D\_Finies ; 1=Random\_W ; 2=Caract=MOC ; 3=TVD]

#### Paragraphe : « Température , effets Thermiques » :

5e-4 = Variation moyenne de Température entre 2 itérations pour convergence  
**Transit** = Régime Transferts Thermiques [0=Transitoire ; 1=Permanent]  
 2.5 = Conductivité Therm. du minéral (W/m/deg) [Déf=1.5] [\* = Spatialisée]  
 10 = Dispersivité Longitudinale Thermique (m) [\* = Spatialisée]  
 0 = Dispersivité Transversale Thermique (m) [\* = Spatialisée]  
 0 = Chaleur Spécifique Eau (J/kg/deg.) [Déf=4185]  
 \* = Chaleur Spécif Volum. Minéral (J/m3/deg) [Déf=2e6] [\* = Spatialisée]  
 0 = Conductivité Thermique Eau (W/m/deg) [Déf=0.6]  
 1 = Calcul du champ de Température (Transport)

On crée également un fichier de « Pas de temps » avec 14 pas de temps de 2.5 ans.

#### Pompages :

On choisit une unité de débits en « m3/h ». On introduit alors les valeurs dans le paragraphe « Initialisation avant calculs »

Pour le puits de production, on introduit alors un débit de -12.5 dans la maille :  
 colonne = 26, ligne = 1, couche = 1.

Pour le puits d'injection, on introduit un débit de +12.5 dans la maille : colonne = 51, ligne = 1, couche = 1.

Dans ce puits d'injection on fixe une « Température extérieure » égale à 12 (°C).

/DEBIT/MAILLE	C=	26L=	1P=	1V=	-12.5;
/DEBIT/MAILLE	C=	51L=	1P=	1V=	12.5;
/TEMPER_EXT/MAILLE	C=	51L=	1P=	1V=	12;

## 15.1. RÉSULTATS

Les calculs se terminent en quelques minutes.

La Figure 63 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 64 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 65 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 66).

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 toutes les mailles de la colonne n°1, située à 3020 m à l'Ouest du centre de la colonne la plus à l'Est. La Figure 66 montre que, bien que le gradient soit très faible, le refroidissement est alors significativement plus long.

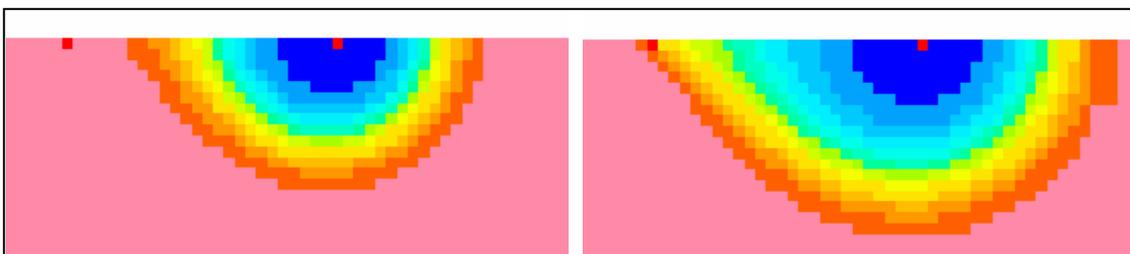


Figure 63 – Vue en plan de la température dans l'aquifère après 17.5 et 35 ans

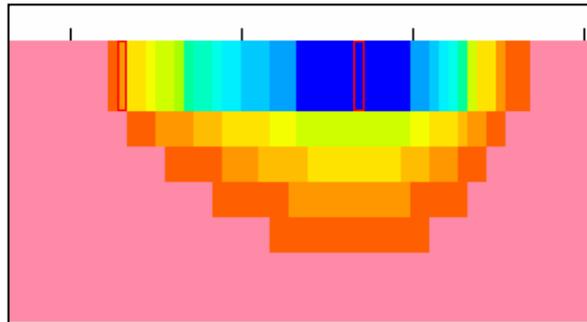


Figure 64 – Vue en coupe verticale de la température dans l'aquifère et les épointes après 35 ans

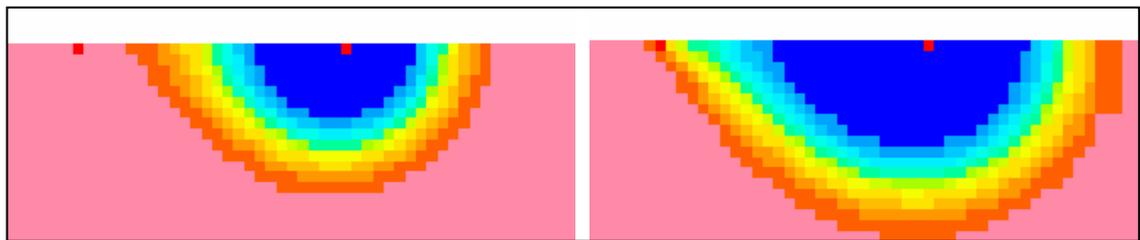


Figure 65 – Vue en plan de la température dans l'aquifère après 17.5 et 35 ans en supposant des épointes adiabatiques.

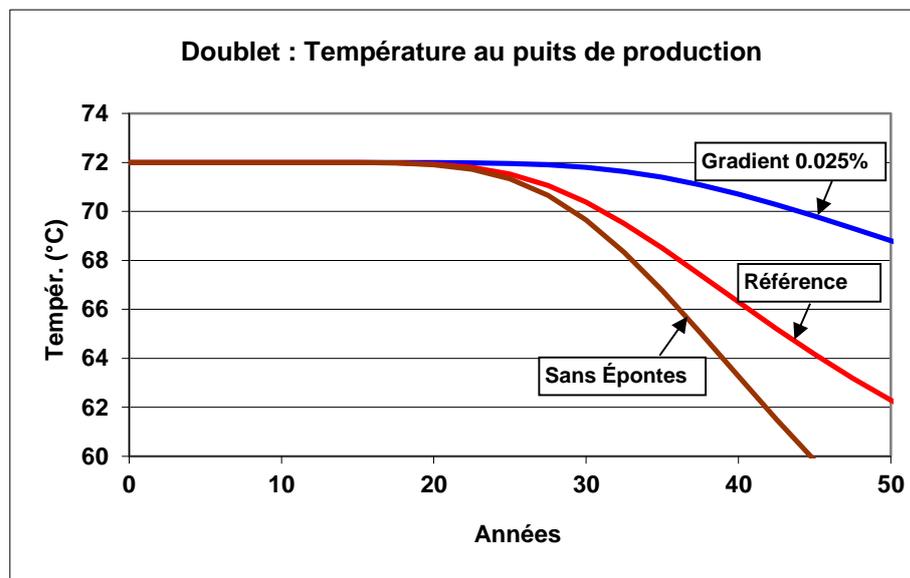


Figure 66 – Évolution de la température au puits de pompage (avec ou sans prise en compte des épointes, avec ou sans écoulement régional).

## 15.2. CALCULS AVEC LA METHODE APPROCHEE DE VINSOME

Dans le cas d'épentes thermiques homogènes de très grandes épaisseurs, le code de calcul MARTHE permet d'utiliser la méthode de Vinsome et Westerveld (1980) pour réaliser beaucoup rapidement les calculs. Cette méthode utilise une solution analytique approchée dans les épentes thermiques en supposant une épaisseur infinie. Elle fait intervenir une seule couche d'épente de chaque côté de l'aquifère.

Pour utiliser cette méthode, accessible avec un « profil d'utilisation avancée », on utilise le même maillage horizontal, mais avec uniquement deux couches :

- La couche aquifère de 50 m (de ½ épaisseur).
- Une couche d'épente analytique, de 10 m d'épaisseur, située sous l'aquifère.

Les substratums des deux couches sont donc respectivement aux altitudes -50 m et -60 m.

Les modifications à apporter sont :

**Paragraphe : « Température , effets Thermiques » :**

1 = Épentes thermiques simulées par une solution analytique (Vinsome)  
*ou bien, plus lisiblement :*  
**Vinsome** = Épentes thermiques simulées par une solution analytique (Vinsome)

Il faut aussi donner un indice d'épente thermique égal à 1 dans la couche n°2. Ceci peut être fait en sélectionnant le champ « **Indice d'épente thermique (solution analytique)** », par exemple dans le paragraphe « Initialisation avant calculs » (Figure 67).

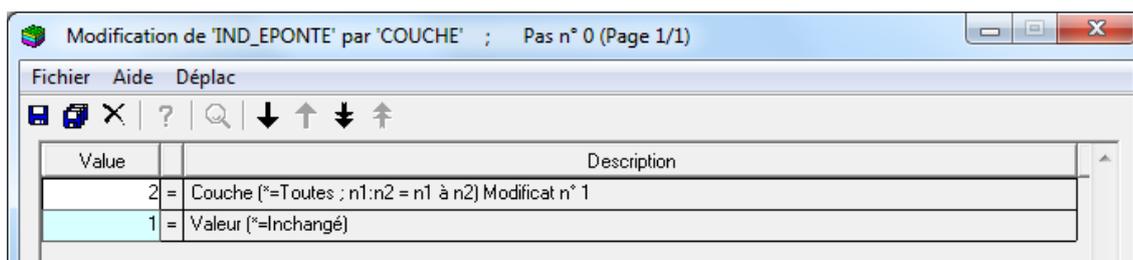


Figure 67 – Définition d'un « indice d'épente thermique analytique » dans la couche n°2.

Dans le paragraphe « Initialisation avant calculs », on obtient alors la ligne suivante :

/ IND\_EPONTE/COUCHE      C=      2V=      1;

On lance alors les calculs qui sont 4 fois plus rapides et utilisent nettement moins de mémoire. La Figure 68 montre que les résultats obtenus sont quasiment identiques.

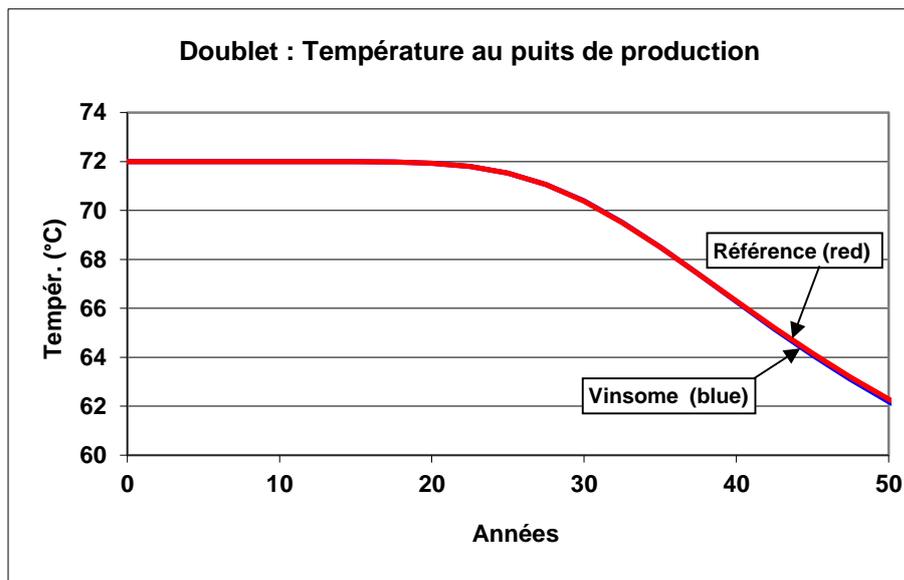


Figure 68 – Évolution de la température au puits de pompage : comparaison de la méthode approchée de Vinsome avec le calcul de référence avec 6 couches d'épontes.

### 15.3. ASSERVISSEMENT DE LA TEMPERATURE D'INJECTION A LA TEMPERATURE D'UN Puits DE PRODUCTION

La température d'un puits de réinjection peut être asservie à la température d'un puits de production. En effet, dans le cas d'une pompe à chaleur ou d'un réseau de distribution, la température de l'eau réinjectée est égale à la température de l'eau pompée diminuée d'une constante. La température des puits de production peut évoluer au cours du calcul, elle n'est donc pas connue *a priori*. Il est cependant possible, en régime transitoire, d'asservir la température d'un puits d'injection à la température d'un puits de production, c'est-à-dire d'un puits de pompage.

Pour définir un asservissement on procède de la manière suivante : On appuie sur l'icône , pour arriver au menu des paramètres non maillés. On sélectionne alors « Température pompage => injection ». (Figure 69).

On clique sur « Préprocesseur » puis « Créer un nouveau fichier 'Asservis. Température injection' ». On définit alors, Figure 70, les numéros de colonne, ligne, couche, gigogne du puits de production (ici colonne n°26, ligne n°1, couche n°1), puis numéros de colonne, ligne, couche, gigogne du puits d'injection (ici colonne n°51, ligne n°1, couche n°1), et enfin la différence de température, ici -50 °C, c'est-à-dire une injection à une température 50° C plus basse que la température du puits de production.

On sauvegarde alors ce fichier sous le nom « Doublet\_6\_50.t\_reinj ». Le nom de ce fichier sera donc dans le fichier projet. Il n’y a pas d’autre modification à effectuer.

La Figure 71 montre l’évolution de la température au puits de production qui diminue de 72° C au début à 54 °C après 100 ans. La température d’injection passe donc de 72° C - 50° C = 22 °C au début, à 4 ° C après 100 ans.

La Figure 72 montre la comparaison de la simulation de référence avec une température d’injection constante de 72°C – 50 = 22°C, avec la simulation avec asservissement. Il apparaît qu’à partir de 60 ans la simulation précise, avec asservissement, est plus basse. L’écart est de 2.2 °C après 100 ans.

Il est également possible de modifier les paramètres de l’asservissement à certains pas de temps, généralement l’écart de température (non représenté ici). On crée un autre fichier d’asservissement, par exemple « Asserviss\_apres\_40\_ans.t\_reinj ». On demande alors une modification de l’objet « TEMPER\_RE-INJ » par « FICHER ».

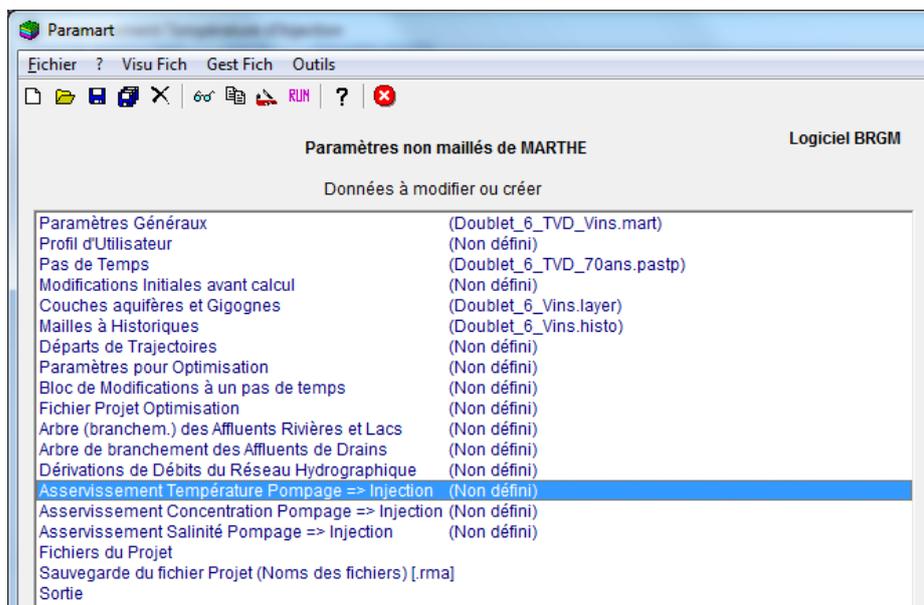


Figure 69 – Création d’un fichier d’asservissements de température.

Col_Pro	Lig_Pro	Couch_Pro	Gig_Pro	Col_Inj	Lig_Inj	Couch_Inj	Gig_Inj	Dif_Temp
26	1	1	0	51	1	1	0	-50

Figure 70 – Définition d’asservissements de température entre un puits de production et un puits d’injection.

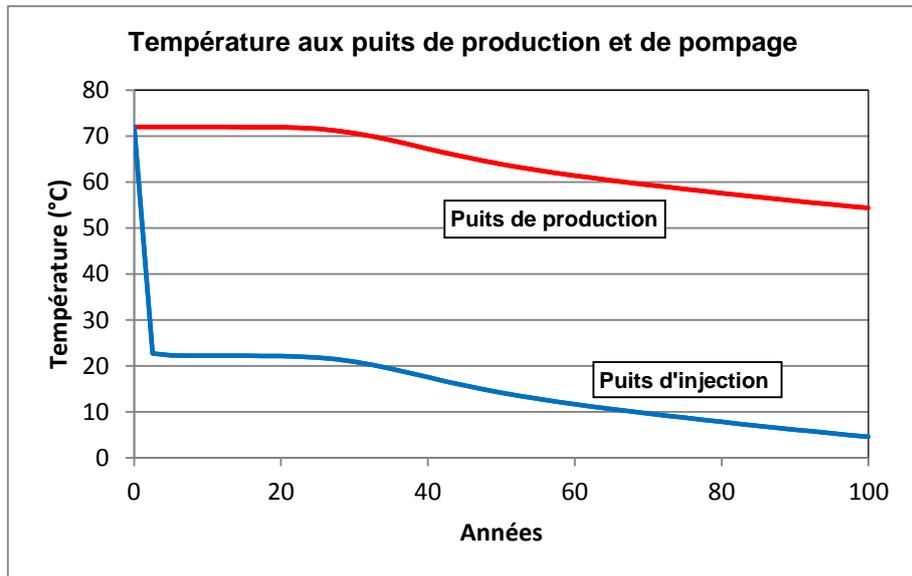


Figure 71 – Asservissements de température : évolution des températures de production et d'injection.

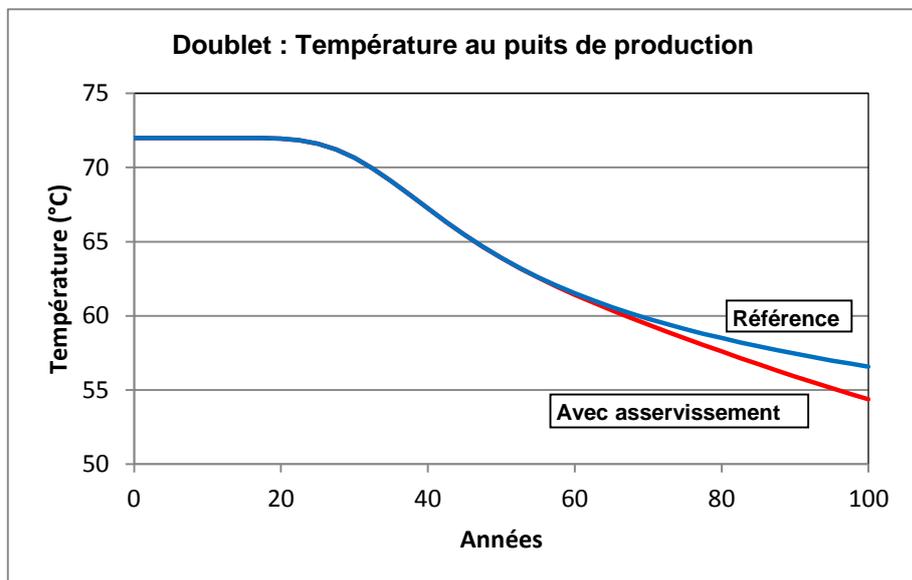


Figure 72 – Mise en évidence de l'influence de l'asservissement de la température d'injection.



## 16. Exemple n°7 : Écoulement sous un cours d'eau, à travers la Zone Non Saturée

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 (Figure 75).

Initialement tout le système, zone saturée et zone non saturée, a une charge hydraulique uniforme égale à +2 mètres. Le cours d'eau est alors instantanément rempli d'une hauteur d'eau de 2 mètres au-dessus du 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 hydraulique uniforme dans tout le domaine = 2 m
- Charge hydraulique dans le fond du lit et sur les berges (jusqu'à l'altitude 18 m) = 18 m

### Conditions aux limites :

- Charge hydraulique imposée dans la nappe (à 2 m) à l'abscisse 17 mètres de l'axe du cours d'eau, depuis l'altitude 0 m jusqu'à l'altitude 2 m.
- Charge hydraulique imposée (à 18 m) 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  $\theta$  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

## 16.1. 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 initialement 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 de 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 [Déf=1]  
**AMONT** = Pondéra. Perméab. Voisines (1=Géomét 3=Amont 4=Harmo 5=Arith Déf=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) (sec,min,heu, jou, déca, moi, ann)  
**Spécif** = Emmag. Captif lus (0=Hydrogéol. ; 1=Spécifiques ; 2=Compressibil.)  
**%** = Unité des Porosités = Teneurs en Eau en [-] [% si en %]

**Paragraphe : « Point origine et état des données » :**

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

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

**1** = Calcul en Zone Non Saturée [0=Non 1=Oui]  
**0.1** = Durée minimale du pas de temps de calcul interne  
**20** = Durée maximale du pas de temps de calcul interne  
**5** = Variation maximale 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=Bilan Glob Stock 2=Bilan Glob %]  
**50** = Succion Maximale <==> Assèchement maximal  
**1e-8** = Perméabilité Minimale (sécurité numérique)  
**Homog** = Loi Rétention [1=Homogr 2=Puissance 3=Logar. 4=Van-Gen 5=B&C etc]  
**Puiss** = Loi Perméa. [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.)

## 16.2. RÉSULTATS

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

La Figure 73 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 74). 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 74 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.

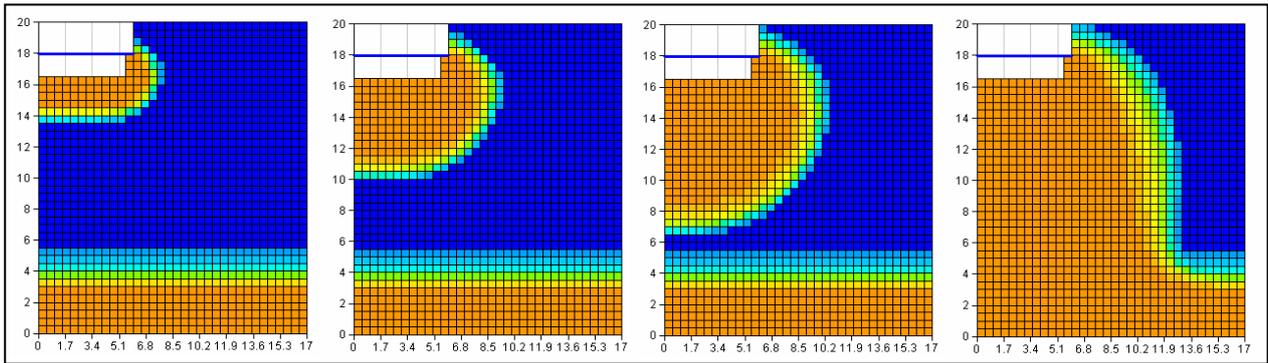


Figure 73 – Profil de teneur en eau après 10 h, 50 h, 100 h et 300 h (maillage de 0.5 m)

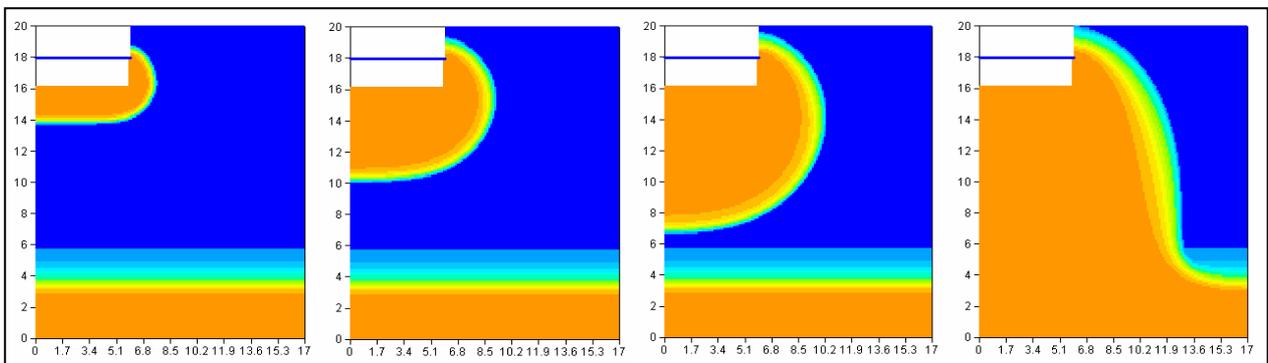


Figure 74 – Profil de teneur en eau après 10 h, 50 h, 100 h et 300 h (maillage de 0.125 m)

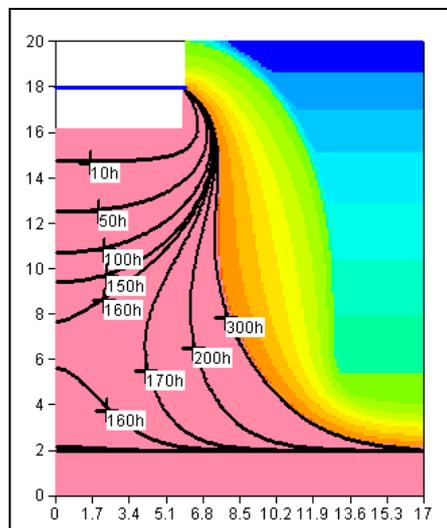


Figure 75 – Évolution au cours du temps de la surface libre (pression = 0)

### 16.3. CALCUL EN RADIAL

Il est quasi immédiat de refaire ce calcul en radial, c'est-à-dire de 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 76. La « bulle » de saturation est seulement un peu moins large, car elle diffuse en radial, donc dans les deux directions au lieu de diffuser uniquement dans la direction ox perpendiculaire à l'axe du cours d'eau.

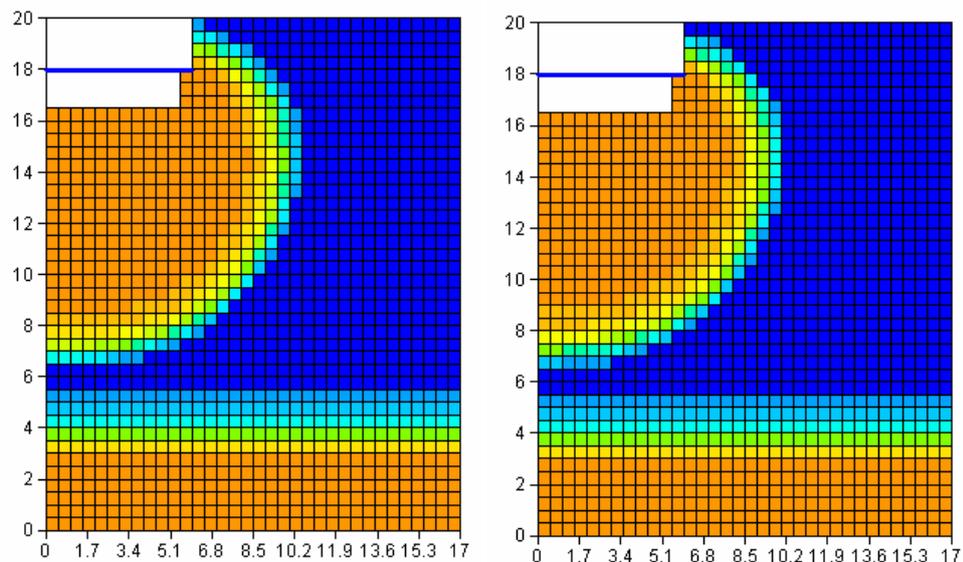


Figure 76 – Profil de teneur en eau après 100 h : à gauche canal, à droite bassin circulaire

#### 16.4. TRANSPORT DE MASSE EN ZONE NON SATURÉE

Il est possible de réaliser 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=Diff_Finies ; 1=Random_W ; 2=Caract=MOC ; 3=TVD]
1.5 = Dispersivité Longitudinale (m) [* = Spatialisée]
0.2 = Dispersivité Transversale (m) [* = Spatialisée]
```

On utilise donc la méthode de transport 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 réalisé 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 hydraulique 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] la sauvegarde du champ de concentration calculé à certaines dates.

On lance alors la simulation qui s'effectue en quelques secondes. La Figure 77 montre les concentrations calculées après 300 heures.

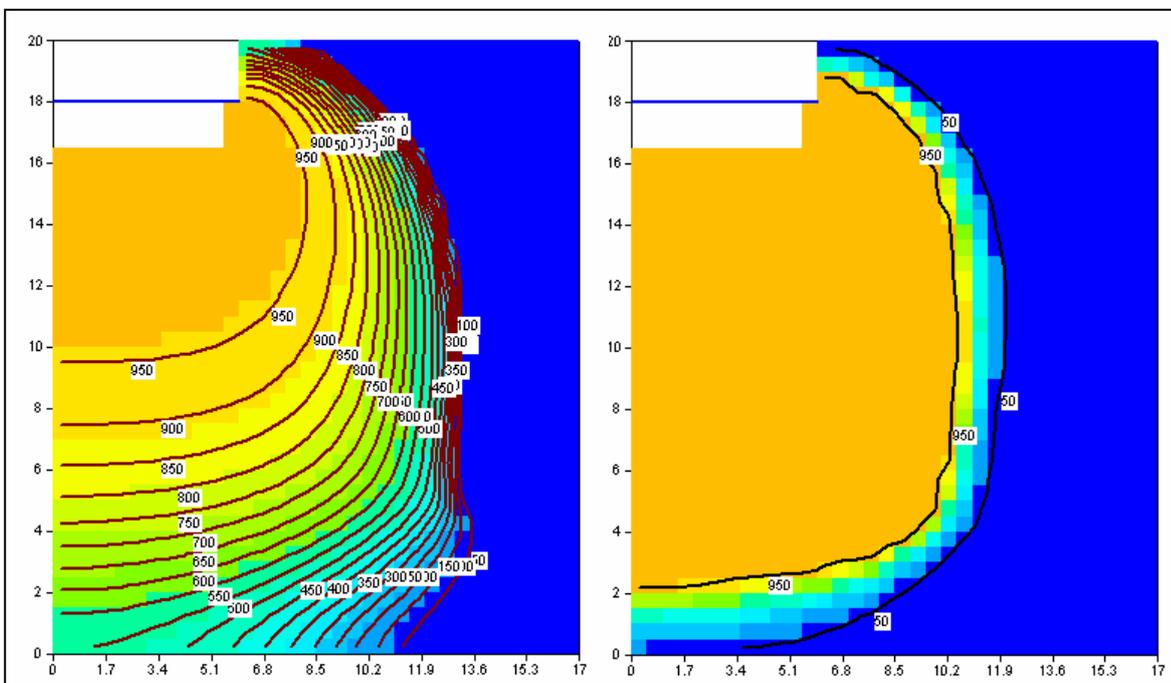


Figure 77 – Concentration après 300 h : à gauche avec dispersivité, à droite sans dispersivité.

## 17. Exemple n°8 : 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 hydraulique de 26 m est imposée sur la limite droite (et une charge hydraulique de 0 m au fond du cours d'eau, à gauche) comme le montre la Figure 78.

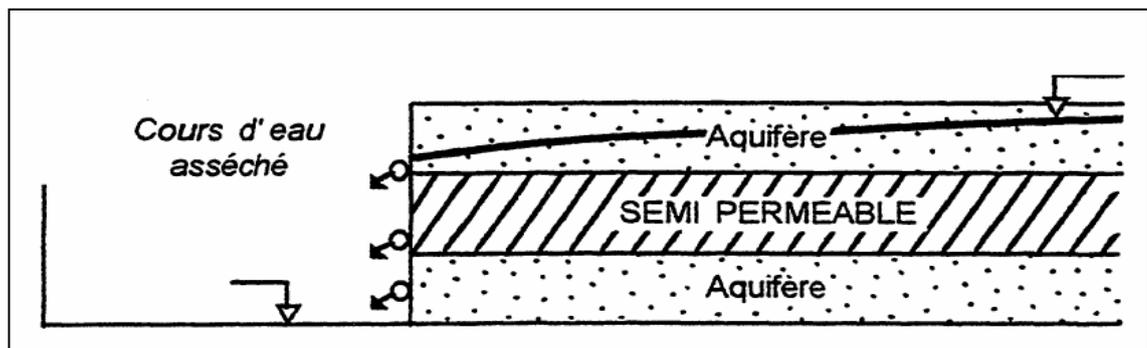


Figure 78 – Écoulement en zone non saturée dans un milieu hétérogène.

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 hydraulique imposée sur la limite droite : charge = 26 m

- Surface de suintement possible sur toute la limite gauche.
- Charge hydraulique 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  $\theta$  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) :  $\theta_S$  et teneur en eau résiduelle :  $\theta_R$ 
  - 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

**17.1. 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 mètres 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 champs 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 hydrauliques 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 (colonne=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 (colonne=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 de 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 [Déf=1]</p>
--

0 = Pondéra. Perméab. Voisines (1=Géomét 3=Amont 4=Harmo 5=Arith Déf=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 : Pesanteur 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)

Ce n'est pas dans ce paragraphe qu'on définit 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 généraux.

Dans le menu « Paramètres généraux » → Paragraphe « Initialisation avant calculs » → « Nouvelles Actions » → *Thème* « Zone Non Saturée, Eau salée, Multiphasique » → *Objet* « Paramètres des lois Non Saturé » (PARA\_NON\_SATU) » → Action « Modification par Zones (Géométriques) ». On définit alors 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=Puiss. 3=Logar 4=Van\_Gen 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\_Gen ,6=B&C, etc]  
**4** = Exposant de la loi de Perméabil. (sans objet si Loi expon ou Van\_Gen)

- Zone n°2 (semi-perméable) :

**2** = Numéro de la Zone de paramètres Zone Non Saturée  
**Homog** = Loi de Rétention [1=Homogr. 2=Puiss. 3=Logar 4=Van\_Gen 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\_Gen ,6=B&C, etc]  
**4** = Exposant de la loi de Perméabil. (sans objet si Loi expon ou Van\_Gen)

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

## 17.2. RÉSULTATS

Les calculs se terminent en quelques secondes et convergent parfaitement (écart de bilan interne des débits 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 79 présente le champ des teneurs en eau ainsi que la limite de saturation définie par l'isovaleur de pression nulle. Dans la partie gauche de la couche intermédiaire (semi-perméable), on remarque que 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 80 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.

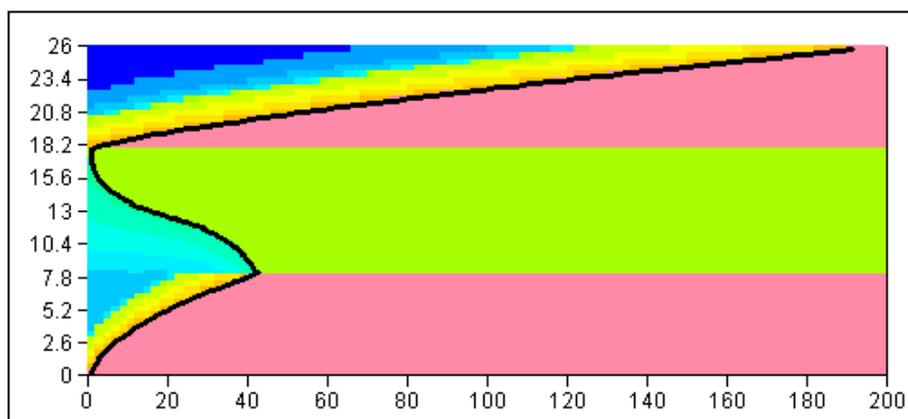


Figure 79 – Teneurs en eau. La ligne noire représente la limite de pression nulle, donc la surface libre.

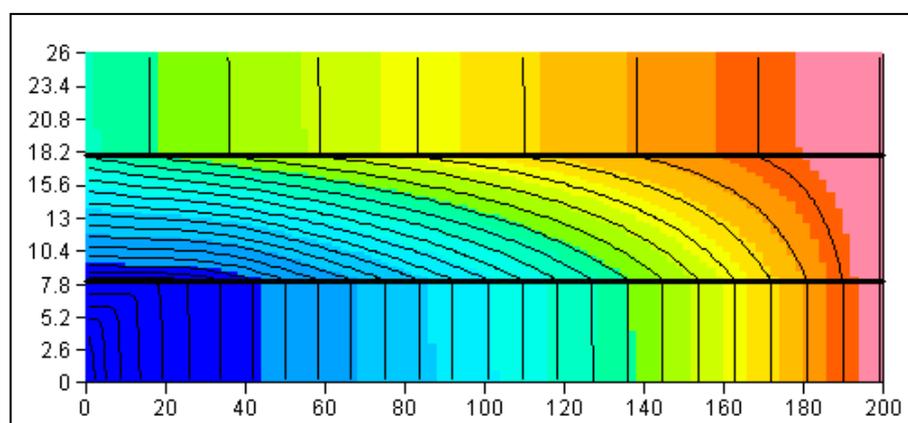


Figure 80 – Champ des charges hydrauliques et isovaleurs tous les 1 m de charge.



## 18. Exemple n°9 : Aquifère côtier avec intrusion saline

Cet exemple, montre comment réaliser un calcul en multiphasique pour prendre en compte un biseau salé dans une île située en mer. Le calcul est réalisé en triphasique car il y a 3 phases immiscibles : 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 (Figure 81). Le domaine comporte deux zones : la première zone est formée des bandes de 3 km de large le long des 4 côtés, la seconde est formée du carré de 8 km de côté restant. La seconde 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 :

### Densité :

- Densité de l'eau salée = 1.025

### Géométrie :

- L'île est formée d'un carré de 14 km de côté
- 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 :  $-2 \text{ m} / (1.025 - 1) = -80 \text{ m}$

**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 ;  $8 \cdot 10^{-5}$  m/s dans la zone n°2
- Coefficient d'emménagement spécifique =  $1 \cdot 10^{-4}$  m<sup>-1</sup>.
- Porosité = 10 %
- (Pour les calculs multiphasiques, comme pour les calculs en zone non saturée, 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.

**18.1. 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 m<sup>3</sup>/h aux ordonnées -312.5 m et +312.5 m
  - 50 m<sup>3</sup>/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 [Déf=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, jou, déca, moi, ann)  
**ann** = Unité de Temps (des Pas de modèle) (sec,min,heu, jou, déca, moi, ann)  
**km** = Unité des Coordonnées Horizontales des mailles en m  
**Spécif** = Emmag. Captif lus (0=Hydrogéol. ; 1=Spécifiques ; 2=Compressibil.)  
**%** = 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)

## 18.2. 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] la sauvegarde sur fichier des champs calculés de « CHARGE », « SATURAT », « INTERFACE ». La Figure 81 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 82).

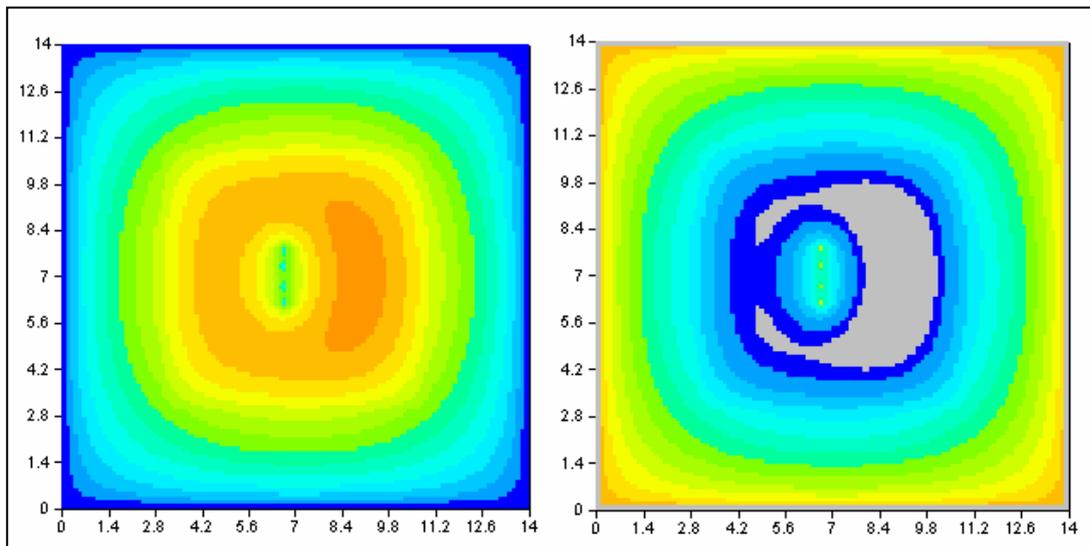


Figure 81 – À gauche : charges d'eau douce. À droite : altitude de l'interface salée.

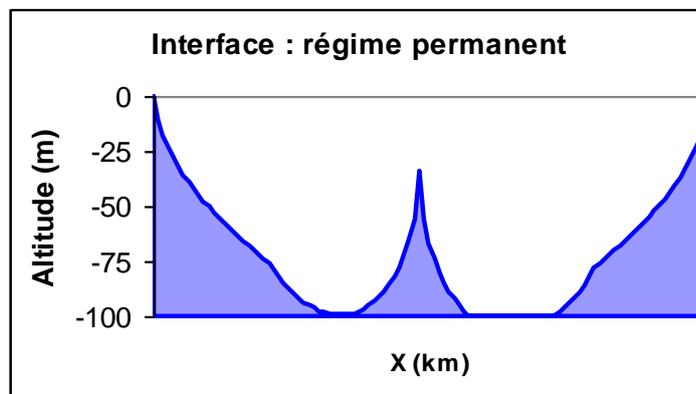


Figure 82 – Vue en coupe Ouest-Est de l'altitude de l'interface salée (ordonnée = 0 km).

### 18.3. 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 (instantanément) 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 [Déf=1]  
**Transit** = Régime de l'Hydrodynamique [0=Transitoire ; 1=Permanent]

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

2 = Durée minimale du pas de temps de calcul interne  
 25 = Durée maximale du pas de temps de calcul interne  
 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=Bilan 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 83 montre l'interface salée calculée 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.

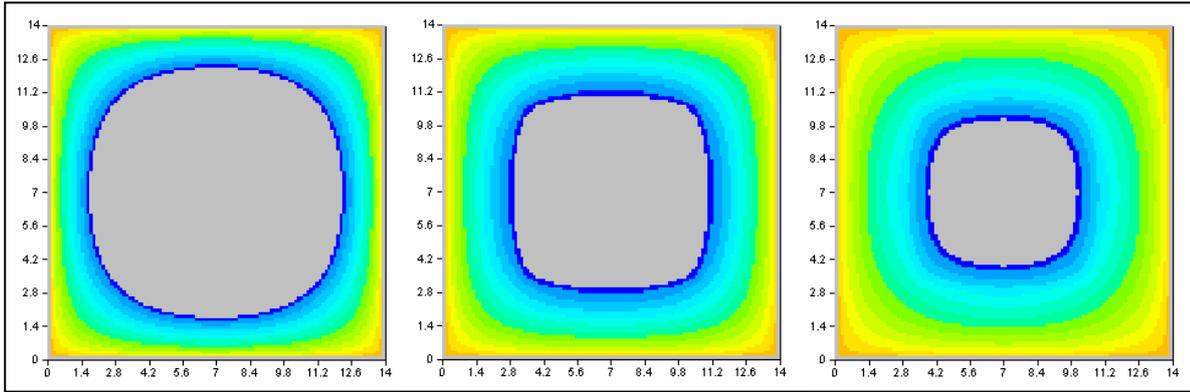


Figure 83 – Altitude de l'interface eau douce-eau salée à  $t=0$ ,  $t=50$  ans et  $t=300$  ans.

## 19. Exemple n°10 : Hydrosystème multicouche avec rivières

Cet exemple, montre comment réaliser la simulation d'un système multicouche avec un réseau hydrographique formé de plusieurs affluents de rivières. On commence par une modélisation avec des cotes de rivière fixées. Dans une deuxième phase, les cotes de rivière sont liées aux débits de rivière par la formule de Manning-Strickler. La simulation des niveaux et débits de nappe et de rivières est d'abord réalisée en régime permanent, puis en régime transitoire pour prendre en compte la propagation de crue résultant d'un fort événement de pluie. Dans une troisième phase, on modélise le transport couplé dans la nappe et le réseau hydrographique pour simuler les conséquences d'une injection de polluant dans un tronçon de rivière.

Les caractéristiques du système sont les suivantes :

### Géométrie :

- Le système modélisé est formé de 3 couches aquifères.
- La couche n°1 affleure au Nord, la couche n°2 affleure dans la partie centrale et la couche n°3 affleure au Sud (Figure 84 et Figure 85).
- En plan l'hydrosystème a la forme d'un rectangle de 102 km dans la direction Ouest-Est (de l'abscisse -51 à +51) sur 300 km dans la direction Sud-Nord (de l'ordonnée 0 à 300).
- L'épaisseur totale de l'aquifère est de 200 m (de la cote -100 à + 100 m).
- Le substratum de la couche n°1, quand elle existe, est à la cote -33.33 m, celui de la couche n°2, quand elle existe, est à la cote -66.66 m et celui de la couche n°3 est à la cote -100 m.
- La cote topographique est uniforme, à la valeur +100 m.

### Conditions à la limite :

- La seule condition à la limite est une charge imposée égale à 0 m dans la maille la plus aval, c'est-à-dire dans la 3<sup>ème</sup> couche, au point de coordonnées  $x = -2$  km,  $y = + 1$  km.

### Paramètres hydrodynamiques :

- Perméabilité des aquifères =  $10^{-4}$  m/s à  $10^{-3}$  m/s selon les simulations
- Coefficient d'emmagasinement spécifique =  $1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ .

- Coefficient d'emmagasinement libre = 5 %
- Porosité = 5 %

**Réseau hydrographique :**

- Le réseau hydrographique est constitué de 6 affluents numérotés 10, 20, 30, 40, 50 et 60. L'écoulement est globalement dans la direction Nord-Sud (Figure 86).
- Les coordonnées des extrémités des affluents sont données dans le Tableau 4.
  - Largeurs des cours d'eau : elles sont données dans le Tableau 4.
  - Altitude de la cote du fond du lit = 0 m.
  - Altitude (initiale) de l'eau dans la rivière = 4 m.
  - Épaisseur du lit et des berges = 0.1 m
  - Perméabilité du lit et des berges =  $10^{-6}$  m/s
  - Rugosité du lit (« n » de Manning-Strickler) = 0.04
  - Pente du lit (pour Manning-Strickler) =  $10^{-4}$ .
- Trois zones de sol sont définies : la zone n°5 dans le tiers supérieur (ordonnées de 200 à 300 km), la zone n°10 au milieu (ordonnées de 100 à 200 km) et la zone n°15 dans le tiers inférieur (ordonnées de 0 à 100 km).

**Maillage :**

- On choisit un maillage régulier avec 51 colonnes de 2 km de largeur et 150 lignes de 2 km de hauteur.
- Trois couches d'épaisseurs variables.

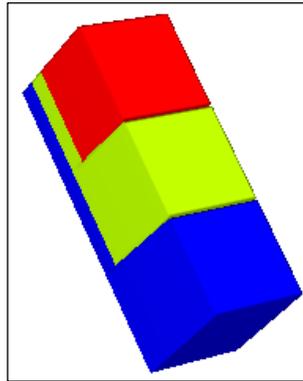


Figure 84 – Hydrosystème multicouche avec rivières.

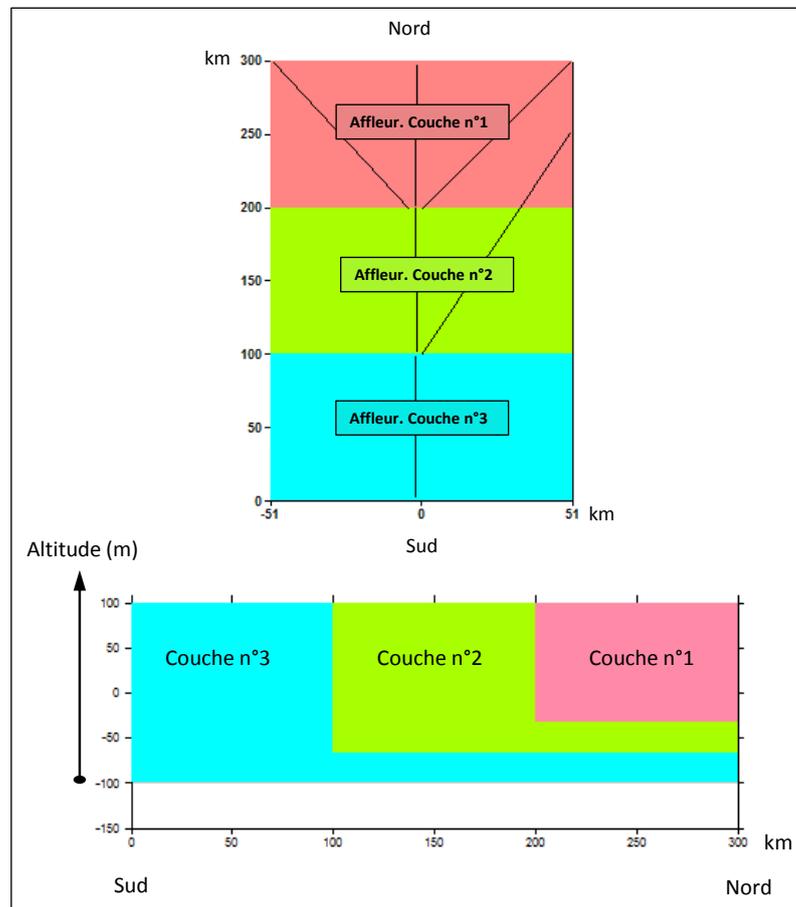


Figure 85 – Géométrie de l'hydrosystème multicouche avec rivières.  
En haut : vue en plan ; en bas : vue en coupe verticale.

N° Affluent :	10		20		30		40		50		60	
Départ (km)	-2	297	-2	199	-2	99	50	299	-50	299	50	251
Arrivée (km)	-2	201	-2	101	-2	3	0	199	-4	199	0	99
Largeur (m)	50		100		100		50		50		50	

Tableau 4 - Coordonnées en km des extrémités des 6 affluents, et largeurs en m.

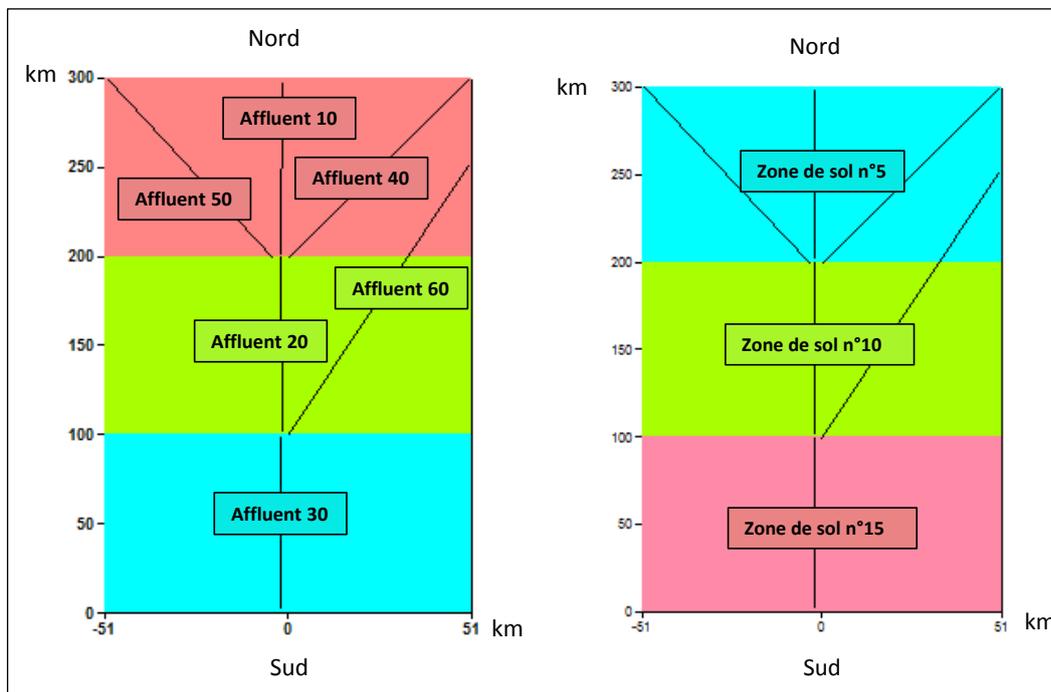


Figure 86 – Description du réseau hydrographique et des zones de sol.

### 19.1. CRÉATION DU MAILLAGE

- Titre du projet : **Didact\_Riv\_3D** ;
- Coin Sud-Ouest : X = **-51** ; Y = **0** ; (km)
- Coin Nord-Est : X = **+51** ; Y = **300** ; (km)
- Largeur des colonnes = **2** ; Hauteur des lignes = **2** ; (km)
- Nombre de couches = **3** ;

- Valeur de perméabilité par défaut = 1 ;
- Cote topographique = **100** ;(m)
- Épaisseur (de chaque couche) = **60**. (m)

Pour avoir une représentation plus agréable, avec un rectangle un peu moins allongé, on utilise l'icône  « Distorsion Y / X pour vues en plan » et on affecte un facteur égal à 0.5.

On sélectionne alors le champ du substratum et on lui affecte les cotes suivantes :

- Couche n°1 : **-33.33** ; Couche n°2 : **-66.66** ; Couche n°3 : **-100**.

### Définition de l'extension des couches n°1 et n°2 :

Bien qu'il eût été plus pratique de définir plus tard ces extensions de couches, on le fait ici car c'est plus didactique.

Pour faire affleurer la couche n°2 et la couche n°3 là où elles doivent affleurer, on procède de la manière suivante :

- On sélectionne le champ des perméabilités.
- Couche n°1 : on sélectionne les lignes des 2/3 inférieur du domaine (lignes 51 à 150) et on leur affecte une valeur de perméabilité égale à 0.
- Couche n°2 : on sélectionne les lignes du 1/3 inférieur du domaine (lignes 101 à 150) et on leur affecte une valeur de perméabilité égale à 0.

## 19.2. DEFINITION DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE

### Définition des numéros d'affluent :

On crée le nouveau champ « **Numéros d'Affluent rivières** » dans le thème « Réseau hydrographique, Drains, Lacs » et on se place sur la couche n°1 car le réseau hydrographique est défini dans la couche de surface, c'est-à-dire la couche n°1.

Pour voir apparaître toutes les mailles de cette couche, y compris les mailles non aquifères, c'est-à-dire ayant une perméabilité égale à 0, on choisit l'option « **Mailles de l'extension globale du modèle** » (ou « Toutes les mailles de la couche ») dans le menu « Vue ».

On sélectionne alors l'icône  « Créer une courbe (ouverte) ». On dessine alors successivement les affluents :

- Affluent n°10 : du point (x=-2, y=297) au point (x=-2, y=201), c'est-à-dire de (col. = 25, ligne = 2) à (col. = 25, ligne = 50).
- Affluent n°20 : du point (col. = 25, ligne = 51) au point (col. = 25, ligne = 100).

- Affluent n°30 : du point (col. = 25, ligne = 101) au point (col. = 25, ligne = 149).
- Affluent n°40 : du point (col. = 51, ligne = 1) au point (col. = 26, ligne = 51).
- Affluent n°50 : du point (col. = 1, ligne = 1) au point (col. = 24, ligne = 51).
- Affluent n°60 : du point (col. = 51, ligne = 25) au point (col. = 26, ligne = 101).

Pour faire ce dessin, le plus simple est de sélectionner auparavant les points de début et de fin. Ils apparaissent en rouge et il est facile de tracer le segment. Pour chaque affluent, on clique sur le point du début, puis on double-clique sur le point de fin. On voit alors se dessiner un trait représentant l'affluent. On donne alors successivement comme nom de polygone « Affluent\_10 », puis « Affluent\_20 » etc.

Le dessin apparaît dans la couche graphique de nom « Dessin » dans le menu de « Gestion des polygones » auquel on accède par l'icône .

On souhaite conserver le dessin des affluents pour les visualiser ultérieurement. Dans ce but, dans ce menu « Gestion des polygones », à droite du polygone « dessin », on appuie sur le bouton « Enregistrer » et on mémorise ces dessins d'affluents dans un fichier de nom « Didact\_Riv\_3D\_Rivieres.blm ».

Avant de commencer, on désélectionne toutes les mailles qui pouvaient avoir été sélectionnées auparavant en cliquant sur l'icône .

Pour affecter les numéros d'affluents, on utilise l'icône  « Sélection des mailles sur une courbe ». On clique sur le dessin d'un affluent (ou à proximité immédiate du dessin). On commence par exemple par l'affluent n°10. Toutes les mailles traversées par cet affluent sont sélectionnées. On leur affecte la valeur 10.

On fait la même opération avec l'affluent n°20, mais les mailles de la couche n°1 qui sont traversées par cet affluent n°20 ne se sélectionnent pas car ce ne sont pas des mailles aquifères. En effet, c'est la couche n°2 qui affleure dans cette zone. Il faut donc « donner accès aux mailles extérieures au domaine (aquifère) » en cliquant sur l'icône



, située sur la barre de droite. On peut maintenant sélectionner les mailles traversées par l'affluent n°20. On procède de la même manière pour les affluents n°30 à n°60.

### Définition des numéros de tronçon :

Les « numéros de tronçon » sont des numéros d'ordre de parcours dans un affluent. Ces numéros d'ordre doivent être croissants, dans chaque affluent, depuis son extrémité amont jusqu'à son extrémité aval.

On crée le nouveau champ « **Numéros de Tronçon rivières** », dans le thème « Réseau hydrographique, Drains, Lacs » et on se place sur la couche n°1.

Pour affecter les numéros d'affluents, on utilise l'icône  « Interpole ou numérote des valeurs le long d'une courbe », située sur la barre du haut. On clique sur le dessin d'un affluent qui se dessine alors en rouge. On choisit alors « Numérotation » puis l'« incrément de numérotation », c'est-à-dire le « pas » de numérotation. Par défaut, la valeur de l'incrément est égale à 1, mais on peut choisir 2 par exemple, pour le cas où on voudrait ajouter ultérieurement des points intermédiaires. On choisit « Numéroté à partir du Premier point » puisqu'on voit que les coordonnées affichées sont bien les coordonnées du tronçon amont (sinon on aurait choisi « Dernier point »). On clique « OK » et les mailles situées sur l'affluent choisi sont sélectionnées et sont numérotées automatiquement. Par exemple pour l'affluent n°10, les numéros vont de 1 à 97 de 2 en 2. On fait la même opération successivement pour tous les affluents.

On n'oublie pas de sauvegarder régulièrement le travail.

### **Définition de l'arbre de branchement des affluents.**

Le branchement des affluents est défini par l'« Arbre de branchement des affluents de rivières ». Pour chaque affluent on donne le numéro, unique, de l'affluent qui est situé à son aval. Par convention quand un affluent n'a pas d'aval, c'est-à-dire quand il constitue un exutoire, on définit que son affluent aval est l'affluent n°0.

Pour créer l'arbre de branchement, on utilise l'icône , pour accéder au menu des paramètres non maillés. On sélectionne alors « Arbre de branchement des affluents de rivière » (Figure 87).

On clique sur « Préprocesseur » puis « Créer un nouveau fichier 'Arbre affluents Rivières/Lacs' ». On définit alors, Figure 88, les numéros aval des 6 affluents.

On sauvegarde alors ce fichier sous le nom « Didact\_Riv\_3D.arb\_r »

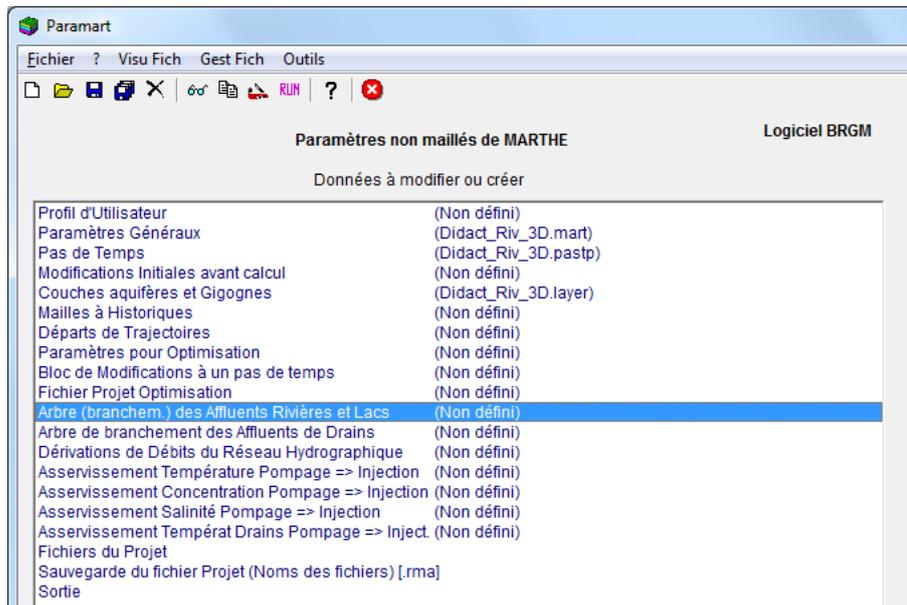


Figure 87 – Création d'un fichier d'arbre de branchement des affluents de rivière.

The screenshot shows the 'Numéro de l'Affluent Aval' dialog box. It contains a table with two columns: 'Affluent' and 'Affluent Aval'. The table has the following data:

Affluent	Affluent Aval
10	20
40	20
50	20
20	30
60	30
30	0

Figure 88 – Définition de l'arbre de branchement des affluents de rivière.

### Définition du profil d'utilisateur.

Comme, après une première simulation en régime permanent, on va réaliser ultérieurement des simulations en régime transitoire, avec transport de masse, on définit un « profil utilisateur » en sélectionnant, c'est-à-dire en donnant la valeur « 1 », aux options suivantes :

- 1 = Régime Transitoire.
- 1 = Transport de masse classique.
- 1 = Rivières, Drains, Lacs (1=Rivières et Lacs ; 2=Drains ; 3=tous les 3).

Et on sauvegarde ce profil sous le nom « Didact\_Riv\_3D.prfu »

Après avoir sauvegardé le projet on retourne dans WinMarthe *sensu stricto*.

### 19.3. DEFINITION DES AUTRES CHAMPS

#### Définition des « Zones de sol » :

Les « Zones de sol » sont des zones dans lesquelles les paramètres hydrologiques (« réserve utile du sol », « temps de percolation » etc.) sont uniformes. On peut également, dans les cas simples, les utiliser pour y introduire des flux de pluie ou des flux d'infiltration.

On a vu que dans notre exemple il faut affecter le numéro de zone 5 dans les lignes n°1 à n°50, le numéro 10 dans les lignes n°51 à n°100 et le numéro 15 dans les lignes n°101 à n°150.

Dans WinMarthe on crée le nouveau champ « **Zones de sol** » et on se place dans la couche n°1 car les données de sol, comme les données de topographie ou de réseau hydrographique, sont définies dans la couche de surface, c'est-à-dire la couche n°1.

On vérifie que l'option « **Mailles de l'extension globale du modèle** » est bien sélectionnée dans le menu « Vue », et que l'icône « **Donner accès aux mailles extérieures au domaine (aquifère)** » est bien activée.

On sélectionne alors, avec le rectangle élastique, les lignes n°1 à n°50 et on affecte la valeur 5 aux mailles sélectionnées. De la même manière on affecte la valeur 10 aux lignes n°51 à n°100 et la valeur 15 aux lignes n°101 à n°150.

#### Définition de « Zones géométriques » :

Pour affecter facilement les valeurs de perméabilité, on définit des numéros de « Zones de géométrie » égales aux numéros de couche des mailles aquifères.

Dans ce but on crée le nouveau champ de « Zones géométriques ».

On retire l' « **Accès aux mailles extérieures au domaine (aquifère)** » en cliquant sur l'icône correspondante.

On sélectionne alors les mailles de la couche n°1, par l'icône , et on leur affecte la valeur 1, puis les mailles de la couche n°2, et on leur affecte la valeur 2, et enfin les mailles de la couche n°3, et on leur affecte la valeur 3.

#### Définition de la maille à charge imposée

La charge est imposée à 0 mètres dans la maille la plus aval, c'est-à-dire dans la 3<sup>ème</sup> couche, au point de coordonnées  $x = -2$  km,  $y = + 1$  km. On sélectionne le champ

« Débits » puis on choisit l'option « Aller à x/y/couche », dans le menu « Outils ». On donne les coordonnées  $x = -2$ ,  $y = 1$  et couche = 3, et on arrive à la maille correspondante dans laquelle on fixe une valeur de débit égale à 9999 pour imposer la charge.

#### 19.4. SIMULATION EN REGIME PERMANENT

On réalise un premier calcul en régime permanent, d'abord avec des cotes de l'eau constantes dans la rivière, puis avec la formule de Manning-Strickler reliant la hauteur d'eau dans la rivière à son débit. Pour ce régime permanent on considère un flux d'infiltration égal à 20 mm/mois (c'est-à-dire 240 mm/an).

##### Définition des paramètres généraux.

Par l'icône , on accède au menu des paramètres non maillés. On sélectionne alors « Paramètres généraux » et on crée un nouveau fichier.

##### Paragraphe : Contrôle de la Résolution Hydrodynamique :

<p>0 = 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)  20 = Nombre d'itérations Internes pour le solveur [Déf=10]  Perman = Régime de l'Hydrodynamique [0=Transitoire ; 1=Permanent]</p>
---

##### Paragraphe : Unités des données :

<p>= Unité des Hauteurs Hydroclimat. (Pluie, ETP, Infilt., Rechar.) en mm  Moi = Unité des Durées Hydroclimat. (sec, min, heu, jou, déca, moi, ann)  km = Unité des Coordonnées Horizontales des mailles en m  = Unité des Débits de Rivières (Déf = Unité générale des débits)</p>
---

##### Paragraphe : Réseau Hydrographique, Drains, Lacs :

<p>1 = Couplage avec un Réseau Hydrographique [0=Non ; 1=Oui]  15 = Nombre maximal d'itérations pour le calcul des Débits Rivières</p>
--

Les champs qui sont uniformes, ou uniformes par zone ou par affluent, vont être définis simplement par le préprocesseur dans le paragraphe « Initialisation avant calcul » :

- Perméabilité de l'aquifère :  $10^{-4}$  m/s dans les zones n°1 à n°3, c'est-à-dire dans les mailles aquifères des couches n°1 à n°3.
- Longueur de tronçon de rivière = 2 km dans tout le domaine. (Ça ne pose pas de problème de définir des longueurs là où il n'y a pas de rivières. Ces données seront ignorées).
- Largeurs de tronçons de rivières 50 m dans les affluents n°10, 40, 50 et 60 et largeur de 100 m dans les tronçons n°20 et n°30. Attention : les largeurs, comme

les longueurs, sont en unité de coordonnées horizontales de mailles, donc ici en km. On donne donc respectivement les largeurs 0.05 et 0.1 km.

- Cote absolue de l'eau dans les tronçons de rivière : 4 mètres dans tous les tronçons (« T = \* ») des affluents n°1 à 60 « A = 1:60 »)
- Cote absolue du fond de la rivière : 0 m dans tous les tronçons.
- Épaisseur du lit : 0.1 mètre dans tous les tronçons.
- Perméabilité du lit et des berges de rivière :  $10^{-6}$  m/s dans tous les tronçons.

**Paragraphe : Initialisation avant calculs :**

/PERMEAB/ZONE_GEO	Z=	1:3	V=	1e-4;
/LONG_RIVI/GRILLE	N:	=2		
/LARG_RIVI/TRONCON	A=	10T=	*V=	5e-2;
/LARG_RIVI/TRONCON	A=	40T=	*V=	5e-2;
/LARG_RIVI/TRONCON	A=	50T=	*V=	5e-2;
/LARG_RIVI/TRONCON	A=	60T=	*V=	5e-2;
/LARG_RIVI/TRONCON	A=	20T=	*V=	0.1;
/LARG_RIVI/TRONCON	A=	30T=	*V=	0.1;
/HAUTEU_RIVI/TRONCON	A=	1:60 T=	*V=	4;
/FOND_RIVI/TRONCON	A=	1:60 T=	*V=	0;
/EPAI_LIT_RIV/GRILLE	N:	=0.1		
/PERM_LIT_RIVI/GRILLE	N:	=1e-6		

**Définition du flux d'infiltration et des champs à sauvegarder.**

Après avoir sauvegardé le fichier des « Paramètres généraux », on sélectionne « Pas de temps » et on crée un nouveau fichier. Avec le préprocesseur on définit alors uniquement le pas de temps n°0, c'est-à-dire le régime permanent.

On définit un flux d'infiltration de 20 mm/mois dans toutes les « zones climatiques ». Le flux est bien en mm/mois puisque, dans le paragraphe « Unités des données » du fichier des « paramètres généraux », l'unité de hauteurs hydroclimatiques est bien restée par défaut en mm, et l'unité de durées hydroclimatiques a été fixée à « Moi ».

Les « zones climatiques » sont par défaut les « zones de sol », puisque dans le paragraphe « Hydroclimatologie » du fichier des « paramètres généraux » on a laissé par défaut à 0 la ligne :

« 0=Type de Zones pour les Pluie, ETP, Rechar., [0=Zones de Sol ; 1=Zones Météo] ».

On demande en fin de calcul la sauvegarde :

- Du champ des charges calculées
- Du champ des débits d'aquifère aux limites

- Du champ des débits de rivière

```

*** Début de la simulation   à la date :           0; ***
/FLUX_INFILTR/ZONE_CLIM  Z=      *V=      20;
/CHARGE/EDITION          I= 1;
/DEBIT_LIMITES/EDITION   I= 1;
/DEBIT_RIVI/EDITION      I= 1;L= 0;F= 0;B= 0;
/*****/***** Fin de ce pas

```

### Lancement des calculs.

On lance alors les calculs qui se terminent en quelques secondes.

Le réseau hydrographique est décrit dans le fichier « reseau\_hydrog.txt ». Ce fichier contient davantage de détails si on a demandé l' « Écriture sur listing de toutes les données ». C'est ce fichier qu'il faut examiner si des erreurs dans le réseau hydrographique ont été détectées.

### Résultats de la simulation en régime permanent à hauteur d'eau fixe dans la rivière.

Le fichier « bilandeb.txt » montre que les calculs ont parfaitement convergé.

Bilans des débits des aquifères (en unité de débits, c'est-à-dire ici en m<sup>3</sup>/s) :

```

- Bilan (aquifères) en unités de Débit : Pas de temps n° 0 - t= 0.000 -----
Débits Sortant /Charges Imposées =                               -0.6816
Débit de Recharge/Évaporation   =      232.717
Débit de Débordement/Suintement =                               -85.120
Débits Rivière -> Nappe         =      0.000      -146.916 (  -146.916 )
-----
d'où une convergence interne à   :  3.462E-08 % (d'erreur)

```

La recharge est égale à 232.7 m<sup>3</sup>/s (77.6 m<sup>3</sup>/s sur chaque couche), dont 85.1 m<sup>3</sup>/s débordent et ruissellent vers le réseau hydrographique et 146.9 m<sup>3</sup>/s sont drainés par les rivières. Il reste 0.7 m<sup>3</sup>/s qui s'écoulent à l'aval de la nappe, par la maille à charge imposée.

Bilans des débits du réseau hydrographique (en unité de débits) :

```

Bilan du réseau Hydrographique en unités de débit : Pas de temps n°0 - t= 0.00
      Entrant      Sortant      Net
Venant de la Nappe =  146.916      0.000      146.916
Débordement Nappe =    85.120

```

Exutoire	=	-232.036
<hr/>		
Écart de bilan global = 5.144E-07 (Entrées/sorties)		

## 19.5. SIMULATION EN REGIME PERMANENT AVEC UNE LOI HAUTEUR – DEBIT SELON LA FORMULE DE MANNING-STRICKLER

Pour prendre en compte une loi hauteur-débit selon la formule de Manning-Strickler, les ajouts sont les suivants :

### Paragraphe : Réseau Hydrographique, Drains, Lacs :

1	=	Couplage avec un Réseau Hydrographique [0=Non ; 1=Oui]
15	=	Nombre maximal d'itérations pour le calcul des Débits de Rivières
1	=	Loi Hauteur(Débit) Rivière [0=Non ; 1=Manning_Large ; 2=Manning]
0.3	=	Coefficient de sous-Relaxation pour les Débits de Rivières [Déf=1]

On sélectionne une « Loi Hauteur-Débit » et suite à un premier calcul qui ne converge pas, compte tenu des non-linéarités, on introduit un coefficient de sous-relaxation égal à 0.3.

### Paragraphe : Initialisation avant calculs :

On introduit une rugosité (paramètre « n » de Manning) égale à 0.04 dans tous les tronçons de tous les affluents, et une pente du lit de la rivière égale à  $5 \cdot 10^{-4}$ .

/RUGOS_RIVI/TRONCON	A=	1:60	T=	*V=	4e-2;
/PENDE_RIVI/TRONCON	A=	1:60	T=	*V=	5e-4;

Pour obtenir les cotes de l'eau et les profondeurs d'eau calculées dans les tronçons de rivière, on ajoute dans le fichier des « Pas de temps » :

/HAUTEU_RIVI/EDITION	I=	1;P=	1;
----------------------	----	------	----

### Lancement des calculs.

On lance alors les calculs qui se terminent en quelques secondes. On vérifie, dans le fichier « bilandeb.txt » qu'ils ont parfaitement convergé.

### Résultats de la simulation en régime permanent avec une loi hauteur-débit selon la formule de Manning-Strickler.

Les bilans d'eau sont quasi inchangés. La Figure 89 montre le champ des charges hydrauliques calculées. Le champ des hauteurs d'eau calculées est également écrit dans le fichier « chasim.out ». La visualisation de ce champ montre que les

profondeurs d'eau dans les rivières varient d'environ 0 m à l'amont du réseau à 2.3 m à l'aval.

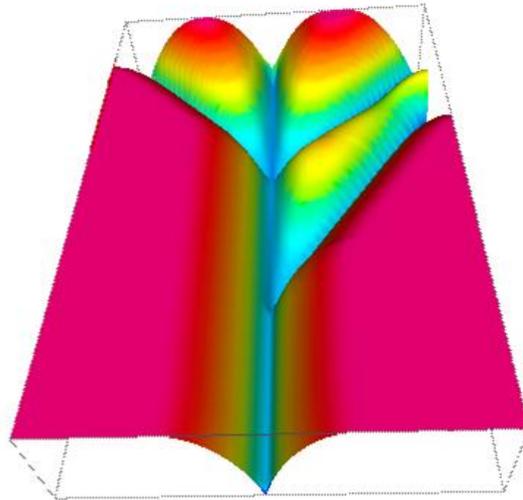


Figure 89 – Hydrosystème multicouche avec rivières : charges hydrauliques calculées.

## 19.6. SIMULATION D'UNE CRUE EN REGIME TRANSITOIRE

- On réalise d'abord un calcul en régime permanent avec un flux d'infiltration égal à 20 mm/mois sur tout le domaine.
- Puis on suppose qu'après 5 jours une très forte pluie de 3000 mm/mois survient pendant une durée de 1 jour, c'est-à-dire de la date  $t = 5$  j à  $t = 6$  j dans la zone de sol n°5, c'est-à-dire sur le 1/3 nord du domaine. Ce flux de pluie de 3000 mm/mois pendant 1 jour correspond à une hauteur de pluie de 98.56 mm. On suppose que pendant cette journée les deux autres zones continuent à recevoir un flux de pluie de 20 mm/mois, soit une hauteur de pluie de 0.66 mm.
- À partir du jour suivant, c'est-à-dire à partir de  $t = 6$  jours, le flux de pluie est égal à 0 sur tout le domaine.

On réalise une simulation pendant une période de 50 jours.

Pour cette simulation on utilise une loi hauteur – débit dans la rivière suivant la formule de Manning-Strickler. On s'intéresse en particulier à l'évolution des débits et des hauteurs d'eau dans la rivière ainsi qu'à l'évolution des charges dans la nappe à proximité de la rivière.

### Définition des paramètres généraux.

Paragraphe : **Sauvegardes et contrôles :**

On demande la sauvegarde de l'historique du bilan hydroclimatique.

Flux =Sauvegarde des Historiques de Bilans Hydroclimat. (1=Flux ; 2=Débit)

Paragraphe : **Pas de Temps et sous pas de temps :**

On demande 5 sous pas de temps par pas de temps de modèle pour reproduire finement le passage de la crue.

5 = Nombre de sous-pas de temps de modèle [Défaut=1]

Paragraphe : **Contrôle de la Résolution Hydrodynamique :**

30 = 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 Init.)

20 = Nombre d'itérations internes pour le solveur [Déf=10]

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

Paragraphe : **Unités des données :**

% = Unité des coefficients d'Emmagasinelements Libres en [-]

= Unité des Hauteurs Hydroclimat (Pluie, ETP, Infiltr., Rechar.) en mm

Moi = Unité des Durées Hydroclimat. (sec, min, heu, jou, déca, moi, ann)

Jou = Unité de Temps (Pas de temps) (sec, min, heu, jou, déca, moi, ann)

km = Unité des Coordonnées Horizontales des mailles en m

Specif = Emmag. Captif lus (0=Hydrogéologues ; 1=Spécifiques ; 2=Compressib.)

= Unité des Débits de Rivières (Déf = Unité générale des débits)

Paragraphe : **Réseau Hydrographique, Drains, Lacs :**

1 = Couplage avec un Réseau Hydrographique [0=Non ; 1=Oui]

15 = Nombre maximal d'itérations pour le calcul des Débits de Rivières

1 = Loi Hauteur (Débit) Rivière [0=Non ; 1=Manning\_Large ; 2=Manning]

1 = Routing Rivière [0=Non 1=Oui] si Transitoire et si loi Hauteur-Débit

0.3 = Coefficient de sous-Relaxation pour les Débits de Rivières [Déf=1]

Paragraphe : **Initialisation avant calculs :**

- Pour avoir un exemple plus démonstratif, on remplace la perméabilité de l'aquifère qui était de  $10^{-4}$  m/s par  $10^{-3}$  m/s. On aura ainsi des gradients de charge plus faibles, et donc davantage d'alimentation de la nappe par la rivière.

On ajoute les données suivantes :

- Un coefficient d'emmagasinement en nappe libre de 5 %.
- Un coefficient d'emmagasinement captif spécifique de  $10^{-5}$  m<sup>-1</sup>.
- Trois paramètres pour un bilan hydroclimatique avec le schéma GARDÉNIA (Thiéry 2013a, 2014) :

- Une hauteur d' « équi ruissellement-percolation » de 20 mm dans toutes les zones de sol.
- Un « temps de ½ percolation » de 1.5 mois dans toutes les zones de sol.
- Une hauteur d'eau initiale dans le réservoir hydrologique « H » égale à 20 mm dans toutes les zones de sol.

La Figure 90 reproduit le paragraphe « Initialisation avant calculs » situé à la fin du fichier des paramètres.

```

/PERMEAB/ZONE_GEO      Z=  1:3  V=      1e-3;
/EMMAG_CAPT/GRILLE    N: =1e-5
/EMMAG_LIBR/GRILLE    N: =5
/POROSITE/GRILLE      N: =5
/LONG_RIVI/GRILLE     N: =2
/LARG_RIVI/TRONCON    A=   10T=   *V=   5e-2;
/LARG_RIVI/TRONCON    A=   40T=   *V=   5e-2;
/LARG_RIVI/TRONCON    A=   50T=   *V=   5e-2;
/LARG_RIVI/TRONCON    A=   60T=   *V=   5e-2;
/LARG_RIVI/TRONCON    A=   20T=   *V=   0.1;
/LARG_RIVI/TRONCON    A=   30T=   *V=   0.1;
/HAUTEU_RIVI/TRONCON  A=  1:60 T=   *V=    4;
/FOND_RIVI/TRONCON    A=  1:60 T=   *V=    0;
/EPAI_LIT_RIV/GRILLE  N: =0.1
/PERM_LIT_RIVI/GRILLE N: =1e-6
/RUGOS_RIVI/TRONCON  A=  1:60 T=   *V=   4e-2;
/PENTE_RIVI/TRONCON  A=  1:60 T=   *V=   5e-4;
/EQU_RUIS_PERC/ZONE_SOL Z=  1:15 V=    20;
/T_DEMI_PERCOL/ZONE_SOL Z=  1:15 V=    1.5;
/NIV_RESERV_H/ZONE_SOL Z=  1:15 V=    20;
    
```

Figure 90 – Hydrosystème multicouche avec rivières : Paragraphe « Initialisation avant calcul » à la fin du fichier des paramètres [.mart].

**Fichier des pas de temps.**

Après une première simulation on a vu que, pour suivre précisément la pointe de crue, il fallait découper finement le temps à partir de la date 7 jours jusqu'à la date 8 jours. On a donc adopté les dates de pas de temps décrites dans le Tableau 5.

Début	0	5	6	7	7.1	7.2	7.3	7.5	7.7	8	9	...	25	35	40	45
-------	---	---	---	---	-----	-----	-----	-----	-----	---	---	-----	----	----	----	----

Fin	5	6	7	7.1	7.2	7.3	7.5	7.7	8	9	10	...	30	40	45	50
Durée	5	1	1	0.1	0.1	0.1	1.2	0.2	0.3	1	1	1	5	5	5	5

*Tableau 5 – Début, fin et durée en jours des pas de temps.*

À la date  $t = 10$  jours on demande la sauvegarde des composantes de débits dans les tronçons de rivière, sous forme de profils en long. Ces résultats sont sauvegardés dans le fichier « rivsim.prn » qui est directement importable dans le tableur Excel ou son équivalent de Open Office.

La Figure 91 présente le « fichier des pas de temps » utilisé pour la simulation.

```

*** Début de la simulation à la date : 0; ***
/FLUX_INFILTR/ZONE_CLIM Z= *V= 20;
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 1: se termine à la date : 5; ***
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 2: se termine à la date : 6; ***
/FLUX_INFILTR/ZONE_CLIM Z= 5V= 3000;
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 3: se termine à la date : 7; ***
/FLUX_INFILTR/ZONE_CLIM Z= *V= 0;
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 4: se termine à la date : 7.1; ***
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 5: se termine à la date : 7.2; ***
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 6: se termine à la date : 7.3; ***
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 7: se termine à la date : 7.5; ***
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 8: se termine à la date : 7.7; ***
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 9: se termine à la date : 8; ***
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 10: se termine à la date : 9; ***
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 11: se termine à la date : 10; ***
/DEBIT_RIVI/EDITION I= 0;L= 0;F= 1;B= 0;
/***** Fin de ce pas
. . .
*** Le pas : 26: se termine à la date : 25; ***
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 27: se termine à la date : 30; ***
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 28: se termine à la date : 35; ***
/***** Fin de ce pas
. . .
*** Le pas : 31: se termine à la date : 50; ***
/***** Fin de ce pas
*** : : Fin de la simulation : ; ***

```

Figure 91 – Hydrosystème multicouche avec rivières : Fichier des pas de temps : extrait.

### Fichier des historiques à sauvegarder.

Avec le préprocesseur on demande les historiques des champs calculés suivants :

- Hauteu\_Rivi = Cote de l'eau dans les tronçons de rivière.  
(On demande la sauvegarde à l'exutoire des affluents)
- Débit\_Rivi = Débit calculé à l'aval des tronçons de rivière.  
(On demande la sauvegarde à l'exutoire des affluents)
- Charge = Charge hydraulique dans la nappe.  
(pour contrôle en quelques points à proximité des rivières)

On aurait pu également demander l'historique des débits d'échange nappe rivière en certains points.

### Lancement des calculs.

On lance alors les calculs qui se terminent en quelques minutes. On vérifie, dans le fichier « bilandeb.txt » et dans le fichier « histobil\_debit.prn » qu'ils ont parfaitement convergé.

### Résultats de la simulation d'une crue en régime transitoire.

La Figure 92 tracée à partir du fichier « histoclim.prn » présente le bilan hydroclimatique moyen sur le domaine. Il apparaît que le flux de pluie très fort pendant un jour est nettement amorti par le bilan hydroclimatique de surface. Il apparaît également que le ruissellement vers les affluents de rivière est beaucoup plus important que le flux d'infiltration.

La Figure 93 tracée à partir du fichier « histobil\_debit.prn » présente le bilan global des débits dans la nappe sur le domaine en unité de débits, c'est-à-dire ici en m<sup>3</sup>/s.

Les Figure 94 à Figure 96 présentent respectivement les historiques de débits à l'exutoire des affluents, les historiques de cote de l'eau à l'exutoire des affluents, des historiques de charge dans la nappe à proximité des rivières.

Les Figure 97 et Figure 98 présentent respectivement les profils en long du débit et du débit d'échange nappe -> rivière dans l'affluent n°10 après 10 jours.

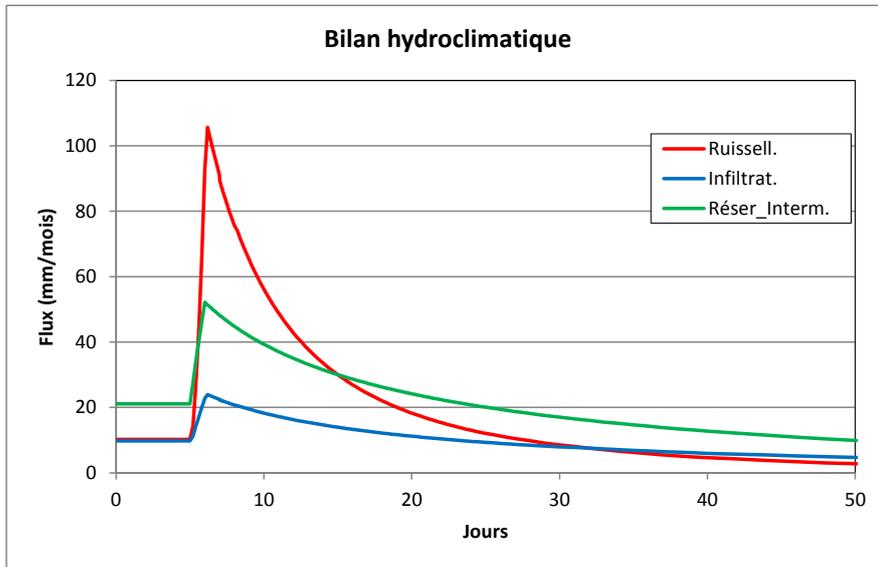


Figure 92 – Hydrosystème multicouche avec rivières : Bilan hydroclimatique.

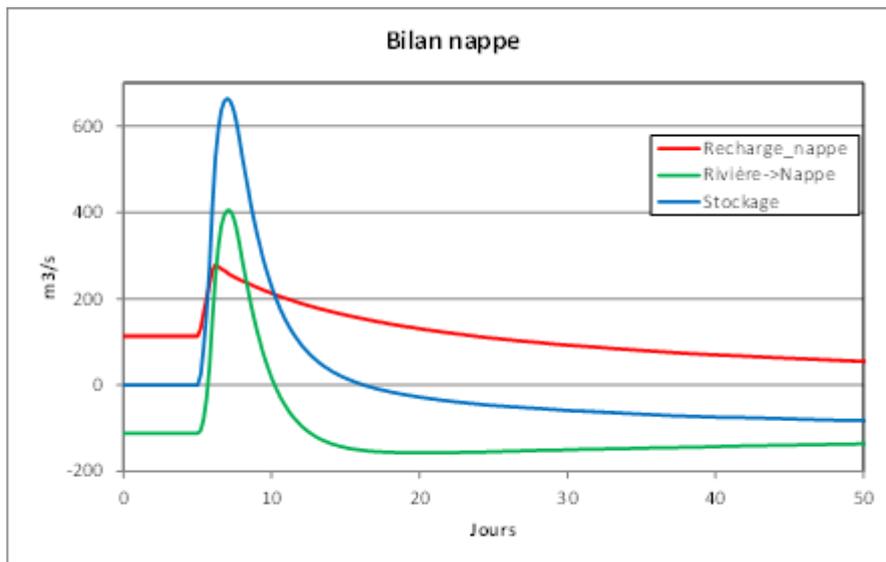


Figure 93 – Hydrosystème multicouche avec rivières : Bilan global de la nappe.

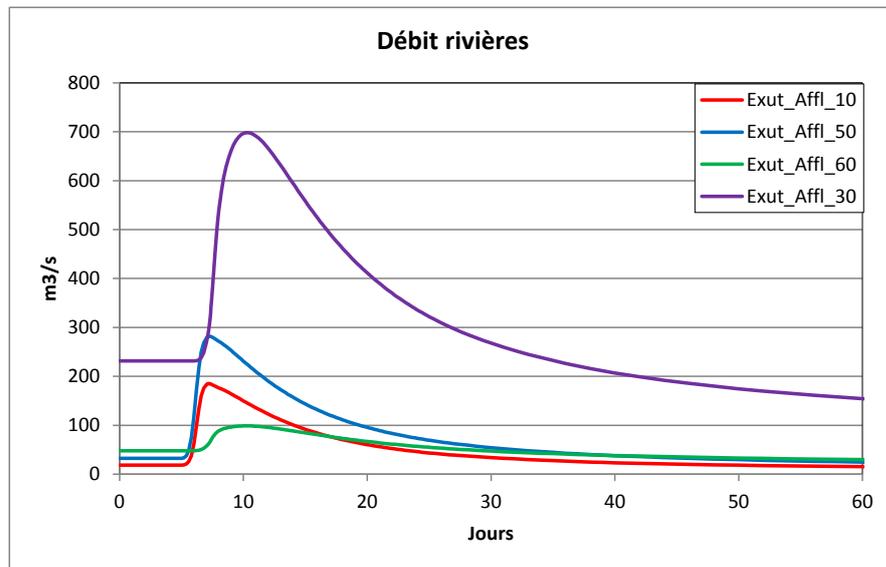


Figure 94 – Hydrosystème multicouche avec rivières : Historiques de débits dans 4 tronçons de rivières.

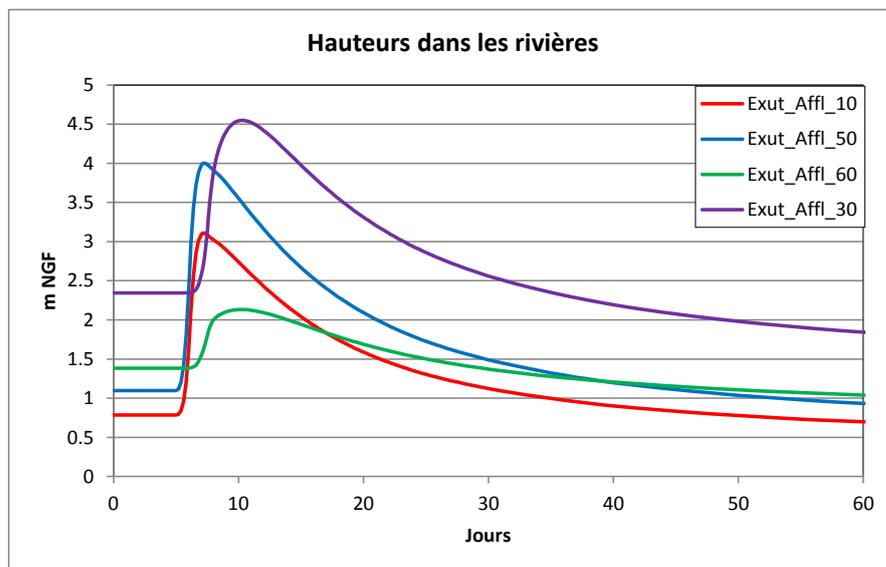


Figure 95 – Hydrosystème multicouche avec rivières. Historiques de la cote de l'eau dans 4 tronçons de rivière.

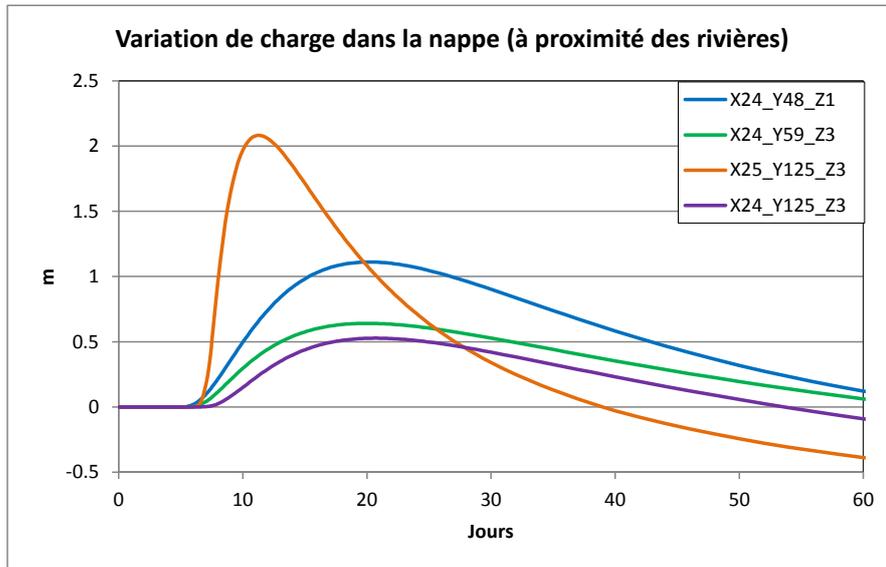


Figure 96 – Hydrosystème multicouche avec rivières : Historiques de niveau de nappe.

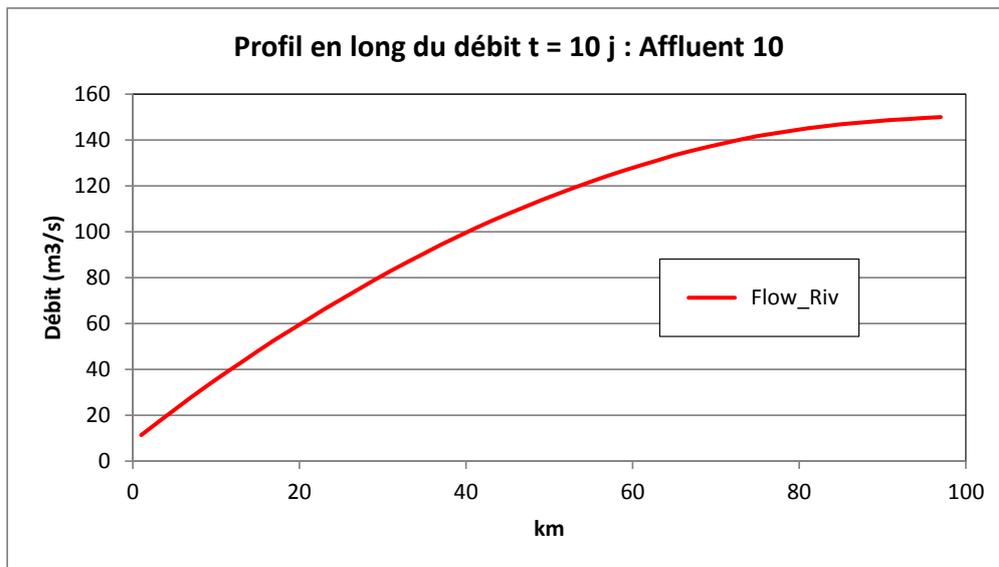


Figure 97 – Profil en long du débit dans l’affluent n°10 à la date 10 jours.

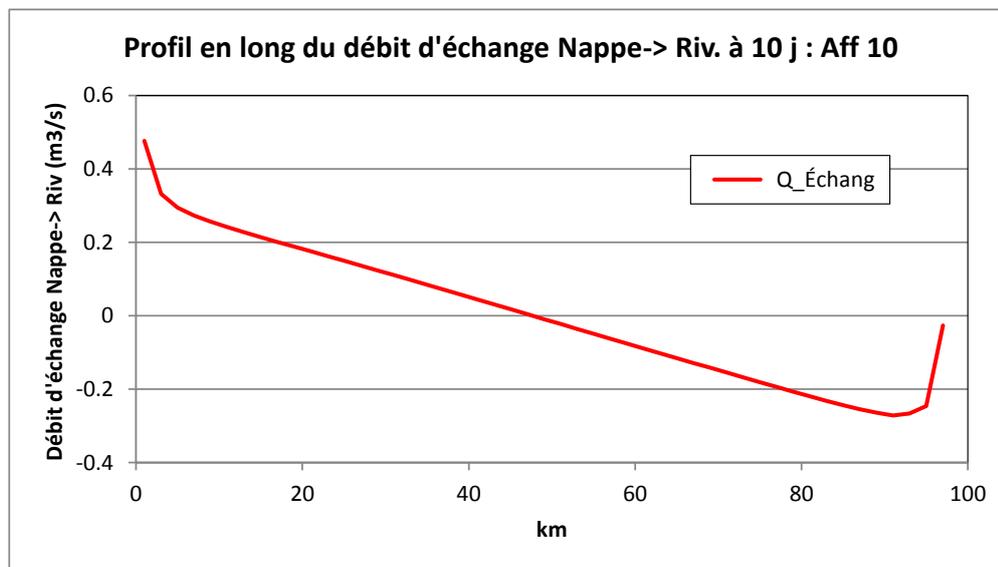


Figure 98 – Profil en long du débit d'échange Nappe-> Rivière de l'affluent n°10 à la date 10 jours.

## 19.7. SIMULATION DES CONCENTRATIONS RESULTANT D'UNE POLLUTION DANS UN AFFLUENT DE RIVIERE

Le scénario simulé est le suivant :

- On considère que le système est en équilibre, en régime permanent, lors d'une période sans recharge, mais avec de forts débits en amont des affluents n°40 et n°60 : Débits de 400 m<sup>3</sup>/s dans l'affluent n°40 et de 200 m<sup>3</sup>/s dans l'affluent n°60.
- Puis on suppose une injection de 500 kg/jour, résultant d'une pollution, au milieu de l'affluent n°40, dans le tronçon n°19 (c'est-à-dire dans la maille de numéro de colonne 48, et de ligne n°7).

On simule alors l'évolution des concentrations dans les cours d'eau et dans la nappe à proximité immédiate du cours d'eau.

### Définition des paramètres généraux.

On utilise un fichier de paramètres généraux identique à celui utilisé précédemment pour la simulation d'une crue, avec cependant les modifications suivantes :

#### Paragraphe : Unités des données :

% = Unité des Porosités = Teneurs en Eau en [-]  
 mug/L = Unité des Concentrations en kg/m<sup>3</sup>  
 (mug est l'abréviation utilisée pour « microgramme par litre »)

**Paragraphe : Couplage et Transport Concentration, Chaleur, Salinité :**

100 = Nombre maximal d'itérations \*Transport\* Salinité/Chaleur/Concentrat.  
 DF = Schéma de Transport [0=D\_Finies] (*ici DF ⇔ Différences Finies*)  
 0 = Diffusion moléculaire (m<sup>2</sup>/s) [\* = Spatialisée]  
 1000 = Dispersivité Longitudinale (m) [\* = Spatialisée]  
 0 = Dispersivité Transversale (m) [\* = Spatialisée]

**Paragraphe : Concentration et Trajectoires :**

1 = Calcul de la Concentration  
 0 = Variation moyenne de Concentration entre 2 itérat. pour convergence  
 Transit = Régime du Transport de Concentration [0=Transitoire ; 1=Permanent]

**Paragraphe : Réseau Hydrographique, Drains, Lacs :**

0 = Routing Rivière [0=Non ; 1=Oui]  
 (*Le routing est inutile car on considère les écoulements en équilibre*)

**Paragraphe : Initialisation avant calculs :**

On ajoute une valeur de porosité égale à 5 % dans tout le domaine.

/POROSITE/GRILLE N: =5

**Définition du fichier des pas de temps.**

Au pas de temps n°1, on introduit le flux massique de 500 kg/jour dans l'affluent n°40, tronçon n° 19. On effectue une simulation pendant une durée totale de 1800 jours (5 ans), avec de petits pas de temps au début, puisque le transfert en rivière est rapide, puis avec des pas de temps plus grands, puisque les transferts dans la nappe sont beaucoup plus lents. Le Tableau 6 montre les dates de fin de pas de temps choisies. Comme pour le calcul de propagation de crue, chaque pas de temps sera découpé en 5 sous pas de temps comme spécifié dans le paragraphe « Pas de Temps et sous pas de temps » du fichier des paramètres. La Figure 99 présente un extrait du fichier des pas de temps.

Dates	0.5	1	1.5	2	3	4	5	7	10	12
de	15	20	25	30	60	90	120	150	180	210
fin	240	300	360	450	540	630	720	810	900	990
(jours)	1080	1170	1260	1350	1440	1550	1620	1710	1800	

Tableau 6 – Transport avec rivières : dates de fin des pas de temps en jours.

**Lancement des calculs.**

On lance alors les calculs qui se terminent en quelques minutes. On vérifie, dans le fichier « bilandeb.txt » et dans les fichiers « histobil\_debit.prn » et « histomas.prn » qu'ils ont parfaitement convergé en termes de bilan des débits et de bilan de masses, à la fois dans la nappe et dans le réseau hydrographique.

**Résultats de la simulation d'une crue en régime transitoire.**

La Figure 100 présente la carte de la concentration calculée dans la couche affleurante de la nappe après 5 ans. Elle montre que les concentrations en nappe sont significatives uniquement à proximité immédiate du réseau hydrographique, en aval du point d'injection. (En fait pour réaliser cette vue on a concaténé dans une seule couche les valeurs de chaque couche qui affleure. Pour le dessin on a considéré comme nulles les concentrations inférieures à 0.1 microgramme par litre).

La Figure 101 et la Figure 102, tracées à partir du fichier « historiq.prn », présentent respectivement l'évolution de la concentration dans la rivière au cours des 5 premiers jours et l'évolution de la concentration dans la nappe en quelques points proches de la rivière pendant 5 ans.

On voit que la concentration dans la rivière se stabilise après 1 jour à l'aval de l'affluent dans lequel se produit la fuite (affluent n°40), et après 4 jours à l'exutoire du réseau hydrographique (affluent n°30).

Dans la nappe, qui est alimentée uniquement par le réseau hydrographique dans cette simulation, les vitesses sont beaucoup plus lentes et les concentrations évoluent beaucoup plus lentement. Elles ne sont pas encore stabilisées après 5 ans. Les concentrations ont une valeur non nulle uniquement à proximité immédiate du réseau hydrographique.

```

Rivières 3D
<< Pas de pluie pour que la rivière alimente la nappe >>
<< Transport : Injection de 500 kg/J dans l'affluent n°40 >>
#<V7.4># --- Fin du texte libre --- ; Ne pas modifier/retirer cette ligne
*** Début de la simulation à la date : 0; ***
/FLUX_INFILTR/ZONE_CLIM Z= *V= 0;
/Q_EXTER_RIVI/TRONCON A= 40T= 1V= 400;
/Q_EXTER_RIVI/TRONCON A= 60T= 1V= 200;
/*****/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 1: se termine à la date : 0.5; ***
/QMASS_RIVI/TRONCON A= 40T= 19V= 500;
/CONCEN_RIVI/EDITION I= 1;
/CONCENTR/EDITION I= 1;V= 0;R= 0;
/*****/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 2: se termine à la date : 1; ***
/*****/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 3: se termine à la date : 1.5; ***
/*****/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 4: se termine à la date : 2; ***
/*****/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 5: se termine à la date : 3; ***
/*****/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 6: se termine à la date : 4; ***
/*****/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 7: se termine à la date : 5; ***
/CONCEN_RIVI/EDITION I= 1;
/CONCENTR/EDITION I= 1;V= 0;R= 0;
/*****/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 8: se termine à la date : 7; ***
/*****/***** Fin de ce pas
. . .
*** Le pas : 39: se termine à la date : 1800; ***
/CONCEN_RIVI/EDITION I= 1;
/CONCENTR/EDITION I= 1;V= 0;R= 0;
/*****/***** Fin de ce pas
*** : : Fin de la simulation : ; ***

```

Figure 99 – Pollution dans un affluent de rivière : Fichier des pas de temps : extrait.

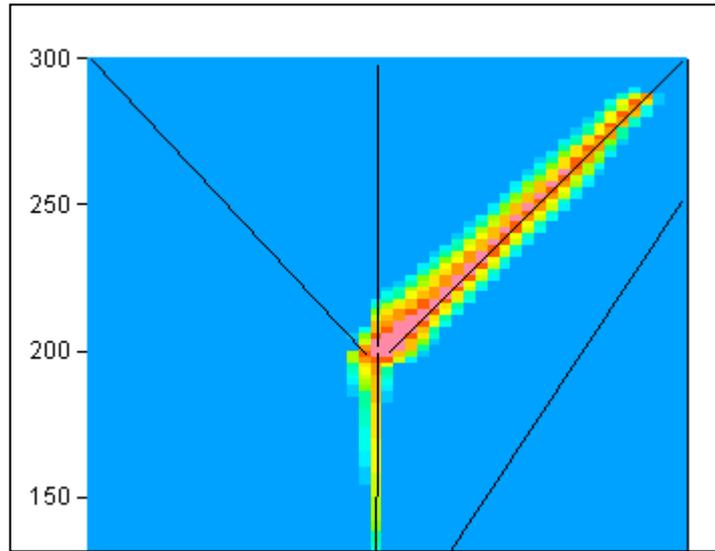


Figure 100 – Pollution dans un affluent de rivière : Concentration dans la nappe après 5 ans.

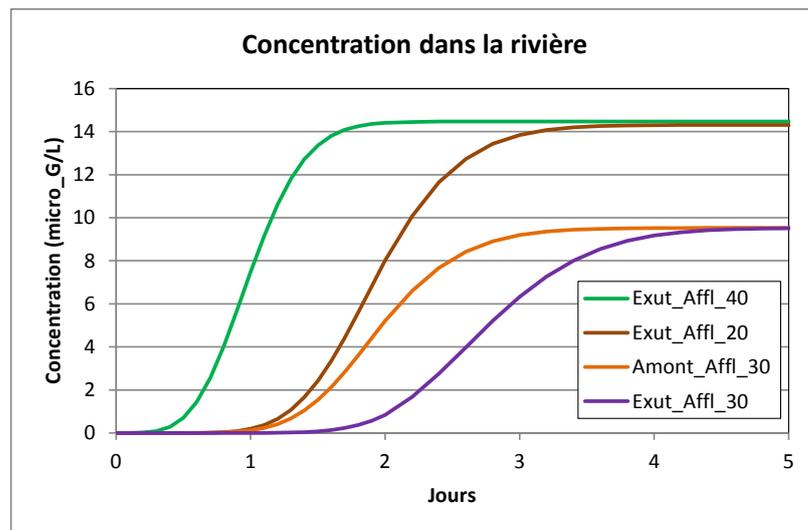


Figure 101 – Pollution dans un affluent de rivière : Évolution de la concentration dans la rivière au cours des 5 premiers jours.

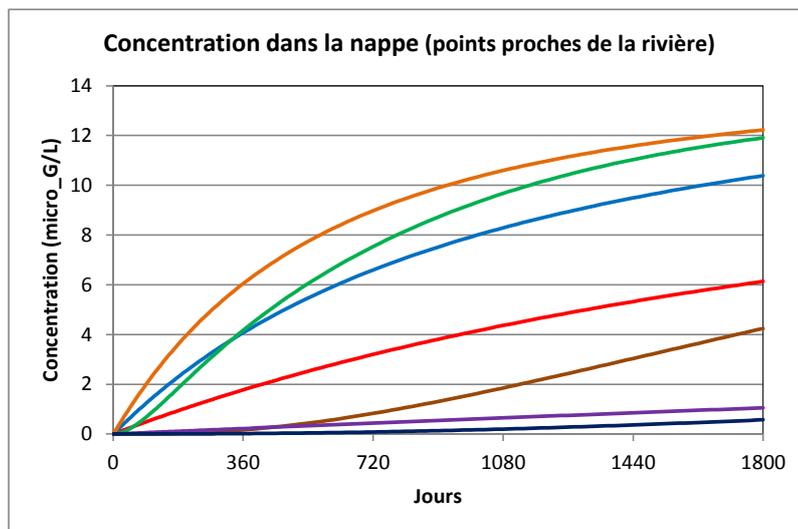


Figure 102 – Pollution dans un affluent de rivière : Évolution de la concentration dans la nappe en quelques points proches de la rivière pendant 5 ans (1800 jours).

## 20. Exemple n°11 : Hydrosystème simple avec bilan hydroclimatique GARDÉNIA

Cet exemple, montre comment simuler un hydrosystème dont les variations temporelles sont conditionnées par les processus hydroclimatiques sur son bassin versant. L'hydrosystème modélisé est une simplification d'un bassin versant réel. Un cours d'eau, la Voulzie à Jutigny, draine un bassin versant de 280 km<sup>2</sup>, situé près de la ville de Provins. Le piézomètre Saint Martin-Chennetron, implanté dans l'aquifère des Calcaires de Champigny, suit le niveau de la nappe en un point du bassin. On modélise le domaine comme un aquifère monocouche, traversé du Nord au Sud par un cours d'eau rectiligne. (Figure 103).

Le ruissellement et l'infiltration sont calculés par MARTHE via un bilan effectué avec l'algorithme GARDÉNIA (Thiéry, 2013a, 2014). On dispose des données hydroclimatiques suivantes :

- La pluie mensuelle moyenne sur le bassin, en mm/mois, de 1962 à 2004. C'est une lame d'eau uniforme sur le bassin, calculé par pondération arithmétique de stations pluviométriques voisines.
- L'évapotranspiration potentielle (ETP) à Melun de 1962 à 2004, en mm/mois.
- Les valeurs du débit moyen mensuel de la Voulzie à Jutigny, en m<sup>3</sup>/s de 1974 à 2004.
- Les relevés du niveau piézométrique mensuel à St Martin-Chennetron, en m NGF, de 1970 à 2004. Ce sont les valeurs relevées aux alentours du 15 de chaque mois.

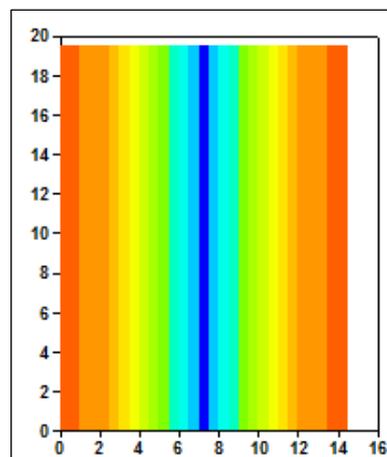


Figure 103 – Géométrie de l'hydrosystème, avec un cours d'eau orienté Nord-Sud au milieu du domaine.

Les caractéristiques du système sont les suivantes :

**Géométrie :**

- Le domaine est modélisé par un rectangle de 14.5 km dans la direction Ouest-Est sur 19.5 km dans la direction Sud-Nord, soit 282.75 km<sup>2</sup>.
- On choisit un maillage régulier, avec 29 colonnes de 0.5 km de largeur et 39 lignes de 0.5 km de hauteur. L'origine du maillage est située au point de coordonnées (0, 0)
- La cote topographique est fixée arbitrairement à +200 m NGF.
- Le substratum est fixé à la cote 0 m NGF.

**Conditions à la limite :**

- Aucune limite à charge imposée.

**Paramètres hydrodynamiques :**

- Perméabilité de l'aquifère = 4.594 10<sup>-5</sup> m/s
- Coefficient d'emmagasinement libre = 1.07 %

**Réseau hydrographique :** Le réseau hydrographique est constitué d'un seul affluent orienté Nord-Sud, situé au milieu du domaine (donc à l'abscisse 7.25 km). On considère, pour simplifier, que son lit est horizontal, ainsi que l'altitude de la surface libre de l'eau.

- Largeur du cours d'eau = 0.015 km (soit 15 m).
- Longueur des tronçons de cours d'eau = 0.5 km (par maille).
- Altitude de la cote du fond du lit = 107 m NGF.
- Cote de l'eau dans le cours d'eau = 107.62 m NGF.
- Épaisseur du lit et des berges = 0.1 m
- Perméabilité du lit et des berges = 10<sup>-6</sup> m/s

**Paramètres du bilan hydroclimatique :**

Dans tout le domaine on fixe les paramètres suivants :

- Capacité du réservoir sol progressif = 103 mm
- Hauteur d'équi-ruissellement = 405 mm
- Temps de ½ percolation = 4.4 mois

**20.1. CRÉATION DU MAILLAGE**

- Titre du projet : **Didact\_Chennetr ;**
- Coin Sud-Ouest : X = 0 ; Y = 0 ; (km)
- Coin Nord-Est : X = 14.5 ; Y = 19.5 ; (km)

- Largeur des colonnes = **0.5** ; Hauteur des lignes = **0.5** ; (km)
- Nombre de couches = **1** ;
- Valeur de perméabilité par défaut = 1 (on définira plus loin la vraie valeur);
- Cote topographique = **200** (m) ;
- Épaisseur (de chaque couche) = **200** (m).

## 20.2. DEFINITION DU PROFIL D'UTILISATEUR

Comme on va réaliser une simulation en régime transitoire, avec un réseau hydrographique et un bilan hydroclimatique, on définit un « profil utilisateur » en sélectionnant, c'est-à-dire en donnant la valeur « 1 », aux options suivantes :

- 1 = Régime Transitoire
- 1 = Rivières, Drains, Lacs (1=Rivières et Lacs ; 2=Drains ; 3=tous les 3)
- 1 = Hydroclimatologie, Cultures, Nitrates

Et on sauvegarde ce profil sous le nom « Didact\_Chennetr.prfu »

Après avoir sauvegardé le projet on retourne dans WinMarthe *sensu stricto*.

## 20.3. DEFINITION DES AUTRES CHAMPS

Étant donné que le domaine est très simple, on définira tous les champs de données maillées par des « modifications initiales » à la fin du fichier des paramètres [.mart].

### Définition des « Zones de sol » :

Les « Zones de sol » sont des zones dans lesquelles les paramètres hydrologiques (« réserve utile du sol », « temps de percolation » etc.) sont uniformes. Dans cet exemple simple on utilisera également les « zones de sol » pour y introduire les données de pluie et d'ETP (évapotranspiration potentielle). En fait, on définira un seul numéro de zone égal à 1 sur tout le domaine. Il y aura donc une seule zone de sol.

### Définition de l'arbre de branchement des affluents.

Comme il y a uniquement un affluent de cours d'eau, il n'y a pas de branchement. Il n'est donc pas utile de définir de fichier « Arbre de branchement des affluents de rivières ».

### Définition des paramètres généraux.

Par l'icône , on accède au menu des paramètres non maillés. On sélectionne alors « Paramètres généraux » et on crée un nouveau fichier.

Paragraphe : **Sauvegardes et contrôles** :

Flux = Sauvegarde des Historiques de Bilans Hydroclimat. (0=Non)  
1 = Écriture des dates sous forme calendaire (0=JMA hh:mm ; 1=JMA ; -1=non)  
[Donc écriture des dates calendaires sous la forme jj/mm/aaaa sans hh:mm]

**Paragraphe : Contrôle de la Résolution Hydrodynamique :**

20 = Nombre Maxi d'itérations par pas de temps calcul suivant le pas n°0  
20 = Nombre maxi d'itérations pour le pas de temps n°0 (Permanent Init.)  
Transit = Régime de l'Hydrodynamique [0=Transitoire ; 1=Permanent]

**Paragraphe : Unités des données :**

1e-6 = Unité des Perméabilités des aquifères en m/s (ou m2)  
= Unité des Hauteurs Hydroclimat. (Pluie, ETP, Infilt., Recharge) en mm  
Moi = Unité des Durées Hydroclimat. (sec, min, heu, jou, déca, moi, ann)  
Jou = Unité de Temps (Pas de temps) (sec, min, heu, jou, déca, moi, ann)  
km = Unité des Coordonnées Horizontales des mailles en m  
= Unité des Débits de Rivières (Déf = Unité générale des débits)

**Paragraphe : Réseau Hydrographique, Drains, Lacs :**

1 = Couplage avec un Réseau Hydrographique [0=Non ; 1=Oui]

**Paragraphe : Hydroclimatologie :**

2 = Limitation de la Reprise à la Nappe par ETR [0=Non ; 1=Limit. ; 2=Suppr.]  
[Important : 2 => Pas de reprise directe à la nappe]  
0 = Type de Bilan Hydroclimat. [0=GARDÉNIA ; 1=Modsur ; 2=Rui,Rech ; 3=GR3/GR4]  
[Donc, par défaut, choix du bilan par la méthode Gardénia]  
0 = Type de Zones pour les Pluie, ETP, Rechar., [0=Zones de Sol ; 1=Z. Météo]

Les champs qui sont uniformes, globalement, par zone ou par affluent, vont être définis simplement par le préprocesseur dans le paragraphe « Initialisation avant calcul » :

- Perméabilité de l'aquifère :  $4.594 \cdot 10^{-5}$  m/s, soit 45.94 puisqu'on a choisi une unité de perméabilité égale à  $10^{-6}$  m/s.
- Coefficient d'emmagasinement libre :  $1.07 \cdot 10^{-2}$  (soit 1.07 %).
- Charge pour initialiser les calculs : 109 m NGF.
- Définition du réseau hydrographique :
  - Affluent n°1, dans la colonne n°15, pour toutes les lignes (noté « \* »).
  - Numéro de tronçon = numéro de la ligne, donc raccourcis « -2 », dans la colonne n°15, pour toutes les lignes (notation « \* »).  
Remarque : on a pu choisir le numéro de la ligne comme numéro de tronçon, puisque ce numéro de ligne est bien croissant de l'amont vers l'aval de l'affluent.

- Longueur de tronçon de rivière = 0.5 km dans tous le domaine. (Ça ne pose pas de problème de définir des longueurs là où il n'y a pas de rivières. Les données en dehors des rivières seront ignorées).
- Largeurs de tronçons de rivières 15 m. Attention, les largeurs de rivières, comme les longueurs de tronçons sont en unité de coordonnées horizontales de mailles, donc ici en km. On donne donc respectivement une largeur égale à 0.015 km et une longueur de 0.5 km.
- Cote absolue de l'eau dans les tronçons de rivière : 107.62 mètres NGF dans tous les tronçons.
- Cote absolue du fond de la rivière : 107 m dans tous les tronçons.
- Épaisseur du lit : 0.1 mètre dans tous les tronçons.
- Perméabilité du lit et des berges de rivières :  $10^{-6}$  m/s dans tous les tronçons.
- Numéro de « Zone de sol » : numéro 1 pour les mailles de tout le domaine.
- Paramètres du bilan hydroclimatique GARDÉNIA :
  - Capacité du réservoir sol progressif : 103 mm, dans la zone n°1
  - Hauteur d'équi-ruissellement : 405 mm, dans la zone n°1
  - Temps de  $\frac{1}{2}$  percolation : 4.4 mois, dans la zone n°1 (en mois puisque l'unité choisie pour les durées hydroclimatiques est le mois.)

**Paragraphe : Initialisation avant calculs :**

/PERMEAB/GRILLE	N:	=45.94			
/EMMAG_LIBR/GRILLE	N:	=1.07e-2			
/H_TOPOGR/GRILLE	N:	=200			
/H_SUBSTRAT/GRILLE	N:	=0			
/CHARGE/GRILLE	N:	=109			
/AFFLU_RIVI/MAILLE	C=	15L=	*P=	1V=	1;
/TRONC_RIVI/MAILLE	C=	15L=	*P=	1V=	-2;
/EPAI_LIT_RIV/GRILLE	N:	=0.1			
/PERM_LIT_RIVI/GRILLE	N:	=1			
/LARG_RIVI/GRILLE	N:	=0.015			
/LONG_RIVI/GRILLE	N:	=0.5			
/FOND_RIVI/GRILLE	N:	=107			
/HAUTEU_RIVI/GRILLE	N:	=107.62			
/ZONE_SOL/GRILLE	N:	=1			
/CAP_SOL_PROGR/ZONE_SOL	Z=		1V=		103;
/EQU_RUIS_PERC/ZONE_SOL	Z=		1V=		405;
/T_DEMI_PERCOL/ZONE_SOL	Z=		1V=		4.4;

**Définition des pas de temps.**

Les données climatiques sont disponibles tous les mois pendant les 43 années de la période de janvier 1962 à décembre 2004, soit 516 mois. On va dans un premier temps constituer un fichier texte avec ces données climatiques. Ce fichier aura 2

colonnes : par exemple la première pour les données de pluies mensuelles et la deuxième pour les données d'ETP mensuelles. En pratique, pour faciliter la lisibilité et la mise en forme, on ajoute une 3<sup>ème</sup> colonne avec la date. Il est conseillé de mettre la date facultative, qui ne sera pas lue, dans la dernière colonne (la plus à droite) pour éviter qu'elle ne perturbe la lecture des colonnes de données. On ajoute également une ligne texte descriptive (commençant par sécurité par un « ! » pour indiquer que cette ligne est un commentaire). En fait la dernière année, l'année 2004, est incomplète. Pour simplifier et avoir un nombre entier d'années, ce qui n'est pas indispensable, on complète l'année 2004 par des valeurs de pluie et d'ETP égales à zéro de mai 2004 à décembre 2004. Le fichier peut être créé très facilement avec un tableur, par exemple avec le tableur Excel ou son équivalent Open Office. Les données doivent être en format texte. Il ne faut donc pas créer un fichier [.xls] ou [.xlsx] mais exporter les données avec par exemple un « format texte, séparateur = tabulation » (Figure 104).

On donne à ce fichier le nom « **Didact\_Chennetr\_Meteo\_1962\_2004.prn** ».

!	Pluie	ETP_Melun	Date
	82.4	14.3285	15/01/1962
	34.7	15.474	15/02/1962
	79.2	24.9761	15/03/1962
	...	...	...
	43.4	49.5	15/03/2004
	65.6	75.9	15/04/2004

*Figure 104 – Hydrosystème avec bilan hydroclimatique GARDÉNIA : Fichier temporel de données climatiques : extrait.*

Avec le préprocesseur de données non maillées, icône , on crée alors un « nouveau fichier de pas de temps ».

On donne la date du début de la simulation sous forme calendaire : « **15/12/1961** » puisque le premier pas de temps sera le « 15/01/1962 » (Figure 105).

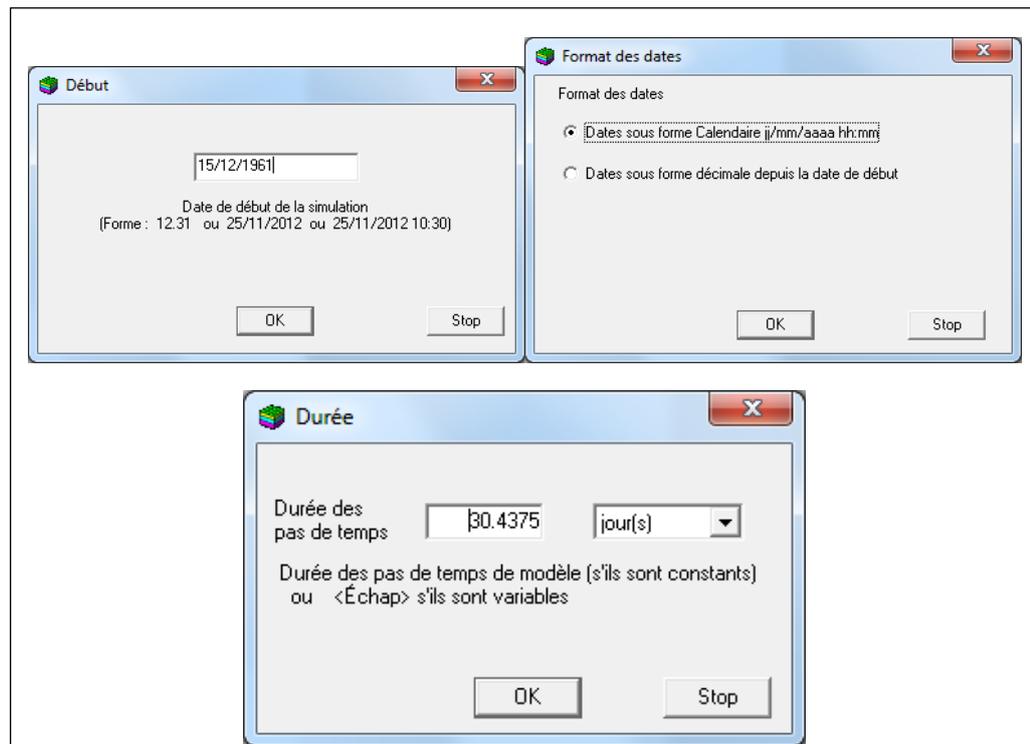


Figure 105 – Hydrosystème avec bilan hydroclimatique GARDÉNIA : Création d'un nouveau fichier de pas de temps de durée 1 mois.

On choisit alors de donner les dates sous la forme « **Calendaire jj/mm/aaaa hh:mm** » et on choisit de créer automatiquement **516** pas de temps de durée **30.4375** jours, c'est-à-dire 365.25/12, donc un mois moyen (Figure 105).

Au pas de temps n°0, on définit les flux de pluie et les flux d'ETP des 516 pas de temps. On choisit donc :

« Nouvelles Actions » → *Thème* « Bilan hydroclimatique, cultures » → *Objet* « Flux de précipitations » (FLUX\_PLUV) → *Modification par* « Zones climatiques » ZONE\_CLIM.

On donne alors dans la zone de sol n°1 un flux de pluie moyen de **15** mm/mois au pas de temps n°0, on définit dans la fenêtre du bas le nom du fichier contenant l'évolution des 516 valeurs correspondant aux 516 pas de temps de janvier 1962 à décembre 2004 : « **Didact\_Chennetr\_Meteo\_1962\_2004.prn** », et on conserve le numéro **1** proposé pour la colonne du fichier à utiliser pour lire ces données de flux de précipitations. On clique alors sur « OK » (Figure 106).

Pour définir les flux d'ETP, on clique sur « Retour » puis :

*Thème* « Bilan hydroclimatique, cultures » → *Objet* « Flux d'évapotranspiration potentielle » (FLUX\_ETP) → *Modification par* « Zones climatiques » ZONE\_CLIM.

On donne alors dans cette zone de sol n°1, un flux d'ETP égal à 0 mm/mois au pas de temps n°0, et on définit dans la fenêtre du bas le nom du fichier contenant l'évolution des 516 valeurs correspondant aux 516 pas de temps de janvier 1962 à décembre 2004 : « **Didact\_Chennetr\_Meteo\_1962\_2004.prn** ». On donne le numéro **2** pour la colonne du fichier à utiliser pour lire ces données de flux d'ETP et on clique sur « OK » (Figure 107).

On clique sur « Retour » et on sauvegarde le fichier des pas de temps sous le nom proposé « **Didact\_Chennetr.pastp** » et on choisit comme format d'écriture «**Jour : jj/mm/aaaa** » (Figure 108), c'est-à-dire une écriture sous forme calendaire, sans heures et minutes, de façon à avoir un fichier plus lisible (Figure 109).

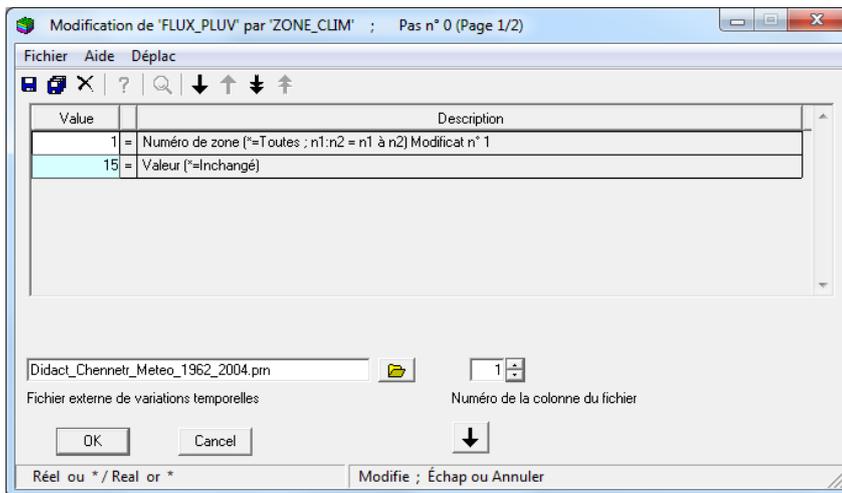


Figure 106 – Au pas de temps n°0 : Définition du flux de pluie avec lecture des données dans la colonne n°1 d'un fichier externe.

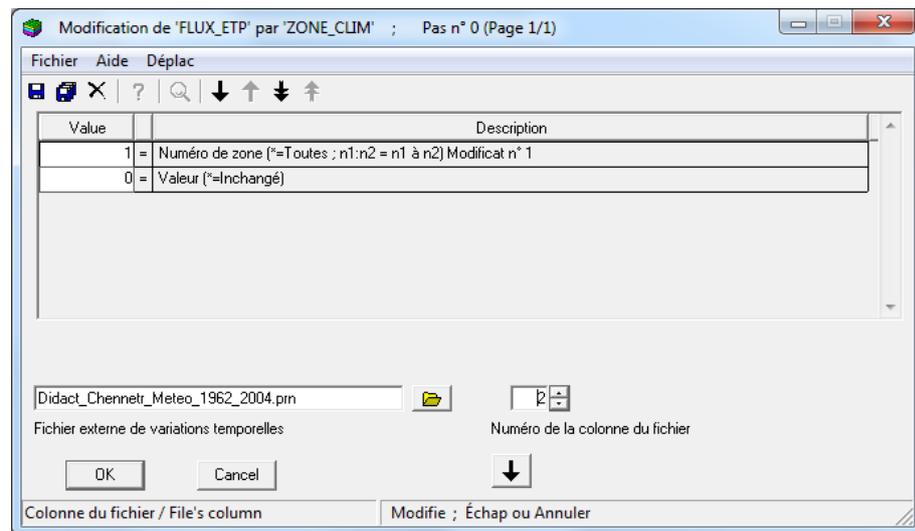


Figure 107 – Au pas de temps n°0 : Définition du flux d'ETP avec lecture des données dans la colonne n°2 d'un fichier externe.

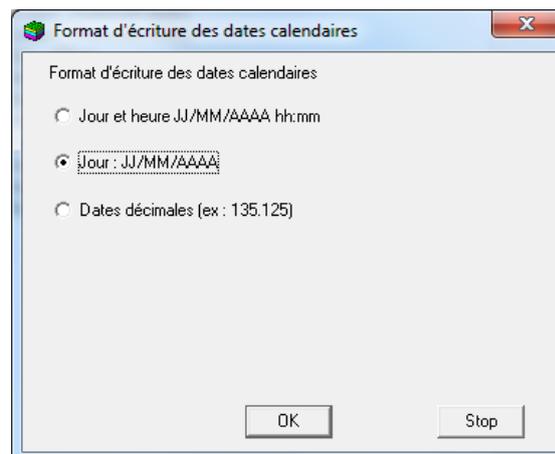


Figure 108 – Définition du format d'écriture des dates dans le fichier des pas de temps résultant.

```

Chennetron - Voulzie 2D : Fichier des pas de temps
#<V7.4># --- Fin du texte libre --- ; Ne pas modifier/retirer cette ligne
*** Début de la simulation à la date : 15/12/1961 ; ***
/FLUX_PLUV/ZONE_CLIM Z= 1V= 15; File= Didact_Chennetr_Meteo_1962_2004.prn
/FLUX_ETP/ZONE_CLIM Z= 1V= 0; File= Didact_Chennetr_Meteo_1962_2004.prn; Col=2
/*****/*****/ Fin de ce pas
*** Le pas : 1: se termine à la date : 14/01/1962 ; ***
/*****/*****/ Fin de ce pas
*** Le pas : 2: se termine à la date : 13/02/1962 ; ***
/*****/*****/ Fin de ce pas
*** Le pas : 3: se termine à la date : 16/03/1962 ; ***
/*****/*****/ Fin de ce pas
. . .
*** Le pas : 515: se termine à la date : 14/11/2004 ; ***
/*****/*****/ Fin de ce pas
*** Le pas : 516: se termine à la date : 14/12/2004 ; ***
/*****/*****/ Fin de ce pas
*** : : Fin de la simulation : ; ***

```

Figure 109 – Hydrosystème avec bilan hydroclimatique GARDÉNIA : Extrait du fichier pas de temps «Didact\_Chennetr.pastp» résultant.

### Définition des « Mailles à historiques » :

Comme dans les exemples précédents, on crée un fichier de mailles à historiques avec le préprocesseur de données non maillées. On demande :

- Un historique de « Charge » dans la maille de colonne n°27 et ligne n°8, qui correspond au piézomètre St Martin Chennetron dans notre exemple simplifié.
- Un historique de « Débit\_Rivière » dans la maille de colonne n°15 et ligne n°29, qui correspond à l'exutoire du bassin.
- Un historique de « Flux de ruissellement », de « Flux d'infiltration » et un historique du « Déficit du réservoir sol progressif ». On demande ces historiques pour une maille située dans la zone de sol n°1, c'est-à-dire n'importe quelle maille du domaine, par exemple dans la maille de colonne n°10 et ligne n°10.

## 20.4. LANCEMENT DES CALCULS ET EXAMEN DES RÉSULTATS

On lance les calculs et comme il n'y a aucune maille à charge imposée, on obtient un message d'avertissement signalant que le calcul initial en régime permanent pourrait être mal défini. On clique « OK » et les calculs s'effectuent en quelques secondes.

La Figure 110 montre que l'évolution des débits de la rivière à l'exutoire du bassin, et l'évolution des niveaux piézométriques au piézomètre, sont bien simulés par le modèle.

La Figure 111 et la Figure 112 montrent respectivement l'évolution des flux de ruissellement et d'infiltration calculés, ainsi que l'évolution du pourcentage de ruissellement calculé.

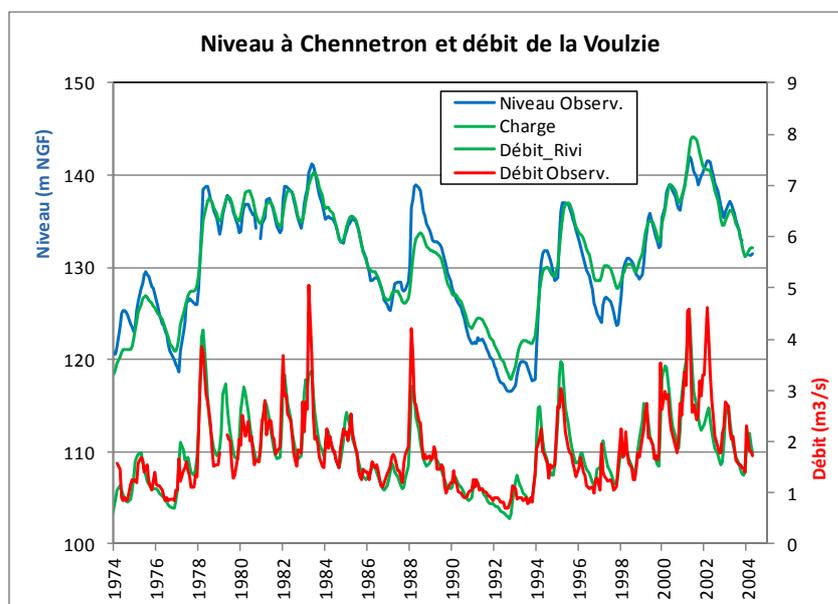


Figure 110 – Simulation avec le code MARTHE du débit de la Voulzie à Jutigny et au niveau du piézomètre St Martin Chenetron.

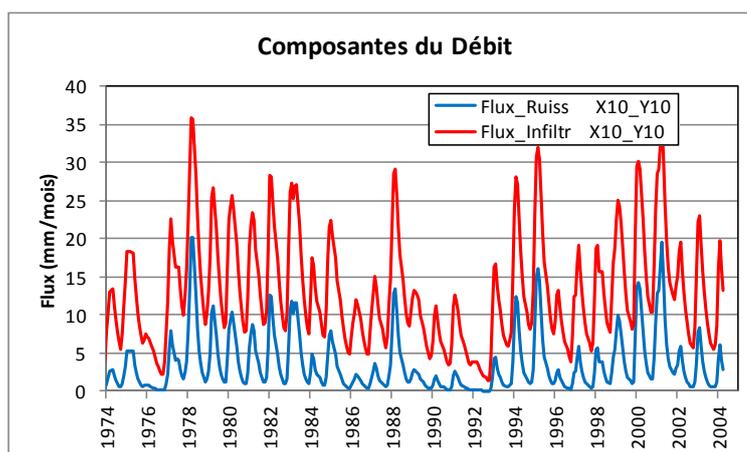


Figure 111 – Flux de ruissellement et flux d'infiltration résultant du bilan hydroclimatique GARDÉNIA couplé.

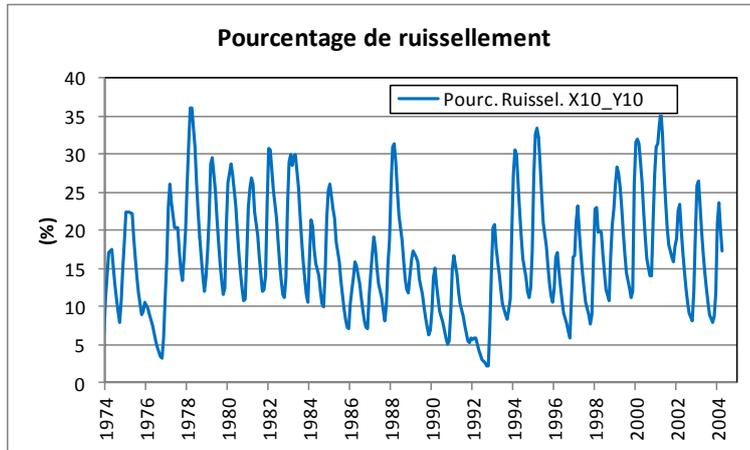


Figure 112 – Pourcentage de flux de ruissellement résultant du bilan hydroclimatique GARDÉNIA couplé.

## 21. Exemple n°12 : Simulation en radial d'un puits à pénétration partielle

Cet exemple montre comment simuler précisément les écoulements vers un puits pénétrant partiellement dans un aquifère. Il montre comment mettre en œuvre une modélisation en coupe verticale dans un maillage radial. Il illustre également l'utilisation de « Liaisons étanches ».

### 21.1. DEFINITION DU SYSTEME MODELISE

Les caractéristiques du système sont les suivantes (Figure 113) :

#### Géométrie :

- Le domaine est constitué d'un aquifère captif homogène de 40 mètres d'épaisseur, de la profondeur -0.25 m à -40.25 m, modélisé en radial jusqu'à une distance de 100 mètres.
- Cet aquifère est traversé par un forage de 10 cm de rayon et de 20 mètres de profondeur.

#### Paramètres hydrodynamiques :

- Perméabilité de l'aquifère :  $K = 1. 10^{-4}$  m/s
- Porosité :  $\omega = 10$  % dans l'aquifère, 100 % dans le forage.
- Débits de pompage = 2 m<sup>3</sup>/h (soit  $5.555 10^{-4}$  m<sup>3</sup>/s)

#### État initial :

- La nappe est initialement à la charge +0.50 m.

#### Conditions aux limites :

- On considère que sur la limite externe, sur un rayon de 100 m, la charge est imposée à la charge +0.50 m.

#### Maillage :

On choisit des unités en centimètres.

On adopte un maillage radial en coupe verticale avec un découpage irrégulier. La distance radiale, de 0 à 10000 cm, est découpée en 24 colonnes, et la direction verticale, de -25 à -4025 cm, est découpée en 21 lignes irrégulières :

Origine :  $x_0 = 0$ ,  $y_0 = -4025$  cm.

Colonnes : 3 x 10 cm, 20, 2 x 25, 2 x 50, 100, 200, 6 x 250, 2 x 500, 2 x 750, 1000, 1250, 1500 et 1750 cm => Total = 10000 cm.

Lignes (de haut en bas) : 6 x 250, 2 x 125, 2 x 100, 2 x 50, 2 x 100, 7 x 250 cm => Total = 4000 cm.

Dans le fichier des couches [.layer] on définit :

```
1 = Maillage Radial [Rayon , Angle] (0=Non ; 1=Oui)
      (Pour définir que le maillage est « radial [Rayon , Angle])
```

Dans le fichier des paramètres [.mart] on définit donc :

**Paragraphe : Contrôle de la Résolution Hydrodynamique :**

```
0 = Nombre Maxi d'itérations par pas de temps calcul suivant le pas n°0
2 = Nombre maxi d'itérations pour le pas de temps n°0 (Permanent Init.)
1e-6 = Variation moyenne de Charge entre 2 itérations pour convergence
50 = Nombre d'itérations Internes pour le solveur [Déf=10]
Perman = Régime de l'Hydrodynamique [0=Transitoire ; 1=Permanent]
```

**Paragraphe : Unités des données :**

```
1e-4 = Unité des Perméabilités des aquifères en m/s (ou m2)
m3/h = Unité des Débits en m3/s
cm = Unité des Charges, Altitudes, Pressions en m
cm = Unité des Coordonnées Horizontales des mailles en m
% = Unité des Porosités = Teneurs en Eau en [-]
```

**Paragraphe : Point origine et état des données :**

```
360 = Épais. de la Tranche de coupe (Unité de Coord. de Mailles ou degrés)
      (donc la tranche verticale est de 360°)
Vertic = Orientat. maillage : 0=Standard ; 1=Coupe Verti. : pesanteur sur Oy
```

**Paragraphe : Concentration et Trajectoires :**

```
INVERS = Calcul de Trajectoires (1 = Oui ; 'INVERS' = -1 = Trajec. inverses)
      (Pour tracer les trajectoires inverses)
```

**Paragraphe : Initialisation avant calculs :**

```
/PERMEAB/GRILLE N: =1
/PERMEAB/MAILLE C= 1L= 1:11 P= 1V= 1;
```

```

/ANISO_VERTI/MAILLE      C=      1L=  1:11 P=      1V=      1E6;
      (Très forte anisotropie verticale dans les mailles du puits)
/CHARGE/GRILLE          N: =50
/DEBIT/MAILLE           C=      1L=      1P=      1V=      -2;
      (Pompage dans la maille du haut du puits)
/DEBIT/MAILLE           C=      24L=      *P=      1V=      9999;
      (Limite à charge imposée dans la colonne externe : colonne n°24)
/POROSITE/GRILLE        N: =10
/POROSITE/MAILLE        C=      1L=      1P=  1:11 V=      100;
      (Porosité de 100 % dans le puits)
      (La porosité est utilisée uniquement pour les trajectoires ou les vitesses)

```

## 21.2. SIMULATION EN REGIME PERMANENT DU Puits CREPINE SUR TOUTE LA PROFONDEUR

### Lancement des calculs.

Le calcul est réalisé en régime permanent. Dans le fichier des pas de temps [.pastp], on demande la sauvegarde de : la « CHARGE », le « DEBIT », la « VITESSE » et également : les débits du haut et du bas « DEBIT\_HAU\_BAS », le débit latéral « DEBIT\_LATERAL », le débit latéral *entrant* « DEBIT\_LAT\_ENT ».

On lance alors les calculs qui s'exécutent en une fraction de seconde, et on vérifie qu'ils ont bien convergé, et que la nappe reste captive.

La Figure 113 montre les charges calculées au voisinage du puits jusqu'à une distance radiale de 3 mètres, avec les isovaleurs de charge. La charge dans le puits varie de 21.84 cm en bas à 21.68 cm en haut soit une différence de 1.6 mm sur 20 m. La charge est donc quasiment constante. La Figure 114 montre les charges calculées au voisinage du puits jusqu'à une distance radiale de 25 mètres, avec les isovaleurs de charge et les trajectoires.

La Figure 115 montre le profil des débits dans le puits. Depuis le fond du puits jusqu'au du puits, le débit provenant de la nappe décroît de 0.144 à 0.095 m<sup>3</sup>/h par mètre de puits.

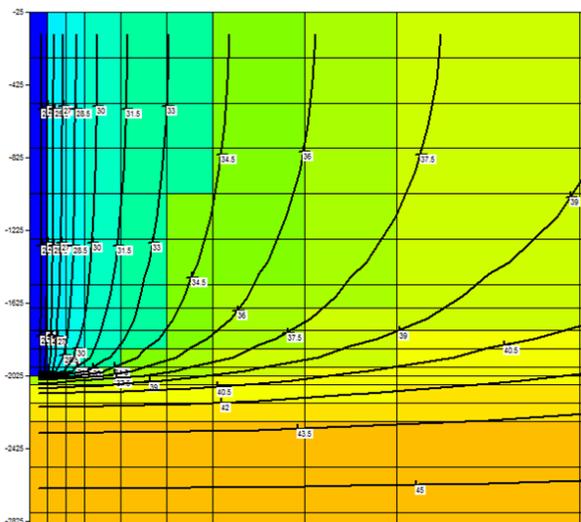


Figure 113 – Puits en coupe verticale : charges calculées au voisinage du puits jusqu'à une distance radiale de 3 mètres. Le puits est situé à gauche, en bleu foncé, et l'échelle radiale est dilatée d'un facteur 10. Les courbes sont les isovaleurs de charge.

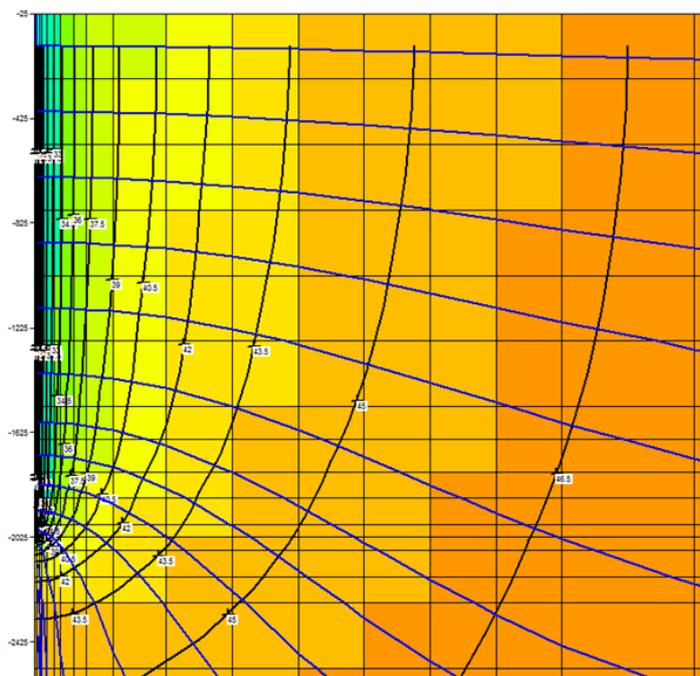


Figure 114 – Charges calculées au voisinage du puits jusqu'à une distance radiale de 25 mètres. Isovaleurs de charge et trajectoires.

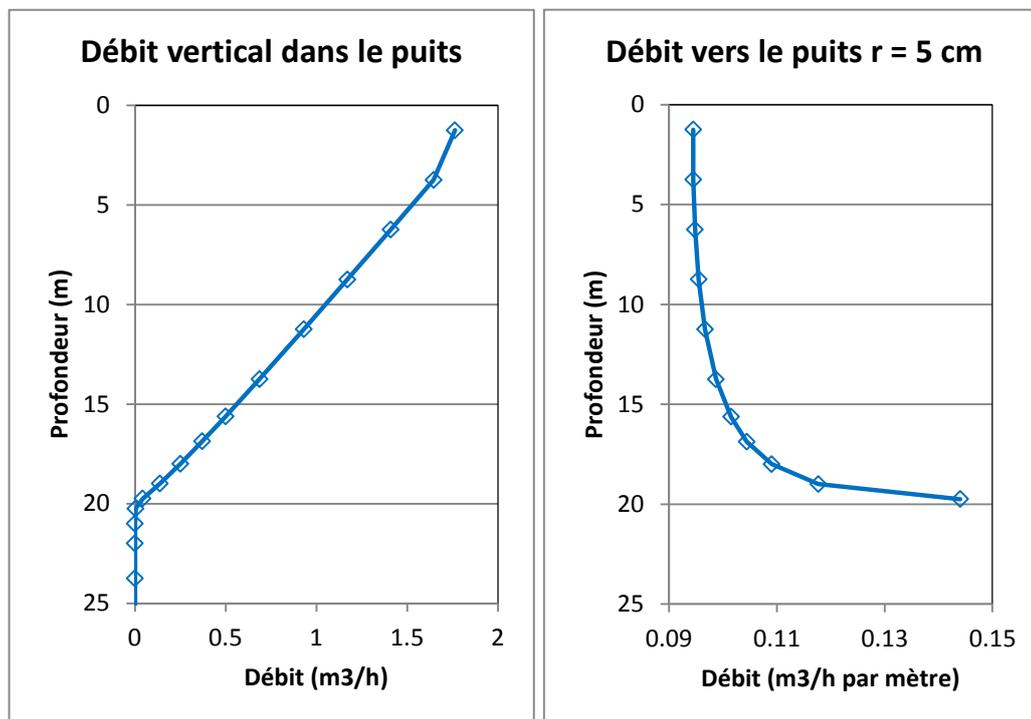


Figure 115 – Profils de débit dans le puits. à gauche : débit vertical dans le puits ; à droite débit venant de la nappe.

### 21.3. SIMULATION D'UN PUIITS CREPINE SUR UNE PARTIE DE LA PROFONDEUR

Pour cette 2<sup>ème</sup> simulation, on suppose que le puits est crépiné uniquement sur les 10 mètres inférieurs, c'est-à-dire des lignes n°5 à n°11. Pour rendre le puits non crépiné sur les 4 mailles supérieures, on introduit des « liaisons étanches » entre la colonne n°1 et la colonne n°2 de ces 4 mailles. Pour cela, dans WinMarthe, on utilise l'icône



de la barre de droite. On sélectionne la première maille, en double-cliquant dessus. On voit alors apparaître la boîte de dialogue de la Figure 116. On clique sur la liaison « Est » puis sur OK. On voit alors apparaître une liaison étanche en gris à l'Est de cette maille. On procède de la même manière pour les 3 autres mailles, lignes n°2 à n°3 du puits (Figure 117). On sauvegarde puis on lance les calculs.

La Figure 118 montre les charges obtenues à proximité du puits. La Figure 119 montre le profil des débits dans le puits. Le débit provenant de la nappe varie de 0.187 à 0.256 m<sup>3</sup>/h par mètre de puits.

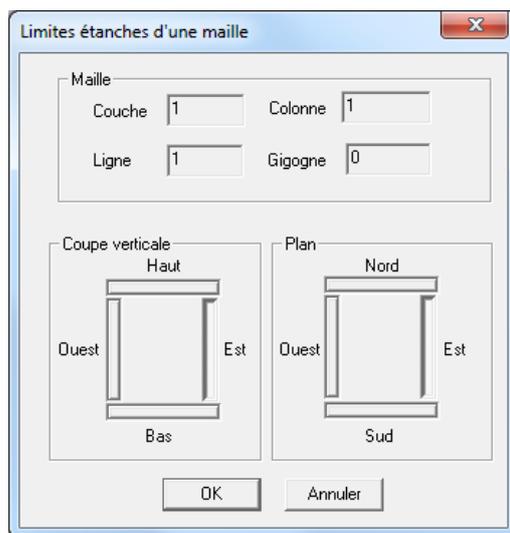


Figure 116 – Introduction d'une liaison étanche à l'Est de la maille supérieure du puits.

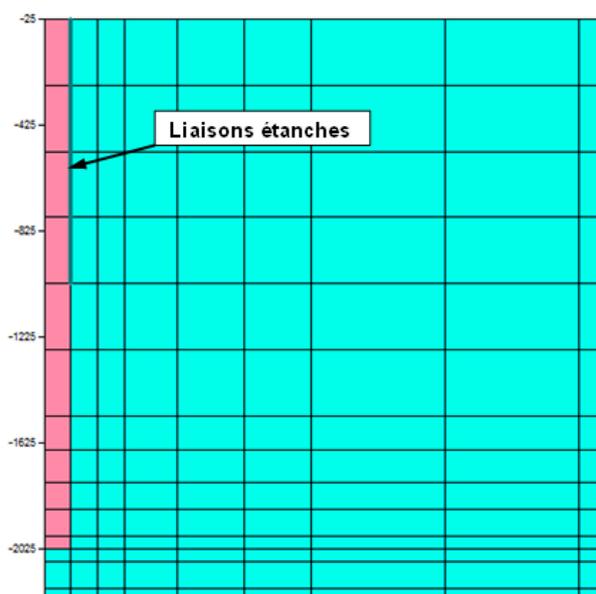


Figure 117 – Puits en coupe verticale, en rose, avec liaisons étanches à l'Est des quatre mailles supérieures.

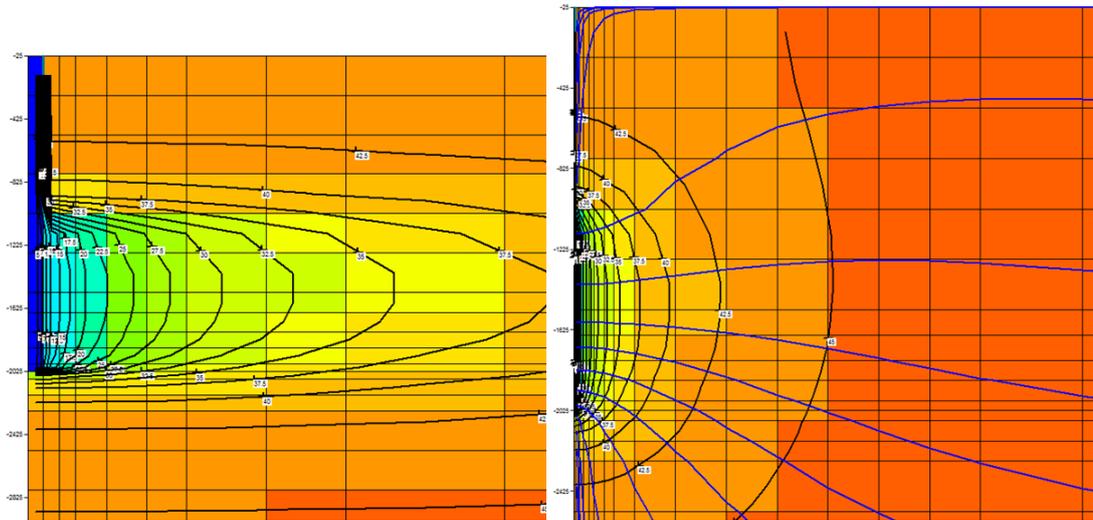


Figure 118 – Charges au voisinage du puits. Dessin de gauche : jusqu'à une distance radiale de 3 mètres (échelle radiale dilatée). Dessin de droite : jusqu'à une distance radiale de 25 mètres avec visualisation des trajectoires.

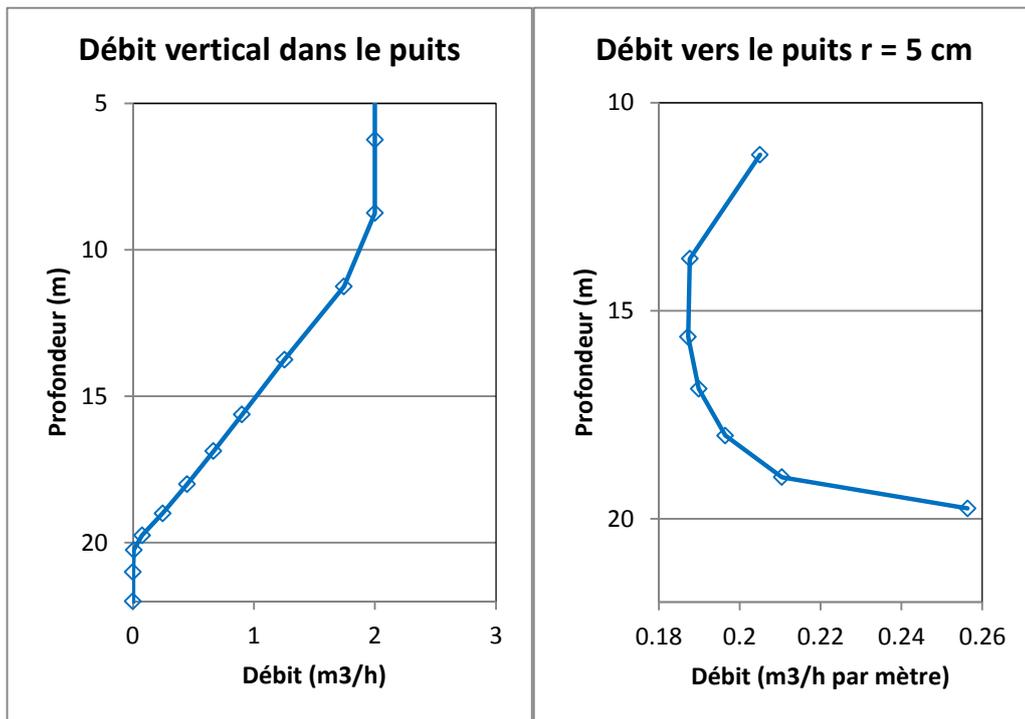


Figure 119 – Profils de débit dans un puits crépiné de 10 m à 20 m de profondeur : à gauche : débit vertical dans le puits ; à droite débit venant de la nappe.



## 22. Exemple n°13 : Simulation d'écoulement de gaz pour réaliser du « venting »

Cet exemple, montre comment simuler des écoulements de gaz, par exemple pour dimensionner un dispositif de « venting ». Dans cet exemple on prend uniquement en compte l'écoulement du gaz, en supposant que les variations de pression étant faibles ont peu d'influence sur la saturation en eau.

Cet exemple montre également comment réaliser un maillage radial plan (rayon , angle).

### 22.1. DEFINITION DU SYSTEME MODELISE

Les caractéristiques du système sont les suivantes (Figure 120) :

#### Géométrie :

- Le domaine est constitué d'une épaisseur d'aquifère de 20 mètres d'épaisseur, recouverte par une formation imperméable, ou bien par une bâche isolante. On suppose par exemple que la zone non saturée est située de la cote 0 mètre à la cote -20 mètres. L'extension de l'aquifère est un carré de 400 m sur 400 m.
- Cet aquifère est traversé en son centre par un pompage qui pompe l'air de la zone non saturée (supposée quasiment saturée en air). L'aquifère est mis en communication avec l'extérieur par trois « puits à l'air » positionnés sur un triangle équilatéral ; ces puits recoupent également toute l'épaisseur de la zone non saturée.

#### Paramètres hydrodynamiques :

- Perméabilité intrinsèque de l'aquifère :  $K = 1. 10^{-12} \text{ m}^2$
- Porosité :  $\omega = 15 \%$  de gaz.
- Masse molaire du gaz = 29 g / mole (ce qui correspond à l'air).
- Débits de pompage = 80 kg/h
- La température est de 12°C

#### État initial :

- Le gaz est à pression atmosphérique.

#### Maillage :

On réalise la modélisation en monocouche. On adopte un maillage régulier formé de 41 lignes de 41 colonnes de mailles carrées de 10 mètres de côté avec l'origine du

maillage au point de coordonnées -5 m , -5 m. Le maillage s'étend donc de -5 m à 405 m dans chaque direction.

Dans le fichier des paramètres [.mart] on définit :

**Paragraphe : Contrôle de la Résolution Hydrodynamique :**

0 = Nombre Maxi d'itérations par pas de temps calcul suivant le pas n°0  
 100 = Nombre maxi d'itérations pour le pas de temps n°0 (Permanent Init.)  
 1e-7 = Variation moyenne de Charge entre 2 itérations pour convergence  
 Perman = Régime de l'Hydrodynamique [0=Transitoire ; 1=Permanent]

**Paragraphe : Unités des données :**

1e-12 = Unité des Perméabilités des aquifères en m/s (ou **m2**)  
 2.78e-4 = Unité des Débits en m3/s (ou **kg/s** si Gaz)  
 % = Unité des Porosités = Teneurs en Eau en [-] ['%' si en %]  
**Intrins** = Type de Perméab. : (0=Déf=Perméab. à l'eau ; 1=Perméab intrinsèque)  
**kPa** = Unité des Pressions de Gaz en m d'eau (Déf = unité de charges)  
*(Pression du gaz en kilo-Pascals)*

**Paragraphe : Température , effets Thermiques :**

12 = Température de référence [viscosité, Gaz, Chimie, etc.] [Déf=20°C]

**Paragraphe : Eau, Gaz, Huile, Eau Salée :**

0 = Calcul de la Phase Eau [0=Non ; 1=Oui]  
 1 = Calcul de la Phase Gaz (Air) [0=Non ; 1=Oui ; 2=Toujours Atmosphérique]

**Paragraphe : Écoulement de Gaz :**

0 = Masse molaire du gaz (grammes) [Déf=air=29g]  
*(Donc on prend la masse molaire par défaut de 29 g/mol)*  
**Atmosph** = Définition de la Press du Gaz [Déf=0=Pression - P\_atmosph. ;  
 1=Pression absolue]  
*(Donc on définit la pression par rapport à la pression atmosphérique)*

**Paragraphe : Initialisation avant calculs :**

/DEBIT_GAZ/MAILLE	C=	12L=	16P=	1V=	9999;
/DEBIT_GAZ/MAILLE	C=	30L=	16P=	1V=	9999;
/DEBIT_GAZ/MAILLE	C=	21L=	31P=	1V=	9999;

*(Pression imposée [à la press. atmosphérique] dans les 3 puits à l'air)*

/DEBIT_GAZ/MAILLE	C=	21L=	21P=	1V=	-80;
-------------------	----	------	------	-----	------

*(Pompage au centre du modèle : 80 kg/heure)*

## 22.2. SIMULATION EN REGIME PERMANENT

### Lancement des calculs.

Le calcul est réalisé en régime permanent. Dans le fichier des pas de temps [.pastp], on demande la sauvegarde de : la pression du gaz « PRESS\_GAZ », le débit de gaz « DEBIT\_GAZ », la masse volumique du gaz « MASSE\_VOL\_GAZ » l'amplitude de la vitesse « VITESS\_AMPLIT » et de la « VITESSE ». En fait la vitesse et l'amplitude de la vitesse correspondent en réalité au débit massique divisé par la section et par la porosité. Ils sont donnés pour visualiser les écoulements.

On lance alors les calculs qui s'exécutent en une fraction de seconde, et on vérifie qu'ils ont bien convergé. La Figure 120 montre les pressions de gaz calculées, la Figure 121 montre les masse volumiques du gaz qui sont de l'ordre de 1 à 1.2 kg/m<sup>3</sup>, et la Figure 122 l'amplitude relative de la vitesse.

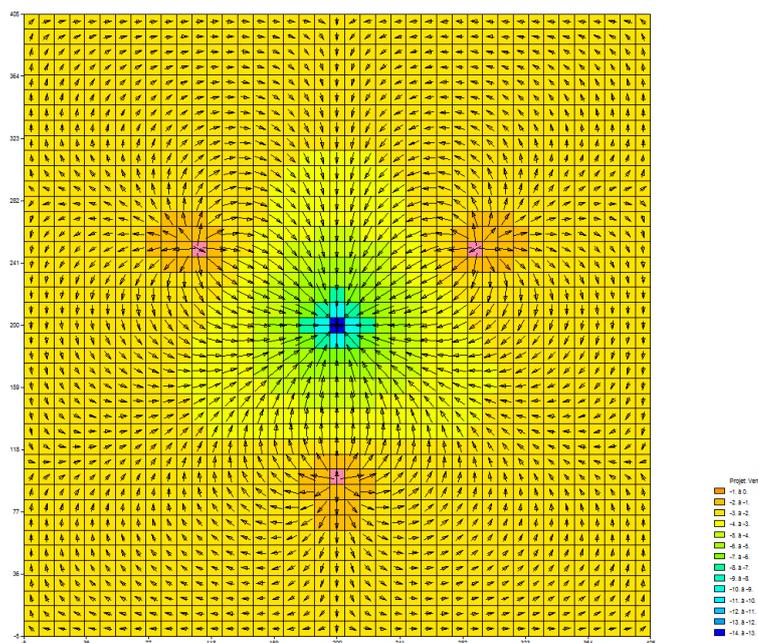


Figure 120 – Venting en régime permanent : pressions du gaz calculées en kPa.

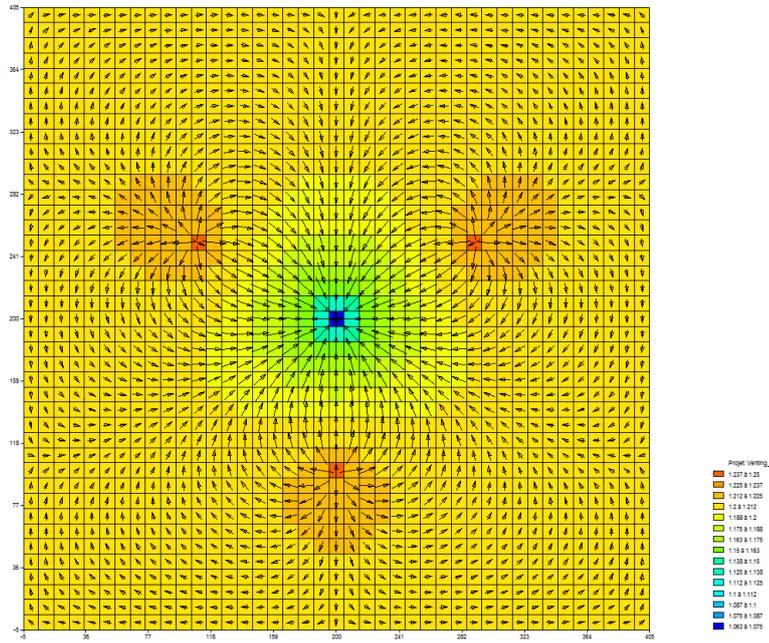


Figure 121 – Venting : masse volumique du gaz calculées en  $\text{kg/m}^3$ .

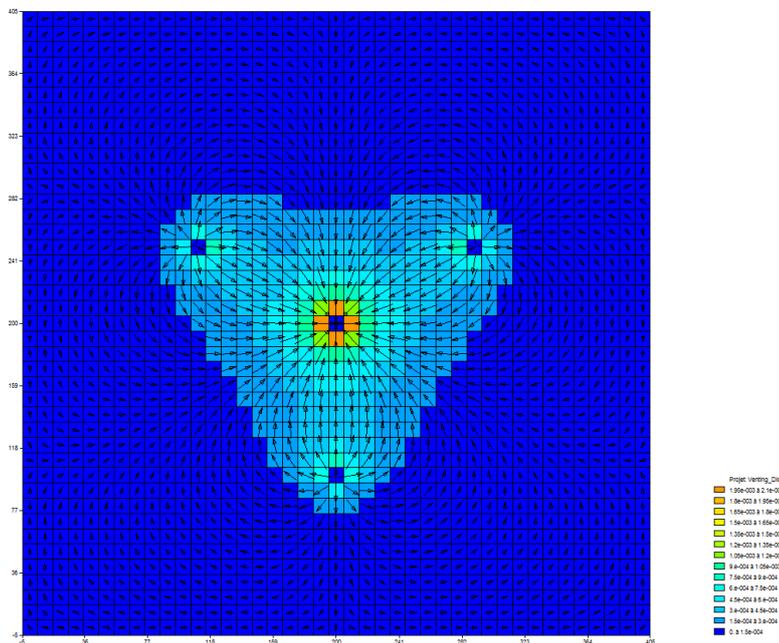


Figure 122 – Venting : amplitude relative de la vitesse du gaz.

### 22.3. MODELISATION FINE AVEC UN MAILLAGE RADIAL PLAN (RAYON , ANGLE)

Pour étudier plus finement les écoulements au voisinage du puits on va réaliser un maillage radial (rayon , angle), très raffiné au voisinage du puits. Compte tenu de la symétrie, on a modélisé uniquement le domaine compris dans un angle de 120°. En fait il aurait suffi de modéliser un secteur d'angle de 60°. On a modélisé les écoulements compris le secteur d'angle qui s'étend de -30° à +90° (dans le sens trigonométrique). En effet les deux rayons à -30° et à +90° correspondent à des lignes de courant donc à des limites étanches.

#### Maillage :

Le domaine à modéliser est formé de 37 arcs de cercles de 120°, centrés sur le puits, et de 23 rayons découpant les 120°

On crée donc un nouveau maillage irrégulier formé de 37 colonnes et 23 lignes.

- Les 37 colonnes correspondent à 37 couronnes de largeurs croissantes de 0.1 m à 10 m, couvrant au total une extension de 250 mètres.
- Les 23 lignes correspondent à 23 secteurs d'angles allant de -30° à +90°. En fait, pour plus de lisibilité on a gradué ces secteurs de 0° à 120° Le puits à l'air est situé à la distance 100 m, à un angle de 60°, soit dans la maille de colonne n°22, ligne n°12.

Les largeurs, en mètres, des 37 colonnes sont précisées dans le Tableau 7.

0.1	0.14	0.2	0.3	0.38	0.55	0.73	1	1.4	2	3.2	4	5	8	10
10	10	10	10	10	8	10	10	10	10	10	10	10	10	10
10	10	10	10	10	10	10								

Tableau 7 – Largeurs en mètres des 37 colonnes du maillage radial.

Les largeurs des 23 lignes sont toutes de 6°, sauf les lignes n°10 et n°14 qui ont une largeur de 3° et les lignes n°11 à n°13 qui ont une largeur de 2°. Ce découpage irrégulier a été choisi pour bien simuler le puits à l'air, situé en ligne n°12.

#### Puits :

Compte tenu de ce maillage : Le puits de pompage correspond à toutes les mailles de la colonne n°1. On a réparti le débit proportionnellement aux largeurs des lignes :

- -1.33333 dans toutes les lignes de 6° de cette colonne
- -0.66667 dans les deux lignes de 3° (lignes n°10 et n°14)

- -0.44444 dans les trois lignes de 2° (lignes n°11 à n°13)

Soit au un débit total de -26.6666 kg/h, qui est le 1/3 du débit de -80 kg/h, puisqu'on ne modélise que le 1/3 du domaine.

Les seules modifications à apporter sont :

Dans le fichier des paramètres [.mart] :

**Paragraphe : Initialisation avant calculs :**

/DEBIT_GAZ/MAILLE	C=	22L=	12P=	1V=	9999;
<i>(Pression imposée [à la pression atmosphérique] dans le puits à l'air)</i>					
/DEBIT_GAZ/MAILLE	C=	1L=	*P=	1V=	-1.333333;
/DEBIT_GAZ/MAILLE	C=	1L=	10P=	1V=	-0.666667;
/DEBIT_GAZ/MAILLE	C=	1L=	11:13 P=	1V=	-0.444444;
/DEBIT_GAZ/MAILLE	C=	1L=	14P=	1V=	-0.666667;
<i>(Puits de Pompage : débit -26.666 kg/h réparti selon la largeur des mailles)</i>					

Dans le fichier des couches [.layer] on définit :

1 = Maillage Radial [Rayon , Angle] (0=Non ; 1=Oui)
<i>(Pour définir que le maillage est « radial [Rayon , Angle]</i>

On lance alors les calculs qui s'exécutent en une fraction de seconde.

La Figure 123 montre le champ de pression calculé dans ce schéma radial. Sur cette figure les abscisses sont les distances radiales et les ordonnées sont les angles, de 0° à 120°. Le calcul est réellement réalisé en coordonnées radiales, et seule la représentation des champs simulés est donnée sous forme de coordonnées cartésiennes (rayon , angle).

La Figure 124 montre deux profils de pression jusqu'au voisinage du puits de pompage, qui a un rayon de 0.1 mètre, donc un centre de maille à la distance radiale 0.05 mètre. Le profil bleu passe par un « puits à l'air », tandis que le profil rouge correspond à la ligne n°1, en limite du maillage, c'est-à-dire à mi-distance entre deux « puits à l'air » (correspondant à l'angle de 120°). Il apparaît qu'au puits de pompage la pression décroît de plus de 15 kPa entre la distance de 10 m, correspondant au maillage cartésien, et la distance de 0.1 m du maillage radial. Ce dernier apporte donc une précision nettement accrue.

Pour réaliser la Figure 124, on a importé sous Excel le fichier « chasim.out » contenant les pressions calculées. Ce fichier est facilement importable sous Excel, ou son équivalent. Il suffit alors de réaliser un graphique de la ligne n°1 et de la ligne n°12.

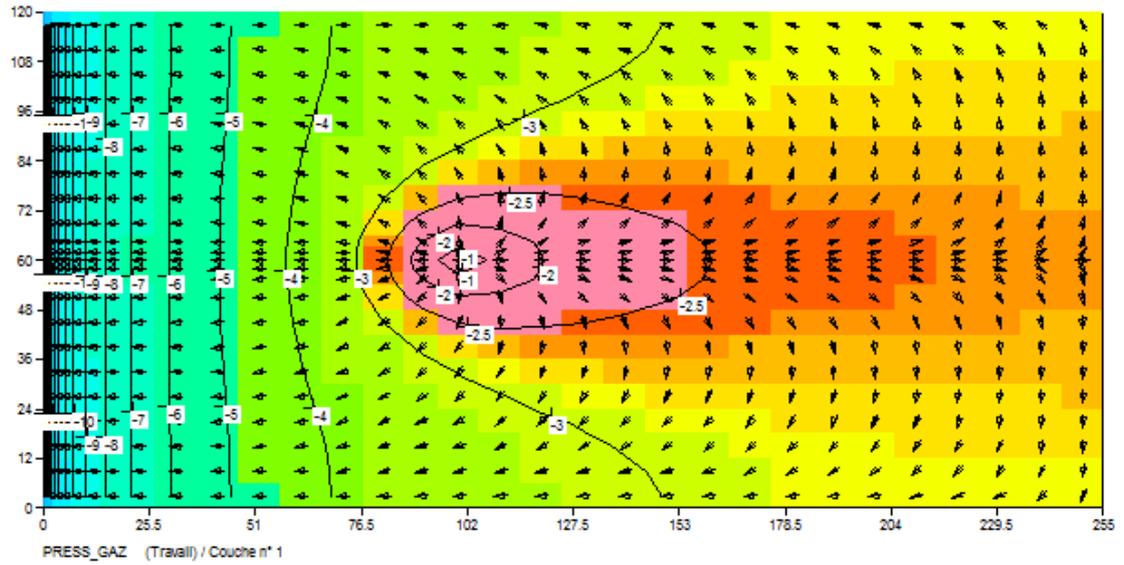


Figure 123 – Venting avec un maillage radial : pressions du gaz calculées en kPa. (Distances radiales en abscisses et angles, de 0° à 120° en ordonnées).

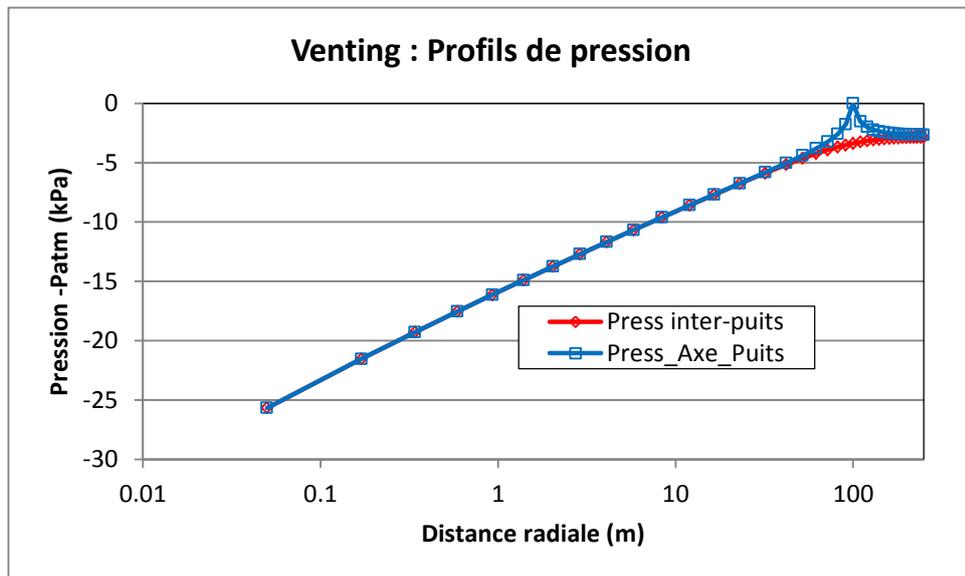


Figure 124 – Venting avec un maillage radial : profils de pressions du gaz jusqu'au voisinage du puits.



## 23. Exemple n°14 : Transport avec adsorptions de Langmuir et de Freundlich

Cet exemple, montre comment simuler des transferts de masse en schématisant les interactions avec la matrice poreuse selon l'isotherme de Langmuir ou l'isotherme de Freundlich.

L'exemple présenté, décrit par Grove et Stollenwerk (1984), est cité par Zheng et Wang (1998). Il s'agit d'un écoulement à travers une colonne avec un échelon de concentration.

### 23.1. DEFINITION DU SYSTEME MODELISE

Les caractéristiques du système sont les suivantes :

#### Géométrie :

Le domaine est constitué d'une colonne horizontale de grande dimension, de section  $1 \text{ m}^2$ , dans laquelle circule un écoulement avec une vitesse réelle de  $0.1 \text{ cm/s}$ .

La colonne choisie a pour dimensions :

- Longueur = 50 cm
- Largeur = 1 m
- Épaisseur = 1 m
- Soit une section de  $10^{+4} \text{ cm}^2$ .

On choisit comme unités :

- Longueurs = cm
- (Charges = m)
- Débits =  $\text{cm}^3/\text{s}$
- Temps = secondes
- Concentrations =  $\mu\text{g}/\text{cm}^3$

#### Conditions aux limites :

On introduit un débit sur la limite amont, située à gauche, et on impose la charge à 0 m sur la limite aval, située à droite. Pour avoir un écoulement en charge, et donc une vitesse uniforme : on fixe le toit à la cote -1 m, et le substratum à la cote -2 m.

Le débit rentre par la limite amont avec une « Concentration extérieure » égale à  $50 \mu\text{g}/\text{cm}^3$  pendant 160 secondes, puis à la concentration 0 à partir de cette date.

On calcule l'évolution au cours du temps de la concentration à une distance de 8 cm en aval du point d'injection.

**Maillage :**

On adopte un maillage régulier formé d'une ligne de 200 mailles de 0.25 cm, soit 50 cm de long.

**Paramètres hydrodynamiques et de transport :**

- Perméabilité :  $K = 1. 10^{-3}$  m/s  
(Cette perméabilité n'a aucune influence sur le transport. Elle sert uniquement à avoir des charges hydrauliques raisonnables).
- Porosité :  $\omega = 37 \%$
- Soit un débit dans la colonne n°1 :  $Q_{\text{amont}} = 0.1 \text{ cm/s} \times 37\% \times 10^{+4} \text{ cm}^2 = 370 \text{ cm}^3/\text{s}$ .
- Dispersivité = 0.01 m
- Diffusion moléculaire = 0.

Le nombre de Péclet est égal à « Dispersivité / Longueur des mailles », d'où  $Pe = 0.25$

Dans le fichier des paramètres [.mart] on définit :

**Paragraphe : Contrôle de la Résolution Hydrodynamique :**

```

0 = Nombre Maxi d'itérations par pas de temps calcul suivant le pas n°0
1 = Nombre maxi d'itérations pour le pas de temps n°0 (Permanent Init.)
1e-6 = Variation moyenne de Charge entre 2 itérations pour convergence
Perman = Régime de l'Hydrodynamique [0=Transitoire ; 1=Permanent]
    
```

**Paragraphe : Unités des données :**

```

cm3/s = Unité des Débits                en m3/s (ou kg/s si Gaz)
Sec = Unité de Temps (des Pas de modèle) (sec, min, heu, jou, etc.)
cm = Unité des Coordonnées Horizontales des mailles en m
mug/L = Unité des Concentrations en kg/m3
      (mug est l'abréviation utilisée pour « microgramme par litre »)
% = Unité des Porosités = Teneurs en Eau en [-] ['%' si en %]
    
```

**Paragraphe : Initialisation avant calculs :**

```

/POROSITE/GRILLE      N: =37
/H_TOPOGR/GRILLE     N: ==-1
/H_SUBSTRAT/GRILLE   N: ==-2
/DEBIT/MAILLE        C=      1L=      1P=      1V=      370;
/CONCEN_EXT/MAILLE   C=      1L=      1P=      1V=      50;
/DEBIT/MAILLE        C=     200L=      1P=      1V=     9999;
    
```

Pour obtenir l'évolution des concentrations à 8 cm de distance, on demande l'historique de la concentration dans la colonne n°32, donc à une distance sensiblement égale à 8 cm du point d'injection. Dans ce but on crée un fichier historique avec la ligne suivante

```
/Concentr /HISTO/ = /MAIL:C= 32L= 1P= 1;
```

### Transport de masse :

Pour modéliser le transport de masse on adopte le schéma TVD et un pas de temps régulier de 10 secondes. Comme les mailles ont une largeur de 0.25 cm, pour une vitesse de 0.1 cm/s, le pas de temps de calcul ne doit pas dépasser 2.5 secondes pour garantir un nombre de Courant qui ne dépasse pas 1. Tous les pas de temps seront donc automatiquement découpés en 4 sous pas de temps.

## 23.2. CALCUL AVEC L'ISOTHERME DE LANGMUIR

### Paramètres d'adsorption selon l'isotherme de Langmuir :

- Densité sèche du milieu poreux :  $Rho_S = 1587 \text{ kg/m}^3$
- Constante d'équilibre de Langmuir :  $K_L = 100 \text{ L/mg}$
- Capacité d'adsorption de Langmuir :  $S_{MAX} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ } \mu\text{g/g}$

Dans MARTHE on n'introduit pas directement la densité sèche. Les deux paramètres de Langmuir sont introduits sous la forme :

- $ConC_{REF} = 1 / K_L$  : en unité utilisateur de concentration.
- $ConC_{MAX} = Rho_S \times S_{MAX}$  : en unité utilisateur de concentration.

Compte tenu de ces définitions on a :

- $ConC_{REF} = 1 / K_L = 0.01 \text{ mg/L}$   
 $= 10 \text{ } \mu\text{g/cm}^3$
- $ConC_{MAX} = Rho_S \times S_{MAX} = 1587 \text{ kg/m}^3 \times 3 \cdot 10^{-3} \text{ } \mu\text{g/g}$   
 $= 1587 \text{ g/cm}^3 \times 3 \cdot 10^{-3} \text{ } \mu\text{g/g}$   
 $= 4.761 \text{ } \mu\text{g/cm}^3$

On introduit donc dans le fichier des paramètres [.mart]

### Paragraphe : **Couplage et Transport Concentration, Chaleur, Salinité :**

```
TVD = Schéma de Transport
0 = Diffusion moléculaire (m2/s) [* = Spatialisée]
0.01 = Dispersivité Longitudinale (m) [* = Spatialisée]
2 = Nombre max d'itérations pour une sorption de schéma Langmuir (déf=20)
```

### Paragraphe : **Concentration et Trajectoires :**

```
1 = Calcul de la Concentration
```

1e-5 = Variation moyenne de Concentration entre 2 itérat. pour convergence  
 Transit = Régime du Transport de Concentration [0=Transitoire ; 1=Permanent]  
 Langm = Type de Sorption [0=Non = Linéaire ; 1=Langmuir ; 2=Freundlich]  
 10 = Paramètre de Sorption n°1 [Concent Refer Langmuir ; Kfv\_Freundlich]  
 4.761 = Paramètre de Sorption n°2 [Site Total Langmuir ; Expos\_Freundlich]

On réalise les calculs pendant une période de 500 secondes.

**Résultats :**

On lance les calculs qui se terminent après quelques secondes. L'historique des concentrations calculées de la colonne n°32 est dans le fichier « historiq.prn » : La Figure 125 présente l'évolution de la concentration, comparée aux calculs de Zheng et Wang (1998).

**23.3. CALCUL AVEC L'ISOTHERME DE FREUNDLICH**

**Paramètres d'adsorption selon l'isotherme de Freundlich :**

- Densité sèche du milieu poreux :  $\rho_{s} = 1587 \text{ kg/m}^3$
- Constante d'équilibre de Freundlich :  $K_F = 0.3 (\mu\text{g/g}) \cdot (\text{L/mg})^B$
- Exposant de l'adsorption de Freundlich :  $B = 0.7$  (adimensionnel)

On remarque que la constante d'équilibre de Freundlich  $K_F$  a une unité complexe.

Dans MARTHE on n'introduit pas directement la densité sèche. Le premier paramètre de Freundlich est introduit sous la forme de la constante d'équilibre volumique  $K_{FV}$  exprimée en « unité utilisateur de concentration » à la puissance  $(1 - B)$  :

$$K_{FV} = (\rho_{s} \times K_F) \text{ exprimé en (unité utilisateur de concentration)}^{(1-B)}$$

$$K_{FV} = 1587 \text{ g/L} \times 0.3 (\mu\text{g/g}) \cdot (\text{L/mg})^{0.7} \text{ qu'il faut exprimer en } (\mu\text{g/L})^{0.3}$$

$$K_{FV} = 476.1 \mu\text{g/L} \times (\text{L/mg})^{0.7} = 476.1 \mu\text{g/L} \times (\text{L}/1000 \mu\text{g})^{0.7} = 476.1 \times 1000^{-0.7} (\mu\text{g/L})^{0.3}$$

Soit :  $K_{FV} = 3.7818 (\mu\text{g/L})^{0.3}$

Le deuxième paramètre est l'exposant  $B = 0.7$

On introduit donc dans le fichier des paramètres [.mart]

**Paragraphe : Couplage et Transport Concentration, Chaleur, Salinité :**

TVD = Schéma de Transport  
 0 = Diffusion moléculaire (m2/s) [\* = Spatialisée]  
 0.01 = Dispersivité Longitudinale (m) [\* = Spatialisée]  
 8 = Nombre max d'itérations pour une sorption de schéma Langmuir (déf=20)

(On augmente ce nombre d'itérations car les interactions sont plus fortes)

### Paragraphe : Concentration et Trajectoires :

```

1 = Calcul de la Concentration
1e-5 = Variation moyenne de Concentration entre 2 itérat. pour convergence
Transit = Régime du Transport de Concentration [0=Transitoire ; 1=Permanent]
Freund = Type de Sorption [0=Non = Linéaire ; 1=Langmuir ; 2=Freundlich]
3.7818 = Paramètre de Sorption n°1 [Concent_Refer_Langmuir ; Kfv_Freundlich]
0.7 = Paramètre de Sorption n°2 [Site_Total_Langmuir ; Expos Freundlich]

```

On réalise les calculs pendant une période de 1500 secondes.

### Résultats :

On lance les calculs qui se terminent après quelques secondes. L'historique des concentrations calculées de la colonne n°32 est dans le fichier « historiq.prn » : La Figure 126 présente l'évolution de la concentration, comparée aux calculs de Zheng et Wang (1998).

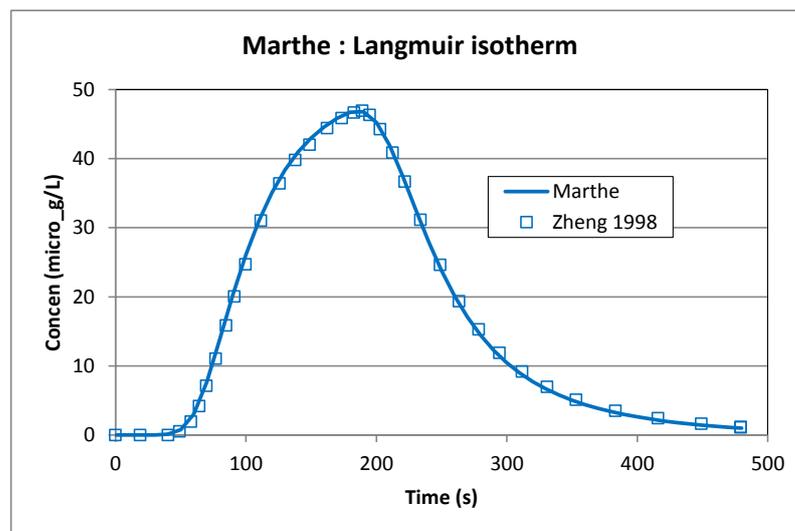


Figure 125 – Transport avec adsorption selon l'isotherme de Langmuir.

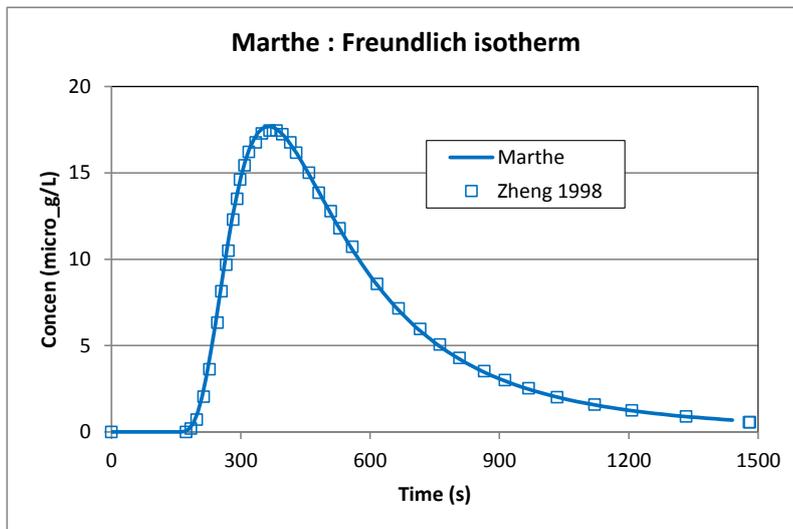


Figure 126 – Transport avec adsorption selon l'isotherme de Freundlich.

## 24. Exemple n°15 : Transport multicomposant avec dégradation en chaîne

Cet exemple, montre comment simuler des transferts de masse multicomposant avec dégradation en chaîne. Le cas le plus classique est un schéma en « série » avec composant n°1 → composant n°2 → composant n°3 etc.

Trois exemples sont présentés. Ils sont tous relatifs à des écoulements en 1D à travers une colonne infinie ou semi-infinie :

- Nitrification :  $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^+$   
Cet exemple est décrit par Cho (1971) et van Genuchten (1985) qui en donne une solution analytique et un logiciel pour la calculer.
- Dégradation en chaîne de 4 éléments : solution de Bauer et al. (2001).
- Dégradation en chaîne d'éléments radioactifs :  $^{234}\text{U} \rightarrow ^{230}\text{Th} \rightarrow ^{226}\text{Ra}$   
Cet exemple est décrit van Genuchten (1985) qui donne une méthode de calcul de la solution analytique.

### 24.1. EXEMPLE DE LA NITRIFICATION

Les caractéristiques du système sont les suivantes :

- Milieu semi-infini
- Vitesse réelle de filtration : 1 cm/h
- Diffusion moléculaire :  $5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$
- Coefficients de retard ( $\text{NH}_4$  ;  $\text{NO}_2$  ;  $\text{NO}_3$ ) = (2 ; 1 ; 1)
- Temps de  $\frac{1}{2}$  dégradation ( $\text{NH}_4$  ;  $\text{NO}_2$  ;  $\text{NO}_3$ ) = (138.63 h, 6.93 h, infini)  
équivalent à des constantes de dégradation = ( $0.005 \text{ h}^{-1}$ ,  $0.1 \text{ h}^{-1}$ ,  $0 \text{ h}^{-1}$ )
- Date de fin de calcul : 200 heures.

La code de calcul MARTHE utilise comme paramètre de dégradation le temps de  $\frac{1}{2}$  dégradation ou « demi-vie »  $t_d$ , qui est le temps après lequel une concentration est divisée par 2 sous l'effet du processus de dégradation exponentielle. Le paramètre contrôlant la dégradation est parfois donné sous forme de constante de dégradation  $\lambda$  exprimée en inverse de temps. La relation entre ces deux paramètres est :

$$t_d = \text{Ln}(2) / \lambda \quad [\text{où } \text{Ln}(2) = \text{Logarithme népérien de } 2 = 0.6931]$$

Par exemple :

$\lambda = 1.389 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  correspond à  $t_d = 4.9906 \cdot 10^5$  secondes (soit 138.63 heures).

$\lambda = 0.005 \text{ h}^{-1}$  correspond à  $t_d = 138.63 \text{ h}$ .

### **Géométrie :**

Le domaine semi infini est constitué d'une colonne horizontale de grande dimension, de section  $1 \text{ m}^2$ , soumise à un écoulement de vitesse réelle  $1 \text{ cm/h}$ . Compte tenu de cette vitesse, de la durée de 200 heures et de la faible diffusion moléculaire, on choisit une colonne de 250 cm de long.

La colonne choisie a pour dimensions :

- Longueur = 250 cm
- Largeur = 100 cm
- Épaisseur = 100 cm
- Soit une section de  $10^{+4} \text{ cm}^2$ .

On choisit comme unités :

- Longueurs = cm
- (Charges = cm)
- Débits =  $\text{cm}^3/\text{h}$
- Temps = heures
- Concentrations = sans importance

### **Conditions aux limites :**

On introduit un débit sur la limite amont, située à gauche, et on impose la charge à 0 m sur la limite aval, située à droite. Pour avoir un écoulement en charge, donc à vitesse uniforme : on fixe le toit à la cote -100 cm, et le substratum à la cote -200 cm.

### **Maillage :**

On adopte un maillage régulier formé d'une ligne de 625 mailles de 0.4 cm, soit au total 250 cm de long.

### **Paramètres hydrodynamiques et de transport :**

- Perméabilité :  $K = 1 \text{ cm/h}$   
(La valeur de cette perméabilité n'a aucune influence sur le transport. Elle sert uniquement à avoir des charges hydrauliques raisonnables).
- Porosité :  $\omega = 10 \%$
- Soit un débit dans la colonne n°1 :  $Q_{\text{amont}} = 1 \text{ cm/h} \times 10\% \times 10^{+4} \text{ cm}^2 = 1000 \text{ cm}^3/\text{h}$ .
- Dispersivité = 0 m
- Diffusion moléculaire =  $5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$

Le nombre de Péclet numérique est égal à 2.2

### Transport de masse :

Le débit rentre par la limite amont avec une « Concentration extérieure » en NH<sub>4</sub><sup>+</sup> égale à 1. On calcule le profil de concentration des 3 composants après 200 heures.

Pour modéliser le transport de masse on adopte le schéma TVD. On crée 5 pas de temps de modèle de 40 heures, chacun subdivisé en 10 sous pas de temps, soit 50 pas de temps de 4 heures ce qui correspond à nombre de Courant numérique égal à 10. Avec le schéma de transport TVD le nombre de Courant ne doit pas dépasser 1. Chaque pas de temps sera donc automatiquement découpé en 10 sous pas de temps.

Il est aussi possible de réaliser le transport par la méthode des différences finies. En revanche le transport par la méthode MOC n'est pas opérationnel dans cette version.

#### 24.1.1. Mise en œuvre de la modélisation

##### Création du maillage :

On crée un nouveau projet WinMarthe. Le maillage est défini par l'origine : X0 = -0.2 cm ; Y0 = -50 cm, 1 ligne de 625 colonnes, 1 couche, largeur des colonnes = 0.4 cm, largeur de la ligne = 100 cm, cote topographique = -100 cm, épaisseur = 100 cm.

##### Profil d'utilisateur :

On crée un profil d'utilisateur avec les options suivantes :

- Régime transitoire
- Transport de masse
- Multicomposant : dégradation en chaîne
- Utilisation avancée

```
0 = Nombre Maxi d'itérations par pas de temps calcul suivant le pas n°0
1 = Régime Transitoire
1 = Transport de masse Classique
1 = Couplage Géochim ou Multicomp. (1=SCS, Chaîne ; 2=PHREEQC ; 3=TREACT)
1 = Utilisation Avancée
```

##### Transport de masse : champs multicomposants :

En transport de masse multicomposant un certain nombre de champs de données sont multicomposants :

- La concentration : « CONCENTR »,
- La concentration extérieure : « CONCEN\_EXT »,

- La concentration de la recharge : « CONCEN\_RECH »,
- Le débit massique : « QMASS\_CONC »,
- Le Dirac de masse injecté « MASS\_CONCEN ».

Les noms des fichiers contenant (éventuellement) ces champs ne sont pas donnés dans le fichier projet puisqu'il y a un fichier, donc un nom de fichier, par composant.

On peut introduire un tel champ multicomposant à la fin du fichier des paramètres, dans le paragraphe « Initialisation avant calculs », ou dans le « fichier des pas de temps », au pas de temps n°0. On peut par exemple introduire un champ de concentration sous forme de « Modification » par « GRILLE ». Comme on a choisi un profil d'utilisateur avec dégradation en chaîne, donc multicomposant, le préprocesseur demande le numéro du composant auquel on affecte la concentration (ou le débit massique). De la même manière le numéro du composant doit être précisé lors des modifications par « MAILLE », par « COUCHE » ou par « ZONE ».

### Fichier des paramètres :

Dans le fichier des paramètres [.mart] on définit :

#### Paragraphe : Pas de Temps et sous-pas de temps :

10 = Nombre de sous-pas de temps de modèle	[Défaut=1]
--	------------

#### Paragraphe : Contrôle de la Résolution Hydrodynamique :

0 = Nombre Maxi d'itérations par pas de temps calcul suivant le pas n°0
2 = Nombre maxi d'itérations pour le pas de temps n°0 (Permanent Init.)
5e-8 = Variation moyenne de Charge entre 2 itérations pour convergence
Perman = Régime de l'Hydrodynamique [0=Transitoire ; 1=Permanent]

#### Paragraphe : Unités des données :

<b>cm/h</b> = Unité des Perméabilités des aquifères en m/s
<b>cm3/h</b> = Unité des Débits en m3/s (ou kg/s si Gaz)
cm = Unité des Charges, Altitudes, Pressions en m
Heu = Unité de Temps (des Pas de modèle) (sec, min, heu, jou, etc.)
cm = Unité des Coordonnées Horizontales des mailles en m
% = Unité des Porosités = Teneurs en Eau en [-] ['%' si en %]

#### Paragraphe : Couplage et Transport Concentration, Chaleur, Salinité :

TVD = Schéma de Transport
5e-9 = Diffusion moléculaire (m2/s) [* = Spatialisée]
0 = Dispersivité Longitudinale (m) [* = Spatialisée]

**Paragraphe : Concentration et Trajectoires :**

```

1 = Calcul de la Concentration
1e-5 = Variation moyenne de Concentration entre 2 itérat. pour convergence
Transit = Régime du Transport de Concentration [0=Transitoire ; 1=Permanent]
2 = Nombre d'éléments de Filiation en chaîne de la Dégradation [déf=0]
[C'est ici qu'on définit qu'il y a 2 fils, donc 3 composants chimiques]

```

**Paragraphe : Initialisation avant calculs :**

```

/POROSITE/GRILLE          N: =10
/H_TOPOGR/GRILLE         N: ==100
/H_SUBSTRAT/GRILLE        N: ==200
/DEBIT/MAILLE             C=      1L=      1P=      1V=      1000;
/DEBIT/MAILLE             C=     625L=      1P=      1V=      9999;
/CONCEN_EXT/MAILLE/TOT=  1; C=      1L=      1P=      1V=      100;N:
/CONCEN_EXT/MAILLE/TOT=  *; C=   625L=      1P=      1V=      9999;N:

```

On remarque qu'on doit définir le composant auquel on affecte la concentration extérieure « CONCEN\_EXT ». Ici on définit la concentration extérieure du composant dissout « TOT » (pour « Total ») n°1 et on la fixe à 100 (Figure 127)

De même on impose (à 0) la concentration de tous les composants de la limite aval (TOT = \*). Cette imposition n'est pas vraiment nécessaire mais est présentée ici à titre de démonstration.

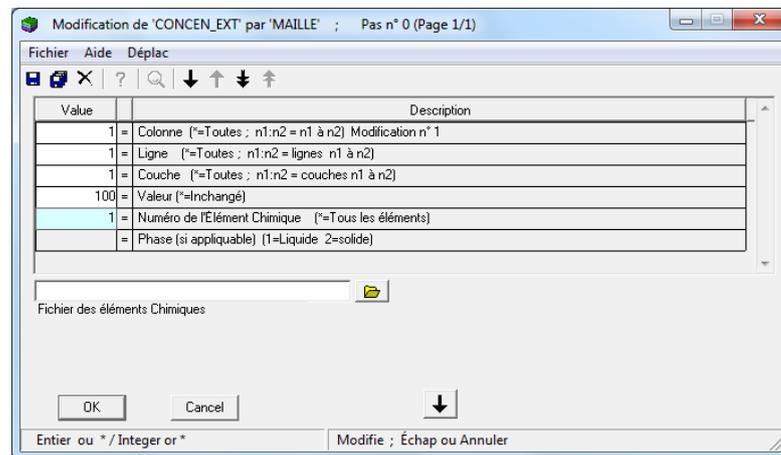


Figure 127 – Définition d'une concentration ou d'une concentration extérieure en précisant le composant.

De la même manière il est possible de demander, en certaines mailles, des historiques de concentration d'un composant donné.

### Définition des temps de ½ dégradation (demi-vie) multicomposants et des facteurs de retard multicomposants :

Le fichier des « temps de ½ dégradation », d'extension [.tdchn] se constitue facilement avec un éditeur de texte. Il a la forme suivante :

```
Temps de 1/2 dégradation en heures NH4 -> NO2 -> NO3 [Titre descriptif]
NH4+      : 138.63
NO2-      : 6.9314718
NO3-      : 0.
```

Les temps de ½ dégradation (ou demie vie) sont donnée en unité de temps, donc ici en heures.

La définition de coefficients de coefficients de partage volumiques rho .x kd multicomposants n'est pas opérationnelle dans cette version.

De la même manière, le fichier des « facteurs de retard », d'extension [.retch] a la forme suivante :

```
Facteurs de Retard : NH4 -> NO2 -> NO3 [Titre]
NH4+      : 2.
NO2-      : 0.
NO3-      : 0.
```

On peut également définir un fichier de « noms des composants chimiques », d'extension [.nomch]. Ces noms apparaîtront alors dans les fichiers de résultats.

Ce fichier de noms (qui est facultatif) a la forme suivante :

Noms des composants : Dégradation en chaine : NH4 -> NO2 -> NO3 [Titre]  
 << Composants Dissouts >> [2<sup>ème</sup> titre quelconque, mais obligatoire]  
 Nom Composant n°1 : NH4+  
 Nom Composant n°2 : NO2-  
 Nom Composant n°3 : NO3-

Pour introduire ces 3 fichiers dans le fichier projet : à partir de WinMarthe :

On clique sur l'icône  pour faire apparaître le menu général des « paramètres non maillés ». On double-clique sur « Fichiers du projet », presque tout en bas. On peut alors introduire les noms de ces fichiers (Figure 128).

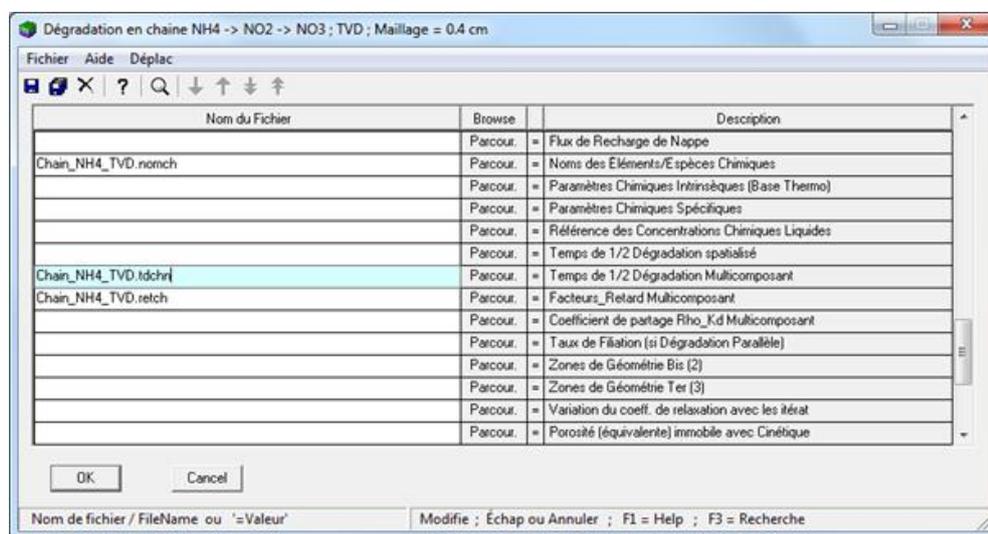


Figure 128 – Introduction de fichiers de données non maillées : fichier de temps de ½ dégradation multicomposant, de temps de retard multicomposant, de noms des composants.

### Fichier des pas de temps :

On crée automatiquement 5 pas de temps égaux de 40 heures. Au dernier pas de temps on demande la sauvegarde du champ de concentration des 3 composants.

```

*** Le pas :      5: se termine à la date :      200; ***
/CONCENTR/EDITION/TOT=  *;      I= 1;V= 0;R= 0;
      [« * » signifie « tous » les composants]
/*****/*****/ Fin de ce pas

```

### 24.1.2. Résultats de la modélisation

On lance les calculs qui se terminent après quelques secondes.

Il convient de remarquer que les bilans de masses donnés dans le fichier de bilan « bilandeb.txt » ou « histomas.prn » se rapportent uniquement au composant n°1.

Les profils de concentrations calculées de  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$  et  $\text{NO}_3^-$  sont comparés avec la solution analytique. La Figure 129, réalisée à partir du fichier « chasimsq.prn » généré par le modèle, montre que les concentrations simulées de  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$  et  $\text{NO}_3^-$  sont identiques à celles de la solution analytique de Cho (1971) et van Genuchten (1985).

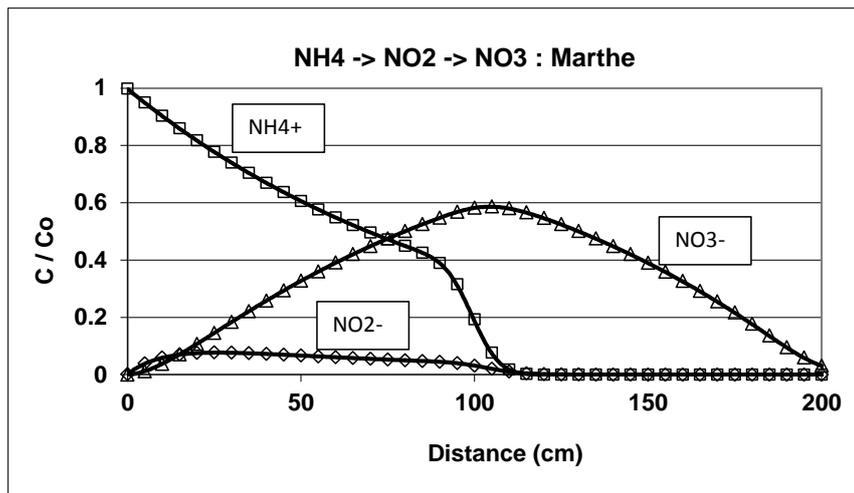


Figure 129 – Nitrification : Concentrations simulées par Marthe (trait continu) comparées à la solution analytique (symboles).

## 24.2. INJECTION INSTANTANEE DE MASSE DANS UN MILIEU 1D D'EXTENSION INFINIE

Les caractéristiques du système à 4 composants sont les suivantes :

- Milieu infini
- Vitesse réelle de filtration : 1 m/j
- Dispersivité longitudinale : 10 m
- Coefficients de retard (C1 à C4) = (5.3, 1.9, 1.2, 1.3)
- Temps de  $\frac{1}{2}$  dégradation (C1 à C4) = (990.2, 1386.3, 1540.3, 1824.1) jours
- Date de fin de calcul : 3000 jours

### Géométrie :

Le domaine infini est constitué d'une colonne de grande dimension, de section 1 m<sup>2</sup>, soumise à un écoulement de vitesse réelle 1 m/j. Compte tenu de cette vitesse, de la durée de 3000 jours choisit une colonne de 3500 m de long. Comme le milieu est infini, et par symétrie on choisit en fait une colonne, sur l'axe des ordonnées, dont les ordonnées s'étendent de -3495 m à + 3495 m.

La colonne choisie a pour dimensions :

- Longueur = 3500 m environ dans la partie des ordonnées positives.
- Largeur = 1 m
- Épaisseur = 1 m
- Soit une section de 1 m<sup>2</sup>.

On choisit comme unités :

- Longueurs = m
- (Charges = m)
- Débits = m<sup>3</sup>/J
- Temps = jours
- Concentrations = sans importance

### Conditions aux limites :

On introduit un débit dans la maille amont, située en bas (ligne n°699), et on impose la charge à 0 m sur la limite aval, située en haut (ligne n°1). Pour avoir un écoulement en charge, donc une vitesse uniforme : on fixe le toit à la cote -1 m, et le substratum à la cote -2 m.

### Maillage :

On adopte un maillage régulier formé d'une colonne de 699 mailles de 10 m de largeur à partir de l'ordonnée -3495 mètres, soit 6990 m de long au total.

### Paramètres hydrodynamiques et de transport :

- Perméabilité : K = 1 m/j

(La valeur de cette perméabilité n'a aucune influence sur le transport. Elle sert uniquement à avoir des charges hydrauliques raisonnables).

- Porosité :  $\omega = 10 \%$
- Soit un débit dans la ligne n°699 :  $Q_{\text{amont}} = 1 \text{ m}^3/\text{j} \times 10\% \times 1 \text{ m}^2 = 0.1 \text{ m}^3/\text{j}$ .
- Dispersivité = 10 m
- Diffusion moléculaire = 0

Le nombre de Péclet numérique est égal à 1

### Transport de masse :

On introduit instantanément une masse du composant n°1 au milieu de la colonne et on calcule le profil de concentration des 4 composants après 3000 jours.

Pour modéliser le transport de masse on adopte le schéma TVD. On crée 300 pas de temps de modèle de 10 jours correspond à nombre de Courant numérique égal à 1.

### 24.2.1. Mise en œuvre de la modélisation

#### Création du maillage :

On crée un nouveau projet WinMarthe. Le maillage est défini par l'origine :  $X0 = -0.5 \text{ m}$  ;  $Y0 = -3495 \text{ m}$ , 1 colonne de 699 lignes, 1 couche, largeur de la colonne = 1 m, largeur des lignes = 10 m, cote topographique = -1 m, épaisseur = 1 m.

#### Profil d'utilisateur :

On crée un profil d'utilisateur identique à l'exemple précédent.

#### Fichier des paramètres :

Dans le fichier des paramètres [.mart] on définit :

#### Paragraphe : Contrôle de la Résolution Hydrodynamique :

```

0 = Nombre Maxi d'itérations par pas de temps calcul suivant le pas n°0
3 = Nombre maxi d'itérations pour le pas de temps n°0 (Permanent Init.)
5e-8 = Variation moyenne de Charge entre 2 itérations pour convergence
Perman = Régime de l'Hydrodynamique [0=Transitoire ; 1=Permanent]
    
```

#### Paragraphe : Unités des données :

```

m/J = Unité des Perméabilités des aquifères en m/s
m3/J = Unité des Débits en m3/s (ou kg/s si Gaz)
Jou = Unité de Temps (des Pas de modèle) (sec, min, heu, jou, etc.)
    
```

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

### Paragraphe : Couplage et Transport Concentration, Chaleur, Salinité :

```
TVD = Schéma de Transport
```

```
10 = Dispersivité Longitudinale (m) [* = Spatialisée]
```

### Paragraphe : Concentration et Trajectoires :

```
1 = Calcul de la Concentration
```

```
Transit = Régime du Transport de Concentration [0=Transitoire ; 1=Permanent]
```

```
3 = Nombre d'éléments de Filiation en chaîne de la Dégradation [déf=0]
```

```
[C'est ici qu'on définit qu'il y a 3 fils, donc 4 composants chimiques]
```

### Paragraphe : Initialisation avant calculs :

```
/POROSITE/GRILLE      N: =10
```

```
/H_TOPOGR/GRILLE     N: =-1
```

```
/H_SUBSTRAT/GRILLE   N: =-2
```

```
/DEBIT/MAILLE        C=      1L=      699P=      1V=      0.1;
```

```
/DEBIT/MAILLE        C=      1L=      1P=      1V=      9999;
```

### Définition des temps de ½ dégradation (demi-vie) multicomposants et des facteurs de retard multicomposants :

Le fichier des « temps de ½ dégradation », d'extension [.tdchn] a la forme suivante :

```
Temps de 1/2 dégradation : Bauer et al. 2001 [Titre descriptif]
```

```
Élém 1      : 990.2102
```

```
Élém 2      : 1386.294
```

```
Élém 3      : 1540.3271
```

```
Élém 4      : 1824.07153
```

Les temps de ½ dégradation (ou demie vie) sont donnée en unité de temps, donc ici en jours.

Le fichier des « facteurs de retard », d'extension [.retch] a la forme suivante :

```
Coefficients de Retard ===== Bauer et al. 2001
```

```
Élém 1      : 5.3
```

```
Élém 2      : 1.9
```

```
Élém 3      : 1.2
```

```
Élém 4      : 1.3
```

On peut éventuellement définir un fichier de « noms des composants chimiques », d'extension [.nomch].

Pour introduire ces 2 fichiers dans le fichier projet on procède comme dans l'exemple précédent.

### Fichier des pas de temps :

On crée automatiquement 300 pas de temps égaux de 10 jours. Au premier pas de temps on introduit dans la phase liquide de la maille centrale (ligne n°350) une masse égale à  $10^6 / 5.3$ , soit  $1.8867 \cdot 10^4$  unités de masse. Au dernier pas de temps on demande la sauvegarde du champ de concentration des 4 composants.

```

*** Le pas :      1: se termine à la date :      10; ***
  /MASS_CONCEN/MAILLE/TOT= 1;      C=      1L=      350P=      1V=      18867;N:
  /*****/*****/ Fin de ce pas
... ..
*** Le pas :    300: se termine à la date :     3000; ***
  /CONCENTR/EDITION/TOT=  *;      I= 1;V= 0;R= 0;
  /*****/*****/ Fin de ce pas

```

## 24.2.2. Résultats de la modélisation

On lance les calculs qui se terminent après quelques secondes. Les profils de concentrations calculées des 4 composants comparés avec la solution analytique. La Figure 129, réalisée à partir du fichier « chasimsq.prn » généré par le modèle, montre que les concentrations simulées des quatre composants C1 à C4 (de gauche à droite) sont quasiment identiques à celles de la solution analytique de Bauer et al. (2001).

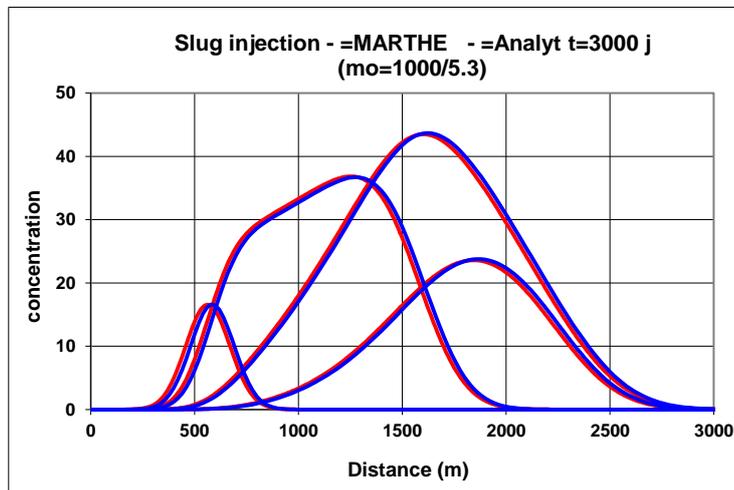


Figure 130 – Injection instantanée d'une masse en milieu infini dégradation en chaîne à 4 composants. Comparaison des concentration simulées (en rouge) avec la solution analytique (en bleu).

### 24.3. DEGRADATION EN CHAÎNE DE PRODUITS RADIOACTIFS : URANIUM, THORIUM, RADIUM

Les caractéristiques du système à 3 composants sont les suivantes :

- Milieu semi infini
- Concentration imposée en un point
- Vitesse réelle de filtration : 100 m/an
- Dispersivité longitudinale : 10 m
- Coefficients de retard ( $^{234}\text{U}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ) = (14300, 50000, 500)
- Temps de  $\frac{1}{2}$  vie ( $^{234}\text{U}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ) = ( $2.4493 \cdot 10^5$ ,  $7.7016 \cdot 10^4$ ,  $1.6 \cdot 10^5$ ) années
- Date de fin de calcul : 10000 ans

#### Géométrie :

Le domaine semi infini est constitué d'une colonne horizontale de grande dimension, de section  $1 \text{ m}^2$ , soumise à un écoulement de vitesse réelle 100 m/an. On choisit une colonne de 750 m de long de l'abscisse -1.25 m à 748.75 m.

La colonne choisie a pour dimensions :

- Longueur = 750 m
- Largeur = 1 m
- Épaisseur = 1 m
- Soit une section de  $1 \text{ m}^2$

On choisit comme unités :

- Débits =  $\text{m}^3/\text{an}$
- Temps = années
- Concentrations = sans importance

#### Conditions aux limites :

On introduit un débit sur la limite amont, située à gauche, et on impose la charge à 0 m sur la limite aval, située à droite. Pour avoir un écoulement en charge, donc à vitesse uniforme : on fixe le toit à la cote -1 m, et le substratum à la cote -2 m.

#### Maillage :

On adopte un maillage régulier formé d'une ligne de 300 mailles de 2.5 m soit au total 750 m de long.

#### Paramètres hydrodynamiques et de transport :

- Perméabilité :  $K = 1 \text{ m/an}$   
(La valeur de cette perméabilité n'a aucune influence sur le transport. Elle sert uniquement à avoir des charges hydrauliques raisonnables).
- Porosité :  $\omega = 10 \%$

- Soit un débit dans la ligne n°699 :  $Q_{\text{amont}} = 100 \text{ m/an} \times 10\% \times 1 \text{ m}^2 = 10 \text{ m}^3/\text{an}$ .
- Dispersivité = 10 m
- Diffusion moléculaire = 0

Le nombre de Péclet numérique est égal à 0.25

### Transport de masse :

Dans la maille amont, la maille n°1, on impose la concentration d'Uranium à 1 et la concentration du Thorium et du Radium à 0, et on calcule le profil de concentration des 3 composants après 10000 jours.

Pour modéliser le transport de masse on adopte le schéma TVD. On crée 200 pas de temps de modèle de 50 ans. Compte tenu de cette durée de pas de temps le nombre de Courant numérique serait égal à 2000 si ignorait les facteurs de retard, mais le nombre de Courant est en fait beaucoup plus petit compte tenu des grands facteurs de retard.

### 24.3.1. Mise en œuvre de la modélisation

#### Création du maillage :

On crée un nouveau projet WinMarthe. Le maillage est défini par l'origine :  $X0 = -1.25 \text{ m}$  ;  $Y0 = -0.5 \text{ m}$ , 1 ligne de 300 colonnes, 1 couche, largeur des colonnes = 2.5 m, largeur de la ligne = 1 m, cote topographique = -1 m, épaisseur = 1 m.

#### Profil d'utilisateur :

On crée un profil d'utilisateur identique à l'exemple précédent.

#### Fichier des paramètres :

Dans le fichier des paramètres [.mart] on définit :

##### Paragraphe : **Contrôle de la Résolution Hydrodynamique :**

```
0 = Nombre Maxi d'itérations par pas de temps calcul suivant le pas n°0
3 = Nombre maxi d'itérations pour le pas de temps n°0 (Permanent Init.)
Perman = Régime de l'Hydrodynamique [0=Transitoire ; 1=Permanent]
```

##### Paragraphe : **Unités des données :**

```
m/an = Unité des Perméabilités des aquifères en m/s
m3/an = Unité des Débits en m3/s (ou kg/s si Gaz)
Ann = Unité de Temps (des Pas de modèle) (sec, min, heu, jou, etc.)
```

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

### Paragraphe : Couplage et Transport Concentration, Chaleur, Salinité :

```
TVD = Schéma de Transport
```

```
10 = Dispersivité Longitudinale (m) [* = Spatialisée]
```

### Paragraphe : Concentration et Trajectoires :

```
1 = Calcul de la Concentration
```

```
Transit = Régime du Transport de Concentration [0=Transitoire ; 1=Permanent]
```

```
2 = Nombre d'éléments de Filiation en chaîne de la Dégradation [déf=0]
```

```
[C'est ici qu'on définit qu'il y a 2 fils, donc 3 composants chimiques]
```

### Paragraphe : Initialisation avant calculs :

```
/POROSITE/GRILLE      N: =10
/H_TOPOGR/GRILLE     N: =-1
/H_SUBSTRAT/GRILLE   N: =-2
/DEBIT/MAILLE        C=      1L=      1P=      1V=      10;
/DEBIT/MAILLE        C=    300L=      1P=      1V=     9999;
```

### Définition des temps de ½ dégradation (demi-vie) multicomposants et des facteurs de retard multicomposants :

Le fichier des « temps de ½ dégradation », c'est-à-dire le temps de demi-vie ou « période », d'extension [.tdchn] a la forme suivante :

```
Temps de 1/2 de dégradation (en années) [Titre descriptif]
Uranium-234 : 2.4493E5
Thorium-240 : 7.7016E4
Radium-226  : 1.6E5
```

Les temps de ½ dégradation (ou demie vie) sont donnée en unité de temps, donc ici en années.

Le fichier des « facteurs de retard », d'extension [.retch] a la forme suivante :

```
Coefficients de Retard ===== [Titre descriptif]
Uranium-234 : 1.43E4
Thorium-240 : 5.0E4
Radium-226  : 500
```

Le fichier de noms des composants a la forme suivante :

```
Dégradation en chaine : Uranium => Thorium => Radium [Titre]
<< Composants Dissouts >> [2ème titre quelconque, mais obligatoire]
Élém 1 : Uranium-234
Élém 2 : Thorium-240
Élém 3 : Radium-226
```

Pour introduire ces 3 fichiers dans le fichier projet on procède comme dans les exemples précédents.

### Fichier des pas de temps :

On crée automatiquement 200 pas de temps égaux de 50 ans. Pas de temps n°0 fixe dans la première maille une concentration égale à 1 pour l'Uranium et à 0 pour le Thorium et le Radium. Au dernier pas de temps on demande la sauvegarde du champ de concentration des 3 composants.

```
*** Début de la simulation à la date : 0; ***
/CONCENTR/MAILLE/TOT= 1; C= 1L= 1P= 1V= 1;
/CONCENTR/MAILLE/TOT= 2; C= 1L= 1P= 1V= 0;
/CONCENTR/MAILLE/TOT= 3; C= 1L= 1P= 1V= 0;
/CONCEN_EXT/MAILLE/TOT= *; C= 1L= 1P= 1V= 9999;N:
/*****/*****/ Fin de ce pas
... ..
*** Le pas : 200: se termine à la date : 10000; ***
/CONCENTR/EDITION/TOT= *; I= 1;V= 0;R= 0;
/*****/*****/ Fin de ce pas
```

### 24.3.2. Résultats de la modélisation

On lance les calculs qui se terminent après quelques secondes. Les profils de concentrations calculées des 3 composants comparés avec la solution analytique calculée avec le logiciel de van Genuchten (1985). La Figure 131, réalisée à partir du fichier « chasimsq.prn » généré par le modèle, montre que les concentrations en l'Uranium, en Thorium et en Radium simulées par le code MARTHE sont quasiment identiques à celles de la solution analytique, même pour une amplitude de variation de concentration de 10 puissances de 10.

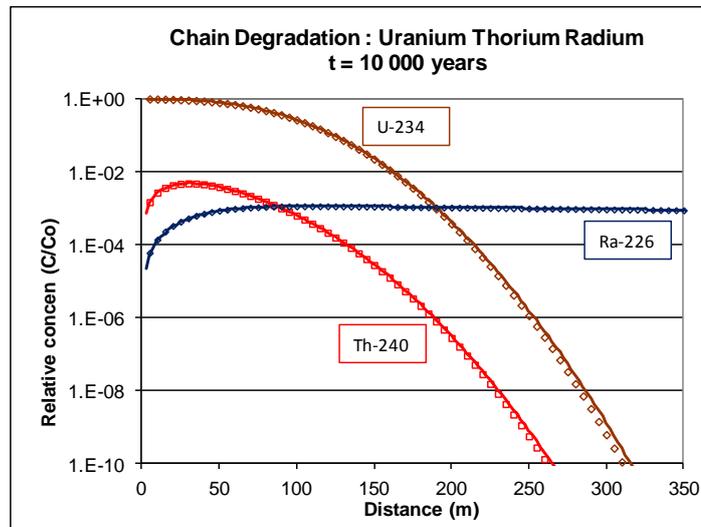


Figure 131 – Réaction en chaîne Uranium ->Thorium-> Radium en milieu semi infini  
Concentration simulées par Marthe (trait continu) comparées à la solution analytique  
(symboles).



## 25. Bibliographie

- Bauer P., Attinger S., Kinzelbach W. (2001) - Transport of a decay chain in homogenous porous media : analytical solutions. *Journal of Contaminant Hydrology* 49 (2001) 217-239.
- Cooley, R.L. (1983) - Some new procedures for numerical solution of variably saturated flow problems. *Water Resour. Res.*, 19(5), 1271-1285.
- Douez, O., Bichot, F., Petit, V. (2011) - Contribution à la gestion quantitative des ressources en eau à l'aide du modèle Jurassique de Poitou-Charentes. Rapport BRGM/RP-59288-FR. 411 p., 286 fig..
- Chiang, W., Kinzelbach, W., (1998). Processing MODFLOW, A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Pollution, User's Manual, 325 pp.
- Cho, C. M. 1971 - Convective transport of ammonium with nitrification in soil, *Can. Jour. Soil Sci.*, 51(3), 339-350.
- Grove, D.B. & Stollenwerk, K.G. (1984) - Computer model of one-dimensional equilibrium-controlled sorption processes. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 89-4059, 58 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 Program, Nairobi, Kenya. ISBN 92-80702131-3.
- Saltel M., Pédron N. (2012) - Contribution à la révision du SAGE Nappes Profondes de Gironde : Utilisation du Modèle Nord-Aquitain dans le cadre du module « Tendances et Scénarios ». Rapport BRGM/RP-60416-FR, 56 p., 24 fig., 5 ann.
- Thiéry D. (1990a) - 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. (1990b) - 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. (1995a) - Modélisation 3D du transport de masse avec le logiciel MARTHE version 5.4. Rapport BRGM R 38149 DR/HYT 95. , 171 pp.
- Thiéry, D. (1995b) - Modélisation des écoulements avec interactions chimiques avec le logiciel MARTHE. Version 5.5, Rapport BRGM n° R 38463 HYT/DR 95.
- 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. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-54652-FR.pdf>. (Accès Avril 2014).
- 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. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-55871-FR.pdf>. (Accès Avril 2014).
- Thiéry, D. (2009) – Modèles d’hydrogéologie. *in Traité d'hydraulique environnementale - Volume 3 - Modèles mathématiques en hydrologie et en hydraulique fluviale*. Tanguy J.M. (Ed.) - Éditions Hermès - Lavoisier. Chapitre 4 pp. 95-117. ISBN 978-2-7462-1838-3.
- Thiéry, D. (2010a) – Modélisation des écoulements souterrains en milieu poreux avec MARTHE. *in Traité d'hydraulique environnementale – Volume 9 – Logiciels d'ingénierie du cycle de l'eau*. Tanguy J.M. (Ed.) - Éditions Hermès - Lavoisier. Chapitre 4 pp. 77-94. ISBN 978-2-7462-2339-4.
- Thiéry, D. (2010b) – Hydrogeologic Models. *in “Mathematical Models Volume 2, chapter 4, pp. 71-92 • Environmental Hydraulics Series”*. Tanguy J.M. (Ed.) – Éditions Wiley/ISTE London. ISBN: 978-1-84821-154-4.
- Thiéry, D. (2010c) – Groundwater Flow Modeling in Porous Media Using MARTHE. *in “Modeling Software Volume 5, Chapter 4, pp. 45-60 • Environmental Hydraulics Series”*. Tanguy J.M. (Ed.) – Éditions Wiley/ISTE London. ISBN: 978-1-84821-157-5.
- Thiéry, D. (2013a) - Didacticiel du code de calcul Gardénia v8.1. Vos premières modélisations. Rapport BRGM/RP-61720-FR, 127 p., 93 fig. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-61720-FR.pdf> . (Accès Avril 2014).
- Thiéry, D. (2014) – Logiciel GARDÉNIA, version 8.2. Guide d'utilisation. BRGM/RP-62797-FR, 126 p., 65 fig., 2 ann. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-62797-FR.pdf>. (Accès Avril 2014).

- 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., 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.
- van Genuchten, M. Th. 1985 - Convective-dispersive transport of solutes involved in sequential first-order decay reactions, *Computers & Geosciences*, 11(2), 129-147.
- Vinsome, P.K.W. and J. Westerveld (1980) - A Simple Method for Predicting Cap and Base Rock Heat Losses in Thermal Reservoir Simulators, *J.Canadian Pet. Tech.*, 19 (3), 87–90, July-September 1980.
- Zheng C. and Wang P.P. (1998) - MT3DMS A modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminant in groundwater systems. Documentation and User's Guide. Contract Report SERDP-99-1, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.



## Annexe 1

### Icônes et boutons du préprocesseur WinMarthe

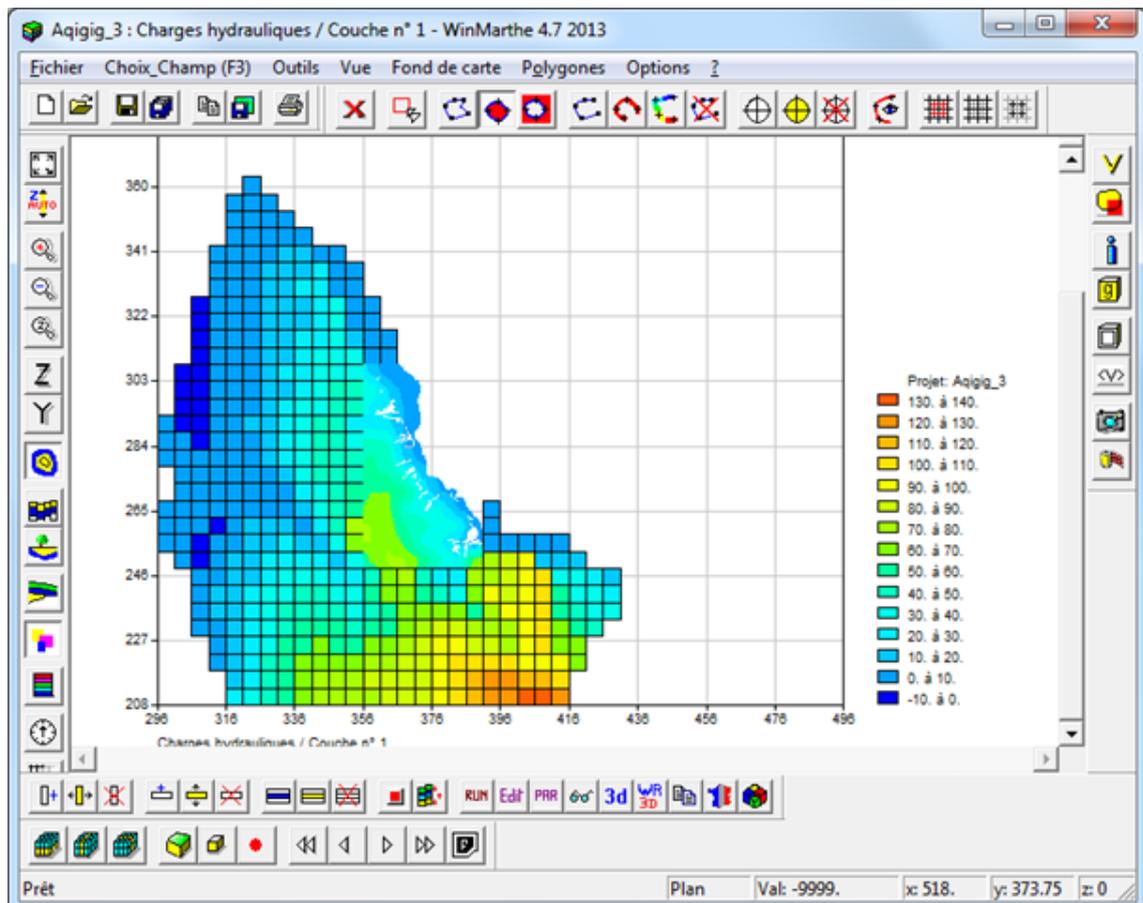


Figure 132 – Fenêtre principale du préprocesseur graphique WinMarthe.

#### 25.1. 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.

## 25.2. 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 champ.



Définit des plages de couleurs personnalisées.



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



Rafrâchit le dessin : recoloré.

## 25.3. BOUTONS DE LA BARRE DE DROITE

Ces boutons concernent principalement les actions relatives aux valeurs des champs : 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 champ 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.

## 25.4. BOUTONS SUR LES BARRES DU BAS

### 25.4.1. 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 champs. WinMarthe ne permet pas de gérer le transfert des champs 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 beaucoup 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 « grille », 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.

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



Passé en mode sélection par couche. Pour sélectionner toute les mailles de la couche : double-cliquer sur une maille de la couche, qui apparaît alors en rouge.



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



Passé 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).



Passé 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).



Reculé 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.

### 25.5. RACCOURCIS CLAVIER

- **F3** : Choix d'un champ
- **Control\_R** : Ouvre un fichier **R**ésultat (champs simulés)
- **Control\_I** : Isovaleurs simples
- **Control\_D** : Isovaleurs **D**oubles

- Control\_Q : Plages de coupures éQui-réparties
  - Control\_T : Plages de coupures logariThmiques
  - Control\_L : Plages de coupures Linéaires
  - Control\_U : Plages de coupures Utilisateur
- 
- Control\_E : Éditeur de grilles
- 
- Control\_A : Select All (Sélectionner tout)
  - Control\_P : Imprimer (Print) la fenêtre
  - Control\_S : Sauvegarder le projet
  - Maj+Control\_S : Sauvegarder le projet sous
- 
- Majusc. F5 : Lancement de la simulation (Run)
  - Control F : Fit to Page (Le dessin remplit au mieux l'écran)
  - Control\_B : Ouvrir un champ « Travail » (anciennement « Brouillon »)
  - Control\_H : Position des mailles à Historiques
  - Alter\_S : Statistiques
  - Alter\_T : Transformation numérique
  - Alter\_O : Opération entre champs
  - Control\_C : Copie la vue (ou une partie) dans le presse-papier
  - Alter\_P : Gestion des Polygones
- 
- Alter\_C : Dessin des Contours de mailles (remet/retire)
  - Alter\_M : Affichage du Maillage
  - Alter\_F : Affichage du Fond de carte
  - Control\_G : Aller à : colonne, ligne, couche (Go to)
- 
- Contr+Alter\_T : Plages de couleurs pour Tout le domaine





**Centre scientifique et technique  
Service EAU**

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