Document public

Code de calcul MARTHE
Modélisation 3D des écoulements dans les hydrosystèmes

Notice d'utilisation de la version 7.5

BRGM/RP-64554-FR
Décembre 2015

Dominique Thiéry

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Code de calcul MARTHE Modélisation 3D des écoulements dans les hydrosystèmes

Notice d'utilisation de la version 7.5

BRGM/RP-64554-FR
Décembre 2015

Rapport écrit dans le cadre des projets
de maturation du BRGM 2015

Dominique Thiéry

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : Y. Barthélemy	Nom : S. Lallier
Date : 19/12/2015	Date : 07/01/2016
Signature :	Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots-clés : Modélisation des écoulements souterrains, Interaction avec le réseau hydrographique, Notice d'utilisation

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

Thiéry D. (2015) – Code de calcul MARTHE - Modélisation 3D des écoulements dans les hydrosystèmes - Notice d'utilisation de la version 7.5. BRGM/RP-64554-FR, 306 p., 150 fig.

© BRGM, 2015, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Ce rapport présente en détail la version 7.5 du code de calcul MARTHE (Modélisation d'Aquifères par un maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Ecoulements) du BRGM.

Le code de calcul MARTHE permet de modéliser les hydrosystèmes en intégrant, de manière couplée, les écoulements souterrains, le bilan hydroclimatique, et les écoulements en rivières.

MARTHE permet en particulier de modéliser en 3D et multicouche les écoulements, le transport de masse et le transfert thermique en zone saturée et en zone non saturée, en milieux monophasiques et diphasiques, en prenant en compte les effets densitaires et les effets thermiques

La discrétisation utilise un schéma à volumes finis avec un maillage parallélépipédique (ou rectangulaire) irrégulier. Il est possible de représenter des systèmes complexes multicouches, avec disparition locale de couche et présence de surfaces libres en n'importe quelle couche.

Le maillage peut intégrer des sous-maillages gigognes pour affiner localement la discrétisation.

MARTHE permet aussi bien la modélisation de systèmes régionaux multicouches de plusieurs milliers de kilomètres carrés d'extension que la modélisation fine de milieux poreux de quelques centimètres cube, avec des mailles millimétriques.

Des informations détaillées sur le code MARTHE du BRGM sont disponibles sur le site http://marthe.brgm.fr/

Sommaire

1. Introduction 15
2. Description générale du code MARTHE 16

2.1. DOMAINE D'APPLICATION DU CODE DE CALCUL MARTHE 16

2.2. CARACTÉRISTIQUES DU CODE DE CALCUL MARTHE 18
2.2.1. Caractéristiques générales 18
2.2.2. Confort d'utilisation 19
2.2.3. Capacité d'utilisation 20

2.3. MAILLAGES 22
2.3.1. Différent types de maillage 22
2.3.2. Maillages gigognes 27

2.4. LES SCHÉMAS NUMÉRIQUES DE CALCUL 31

2.5. EXTENSION DU DOMAINE AQUIFÈRE 33

2.6. CONDITIONS AUX LIMITES 33

2.7. AGENCEMENT DES COUCHES 34

2.8. IMPORT ET EXPORT DE DONNÉES 38
2.8.1. Imports 38
2.8.2. Exports 39

2.9. LANCEMENT DE LA SIMULATION, ET ARRÊT ANTICIPÉ DE LA SIMULATION 41
2.9.1. Lancement en mode « batch » (pour utilisateurs avancés) 41
2.9.2. Arrêt exceptionnel de la simulation 42
3. Les fichiers toujours nécessaires pour une simulation 43
4. Principe du réseau hydrographique et du réseau de drains 45

4.1. PRINCIPE DU RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE DE RIVIÈRES 45
4.1.1. Présentation du réseau hydrographique 45
4.1.2. Propagation du débit dans un tronçon de rivière 47
4.1.3. Débit échangé entre un tronçon de rivière et l'aquifère 49
4.1.4. Organisation détaillée du réseau hydrographique et terminologie 50
4.1.5. Numérotation des éléments du réseau hydrographique 51
4.1.6. Arbre de branchement des affluents de rivière 51
4.1.7. Cas particulier des « étangs » ou « estuaires » 51
4.1.8. Dérivations de débit 52
4.1.9. Options de calcul 52

4.1.10. Champs de données à définir dans chaque maille contenant un tronçon de rivière 53
4.1.11. Données globales caractérisant tout le réseau 54
4.1.12. Affectation ou modification des champs de données de rivières 54
4.1.13. État initial 55
4.1.14. Paramètres numériques pour les calculs dans le réseau hydrographique 55
4.1.15. Résultats du calcul 55

4.2. PRINCIPE DES ENSEMBLES DE LACS 57
4.2.1. Propriétés des lacs 57
4.2.2. Principaux champs de données relatifs aux lacs 57

4.3. PRINCIPE DU RÉSEAU DE DRAINS OU DE « CONDUITS » 58
4.3.1. Options de calcul 58
4.3.2. Organisation du réseau de drains 59
4.3.3. Numérotation des éléments de drain 59
4.3.4. Champs de données à définir dans chaque maille contenant un drain 59
4.3.5. Données globales caractérisant le réseau de drains 61
4.3.6. Affectation ou modification des champs de données de drains 61
4.3.7. État initial 61
4.3.8. Conditions aux limites 61
4.3.9. Paramètres numériques pour les calculs dans le réseau de drains 62
4.3.10. Résultats du calcul 62
4.3.11. Schémas d'échange Drain-Nappe ou Conduit-Nappe 63
4.3.12. Débit dans un tronçon de drain 63
5. Principe du calcul de la recharge de la nappe et du ruissellement 65

5.1. PRINCIPE DU BILAN PAR ZONES 65

5.2. DEVENIR DE LA RECHARGE, DU RUISSELLEMENT ET DU DÉBIT DE DÉBORDEMENT 66

5.3. BILAN HYDROCLIMATIQUE GARDÉNIA 67
5.3.1. Principe du schéma GARDÉNIA 67
5.3.2. Le bilan dans le réservoir superficiel 69
5.3.3. Le réservoir intermédiaire H 71
6. Organisation des données 72

6.1. LES DIFFÉRENTS TYPES DE DONNÉES DU CODE MARTHE 72
6.1.1. Options ou paramètres constants 72
6.1.2. Données de champs maillés 72
6.1.3. Données particulières qui ne sont ni des champs maillés, ni des constantes 73

6.2. LE FICHIER PROJET DE MARTHE 74

6.3. MODIFICATIONS DE DONNÉES D'UN CHAMP MAILLÉ 74

6.4. DÉFINITION DIRECTE DES DONNÉES D'UN CHAMP MAILLÉ, SANS CRÉATION D'UN FICHIER 75

6.5. EXEMPLES DE MODIFICATIONS OU DE CRÉATION D'UN CHAMP MAILLÉ, SANS GÉNÉRATION DE FICHIER 76

7. Le fichier profil d'utilisation 79

8. Le fichier des paramètres généraux de calcul 81

8.1. PARAMÈTRES DE SAUVEGARDE ET DE CONTRÔLES 83

8.2. PARAMÈTRES DE DÉFINITION DES UNITÉS DES DONNÉES 92

8.2.1. Les unités relatives aux calculs d'hydrodynamique classique, avec bilan hydroclimatique et réseau hydrographique. 93

8.2.2. Les unités relatives à d'autres fonctionnalités : transport de masse, effets densitaires, calcul en Zone Non Saturée, écoulements de gaz 99

8.3. PARAMÈTRES POUR LES PAS DE TEMPS DE MODÈLE ET LES SOUS-PAS DE TEMPS 101

8.4. OPTIONS DE GÉOMÉTRIE, ÉTATS DE RÉFÉRENCE, PROCESSEURS ... 103

8.5. CONTRÔLE DE LA RÉSOLUTION DE L'HYDRODYNAMIQUE (CALCUL DU CHAMP DE CHARGE HYDRAULIQUE ET DU CHAMP DE DÉBIT) 107

8.5.1. Paramètres classiques pour les calculs de l'hydrodynamique 108

8.5.2. Paramètres plus avancés pour les calculs de l'hydrodynamique 110

8.5.3. Paramètres très avancés, ou d'usage moins fréquent pour les calculs de l'hydrodynamique 114

8.6. PARAMÈTRES POUR LE CALCUL DE TRAJECTOIRES 117

8.7. PARAMÈTRES POUR LE BILAN HYDROCLIMATIQUE 119

8.8. PARAMÈTRES POUR LE RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE : RIVIÈRES, DRAINS, LACS 124

8.8.1. Réseau hydrographique de Rivières 125

8.8.2. Réseau de Drains 129

8.8.3. Réseau de Lacs 131

8.9. PARAMÈTRES POUR LES CONTRÔLES SUR ÉCRAN ET L'ALLÉGEMENT DES ÉCRITURES DANS LE FICHIER « BILANDEB.TXT » 133

8.9.1. Contrôles sur écran en cours de calcul 133

8.9.2. Allégements des écritures dans le fichier « bilandeb.txt » 134

8.10. OPTIONS SUPPLÉMENTAIRES (POUR ACCESSOIRES) 134

8.11. PARAGRAPHE D'« INITIALISATION AVANT CALCULS » 135

9. Le fichier des pas de temps 137

9.1. CRÉATION AUTOMATIQUE DE PAS DE TEMPS DE MODÈLE 138

9.1.1. Définition de la date de début de simulation....139
9.1.2. Création initiale de pas de temps....139

9.2. CHOIX D'UN PAS DE TEMPS....142

9.3. NOUVELLES ACTIONS OU MODIFICATION D'ACTIONS EXISTANTES....142
9.3.1. Création de nouvelles actions....144
9.3.2. Affectation d'un fichier d'« évolution temporelle »....147
9.3.3. Modification d'« Actions » existantes....151

9.4. AJOUT OU SUPPRESSION DE PAS DE TEMPS....152

9.5. AUTRES OPTIONS....153
10. Les champs de données spatialisées en entrée....155

10.1. LES CHAMPS DE DONNÉES (QUASIMENT) TOUJOURS NÉCESSAIRES 156

10.2. LE FICHIER DES « COUCHES AQUIFÈRES ET GIGOGNES »....156

10.3. LES CHAMPS DE DONNÉES POUR UN CALCUL D'HYDRODYNAMIQUE CLASSIQUE....158

10.4. LES CHAMPS DE DONNÉES POUR LE BILAN HYDROCLIMATIQUE177
10.4.1. Les champs à utiliser pour les cas les plus simples....178
10.4.2. Les champs de numéros de « zones » pour le bilan hydroclimatique178
10.4.3. Définition des champs de numéros de « zones » avec les maillages en coupe verticale....181
10.4.4. Les données climatiques en entrée (flux climatiques, température)182
10.4.5. Les champs de paramètres pour le bilan hydroclimatique avec le schéma GARDÉNIA....193
10.4.6. Les champs de paramètres pour le bilan hydroclimatique avec le schéma Ruissellement/Recharge....196
10.4.7. Les champs de paramètres de contrôle de la fonte de la neige....198
10.4.8. Les données pour la prise en compte des cultures....201

10.5. LES CHAMPS DE DONNÉES POUR LE RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE (RIVIÈRES) ET LE RÉSEAU DE DRAINS....203
10.5.1. Les champs de données pour le réseau hydrographique....203
10.5.2. Les champs de données pour le réseau de drains-conduits....212
10.5.3. Les champs de données pour les lacs....218

10.6. LES CHAMPS DE DONNÉES POUR LES SYSTÈMES MULTICOUCHES AVEC ÉPONTES....220
11. Les champs de donnés calculées qui peuvent être sauvegardés....223

11.1. LES CHAMPS QUASIMENT TOUJOURS OBTENUS OU DEMANDÉS223

11.2. LE FICHIER « BILANDEB.TXT » DE SUIVI DES CALCULS ET DE BILAN DES DÉBITS CALCULÉS....224

11.3. LE FICHIER DES HISTORIQUES TEMPORELS CALCULÉS 227

11.4. LES FICHIERS DE TRAJECTOIRES CALCULÉES 228

11.5. SAUVEGARDE DE CHAMPS RELATIFS À L'HYDRODYNAMIQUE CLASSIQUE 229

11.6. SAUVEGARDE DE DONNÉES HYDROCLIMATIQUES CALCULÉES (FLUX, ÉTATS) 235

11.7. SAUVEGARDE DE CHAMPS RELATIFS AU RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE, AU RÉSEAU DES DRAINS ET AUX LACS 239

11.7.1. Sauvegarde de champs relatifs aux rivières 239

11.7.2. Sauvegarde de champs relatifs au réseau de drains 240

11.7.3. Sauvegarde de champs relatifs aux lacs 241

12. Sauvegarde d'historiques temporels 243

12.1. HISTORIQUES D'HYDRODYNAMIQUE CLASSIQUE 244

12.2. HISTORIQUES RELATIFS AU BILAN HYDROCLIMATIQUE 244

12.3. HISTORIQUES RELATIFS AU RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE (RIVIÈRES) 245

12.4. HISTORIQUES RELATIFS AU RÉSEAU DE DRAINS ET DE DRAINS-CONDUITS 245

12.5. HISTORIQUES RELATIFS AUX LACS 245

12.6. HISTORIQUES DES TERMES DU BILAN DES DÉBITS DE LA NAPPE246

12.7. HISTORIQUES DES TERMES DU BILAN DES DÉBITS DES RIVIÈRES248

12.8. HISTORIQUES DES TERMES DU BILAN DES DÉBITS DES LACS ... 249

13. Exemples de vérification 251

13.1. MODÉLISATION EN RÉGIME TRANSITOIRE D'UN POMPAGE DANS UNE NAPPE CAPTIVE HOMOGÈNE D'EXTENSION INFINIE 251

13.2. EFFET DE LA PÉNÉTRATION PARTIELLE D'UN POMPAGE EN NAPPE LIBRE. 253

13.3. CALCUL D'UNE NAPPE LIBRE SOUMISE À UNE INFILTRATION CONSTANTE (BOUSSINESQ). 255

13.4. CALCUL EN RÉGIME TRANSITOIRE D'UNE NAPPE LIBRE SOUMISE À DES DÉNOYAGES ET RE-SATURATIONS (PAINTER ET AL. 2008). 259

13.5. CALCUL EN RÉGIME TRANSITOIRE D'UNE NAPPE LIBRE SOUMISE À DES DÉNOYAGES ET RE-SATURATIONS (DOHERTY 2001). 262

14. Exemple détaillé d'application 265

14.1. DESCRIPTION DU DOMAINE ET DE LA MODÉLISATION À RÉALISER265

14.2. CRÉATION DU PROJET 266
14.3. DÉFINITION DES LIMITES DU DOMAINE 267
14.4. DÉFINITION DES CHAMPS MAILLÉS 268
14.5. DÉFINITION DES PARAMÈTRES NON MAILLÉS 269
14.5.1. Profil d'utilisation 270
14.5.2. Fichier des « Paramètres généraux » 271
14.5.3. Fichier des « Pas de temps » 274
14.5.4. Fichier des « mailles à historiques » 277
14.5.5. Lancement des calculs et visualisation des résultats 279
15. Fonctionnalités ou paramètres déconseillés car obsolescents 284
16. Incompatibilités 286
17. Glossaire appliqué au code MARTHE ® 287
18. FAQ 292
19. Conclusions 295
20. Références bibliographiques 297

Annexe 1 Description des « Grilles Marthe » 299
Annexe 2 Coefficients d'échange entre mailles 303
Annexe 3 Description des couches aquifères 305

Liste des figures

Figure 1 – Préprocesseur WinMarthe pour créer et modifier les champs. 20
Figure 2 – Maillage complexe avec des couches incomplètes permettant des courts-circuits entre couches. 22
Figure 3 – Vue du dessus d'un maillage rectangulaire irrégulier. 23
Figure 4 – Numérotation des colonnes et lignes d'un maillage 2D. 23
Figure 5 – Numérotation des colonnes, lignes et couches d'un maillage 3D. 24
Figure 6 – Maillage radial (axisymétrique) plan. Vue en perspective. 24
Figure 7 – Maillage radial plan. Vue dans WinMarthe (anamorphose). 25
Figure 8 – Maillage en coupe verticale. 26
Figure 9 – Maillage en pseudo-coupe verticale (ce n'est pas une coupe verticale). 26
Figure 10 – Maillage en coupe verticale axisymétrique. 27
Figure 11 – Maillages gigognes : à droite un maillage gigogne « partiel ». 27
Figure 12 – Maillage avec 2 sous-maillages gigognes. 28
Figure 13 – Subdivision des lignes et des colonnes du maillage principal. 28
Figure 14 – Détail de la subdivision des lignes et des colonnes d'un maillage gigogne. 29
Figure 15 – « Branchement » d'un sous-maillage gigogne : à gauche le sous-maillage, à droite le maillage principal. 29

Figure 16 – Sous-maillage gigogne dans un angle : à gauche le sous-maillage, à droite le maillage principal. Sous-maillage tangent ; il n'y a qu'un coin (n°1) identique dans les 2 maillages. 30

Figure 17 – Modélisation en 3D de la plaine d'Alsace avec un maillage irrégulier contenant un maillage gigogne emboîté. 30

Figure 18 – Échanges entre une maille et ses 6 voisines. 31

Figure 19 – Système aquifère Nord-Aquitain à 7 couches. Extension des couches. 33

Figure 20 – Coupe verticale à travers le système aquifère Nord-Aquitain à 7 couches. Mise en évidence de la couche n°0 (extension totale de toutes les couches). 35

Figure 21 – Exemple de système complexe qui peut être modélisé avec MARTHE. 36

Figure 22 – Coupe verticale : illustration de la différence entre une perméabilité égale à 0 et une perméabilité égale à 9999. 37

Figure 23 – Maillage en « coupe verticale » ou en « Pseudo-coupe verticale » : c'est la ligne n°1, en rose, qui correspond à la couche n°0. C'est dans cette ligne qu'il faut définir les numéros de zone de sol, les numéros de zone météo, les index de débordement, etc. 37

Figure 24 – Importation de données d'un géomodeleur (Multilayer, EarthVision, Eclipse/Petrel). 38

Figure 25 – Importation de grille Marthe, de fichier [.Asc] ou de fichier Surfer ®. 39

Figure 26 – Réseau de rivières connecté au maillage du domaine. 46

Figure 27 - Géométrie d'un tronçon de rivière. 47

Figure 28 – Bilan des débits dans un tronçon de rivière. 48

Figure 29 – Différentes configurations d'échanges Nappe – Rivière. 49

Figure 30 – Schéma de bilan hydroclimatique GARDÉNIA complet. 68

Figure 31 – Schéma de bilan hydroclimatique GARDÉNIA intégré dans MARTHE. 68

Figure 32 - Le réservoir superficiel de GARDÉNIA. 69

Figure 33 – Pluie Nette Pn et évapotranspiration Etr dans le réservoir sol. En trait interrompu bleu : réservoir de type « réserve utile », en rouge : « réservoir progressif ». 70

Figure 34 - Schéma du réservoir intermédiaire de GARDÉNIA (Réservoir H). 71

Figure 35 - Sélection du fichier « Profil d'utilisation ». 79

Figure 36 – Exemple de fichier profil d'utilisation. 80

Figure 37 – Sélection du menu des « Paramètres Généraux ». 81

Figure 38 – Ouverture du fichier des paramètres avec l'éditeur de texte intégré. 82

Figure 39 - Fichier des paramètres généraux : Paragraphe de sauvegarde et contrôles. 83

Figure 40 - Paramètres généraux : Paragraphe des unités de données. 92

Figure 41 - Paramètres généraux : Paragraphe des pas de temps et sous-pas de temps. 101

Figure 42 - Fichier des paramètres généraux : Paragraphe Options de Géométrie, etc. 103

Figure 43 - Angle correcteur de la direction de la pesanteur. 104

Figure 44 - Effet de l'angle correcteur de la direction de la pesanteur. 105

Figure 45 - Paramètres généraux : Paragraphe de la résolution de l'hydrodynamique. 107

Figure 46 - Fichier des paramètres généraux : Paragraphe de concentration et trajectoires… 117

Figure 47 - Paramètres généraux : Paragraphe du bilan hydroclimatique. 119

Figure 48 - Paramètres généraux : Paragraphe des réseaux hydrographiques. 124
Figure 49 - Sélection du fichier des « Pas de Temps ». 137
Figure 50 – Définition de la date de début de simulation. 139
Figure 51 – Création automatique de 8 pas de temps. 139
Figure 52 – Définition de la durée des pas de temps à créer, si elle est uniforme En haut, si on utilise des dates décimales ; en bas, avec des dates calendaires. 140
Figure 53 – Choix de la méthode de définition des dates de fin des pas de temps. 140
Figure 54 – Définition par tableur des dates de fin de pas de temps. 141
Figure 55 – Fichier texte pour définir les dates des pas de temps sous forme décimale. 141
Figure 56 - Fichier texte pour définir les dates des pas de temps sous forme calendaire. 142
Figure 57 – Choix d'un pas de temps. 142
Figure 58 – Option de créer de nouvelles actions. 145
Figure 59 – Sélection d'un « Thème » d'actions à créer. 145
Figure 60 – Liste des champs ou « Objets » du thème choisi, correspondant au profil d'utilisation. 146
Figure 61 – Liste des « Actions » possible pour l'« Objet » choisi. Ici l'Objet est le « DEBIT » et on choisit l'Action « MAILLE » (Modification par mailles). 146
Figure 62 – Introduction d'une modification par bloc de mailles. 147
Figure 63 – Fichier d'« évolution temporelle » simple pour un groupe de mailles. 148
Figure 64 - Fichier d'« évolution temporelle » simple pour 3 groupes de mailles, avec une colonne (facultative) indiquant la date, pour vérifications. 148
Figure 65 – Affectation d'un fichier d'évolution temporelle à une maille (ou à un groupe de mailles) (Affectation possible uniquement au pas de temps de modèle n°0). 149
Figure 66 – Fichier « Pas de Temps » avec utilisation de fichiers d'évolution temporelle. 150
Figure 67 – Début du fichier « Pas de Temps » sans utilisation de fichiers d'évolutions temporelle. 150
Figure 68 – Option de modifier des actions existantes. 151
Figure 69 – Sélection d'un « Thème » pour les actions à modifier. 151
Figure 70 – Visualisation des actions existantes dans le thème choisi. 152
Figure 71 – Insertion de pas de temps (dans le fichier des pas de temps). 152
Figure 72 – Suppression de pas de temps (du fichier des pas de temps). 152
Figure 73 – Sélection du paragraphe « Couches aquifères et gigognes ». 157
Figure 74 – Exemple de fichier de « Couches aquifères et gigognes ». 157
Figure 75 - Limite à charge hydraulique imposée (définie par des débits = 9999). 161
Figure 76 - Boite de dialogue pour définir les liaisons étanches. 167
Figure 77 - Exemple de fichier de liaisons étanches. 167
Figure 78 – Sélection du fichier « Points de départ de trajectoires ». 169
Figure 79 – Sélection des points de départ de trajectoire. 169
Figure 80 – Sélection du fichier des mailles à historiques. 172
Figure 81 – Sélection du type d'historique. 172

Figure 82 – Consultation du 4ème historique de débit parmi les 5 historiques existants. 172

Figure 83 – Modification du nom (facultatif) ou du numéro de colonne, ligne ou couche. 173

Figure 84 - Définition d'un nouvel historique par appui sur le bouton « Ajout », puis choix du mode de sélection de la maille (colonne, ligne, couche). 173

Figure 85 – Définition du point par ses coordonnées. 174

Figure 86 - Définition du nom, des coordonnées réelles de la maille et de son numéro de couche. 174

Figure 87 – Sélection de la ligne n°1 (en rose-violet) pour y définir un numéro de « Zone de sol », ou un numéro de « Zone Météo » 181

Figure 88 – Maillage en coupe : Définition de flux de recharge par « maille » : Seuls les flux de recharge définis dans les mailles affleurantes (en rouge) sont pris en compte 182

Figure 89 – Différentes possibilité pour affecter un flux climatique ou la température de l'air. . 183

Figure 90 – « Fichier Météo séquentiel » avec 7 zones climatiques : et 8 pas de temps. 186

Figure 91 – « Fichier Météo séquentiel » avec 11 zones climatiques et 5 pas de temps. Chaque pas de temps est écrit ici sur 2 lignes. 186

Figure 92 – Exemple de fichier de pas de temps avec définition de fichiers Météo séquentiels, puis affectation de flux de Pluie et de flux d'ETP à ces fichiers. Redéfinition de nouveaux fichiers Météo après 365 jours. 187

Figure 93 – Exemple de fichier de pas de temps avec définition de fichiers Météo séquentiels, puis affectation de flux de Ruissellement et de flux de Recharge à ces fichiers. ... 188

Figure 94 – Exemple de réseau hydrographique dans un système aquifère multicouche En haut : vue en plan ; en bas : vue en coupe verticale. 205

Figure 95 – Sélection du fichier « Arbre de branchement des affluents de rivières et des lacs ». 206

Figure 96 – Tableur pour la création de l'« Arbre de branchement des affluents de rivières ». 206

Figure 97 – Sélection du fichier de « Dérivations de débit du Réseau Hydrographique ». 210

Figure 98 – Tableur pour la définition des « Dérivations de débit du réseau hydrographique ». 210

Figure 99 – Sélection du fichier de l'« Arbre de branchement des affluents de drains ». 214

Figure 100 – Tableur pour la création de l'« Arbre de branchement des affluents de drains ». 215

Figure 101 – Géométrie des couches en présence d'épontes semi-perméables. Vue en coupe verticale. 220

Figure 102 – Fichier bilandeb.txt : Suivi du calcul de la charge hydraulique. Pas de temps n°15. 225

Figure 103 – Fichier bilandeb.txt : Bilan des débits. Pas de temps n°15. 225

Figure 104 – Fichier bilandeb.txt : Volumes cumulés. Pas de temps n°15. 227

Figure 105 – Exemple de fichier historique « historiq.prn » obtenu après calcul. 228

Figure 106 – Exemple de fichier de trajectoires « trajmar.out » en monocouche, en régime permanent. 229

Figure 107 – Exemple de fichier pour dessins de trajectoires « trajmar.bln ». 229

Figure 108 - Sélection du fichier des historiques, puis du type d'historique. 243

Figure 109 – Évolution du rabattement à 55 mètres : comparaison avec la solution de Theis. 252

Figure 110 – Profil du après 10^8 secondes : comparaison avec la solution de Theis. 252

Figure 111 – Évolution du rabattement au point d'observation : comparaison avec la solution de Neuman. 254

Figure 112 – Nappe libre 3D avec infiltration : vue en coupe verticale. La zone en orange est totalement saturée. Les mailles en bleu foncé sont dénoyées. 256

Figure 113 – Nappe libre 3D avec infiltration : vue en coupe verticale. Isovaleurs de charge hydraulique. En rouge : la surface libre. 256

Figure 114 – Nappe libre avec infiltration : vue en coupe verticale Comparaison avec la solution analytique (symboles). 258

Figure 115 – Géométrie du test de Painter et al. : vue en coupe verticale. 259

Figure 116 – Test de Painter et al. : profils de charge en régime permanent (courbe bleue) et 270 jours après l'abaissement du niveau à l'abscisse 500 mètres (courbe rouge). 260

Figure 117 – Test de Painter et al. : remontée et remise en eau de la nappe pendant 20 ans. 261

Figure 118 – Géométrie de l'aquifère décrite par Doherty (2001) avec la position des drains. 262

Figure 119 – Simulation de l'exemple de Doherty avec MARTHE. Profils de charge hydraulique dans la ligne n°22 passant par les drains. À gauche profil après 1000 jours ; à droite profil après 2000 jours de remontée. Les charges hydrauliques des 3 couches sont quasi-identiques. 264

Figure 120 – Création du maillage. 266

Figure 121 – À gauche : maillage. À droite sélection d'une zone dans le fichier de perméabilité. 267

Figure 122 – Affectation d'une valeur aux mailles sélectionnées. 267

Figure 123 – Champ du débit. Imposition des charges hydrauliques sur les limites de gauche et du bas. 268

Figure 124 – Sélection de toutes les mailles du champ « Coefficient d'emmagasinement libre ». 269

Figure 125 – Menu général de définition des paramètres non maillés. 270

Figure 126 – Création du « Profil d'utilisation ». 270

Figure 127 – Sélection des options du « Profil d'utilisation ». 271

Figure 128 – Sélection du fichier des « Paramètres Généraux ». 271

Figure 129 – Fichier des « Paramètres Généraux » de l'exemple détaillé d'application. 272

Figure 130 – Choix du paragraphe « Initialisation avant calculs », puis choix de réaliser une « Nouvelle action ». 272

Figure 131 – Sélection du thème « Hydrodynamique classique », puis sélection du champ « Rayon du puits ». 273

Figure 132 – Choix d'une « Modification par Mailles » et introduction de la valeur 0.2 m dans la maille de colonne n°26, ligne n°26, couche n°1. 273

Figure 133 – Sélection du fichier des « Pas de temps ». 274

Figure 134 – Définition de la date de début de la simulation et création automatique de 15 pas de temps. 274

Figure 135 – Définition de la durée des pas de temps (« Échap. » car la durée n'est pas uniforme) Choix de définir par le tableur intégré les dates de fin de pas de temps. 275

Figure 136 – Avec le tableur intégré : Définition des dates de fin des 15 pas de temps. 275

Figure 137 – Sélection du pas de temps n°1. 276

Figure 138 – Sélection du champ « débit », choix de le modifier par « Maille » et introduction de la valeur -100 dans la maille appropriée. 276

Figure 139 – Choix d'introduire une « Nouvelle action », pour le champ « CHARGE ». Choix de l'action « EDITION », puis de l'index de sauvegarde de valeur 1. 277

Figure 140 – Sélection du fichier des « Mailles à historiques ». 277
Figure 141 – Sélection du type d'historique, de la méthode de définition de la maille, et définition d'une maille dont on souhaite sauvegarder l'historique de variation temporelle. 278
Figure 142 – Fichier des mailles à historiques obtenu. 278
Figure 143 – Lancement des calculs. 279
Figure 144 – Bilan des débits au pas de temps n°1. 280
Figure 145 – Bilan des débits au pas de temps n°15. 281
Figure 146 – Évolution temporelle des termes du bilan des débits et du pourcentage de non-convergence. 282
Figure 147 – Champ de la charge calculée. Isovaleurs tous les 0.2 mètre. 282
Figure 148 – Évolution de la charge hydraulique calculée en 3 points. 283
Figure 149 – Exemple de grille MARTHE de 5 colonnes de 4 lignes. 300
Figure 150 – Exemple de grille MARTHE relative à un champ uniforme. 301

1. Introduction

Le code de calcul MARTHE ® permet de modéliser les hydrosystèmes en intégrant, de manière couplée, les écoulements souterrains, le bilan hydroclimatique, et les écoulements en rivières.

MARTHE permet en particulier de modéliser en 3D et multicouche les écoulements, le transport de masse, et les transferts thermiques (Thiéry, 2015c) en zone saturée et en zone non-saturée (Thiéry, 2015b), en milieux monophasiques et diphasiques, en prenant en compte les effets densitaires (Thiéry, 2015c). Il est également possible de faire des calculs de transport réactif (Thiéry, 2015e).

La discrétisation utilise un schéma à volumes finis avec un maillage parallélépipédique (ou rectangulaire) irrégulier. Il est possible de représenter des systèmes complexes multicouches, avec disparition locale de couche (Figure 2) et présence de surfaces libres en n'importe quelle couche.

Le maillage peut intégrer des sous-maillages gigognes pour affiner localement la discrétisation tout en optimisant le nombre de mailles nécessaire.

MARTHE permet aussi bien la modélisation de systèmes régionaux multicouches de plusieurs milliers de kilomètres carrés d'extension, que la modélisation fine de milieux poreux de quelques centimètres cube avec des mailles millimétriques.

La version décrite dans ce rapport est la version 7.5 de Décembre 2015.

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

Pour mettre en œuvre les fonctionnalités de MARTHE, il est conseillé de lire le « Didacticiel du code de calcul MARTHE v7.5 » (Thiéry, 2015d), ainsi que la notice d'utilisation de WinMarthe v4.0 (Thiéry, 2006).

Des informations détaillées sur le code MARTHE du BRGM sont disponibles sur le site http://marthe.brgm.fr/

2. Description générale du code MARTHE

2.1. Domaine d'application du code de calcul MARTHE

Dans sa version 7.5 de Décembre 2015, le code de calcul MARTHE permet de modéliser les hydrosystèmes intégrant à la fois les écoulements souterrains et les écoulements en rivières.

Il est possible en particulier de modéliser en 3D les écoulements, le transport de masse et le transfert thermique (Thiéry, 2015c) en zone saturée et en zone non saturée (Thiéry, 2015b), en milieux monophasiques et diphasiques, en prenant en compte les effets densitaires (Thiéry, 2015c). Il est également possible de faire des calculs de transport réactif (Thiéry, 2015e).

MARTHE possède notamment les fonctionnalités suivantes :

- **Hydrodynamique classique** :
  - Maillages 2D (en plan, en coupe verticale, en coordonnées radiales) ou 3D (« full 3D »).
  - Systèmes aquifères monocouches ou multicouches (empilement d'aquifères éventuellement séparés par des épontes semi-perméables).
  - Nappes libres, captives ou semi-captives en régime hydraulique permanent ou transitoire.
  - Prise en compte de discontinuités telles que plans d'eau à surface libre (lacs, gravières), assèchements locaux de nappe (et remise en eau), y compris en aquifères multicouches, débordements de nappe (cours d'eau, sources, drains), parois étanches (palplanches, ...).
  - Limitation automatique du débit des pompages en fonction du niveau dynamique local (dénoyage des crépines de pompes de forage).
  - Couplage total avec des réseaux hydrographiques et des réseaux de drains.
  - Bilan hydroclimatique couplé.
  - Anisotropies horizontales et verticales de la perméabilité.
  - Calcul de trajectoires (directes et inverses) en régime hydraulique permanent ou transitoire.

- **Transport de masse hydrodispersif** :
  - Migration hydrodispersive d'un soluté dans la nappe et la zone non saturée (ZNS) par convection, diffusion, dispersion.
  - Dégradation d'un soluté par décroissance exponentielle en fonction du temps (fonction de la teneur en eau et de la température) ;
  - Dégradation en chaîne de plusieurs solutés ;
  - Facteur de retard invariant ou fonction d'un coefficient de partage Kd (phénomènes d'adsorption-désorption) ;
  - Prise en compte d'une double porosité, avec cinétique ou en équilibre ;
  - Isothermes de Freundlich ou de Langmuir.

- **Zone Non Saturée, Densité, Température** :
  - Traitement continu de la zone saturée et de la zone non saturée.
  - Effets densitaires induits par des salinités et/ou des températures hétérogènes.
  - Variation de viscosité avec la température.

- **Transfert thermique** :
  - Stockage/déstockage de chaleur, migration d'un panache thermique.

- Simulation de doublets géothermiques.
- Simulation des épontes thermiques possible par la solution analytique de Vinsome.

- **Calibration automatique, Optimisation** :
  - Calibration automatique de paramètres du modèle, selon des zones homogènes ou maille par maille.
  - Analyse de sensibilité aux paramètres de calibration.

- **Interactions géochimiques** :

  MARTHE est couplé avec deux solveurs géochimiques :
  - Le module hydrogéochimique REACT du code de calcul TOUGHREACT (Xu et al. 2004)
  - Les modules hydrogéochimiques du code de calcul PHREEQC de l'USGS (Parkhurst et Appelo, 2013 ; Parkhurst et Wissmeier, 2015).

  Les interactions physico-chimiques entre la phase liquide et la matrice poreuse peuvent être simulées au choix par une de ces versions couplées. Le couplage avec PHREEQC est décrit par Thiéry, 2015e.

- **Utilisations avancées** :
  - Réseaux de drains ou de galeries.
  - Transport avec interactions physico-chimiques entre eau, effluents et matrice poreuse.
  - Écoulements diphasiques : eau douce et eau salée, eau et air, eau et « huile ».
  - Écoulements de gaz.
  - Prise en compte du développement de la végétation.
  - Fractures verticales simulées par transmissivités équivalentes.

2.2. Caractéristiques du code de calcul MARTHE

2.2.1. Caractéristiques générales

Parmi les caractéristiques du code MARTHE, on notera en particulier les suivantes :

- Écoulements 1D, 2D ou 3D.
- Maillage rectangulaire irrégulier, l'extension de chaque couche pouvant être différente de celle des autres couches. Sur une verticale, les mailles existantes ont les mêmes dimensions horizontales, mais possibilité de courts-circuits quand une formation disparaît (lacunes, biseautage).
- Maillages gigognes intégrés au maillage principal.
- Simulations en régime transitoire et en régime permanent. Possibilité d'enchainer un régime permanent puis un régime transitoire.
- Prise en compte possible d'une surface libre dans n'importe quelle couche.
- Simulation fine de phénomènes locaux de dénoyage et re-saturation de l'aquifère.
- Possibilité de prise en compte d'épontes semi-perméables intercalées entre certaines couches aquifères.
- Mailles à débordement (sources, gravières).
- Zones équipotentielles à potentiel inconnus ou variable (gravières).
- Parois étanches (palplanches, fondations, failles, etc.).
- Anisotropie de perméabilité selon les deux directions horizontales du maillage (« nord/sud » et « est/ouest »).
- Anisotropie verticale de perméabilité.
- Possibilité d'introduire maille par maille les coefficients d'anisotropie de perméabilité.
- Couplage avec un réseau hydrographique (réseau de rivières).
- Couplage avec un réseau de drains, pouvant être en charge.
- Bilan hydroclimatique couplé calculant la recharge de la nappe et le ruissellement vers les rivières.
- Préprocesseur WinMarthe pour la préparation des données et la visualisation automatique des résultats.
- Définition ou modification de n'importe quel champ à n'importe quel pas de temps de calcul. Ces modifications peuvent être faites par maille, par zone géométrique, par couche ou par grille.
- Bilans détaillés de débit, de masse ou de chaleur par zone.
- Calculs d'écoulement et de transfert avec prise en compte de la « Zone Non Saturée ».
- Prise en compte du développement de la végétation et de ses effets sur la transpiration.
- Simulation des transferts de nitrates.
- Couplage avec des codes géochimiques pour les calculs de transport réactif.

2.2.2. Confort d'utilisation

- Création et modification du maillage par le préprocesseur graphique WinMarthe,
- Possibilité d'importer la géométrie résultant de modèles géométriques 3D ou de géo-modeleurs : GDM ®, Multilayer ®, EarthVision ®, Eclipse/Petrel ®.
- Préprocesseur pour définir les paramètres de simulation et de calcul,
- Préprocesseur pour définir les pas de temps,
  - ⇨ Utilisation de dates absolues permettant d'enchaîner des simulations, puis de les juxtaposer,
  - ⇨ Pas de temps de modèle dont la durée peut être individuellement définie par l'utilisateur,
- Bilans très détaillés des débits et masses entrant et sortant, stockés et déstockés dans chaque maille,
- Possibilité de modifier n'importe quelle donnée avant calcul et à chaque pas de temps,
- Toutes les données peuvent être modifiées :
  - ⇨ Par lecture d'un nouveau fichier (pour toutes les couches),
  - ⇨ Par affectation d'une valeur uniforme dans toutes les mailles,
  - ⇨ Par affectation d'une valeur uniforme par couche,
  - ⇨ Par affectation d'une valeur uniforme par « zone géométrique »,
  - ⇨ Par affectation d'une valeur par maille ou par « bloc de mailles ».

    Un « bloc de maille » est un ensemble de mailles adjacentes, dans un « parallélépipède » défini par un intervalle de lignes, un intervalle de colonnes et un intervalle de couches. Par exemple : colonnes n°7:9, lignes n°12:15, couches n°3:7

    ou bien : colonnes n°7:9, lignes *, couche n°2.

    Les mailles d'une « Zone Géométrique » sont un ensemble de mailles, pas forcément adjacentes, ayant le même « numéro de zone géométrique ».

    Ces fonctionnalités sont utilisées pour modifier :
    - des valeurs locales de charge hydraulique imposée (variation du niveau d'un cours d'eau, d'un lac, de la mer ...),
    - un index de débordement local (modification d'une émergence de source, de la position d'un drain),
    - des débits captés (ou injectés) pour simuler une évolution des besoins,
    - les flux de recharge selon les variations hydroclimatiques,
    - le maillage en changeant la position de mailles à perméabilité nulle,
    - l'extension d'éventuelles fissures ou gravières par modification de l'extension des zones équipotentielles associées,
    - des conditions aux limites en imposant ou libérant localement une charge hydraulique, une concentration, une température *via* une valeur de débit codée à 9999.
- Aucune donnée n'est redondante (par exemple, le substratum d'une couche sert de toit à la couche sous-jacente).
- Sauvegarde sélective des champs de données et de résultats souhaités aux seuls pas de temps indiqués.
- Sauvegarde sélective par maille des historiques d'évolution de certains champs

calculés, ce qui permet le suivi des valeurs calculées à chaque pas de temps.

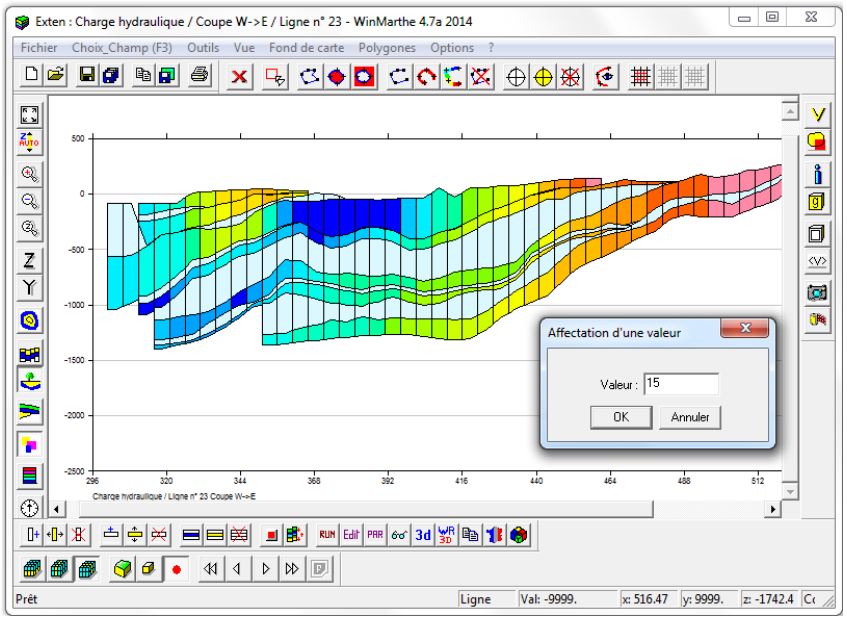


Figure 1 – Préprocesseur WinMarthe pour créer et modifier les champs.

2.2.3. Capacité d'utilisation

MARTHE v7.5 offre les capacités maximales suivantes :

- 999 couches
- 3000 lignes de mailles dans un maillage.
- 3000 colonnes de mailles dans un maillage.
- 99 maillages gigognes inclus dans le maillage principal.
- Nombre de pas de temps : illimité.
- 999 zones de géométrie.
- 500 zones de sol pour le bilan hydroclimatique.
- 500 zones d'irrigation.
- Nombre de zones météo : illimité (mais la zone n°9999 ne peut pas être utilisée).
- 99 zones de culture.
- 999 types de culture.
- 99 zones équipotentielles.
- 4000 historiques sauvegardés.
- Numéros d'affluents de rivière inférieurs à 1000.
- Numéros de tronçons de rivière inférieurs à 999999 (mais différents de 9999).
- Numéros d'affluent ou de tronçons de drain inférieurs à 999999 (mais différents de 9999).
- Numéros de lac inférieurs à 999999.

- 150 éléments chimiques, 150 espèces, 150 minéraux au maximum.

2.3. Maillages

Le code MARTHE utilise des maillages structurés sous forme de grilles irrégulières empilées en couches. L'organisation des couches permet de représenter des géométries complexes.

Certaines couches du domaine peuvent se biseauter au sein du domaine modélisé et disparaître, permettant des courts-circuits entre deux couches non consécutives, et permettant l'affleurement de couches profondes. Ces disparitions de couches sont des disparitions réelles et non pas de simples diminution d'épaisseur, ce qui permet des calculs exacts (Figure 2).

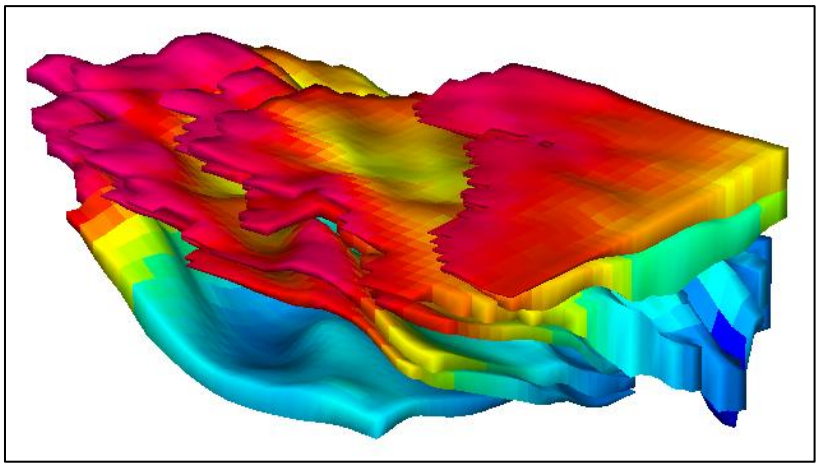


Figure 2 – Maillage complexe avec des couches incomplètes permettant des courts-circuits entre couches.

2.3.1. Différent types de maillage

Les principaux types de maillages sont les suivants :

- Maillage « cartésien » formé de parallélépipèdes irréguliers : (Colonne, Ligne, Couche). C'est le cas général, le plus courant.
- Maillage radial plan : (Rayon, Angle, [couche]).
- Maillage en coupe verticale : (Colonne, Couche).
- Maillage en pseudo-coupe verticale : (Colonne, Ligne), avec la pesanteur sur l'axe oy.
- Maillage en « coupe verticale axisymétrique » : coordonnées (Rayon, Couche) ou éventuellement (Rayon, Ligne) avec la pesanteur sur l'axe oy.

Maillage cartésien : Colonne, Ligne, Couche

Dans les maillages « cartésiens », le domaine à modéliser est formé de parallélépipèdes irréguliers. En vue du dessus, les mailles sont des rectangles irréguliers (Figure 3).

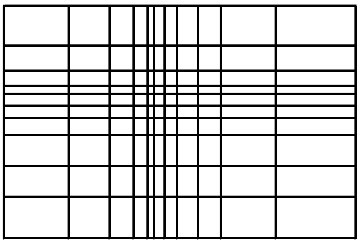


Figure 3 – Vue du dessus d'un maillage rectangulaire irrégulier.

L'aquifère est défini comme un ensemble de couches, la couche n°1 étant la couche supérieure. Les mailles sont des parallélépipèdes dont les dimensions sont définies par :

- les largeurs des différentes colonnes,
- les hauteurs des différentes lignes,
- les épaisseurs de couches, variables dans chaque maille.

Il est ainsi possible d'adapter la largeur de chacune de ces lignes et colonnes en fonction des hétérogénéités locales, de la densité des informations disponibles, et de la précision recherchée.

Les mailles sont géo-référencées, et auto-documentées, ce qui permet d'une part d'importer facilement des données spatialisées (fichiers x, y, valeur) issues de modeleurs géologiques, d'interpolateurs, de nuages de points, etc., et d'autre part d'exporter les résultats de simulation sous forme de fichiers géo-référencés exploitables par processeurs cartographiques.

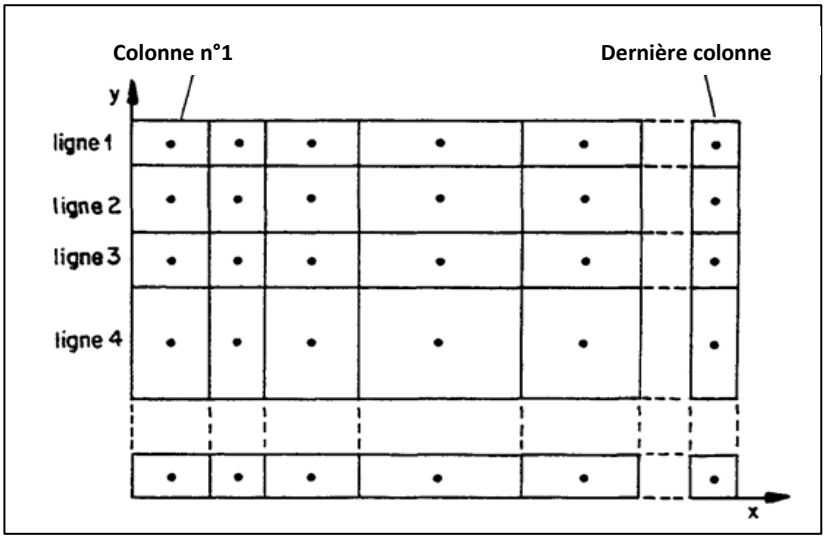


Figure 4 – Numérotation des colonnes et lignes d'un maillage 2D.

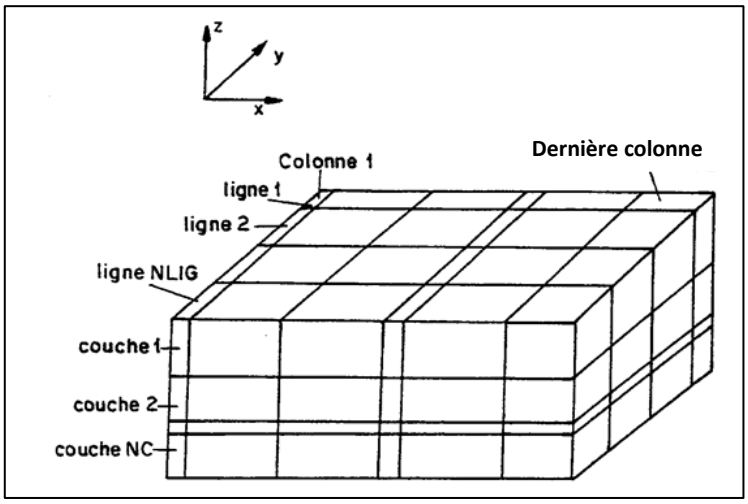


Figure 5 – Numérotation des colonnes, lignes et couches d'un maillage 3D.

Avec un processeur 32 bits, il est possible, selon les configurations, de gérer des maillages de plus de 1 million de mailles (plus de 0.5 million de mailles dans les calculs avec transport).
Avec un processeur 64 bits les maillages sont limités uniquement par la mémoire installée, et par les dimensions maximales indiquées au chapitre précédent.

Maillage radial plan

Dans un plan, le maillage est formé de secteurs de couronnes.

En 2D les coordonnées sont définies par (Rayon, Angle)
En 3D, s'il y a plusieurs couches, les coordonnées sont (Rayon, Angle, Couche).

La Figure 6 montre un maillage radial couvrant un secteur d'angle total s'étendant de 20° à +40°. Le maillage est formé de 10 couronnes de rayons croissant régulièrement de 50 m à 500 m. Chaque couronne est découpée en 7 secteurs de 4° à 10° d'angle.

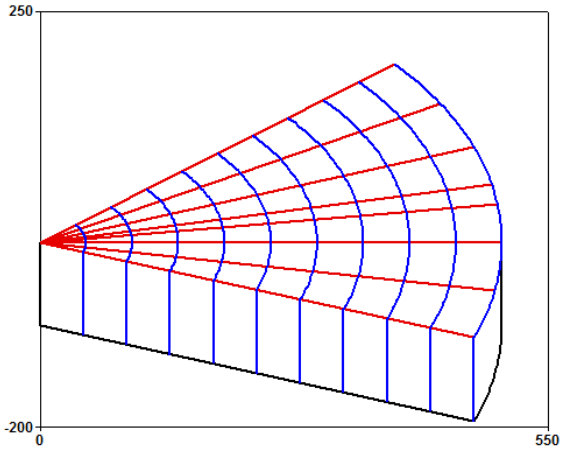


Figure 6 – Maillage radial (axisymétrique) plan. Vue en perspective.

Les calculs sont effectués dans le maillage radial.

Cependant pour la définition du maillage et la visualisation par WinMarthe :

- Les abscisses sont remplacées par la distance à l'origine (ou à l'axe verticale)
- Les ordonnées sont remplacées par l'angle, en degré, depuis l'axe horizontal. La valeur maximale de l'angle est de 360°

La Figure 7 montre la représentation dans WinMarthe du maillage radial :

- Les 10 couronnes, de rayons 0 à 500 m sont représentées par 10 colonnes d'abscisses 0 à 500 m
- Les 7 secteurs d'angle de largeur 4° à 10° sont représentés par 7 lignes (de largeur 4 à 10 « unités ».

Quand on utilise un secteur d'angle maximal de 360° il noter que le Nord de la première ligne (qui correspond à l'angle 360°) est par définition une limite étanche. Il n'est donc pas en contact avec le Sud de la dernière ligne (qui correspond à l'angle 0°), qui est lui aussi par définition une limite étanche.

Il y a donc implicitement une limite étanche située entre 360° et 0°. L'écoulement doit dont être symétrique par rapport à cet axe.

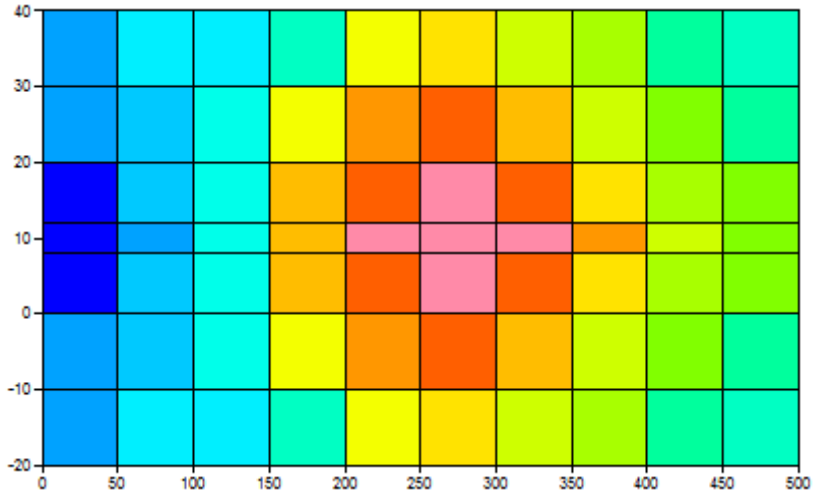


Figure 7 – Maillage radial plan. Vue dans WinMarthe (anamorphose).

Maillage en coupe verticale

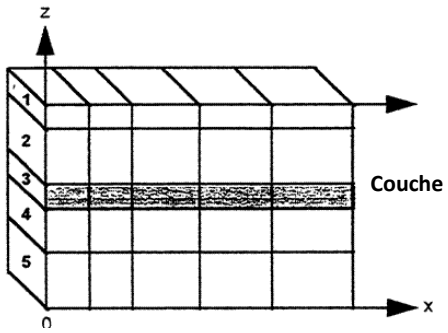


Figure 8 – Maillage en coupe verticale.

Les centres des mailles sont décrits par les 2 coordonnées : (Colonne, Couche) (Figure 8).

La visualisation des données est « monocouche » (Colonne, Couche), mais les calculs sont réalisés en 3D, avec plusieurs couches.

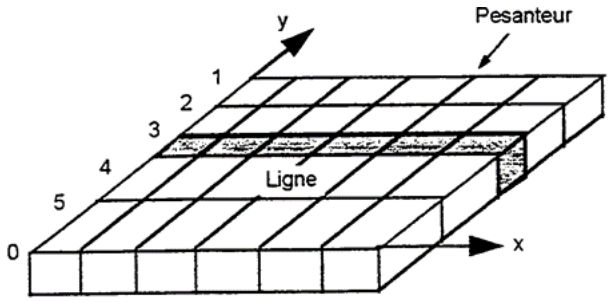


Figure 9 – Maillage en pseudo-coupe verticale (ce n'est pas une coupe verticale).

Certains schémas de calcul, comme les calculs en « Zone Non Saturée », n'utilisent pas d'altitude du substratum, ni d'altitude du toit de la maille. Ils utilisent uniquement l'« altitude du centre de la maille ». Il est alors possible de modéliser une coupe verticale en conservant un maillage cartésien plan (Colonne, Ligne) mais en spécifiant que la pesanteur est parallèle à l'axe oy, dirigée vers le bas (Figure 9). Les calculs sont effectués en « monocouche » avec une seule couche.

Maillage en coupe verticale axisymétrique

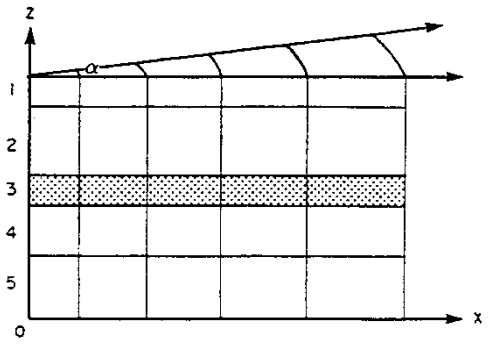


Figure 10 – Maillage en coupe verticale axisymétrique.

Les centres des mailles sont décrits par les 2 coordonnées (Rayon, Couche) ou éventuellement (Rayon, Ligne) avec la direction de la pesanteur sur l'axe oy (Figure 10).

2.3.2. Maillages gigognes

Il est possible d'affiner localement un maillage cartésien par des sous-maillages emboîtés appelés « maillages gigognes ». Dans cette version les sous-maillages gigognes s'appliquent à toutes les couches. Ces sous-maillages, qui sont comme des « rustines » ou des « patchs » sur le maillage principal, peuvent être complets ou « partiels » (Figure 11, Figure 12).

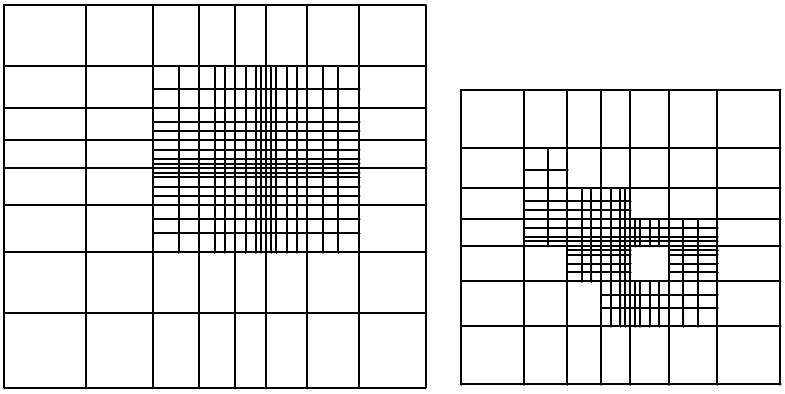


Figure 11 – Maillages gigognes : à droite un maillage gigogne « partiel ».

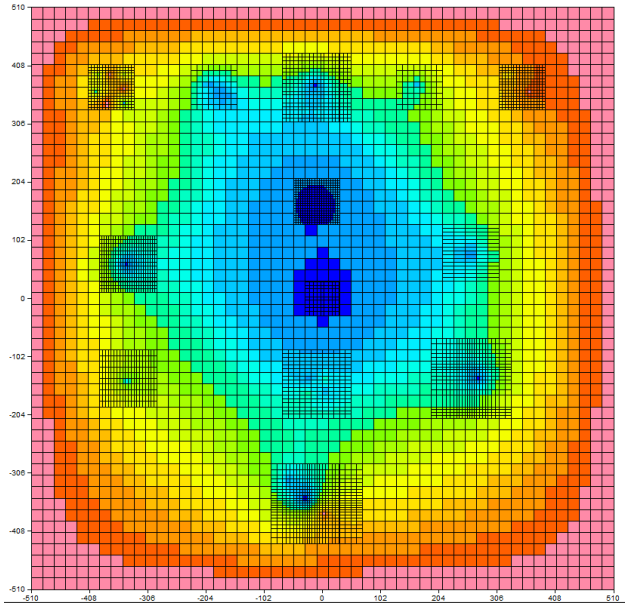


Figure 12 – Maillage avec 2 sous-maillages gigognes.

Les maillages gigognes répondent à un certain nombre de principes :

- L'emboîtement n'est qu'à un seul niveau, c'est-à-dire qu'un sous-maillage ne peut pas contenir un autre sous-maillage.

- Toutes les couches sont affectées par les mêmes sous-maillages.

- Les sous-maillages doivent être indépendants, c'est-à-dire qu'ils ne doivent pas se chevaucher.

- Le principe de subdivision est que les lignes et les colonnes du maillage principal sont subdivisées en un nombre entier de lignes et de colonnes. Par exemple (Figure 13), si la région formée par les colonnes n°4 à n°6 et les lignes n°9 à n°10 est remplacée par un sous-maillage, on pourra avoir le schéma décrit par la Figure 14.

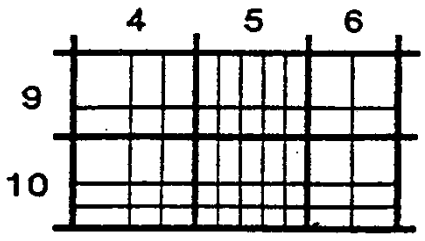


Figure 13 – Subdivision des lignes et des colonnes du maillage principal.

Colonnes du maillage principal	Nombre de colonnes du sous-maillage
n°4	3
n°5	5
n°6	2
Lignes du maillage principal	**Nombre de lignes du sous-maillage**
n°9	2
n°10	3

Figure 14 – Détail de la subdivision des lignes et des colonnes d'un maillage gigogne.

- Le nombre de sous-lignes (ou de sous-colonnes) contenues dans une ligne (ou une colonne) n'est pas limité. Ces sous-lignes (ou sous-colonnes) ne sont pas forcément égales entre elles.

- Chaque sous-maillage est bordé par des marges, d'une maille de largeur, qui servent au transfert entre le maillage principal et le sous-maillage. Dans le cas général ces marges correspondent à la première et à la dernière colonne du sous-maillage, ainsi qu'à sa première et dernière ligne.

- Les marges sont recouvertes par le maillage principal. Elles ne sont donc pas visibles dans le préprocesseur, et il n'est pas possible (ni permis) de leur affecter des données. Pour l'utilisateur, tout se passe comme si un sous-maillage gigogne commençait à la colonne n°2 et à la ligne n°2, et s'étendait jusqu'à l'avant-dernière colonne et l'avant-dernière ligne (sauf dans le cas d'un gigogne « en angle ».

- Les mailles du maillage principal qui correspondent aux marges d'un gigogne, ne peuvent pas également correspondre à un autre gigogne. En conséquence, dans le maillage principal, 2 gigognes sont séparés par au minimum 2 colonnes et 2 lignes.

- On remarque que, par construction, les 4 coins, notés 1 à 4, ont les mêmes dimensions dans le maillage principal et dans le sous-maillage (Figure 15). (Les points 1 à 4 du sous-maillage ne sont pas visibles car recouverts).

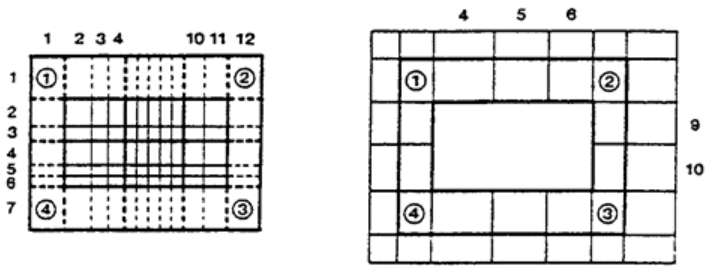


Figure 15 – « Branchement » d'un sous-maillage gigogne :
à gauche le sous-maillage, à droite le maillage principal.

- Le principe des 4 coins égaux ne s'applique pas si le sous-maillage n'est pas complètement inclus dans le maillage principal ; en particulier le sous-maillage peut être inclus mais tangent sur 1 ou 2 de ses bords (Figure 16).

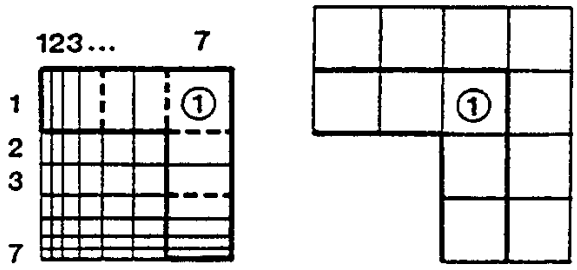


Figure 16 – Sous-maillage gigogne dans un angle :
à gauche le sous-maillage, à droite le maillage principal.
Sous-maillage tangent ; il n'y a qu'un coin (n°1) identique dans les 2 maillages.

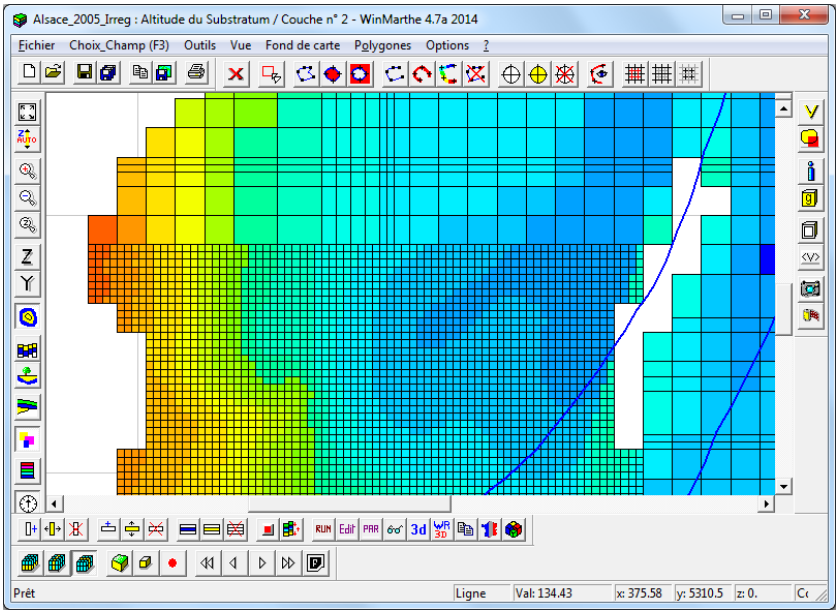


Figure 17 – Modélisation en 3D de la plaine d'Alsace avec un maillage irrégulier contenant un maillage gigogne emboîté.

2.4. Les schémas numériques de calcul

- Calcul des écoulements

Les calculs hydrodynamiques (ou hydrauliques) sont effectués selon une méthode aux volumes finis (Différences Finies Intégrées) avec une discrétisation implicite, en établissant l'équation d'équilibre des débits d'échange entre une maille et ses voisines.

Dans le cas général une maille, au centre, indice « C », a 6 mailles voisines « V » : au Nord, Est, Sud, Ouest, Haut et Bas (Figure 18). Cependant, au contact d'un maillage gigogne, le nombre de mailles voisines peut être supérieur à 6. Par exemple, dans un gigogne *partiel* sous-divisé en 5 : une maille non subdivisée aura 5 mailles voisines au Nord, 5 mailles voisines à l'Est, 5 mailles voisines au Sud et 5 mailles voisines à l'Ouest, soit au total 27 mailles voisines.

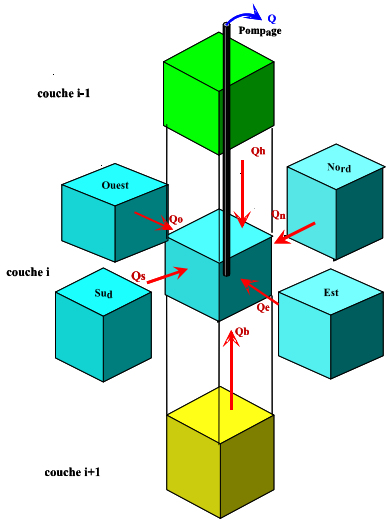


Figure 18 – Échanges entre une maille et ses 6 voisines.

La loi de conservation de la masse, associée à la loi de Darcy, conduit aux équations suivantes :

$$div(\mathrm{K} \cdot grad\ H) + q = S_S \cdot \frac{\partial H}{\partial t} \qquad \textit{en nappe captive}$$

$$div(\mathrm{K} \cdot grad\ H) + q = \frac{1}{\Delta z} \cdot S_L \cdot \frac{\partial H}{\partial t} \qquad \textit{en nappe libre}$$

Avec :

K = Perméabilité.
H = Charge hydraulique.
q = Densité de débit injecté ou pompé (débit par unité de volume).
t = Temps.
S_S = Coefficient d'emmagasinement captif spécifique.
S_L = Coefficient d'emmagasinement libre.

En écrivant les échanges entre la maille du centre et ses voisines on obtient l'équation algébrique :

$$Q + \sum_{V=1}^{6} T_{VC} \cdot (H_V - H_C) = Surf \cdot S \cdot \left(\frac{H_C - H_P}{dt}\right)$$

avec, suivant le cas (nappe captive ou nappe libre) :

$$Surf \cdot S = a_x \cdot a_y \cdot a_z \cdot S_S \quad \textit{ou bien} \quad Surf \cdot S = a_x \cdot a_y \cdot a_z \cdot S_L$$

Avec :
Q = Débit dans la maille du centre (positif si le débit est injecté)
T_{VC} = Transmissivité d'échange entre la maille V et la maille C
H_P = Charge hydraulique au centre au début du pas de temps
H_C = Charge hydraulique au centre en fin de pas de temps
H_V = Charge hydraulique dans la maille voisine V en fin de pas de temps
dt = Durée du pas de temps

Les transmissivités d'échange (ou coefficients d'échange) sont explicitées dans l'Annexe 2.

On obtient ainsi un système d'équations, linéaires si on considère que les coefficients d'échanges T_{VC} sont connus. La matrice correspondant à ce système d'équation est très « creuse ». Dans le cas général, hors gigognes, elle contient uniquement des 0, sauf dans 7 diagonales : la diagonale du centre et les 6 diagonales voisines : Haut, Nord, Est, Ouest, Sud et Bas.

Comme les coefficients d'échanges sont symétriques ($T_{VC} = T_{CV}$), la matrice est symétrique. La résolution se fait donc itérativement par la méthode des « gradients conjugués » selon l'un des algorithmes de résolution proposés (pré-conditionnement de Cholesky, méthode Eisenstat, etc.).

- Calcul du transport de masse et du transfert thermique

Selon le type de problème posé (dominance de la convection ou de la dispersion), l'utilisateur peut choisir entre 4 techniques de calcul pour optimiser le schéma de transport mis en œuvre :

  - Méthode TVD (Total Variation Diminishing) à limiteur de flux ;
  - Méthode des volumes finis ;
  - Méthode des caractéristiques (MOC), utilisant des particules ;
  - Méthode des déplacements aléatoires (Random Walk), dite aussi méthode des particules.

Les fonctionnalités de transport de masse, de transfert thermique et de transport réactif ne sont pas décrites dans cette notice d'utilisation. Elles sont décrites dans des notices séparées (Thiéry, 2015c, 2015e).

2.5. Extension du domaine aquifère

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

Les mailles ayant une perméabilité égale à la valeur code 9999 sont également extérieures au domaine. Dans les maillages 3D une maille ayant une perméabilité égale à 9999 permet d'isoler les écoulements entre couches adjacentes.

Les limites latérales peuvent être différentes d'une couche à l'autre, sans se superposer (Figure 19).

En résumé :

- Une maille avec une perméabilité supérieure à 0 fait partie du domaine aquifère ;
- Une maille avec une perméabilité = 0 (ou 9999) est extérieure au domaine aquifère ;
- Dans les maillages 3D (ou multicouches), on doit distinguer :
  - perméabilité = 0 => maille inexistante (transparente aux écoulements),
  - perméabilité = 9999 => maille imperméable (peut isoler 2 couches).

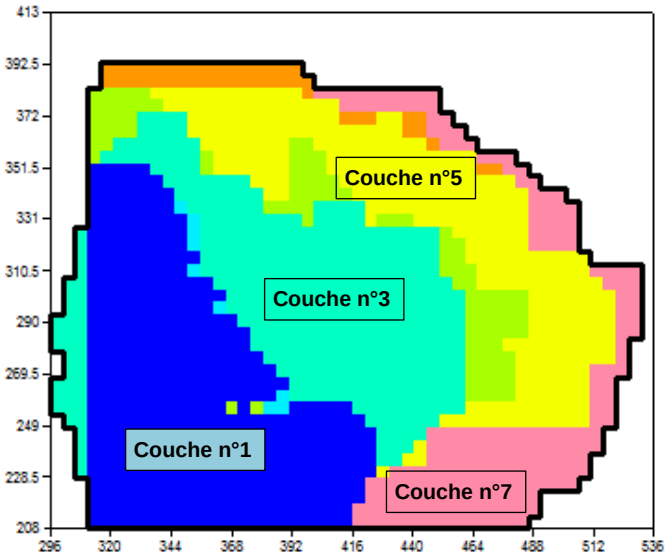


Figure 19 – Système aquifère Nord-Aquitain à 7 couches. Extension des couches.

2.6. Conditions aux limites

Géométriquement, on appelle « maille limite latérale » une maille qui est adjacente avec au moins une maille imperméable (perméabilité = 0 ou 9999).

Dans une maille limite latérale :

- Si on n'impose rien de particulier, par défaut c'est une « limite étanche » (vis-à-vis de la maille voisine qui est extérieure au domaine).
- Si on veut imposer la charge hydraulique (c'est-à-dire le « potentiel ») dans une telle maille limite latérale il faut :
  - lui affecter un débit initial égal à la valeur code 9999,
  - lui affecter la charge hydraulique (le potentiel) souhaitée.

Dans n'importe quelle maille, qui n'est pas une maille limite latérale, on peut exactement de la

même manière, imposer la charge hydraulique :

- en lui affectant un débit initial égal à la valeur code : 9999,
- et en lui affectant la charge hydraulique (le potentiel) souhaitée.

Dans tous les cas, quand on a imposé la charge hydraulique, la maille est dite « maille à potentiel imposé ».

Même si cette maille est située au milieu du domaine, une maille« à potentiel imposé » est par définition une « maille limite », puisque pour imposer sa charge hydraulique il doit y avoir un débit (calculé par le code de calcul) entrant depuis l'extérieur, ou sortant vers l'extérieur.

Par définition, on ne peut pas fixer un débit dans une maille « à potentiel imposé » puisque c'est le code de calcul qui calcule le débit. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle on définit ces mailles par un débit à la valeur code « 9999 ».

Dans n'importe quelle maille (qui n'est pas à potentiel imposé) on peut introduire un débit d'injection (positif) ou un débit de pompage (négatif).

Dans MARTHE, on ne considère pas qu'il s'agit d'une maille « à débit imposé ». C'est une maille normale qui reçoit un « terme source ». Par exemple, dans un domaine 2D, toutes les mailles peuvent recevoir un flux de recharge par les précipitations atmosphériques. De la même manière, on ne parle pas de mailles « à débit nul », puisqu'il n'y a aucune action à prendre pour une telle maille.

2.7. Agencement des couches

Le code de calcul MARTHE peut faire intervenir jusqu'à 999 couches.

La couche la plus haute est la couche n°1.

Les limites latérales de chaque couche peuvent être différentes d'une couche à l'autre, sans se superposer. Certaines couches peuvent disparaître localement. Par exemple la couche n°3 et la couche n°4 peuvent disparaître et mettre en contact les couches n°2 et n°5.

Certaines couches peuvent être séparées entre elles par des formations semi-perméables appelées épontes qui ne sont *pas* des couches de calcul. Cette fonctionnalité n'est cependant plus guère utilisée. Le texte qui suit se rapporte donc plus particulièrement aux maillages du cas général, sans épontes. Dans les systèmes avec épontes, la géométrie est un peu différente : elle est décrite dans les champs relatifs aux épontes.

Pour éviter toute redondance, puisque le toit d'une couche est le substratum d'une couche située au-dessus, on procède de la manière suivante :

- La description du système à modéliser se fait de haut en bas (dans le sens de la recharge par les pluies) depuis la 1ère couche (la plus haute) jusqu'à la dernière.
- Chaque maille d'une couche possède une altitude de substratum.
- Le toit d'une maille est alors constitué par le substratum de la couche située immédiatement au-dessus.
- Quand une maille affleure, il n'y a pas de couche située au-dessus, donc pas de substratum utilisable pour définir son toit. Le code de calcul utilise donc la « topographie ».

La « topographie » est la limite supérieure du système aquifère. Elle s'applique à l'extension totale du domaine, formée de la réunion, ou de la projection, de toutes les couches. Cette extension totale est appelée la couche fictive n°0.

- En fait, la « topographie » n'est pas réellement l'altitude de la topographie mais, en chaque maille, l'altitude de la « limite supérieure de la couche aquifère la plus haute ».

- Si la couche aquifère la plus haute est recouverte d'une couche imperméable : l'« altitude topographique » est alors l'altitude de la base de cette couche imperméable.

- Chaque fois qu'une formation aquifère affleure, c'est cette topographie qui lui sert de toit.

Sur la Figure 20, la couche n°6 (en bleu clair) disparaît vers l'Est, et met en contact la couche n°7 (en bleu foncé) avec la couche n°5 (en vert foncé). Par ailleurs, plus à l'Est, cette couche n°5 affleure.

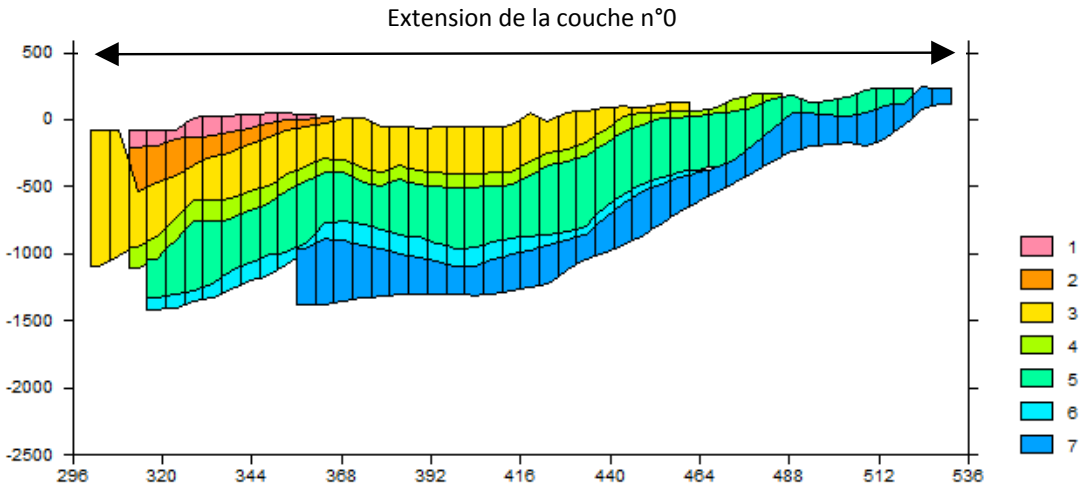


Figure 20 – Coupe verticale à travers le système aquifère Nord-Aquitain à 7 couches. Mise en évidence de la couche n°0 (extension totale de toutes les couches).

La Figure 21 montre un exemple de géométrie complexe, les couleurs représentant les numéros des couches aquifères.

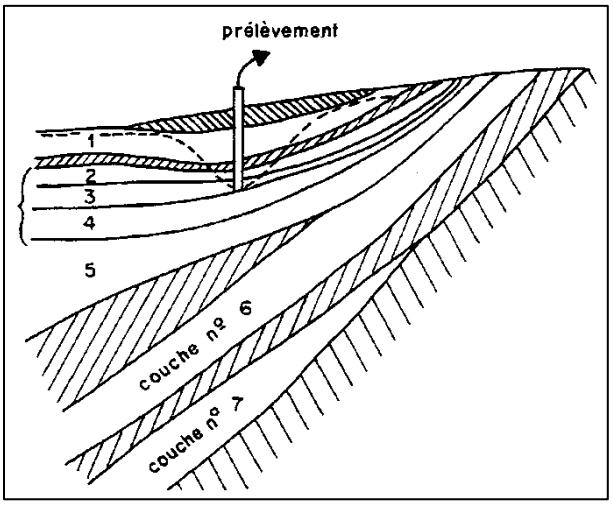


Figure 21 – Exemple de système complexe qui peut être modélisé avec MARTHE.

Dans les fichiers de données de perméabilité, on attribue une valeur positive aux mailles hydrauliquement actives. À l'inverse, on n'affecte *pas* de valeur aux mailles situées en dehors de l'extension d'une couche ; la perméabilité des mailles absentes a donc par défaut la valeur « 0 ». MARTHE considère que 2 mailles actives superposées sont en connexion hydraulique, qu'elles appartiennent ou non à des couches consécutives. Pour simuler le biseautage d'une formation et le court-circuit induit entre les formations encaissantes, il suffit de ne *pas* attribuer de valeur de perméabilité aux mailles correspondant à la lacune de formation : les mailles actives sus-jacentes et sous-jacentes sont alors automatiquement mises en connexion hydraulique.

Il est cependant possible d'indiquer qu'en dehors de l'extension aquifère de la couche, la couche existe mais est imperméable et isole les éventuelles couches situées au-dessus et en dessous. On affecte alors la valeur code « 9999 » à la perméabilité d'une telle zone. (Figure 22) :

- Une perméabilité égale à la valeur code « 9999 » : indique une maille dont la perméabilité est « infiniment petite » : il n'y aura pas de calcul de charge hydraulique dans une telle maille.
  Par exemple : sur la partie Est de la figure, la couche n°3 isole les couches n°2 et n°4, puis les couches n°1 et n°4
- Une perméabilité égale à 0 : indique une maille qui n'existe pas et n'est pas une maille de calcul de l'aquifère.
  Par exemple, sur la partie Ouest de la Figure 22, la couche n°2 a une perméabilité égale à 0, mettant en contact la couche n°1 avec la couche n°3. Le toit de la couche n°3 est alors automatiquement le substratum de la couche n°1

En résumé :

- Une perméabilité égale à 0 indique une maille qui n'existe pas. C'est le cas général à privilégier.
- Une perméabilité égale à 9999 dans un système multicouche ou 3D isole sur la verticale (comme du « granite sain » ou de l'argile totalement imperméable) : *ce qui est relativement rare*.
- En aquifère monocouche une maille imperméable (perméabilité = 9999) est équivalente à une maille inexistante (perméabilité = 0).

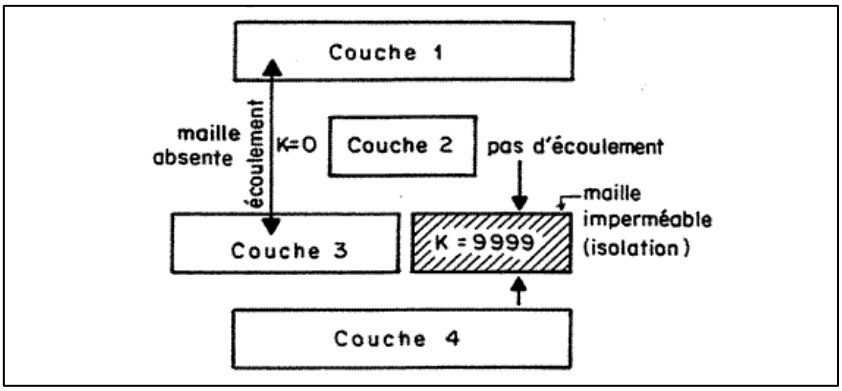


Figure 22 – Coupe verticale : illustration de la différence entre une perméabilité égale à 0 et une perméabilité égale à 9999.

Remarque : Pour un maximum de clarté, on n'utilise jamais le terme « mur » dans ce document, mais uniquement :

- Le terme « toit » (en anglais « top ») pour désigner la limite supérieure d'une couche.
- Et le terme « substratum » (en anglais « bottom ») pour désigner la limite inférieure d'une couche.

Remarque : La couche n°0 est une couche fictive, située à la surface du domaine modélisé, dont l'extension couvre la superficie totale de toutes les couches. Cette couche numéro zéro sert à définir les conditions d'affleurement : altitude topographique, possibilité de mise en charge ou de débordement, numéros de zone météo, numéros de zone de sol, numéros de zone d'irrigation. En pratique, dans les fichiers, les données de la « couche n°0 » sont rangées dans la couche n°1, mais elles sont relatives à l'extension totale du domaine.

Remarque : Dans les maillages en « coupe verticale », ou en « Pseudo-coupe verticale », c'est la ligne n°1 qui correspond à cette couche n°0 (Figure 23).

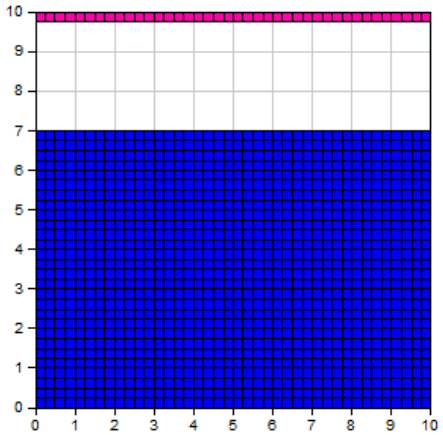


Figure 23 – Maillage en « coupe verticale » ou en « Pseudo-coupe verticale » :
c'est la ligne n°1, en rose, qui correspond à la couche n°0.
C'est dans cette ligne qu'il faut définir les numéros de zone de sol, les numéros de zone météo, les index de débordement, etc.

2.8. Import et export de données

Les mailles du domaine modélisé sont automatiquement associées à des coordonnées géographiques, ce qui permet des imports et des exports aisés.

2.8.1. Imports

Il est possible d'importer la géométrie résultant de modèles géométriques 3D ou de géo modeleurs : GDM ®, Multilayer ®, EarthVision ®, Eclipse/Petrel ®.

WinMarthe : « Outils » ➔ « Autres » ➔

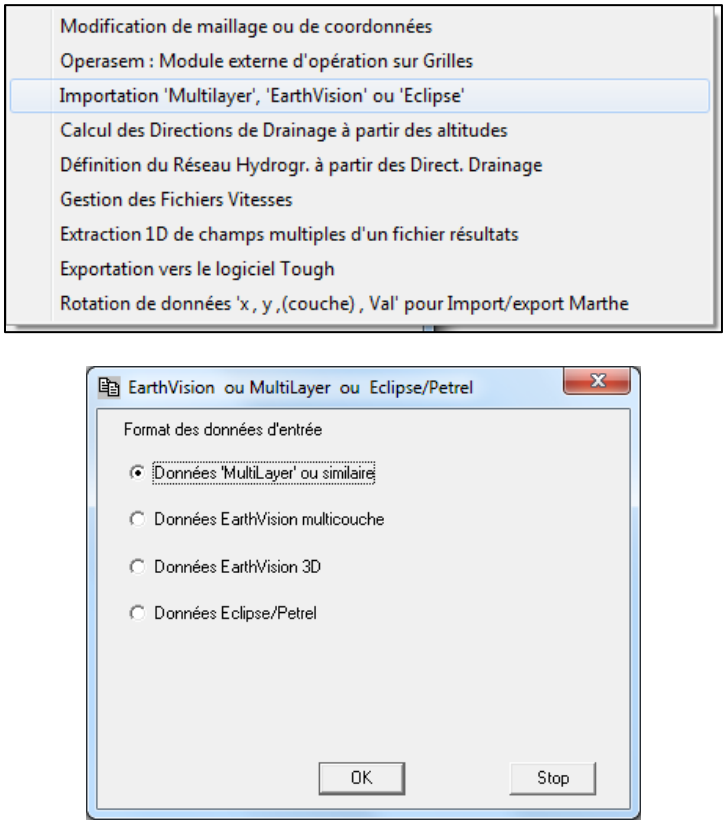


Figure 24 – Importation de données d'un géomodeleur (Multilayer, EarthVision, Eclipse/Petrel).

Il est possible également d'importer des « habillages » au format « mif » de Mapinfo ®, ou bien au format « bln » de Surfer ® dans le module de « Gestion des polygones » : WinMarthe : bouton .

Si on utilise un maillage régulier monocouche, il est possible d'importer directement des champs résultant d'ArcGIS ® (au format texte [.asc]), ou éventuellement des grilles générées par Surfer ®, d'extension de fichier [.grd]. Seuls les fichiers en format texte (format Ascii) peuvent être importés.

Les restrictions sont les suivantes :

- Fichiers ArcGIS [.asc] : Les grilles sont formées de mailles carrées régulières.

- Fichiers Surfer [.grd] en format Ascii : Les grilles sont formées de mailles rectangulaires régulières, c'est-à-dire que tous les rectangles sont égaux.

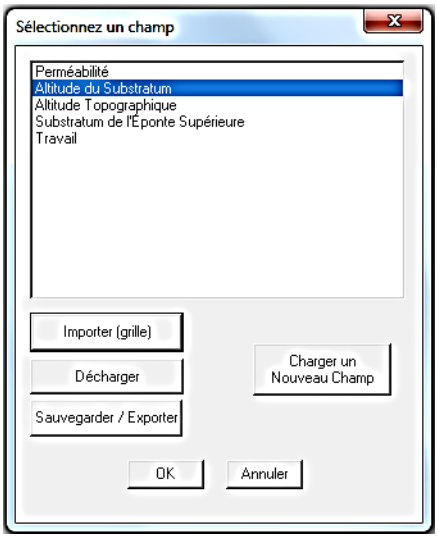


Figure 25 – Importation de grille Marthe, de fichier [.Asc] ou de fichier Surfer ®.

Il est possible avec le préprocesseur WinMarthe d'importer des données au format : **(X Y Valeur)** ou bien (**X Y Couche Valeur**) :

WinMarthe : « Fichier » ➔ « Importer des valeurs dans le champ courant » ➔ « (x, y, valeur) ou (x, y, Couche, valeur) »

2.8.2. Exports

Les mailles du domaine modélisé étant associées à des coordonnées géographiques, il est possible de superposer les données initiales et les résultats de simulation à des fonds cartographiques préalablement digitalisés.

Les résultats de simulation sont sauvegardés dans des fichiers texte. Ils peuvent être représentés graphiquement directement par le post-processeur WinMarthe.

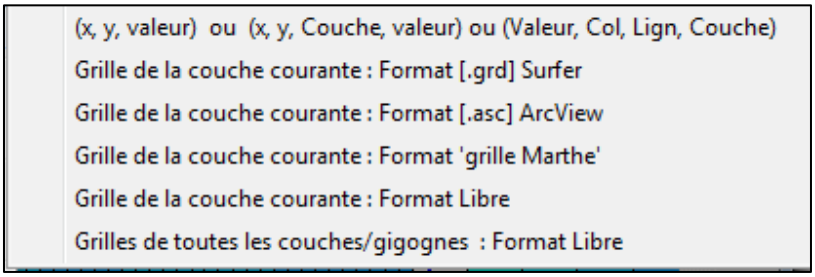
Si les maillages sont monocouches, ils peuvent être exportés directement en 2D vers ArcGIS ®, QGIS ®, ou Surfer ®.

Les restrictions sont les suivantes :

- Fichiers ArcGIS [.asc] : Les grilles doivent être formées de mailles carrées régulières.
- Fichiers Surfer [.grd] en format Ascii : Les grilles doivent être formées de mailles rectangulaires régulières, où tous les rectangles sont identiques.

La procédure est la suivante :

WinMarthe : « Fichier » ➔ « Exporter les valeurs du champ courant » ➔



Ils peuvent également être exportés par des modules d'exportation dédiés :

- WinMarthe : : En 2D vers : Mapinfo ®, ArcGIS ®, QGIS ® (mif/mid)
- WinMarthe : : En 2.5D vers : VRML
- WinMarthe : : En 3D vers : Model3D ®, VTK, Paraview ®, Tecplot ®.

Des historiques d'évolution temporelle de champs calculés dans des mailles particulières peuvent également être sauvegardés. Les fichiers contenant ces historiques, dont le nom a pour extension [.prn] peuvent ensuite être directement importés sous Excel ® ou un tableur équivalent. Les valeurs de ces fichiers d'extension [.prn] sont toujours séparées par des « tabulations », jamais par des « virgules ». Par ailleurs, les nombres décimaux sont représentés avec des « points décimaux », jamais avec des virgules.

2.9. Lancement de la simulation, et arrêt anticipé de la simulation

Après avoir préparé les données avec le préprocesseur WinMarthe, on lance la simulation en cliquant sur l'icône

, située sur la première ligne de la barre d'outils du bas du cadre.

Il est également possible de lancer la simulation, hors de WinMarthe, directement à partir du « menu démarrer », par la commande « RunMarthe ». Si on a créé sur le bureau une icône du moteur de calculs Marthe_R8, il est également possible de lancer la simulation en double-cliquant directement sur cette icône.

En lançant directement le moteur de calcul, hors WinMarthe, on libère un maximum de mémoire pour effectuer la simulation, ce qui peut être utile pour les très gros domaines, et on libère l'écran de l'ordinateur, ce qui est utile pour les simulations de longues durées.

2.9.1. Lancement en mode « batch » (pour utilisateurs avancés)

Pour une utilisation spéciale, pour enchaîner des simulations par exemple, il est possible de lancer Marthe en mode batch. Pour cela on pourra créer un petit fichier script (un fichier [.bat]), par exemple un fichier de nom « Lance_ma_Simul.bat » contenant la ligne suivante :

Si on s'est placé dans dossier dans lequel sont les fichiers du projet :

"%bin_Marthe%\marth_R8.exe" Mon_Projet.rma

Ne pas oublier les guillemets de part et d'autre de : %bin_Marthe%\marth_R8.exe

Ou bien si on lance les calculs à partir d'un autre dossier :

"%bin_Marthe%\marth_R8.exe" Mon_Dossier\Mon_Projet.rma
ou bien :
"%bin_Marthe%\marth_R8.exe" Mon_Projet.rma * Mon_Dossier

Ne pas oublier les guillemets de part et d'autre de : %bin_Marthe%\marth_R8.exe
Ne pas oublier l'astérisque « ***** » entre le nom du projet et le nom du dossier)

Remarque : Il faut mettre entre guillemets le « nom de fichier » ou le « nom de dossier » s'ils contiennent des espaces. De tels noms, contenant des espaces, sont d'ailleurs déconseillés.

Si on lance de cette manière plusieurs « runs » en mode batch dans le même dossier, par exemple :

"%bin_Marthe%\marth_R8.exe" Projet_1.rma
"%bin_Marthe%\marth_R8.exe" Projet_2.rma

Il faudra, entre les 2 « runs », renommer les fichiers de résultats ayant un nom générique, par exemple :

```
"%bin_Marthe%\marth_R8.exe"   Projet_1.rma
Ren    bilandeb.txt          bilandeb_1.txt
Ren    chasim.out            chasim_1.out
Ren    historiq.prn          historiq_1.prn
REM
"%bin_Marthe%\marth_R8.exe"   Projet_2.rma
Ren    bilandeb.txt          bilandeb_2.txt
Ren    chasim.out            chasim_2.out
Ren    historiq.prn          historiq_2.prn
```

2.9.2. Arrêt exceptionnel de la simulation

Quand la simulation est terminée, le moteur de calculs s'arrête et l'utilisateur se retrouve sous WinMarthe, si la simulation a été lancée à partir de WinMarthe.

Exceptionnellement, on peut cependant arrêter la simulation avant la fin, en cas de problèmes, ou bien pour une vérification. Pour cela :

Il faut appuyer en continu sur la touche « F9 ». Après quelques instants on obtient une boîte de dialogue demandant de confirmer qu'on veut bien arrêter la simulation et terminer définitivement l'exécution du moteur de calculs.

3. Les fichiers toujours nécessaires pour une simulation

Pour faire une simulation, il faut créer ou disposer d'un certain nombre de fichiers. Le nombre de ces fichiers dépend des fonctionnalités mises en œuvre pour la simulation. Par exemple, si on prend en compte un réseau de rivières, avec du transport de masse et du transfert thermique couplés avec un bilan hydroclimatique, il faudra beaucoup plus de fichiers que si on fait une simulation pour calculer uniquement la charge hydraulique dans un aquifère monocouche.

Les noms de tous les fichiers qui seront utilisés pour la simulation (à quelques exceptions près) sont listés dans le « fichier projet » de MARTHE.

Ce fichier projet est constitué automatiquement par le préprocesseur WinMarthe. Il a pour extension automatique [.rma] c'est-à-dire « répertoire de MARTHE ». C'est un fichier texte qui peut être modifié de manière externe si nécessaire.

Le fichier projet peut contenir des noms de fichiers de données qui ne seront pas utilisés. La présence d'un nom de fichier dans le fichier projet n'est généralement pas suffisante pour mettre en œuvre une fonctionnalité. Il faut choisir d'actionner cette fonctionnalité par un paramètre du fichier des « paramètres généraux ».

Par exemple, le fait d'introduire un fichier de concentration dans le fichier projet n'implique pas qu'il y aura un calcul de transfert de masse.

La simulation la plus simple qui peut être effectuée est un calcul hydrodynamique (appelé parfois aussi calcul hydraulique) pour obtenir le champ de la charge hydraulique et le champ du débit dans un aquifère ou dans un système aquifère.

Pour effectuer une telle simulation simple, les fichiers nécessaires sont au minimum les suivants :

- Quelques fichiers de champs spatialisés définissant la géométrie. Au minimum :
  - Un fichier maillé de « Perméabilité » qui définit en particulier l'extension du maillage, les dimensions des mailles, et l'extension des aquifères dans le maillage. Ce fichier de « Perméabilité » joue aussi le rôle de fichier de « Présence » définissant les mailles hydrauliquement actives.
  - Un fichier maillé d'« Altitude du substratum » des couches modélisées.
  - Un fichier maillé d'« Altitude topographique » de la limite supérieure des couches affleurantes.

- Un fichier de « Couches aquifères et Gigognes » pour décrire le nombre de couches et le type de maillage.
  Ce fichier est créé automatiquement lors de la création d'un nouveau projet par WinMarthe. Il peut ensuite être modifié avec le module de « Gestion des données non maillées ».

- Un fichier de « Profil d'utilisation » : c'est un fichier facultatif de confort pour faciliter la simulation de problèmes simples.
  Ce fichier peut être créé puis modifié avec le module de « Gestion des données non maillées ».

- Un fichier de « Paramètres généraux » pour choisir les fonctionnalités, définir les options et les paramètres constants non spatialisés.
  Ce fichier peut être créé puis modifié avec le module de « Gestion des données non maillées ».

- Un fichier de description des « Pas de temps » de modèle.
  Ce fichier peut être créé puis modifié avec le module de « Gestion des données non maillées ».
  Ce fichier permet de définir les dates de fin des pas de temps, et donc leurs durées.
  Il décrit aussi les actions à déclencher durant ces pas de temps :
  - Modifications ponctuelles de données en début de pas de temps : par exemple, modification de débits de pompages, modification de flux de pluie, etc.
  - Demande de sauvegarde de certains champs calculés en fin de ce pas de temps : par exemple, sauvegarde du champ de l'amplitude de la vitesse d'écoulement, sauvegarde du champ de la charge hydraulique calculée, etc.

- Un fichier de définition de « Mailles à historiques » : c'est un fichier facultatif, souvent utile pour sauvegarder les historiques d'évolution de certains champs calculés dans certaines mailles d'un intérêt particulier, pour en suivre l'évolution temporelle, pas de temps après pas de temps.
  Ce fichier peut être créé puis modifié avec le module de « Gestion des données non maillées ».

4. Principe du réseau hydrographique et du réseau de drains

Ce chapitre présente les fonctionnalités de :

- Réseau hydrographique (réseau de rivières),
- Réseau de drains,

qui peuvent être pris en compte lors de la modélisation des hydrosystèmes. Ces réseaux sont couplés à la nappe lors des calculs d'écoulement, de transport de masse et de transfert thermique. Le réseau hydrographique est également couplé au bilan hydroclimatique puisque c'est vers lui qu'est dirigé le ruissellement.

Les réseaux de drains peuvent être de deux types, qui seront détaillés plus loin :

- Drains « classiques », pouvant uniquement drainer la nappe, mais ne pouvant jamais l'alimenter.
  Ces drains ne peuvent pas se mettre « en charge ». Ils sont toujours à pression atmosphérique Le débit drainé est proportionnel à la différence entre la charge hydraulique locale dans la nappe et l'altitude du (fond du) du fond du drain.
  Si la charge hydraulique est inférieure à l'altitude du drain => le débit drainé est nul.
  Pour le cumul du débit drainé, la propagation d'un tronçon vers le tronçon aval est instantanée et dans un sens imposé de l'amont vers l'aval.

- « Drains-conduits » : ces drains, assimilables à des conduits ou tuyaux, ont des échanges avec la nappe, à travers leur paroi poreuse. Ces échanges dépendent de la différence de charge hydraulique, donc de pression, entre la nappe et le conduit. Ils peuvent donc drainer ou alimenter la nappe. Le sens de propagation de l'écoulement dans un drain-conduit dépend de la différence de charge hydraulique. L'écoulement dans le drain-conduit peut donc s'effectuer dans un sens ou l'autre, sans notion prédéfinie d'amont ou aval hydraulique.
  Ces drains-conduits peuvent être utilisés pour représenter finement des conduits karstiques, ou des galeries de mine.

4.1. Principe du réseau hydrographique de rivières

4.1.1. Présentation du réseau hydrographique

Le réseau hydrographique, qui se superpose au maillage de surface, est composé d'un système arborescent de tronçons de rivières organisés en affluents (Figure 26).

Le réseau hydrographique est en contact uniquement avec la couche qui affleure localement.

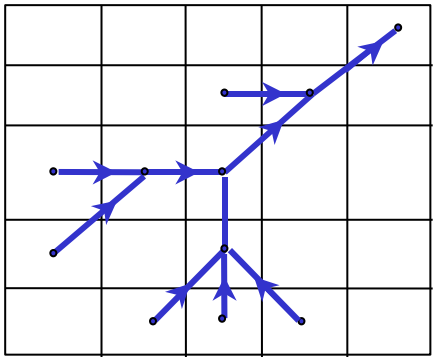


Figure 26 – Réseau de rivières connecté au maillage du domaine.

Chaque tronçon de rivière peut avoir :

- Un seul tronçon aval.
- Jusqu'à trois tronçons amont.

Un tronçon est décrit (Figure 27) par :

- Sa géométrie :
  - Longueur,
  - Largeur,
  - Altitude du fond du lit.
- Ses propriétés physiques :
  - Rugosité du lit et des berges,
  - Pente du lit,
  - Épaisseur du lit et des berges,
  - Perméabilité du lit et des berges.
- Son terme source :
  - Pompage ou injection dans le tronçon.
- Son état :
  - Niveau (absolu) de l'eau dans la rivière.

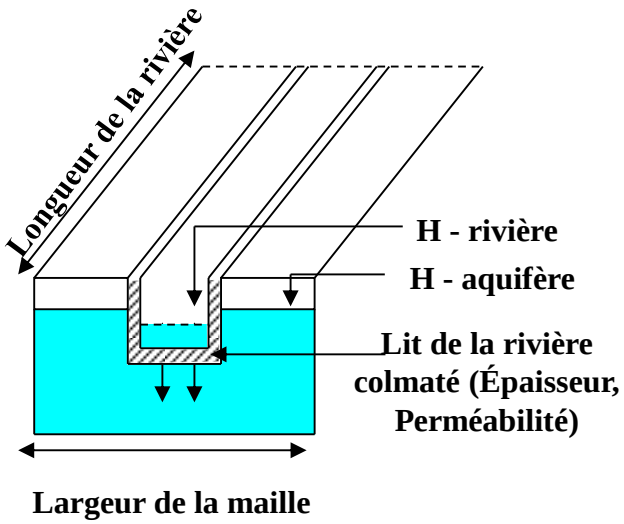


Figure 27 - Géométrie d'un tronçon de rivière.

4.1.2. Propagation du débit dans un tronçon de rivière

Comme le montre la Figure 28, le débit dans un tronçon de rivière résulte de l'équilibre de tous les termes de débits :

- Débit amont (Q_{AM}),
- Débit aval (Q_{AV}),
- Débit d'échange avec l'aquifère (Q_{ECH}),
- Débit de ruissellement et de débordement (Q_{RUIS}),
- Termes sources de débit (Q_{INJ})

Et, lorsque le routage est pris en compte, en régime transitoire :

- Débit de stockage (STO).

L'équation d'écoulement s'écrit comme suit :

$$Q_{AV} = Q_{AM} + Q_{ECH} + Q_{RUIS} + Q_{INJ} - \frac{dSTO}{dt} \qquad (1)$$

où « dt **»** est la durée du pas de temps.

Dans le cas d'une section rectangulaire, le terme de stockage « STO » est le produit de la largeur du tronçon par la hauteur d'eau dans la rivière « H_{RL} ».

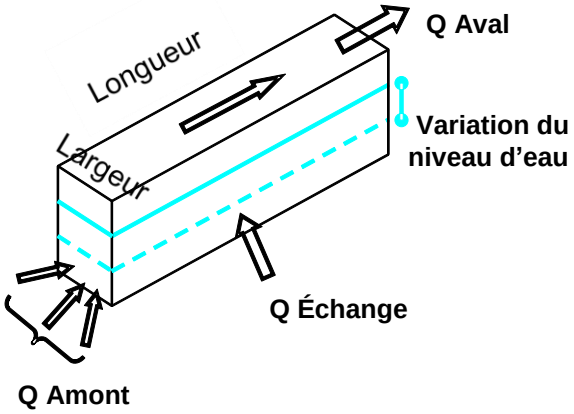


Figure 28 – Bilan des débits dans un tronçon de rivière.

La hauteur d'eau « H_{RL} » dans le tronçon est reliée au débit aval « Q_{AV} » du tronçon par la formule de Manning-Strickler :

$$Q_{AV} = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot \sqrt{Pente} \qquad (2)$$

Où : A = Section du tronçon

R = Rayon hydraulique = (Largeur · H_{RL}) / (Largeur + 2 H_{RL}) (3)

n = Coefficient de Manning-Strickler (traduisant la « rugosité »)

Pente = Pente du lit du cours d'eau

H_{RL} = Hauteur de l'eau au-dessus du lit

Si on introduit un seuil, c'est-à-dire un petit barrage, à l'aval du tronçon : on n'a plus une loi de Manning-Strickler, mais on a une loi de seuil de la forme suivante :

$$Q_{AV} = \mathrm{Larg} \cdot \mathrm{FactQ} \cdot \sqrt{2g} \cdot (H_{Riv} - H_{Seuil})^{\mathrm{Expos}}$$

Avec :

FactQ = Facteur (sans unité) dont la valeur par défaut est égale à 0.40

g = Accélération de la pesanteur = 9.81 m/s^2 (à Paris).

Larg = Largeur du tronçon (m).

H_{Riv} = Hauteur d'eau au-dessus du fond dans le tronçon considéré (m).

H_{Seuil} = Hauteur au-dessus du fond, du seuil situé à l'aval du tronçon considéré (m).

Expos = Exposant : très généralement égal à 1.5 (sans dimension).

En combinant les équations (1), (2) et (3) on obtient une équation implicite qui donne le débit en aval du tronçon en fonction des débits des tronçons amont. Le débit dans tout le réseau hydrographique est alors obtenu par un processus itératif de manière optimale, en utilisant l'ordre de Strahler de chaque tronçon. Ce schéma de routage s'est avéré très efficace et a été comparé avec succès à une solution quasi-analytique de propagation d'onde de crue dans un canal, ainsi qu'avec des données observées de propagation de crue en Haute-Loire. Comme la méthode de calcul suppose qu'en chaque tronçon la surface libre a la même pente que le lit, l'approximation est d'autant meilleure que la pente du lit de la rivière n'est pas trop petite et que les variations de hauteur dans la rivière ne sont pas trop rapides, ce qui est généralement le cas dans les systèmes naturels.

4.1.3. Débit échangé entre un tronçon de rivière et l'aquifère

Selon la position relative du niveau d'eau dans la rivière et de la surface libre dans l'aquifère, un débit peut être échangé : depuis un tronçon de rivière vers l'aquifère, ou réciproquement depuis l'aquifère vers la rivière. Le débit d'échange est contrôlé, d'une manière non linéaire, par le lit et les berges du cours d'eau en fonction de leur surface, épaisseur et perméabilité (Figure 29).

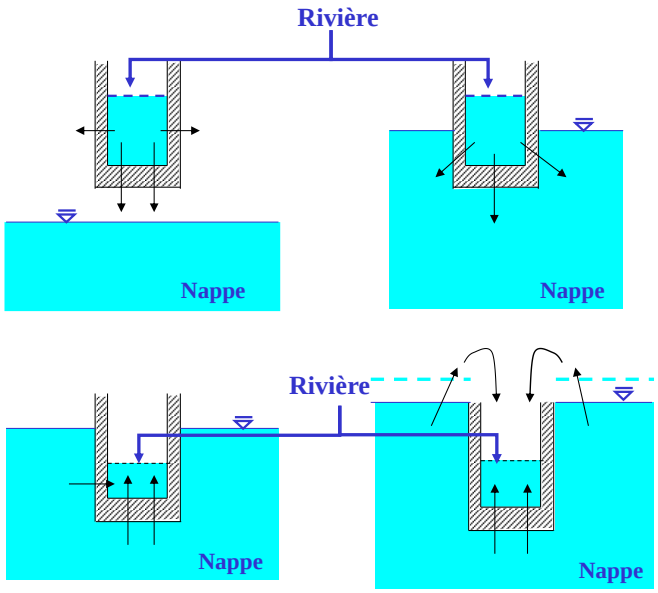


Figure 29 – Différentes configurations d'échanges Nappe – Rivière.

Trois situations sont possibles :

- Lorsque le niveau dans l'aquifère est inférieur à la base du lit de la rivière, le débit d'échange vers l'aquifère est un terme de percolation indépendant de ce niveau. En effet la nappe est « décrochée ». Le milieu n'est plus en charge ; il n'est plus saturé mais on considère qu'à la base du lit on est à la limite de saturation, donc avec une succion quasi nulle. La charge hydraulique à la base du lit est égale à l'altitude « H_f ». Équation (5)

- Lorsque le niveau dans l'aquifère est situé au-dessus de la base du lit de la rivière, le débit d'échange est le produit de la perméabilité du lit et des berges la surface d'échange, qui intègre les berges du fleuve, multiplié par la différence entre l'altitude de l'eau dans la rivière et la charge hydraulique dans l'aquifère, divisé par l'épaisseur du lit. Équation (6).

- Lorsque la charge hydraulique de l'aquifère est supérieure à la cote du sol et aussi supérieure au niveau d'eau dans la rivière : le débit d'échange (de la nappe vers la rivière) est augmenté d'un terme complémentaire de débordement de la nappe. Ce terme de débordement de nappe est appliqué à la surface complémentaire de la maille du domaine souterrain. Équation (7).

$$SURF_{Éch} = L \cdot \left[l + 2 \cdot \left(H_R - H_f \right) \right] \qquad (4)$$

$$Q_{Percol} = SURF_{Éch} \cdot K_R \cdot \frac{\left(H_R - H_f \right)}{Épais} \qquad (5)$$

$$Q_{Éch} = SURF_{Éch} \cdot K_R \cdot \frac{(H_R - H_N)}{Épais} \quad (6)$$

$$Q_{Débo} = (SURF_{Mail} - L \cdot l) \cdot K_R \cdot \frac{(H_N - H_{Topo})}{Épais} \quad (7)$$

Avec :

L	= Longueur du tronçon de rivière
l	= Largeur du tronçon de rivière
K_R	= Perméabilité du lit et des berges
Épais	= Épaisseur du lit (et des berges)
H_R	= Altitude absolue de la surface libre de l'eau dans la rivière
H_N	= Charge hydraulique (niveau piézométrique) de la nappe sous-jacente
H_f	= Altitude du fond du lit de la rivière
H_{Topo}	= Altitude de la surface topographique de la maille
$SURF_{Mail}$	= Superficie de la maille dans laquelle est situé le tronçon
$SURF_{Éch}$	= Superficie d'échange nappe-rivière
$Q_{Éch}$	= Débit d'échange de la rivière vers la nappe
Q_{Percol}	= Débit de percolation de la rivière vers la nappe décrochée
$Q_{Débo}$	= Débit complémentaire de débordement de la nappe vers la rivière

Il apparaît donc que, dans le cas général, le débit d'échange dépend des variations d'eau dans la rivière. Considérant un niveau donné dans l'aquifère, le débit d'échange est plus élevé quand le débit de la rivière, et donc la hauteur d'eau dans la rivière, sont plus élevés. Le modèle peut donc être vérifié ou calibré à partir d'observations de variations de hauteur d'eau, ou de niveau d'eau, dans la rivière quand elles sont disponibles.

4.1.4. Organisation détaillée du réseau hydrographique et terminologie

Dans MARTHE, le réseau hydrographique est organisé en « affluents », eux-mêmes découpés en « tronçons » :

- Un « affluent » est un ensemble de tronçons en série, sans confluences ; par commodité un affluent réel peut être découpé en plusieurs affluents « au sens de MARTHE.
- Chaque affluent peut avoir jusqu'à 3 affluents amont. Il se jette dans **1** affluent aval au maximum.
- Si un affluent n'a pas d'affluent aval, son extrémité aval est un « exutoire ».
- Si un affluent n'a pas d'affluent amont, son extrémité amont est une « source ».
- Il peut y avoir autant d'exutoires et autant de sources qu'on le souhaite.
  Il peut y avoir plusieurs réseaux complètement indépendants (comme le seraient le réseau de la Seine et le réseau de la Loire dans un modèle régional).
- Chaque maille du domaine peut contenir au maximum un seul élément de réseau hydrographique.
- Le domaine aquifère modélisé peut être monocouche ou multicouche.
- Le réseau hydrographique concerne uniquement la couche qui affleure. Ce n'est pas forcément la couche n°1, par exemple en une maille où c'est la couche n°3 qui affleure.
- Dans la couche courante, les tronçons ou affluents voisins peuvent se situer dans les **8** mailles voisines (N , S , E , O , NE , NO , SE , SO) donc incluant les obliques.

En multicouche, les tronçons voisins peuvent se situer dans la couche sus- ou sous-jacente, à condition qu'elle soit affleurante. Les **8** directions suivantes sont possibles : HN , HS , HE , HO pour le haut, et BN , BS , BE , BO pour le bas.
(N = Nord ; S = Sud ; E = Est ; O = Ouest ; H = Haut ; B = Bas).
Il y a donc au total jusqu'à 16 directions possibles.

4.1.5. Numérotation des éléments du réseau hydrographique

Un tronçon de rivière est défini par son « numéro d'affluent »et par son « numéro de tronçon ». Dans un affluent donné, les tronçons ont des numéros de tronçon croissants de l'amont à l'aval. C'est la manière d'indiquer à MARTHE le sens de parcours dans l'affluent. Ces numéros de tronçon n'ont pas besoin d'être continus. Ils doivent être croissants dans un même affluent, cependant des affluents différents peuvent contenir des éléments ayant le même numéro de tronçon.

Un numéro d'affluent peut être au maximum égal à 1000, puisqu'à partir de 1001 un numéro d'affluent correspond à un « Lac » et non pas à une rivière.

Pour la commodité de la modélisation, on peut découper un affluent (réel) en plusieurs affluents en série.

Le nombre de tronçons dans un même affluent n'est pas limité (le numéro maximal d'un tronçon est 999998).

Le nombre total de tronçons n'est pas limité.

Pour désigner un « élément de rivière » on utilise souvent dans ce document le terme « tronçon de rivière ». Un « tronçon de rivière » (c'est-à-dire un « élément de rivière ») est donc caractérisé par son « numéro d'affluent »et par son « numéro de tronçon ».

4.1.6. Arbre de branchement des affluents de rivière

L'« Arbre de branchement des affluents de rivière » permet de fixer les relations entre les affluents de rivière. Pour chaque affluent de rivière, il donne le numéro de son affluent aval.

Si un affluent n'a pas d'aval, c'est-à-dire si c'est un exutoire : par convention son affluent aval a le numéro « 0 ».

4.1.7. Cas particulier des « étangs » ou « estuaires »

Il est possible de simuler simplement des étangs (ou des estuaires) comme des « Rivières », c'est-à-dire avec la même loi d'échange Nappe-Rivière. L'altitude de l'eau dans l'étang (ou l'estuaire) peut varier au cours du temps, mais il n'y a pas de loi Hauteur-Débit. Dans MARTHE, ces étangs ou estuaires sont des « Rivières » particulières qui ont un « numéro d'affluent » négatif. Ce numéro négatif doit être inférieur à -3 puisque, comme on le verra, les n°-1, -2 et -3 ont un sens particulier. Leur « numéro de tronçon » est inutilisé et n'a pas besoin d'être défini : il suffit de le laisser à la valeur zéro par défaut. Les numéros d'affluents (négatifs) n'ont pas besoin d'apparaître dans l'« Arbre de branchement des affluents ».

Il n'y a donc *pas* de connexion entre ces « étangs » et les affluents de rivières. Si on utilise des « numéros d'affluent » différents pour chaque étang, ou groupe d'étangs, on pourra obtenir un

bilan séparé des échanges entre ces affluents et la nappe (Bilan global récapitulatif de chaque affluent).

Ces affluents particuliers (à numéro d'affluent négatif) peuvent également être utilisés pour simuler des rivières jamais asséchées dont on ne s'intéresse pas aux débits, mais uniquement aux échanges avec la nappe. On évite alors de devoir en numéroter les tronçons.

Pour simuler de manière plus élaborée des « étangs » ou des « lacs », il est cependant conseillé d'utiliser les fonctionnalités de simulation des « Lacs ».

4.1.8. Dérivations de débit

Il est possible de définir des dérivations de débit. Une dérivation consiste à dériver du débit depuis un tronçon (appelé « source ») vers un autre tronçon (appelé « cible ») situé dans le même affluent ou bien dans un autre affluent.

Le débit prélevé est défini par le pourcentage du débit prélevé dans le tronçon source.

Les éventuelles dérivations sont définies dans par un fichier créé *via* le module de « Gestion des données non maillées » accessible par le bouton

de la barre d'outils du bas du cadre de WinMarthe.

Pour chaque dérivation cinq valeurs sont à définir :

- Le numéro de l'affluent source
- Le numéro du tronçon source
- Le numéro de l'affluent cible
- Le numéro du tronçon cible
- Le pourcentage de débit prélevé dans le tronçon source

4.1.9. Options de calcul

- Si on le souhaite, le code de calcul peut calculer dans chaque tronçon de rivière la hauteur d'eau à partir du débit : la relation utilisée est la loi de Manning-Strickler complète (ou simplifiée). Réciproquement, cette loi donne le débit d'écoulement à partir de la hauteur d'eau dans le tronçon de rivière. Pour une section donnée (et une forme donnée) la relation « Hauteur - débit » dépend de 2 paramètres :

  - La pente du tronçon
  - La rugosité du cours d'eau

  À l'aval de certains tronçons, on peut introduire un seuil (c'est-à-dire un petit barrage). Le débit à l'aval du tronçon, c'est-à-dire le débit de surverse du seuil n'est *pas* donné par la loi de Manning-Strickler. Le débit à l'aval du tronçon dépend alors de la hauteur d'eau par rapport à la hauteur du seuil, ainsi que de 2 autres paramètres :

  - Le facteur de débit de la loi de débit du seuil.
  - L'exposant de la loi de débit du seuil.

- Si on a défini une relation hauteur-débit, et si on est en régime transitoire, il est possible de prendre en compte la variation de volume d'eau dans la rivière, qui induit un « routage » (ou « routing »), c'est-à-dire un retard de propagation.

- Si on a une défini une relation hauteur-débit : on peut imposer le niveau d'eau dans la rivière dans certains tronçons (c'est-à-dire en certaines mailles) : pour cela on fixe un débit injecté égal à 9999 ; le code de calcul détermine alors le débit à injecter (ou à prélever) dans le tronçon de rivière pour maintenir ce niveau d'eau.

- Schéma d'échange nappe - rivière : plusieurs schémas d'échange sont possibles.

- Couplage avec le calcul des charges hydrauliques de la nappe

  Dans le cas général le calcul des débits des cours d'eau est réalisé à chaque pas de temps de modèle. Il est cependant possible, dans un but d'efficacité en temps de calcul, de ne pas réactualiser les calculs hydrodynamiques de l'aquifère à chaque pas de temps. Cependant ceci peut créer des instabilités quand le couplage est fort.

  Il est donc conseillé de réaliser les calculs de débits de cours d'eau et les calculs de charge hydraulique dans la nappe aux mêmes pas de temps. C'est l'option par défaut, mais il est possible d'en choisir une autre.

- Il est possible de prendre en compte les transferts de masse et de chaleur dans le réseau hydrographique et les échanges de masse et de chaleur avec la nappe.

4.1.10. Champs de données à définir dans chaque maille contenant un tronçon de rivière

- Longueur du tronçon de cours d'eau
- Largeur du tronçon de cours d'eau
- Altitude du fond de la rivière (rivière à sec)
- Épaisseur du lit de la rivière (en dessous du fond de la rivière)
- Perméabilité du lit de la rivière
- Altitude (absolue) de l'eau dans la rivière
- Débit d'Injection (ou de pompage) dans la rivière :
  Ce débit est positif s'il est injecté ; il est débit négatif s'il est pompé ;
  Un débit d'Injection égal à la valeur 9999 est utilisé pour imposer le niveau d'eau dans la rivière (uniquement si on a choisi un schéma avec une relation Hauteur – Débit).
- Débit amont (sources) dans la rivière (dans les « tronçons sources »)

Si les calculs sont en régime transitoire, il faut définir en plus :
- Débit (écoulement) initial à l'aval du tronçon

Si on a fixé une relation Hauteur-Débit par la relation de Manning-Strickler :
- Rugosité du lit de la rivière (de l'ordre de 0.02 [en $m^{-1/3}.s$])
- Pente du lit de la rivière (adimensionnel ; de l'ordre de 1/100 à 1/1000).

Si on introduit un seuil à l'aval du tronçon, on a une relation Hauteur-Débit qui dépend des champs :
- Hauteur au-dessus du fond, du seuil situé à l'aval du tronçon (en unité utilisateur de charge hydraulique et d'altitude).
- Facteur de débit de la loi de débit du seuil : par défaut 0.4 (sans unité).

- Exposant de la loi de débit du seuil : par défaut 1.5 (sans unité).

Si on prend en compte les transferts de masse :
- Débit massique éventuellement injecté (ou pompé) dans la rivière.

Conseil : Il est possible de définir ces données (Longueur du tronçon, Largeur du tronçon, Épaisseur, Rugosité, etc.) également en dehors du réseau hydrographique. MARTHE ne considère pas que c'est une erreur, mais ignore ces données. Si les « Largeurs du tronçon » ou les « Rugosités » sont uniformes dans tout le domaine, il est possible, et plus simple, de définir cette valeur par exemple par « Grille MARTHE ».

Les unités utilisateur des données sont les suivantes :
- Longueurs, largeurs de tronçon : en unité utilisateur de coordonnées.
- Niveau de l'eau, profondeur, altitude du fond du lit, épaisseur de colmatage : en unité utilisateur de charge hydraulique et d'altitude.
- Débit : en unité utilisateur de débit de rivière (ou, par défaut en unité utilisateur de débit, si on n'a pas défini d'unité de débit de rivière)
- Perméabilité du lit et des berges : en unité utilisateur de perméabilité
- Rugosité : en $m^{-1/3}.s$
- Pente : pas d'unité

4.1.11. Données globales caractérisant tout le réseau

- L'« Arbre de branchement » des affluents de rivière :
  C'est un fichier qui donne pour chaque affluent le numéro de l'affluent aval.
  Si un affluent n'a pas d'aval, c'est-à-dire si c'est un exutoire, on lui donne « 0 » comme numéro d'affluent aval.

- L'éventuel fichier de dérivations de débit.
  C'est un fichier qui définit pour chaque dérivation le tronçon source, le pourcentage de débit dérivé et le tronçon cible.

- Si on prend en compte les transferts de masse :
  Le Coefficient de diffusion de la concentration dans le réseau hydrographique (m^2/s).

4.1.12. Affectation ou modification des champs de données de rivières

Tous les champs de données de rivières (numéro, Niveau de l'eau, longueur, largeur, perméabilité, etc.) peuvent être définis dans les mailles avec le préprocesseur graphique WinMarthe.

Les données peuvent également, comme les autres champs de MARTHE, être définies ou modifiées par « Grille », par « Zone », par « Couche » ou par « Maille ». Les données de rivières peuvent en outre être définies ou modifiées par « tronçon **»** c'est-à-dire par couple « affluent-tronçon ».

4.1.13. État initial

- Si on ne définit pas de loi hauteur-débit (cas le plus simple) : on doit donner les niveaux absolus de l'eau dans chaque tronçon de rivière. Ces niveaux d'eau resteront inchangés au cours des calculs.

- Si on définit une loi hauteur-débit, on doit donner au choix :
  - Le niveau d'eau initial dans tous les tronçons de rivière.
  - Le débit initial dans tous les tronçons de la rivière. Le code recalcule alors le niveau d'eau correspondant.
    Cette option d'initialiser par le débit initial est conseillée (car initialiser par un niveau d'eau approximatif peut conduire à des instabilités).

  À chaque pas de temps, le code calcule alors le débit et le niveau d'eau dans chaque tronçon.

- Si on prend en compte les transferts de masse :
  On doit également donner la concentration initiale dans tous les tronçons du réseau.

4.1.14. Paramètres numériques pour les calculs dans le réseau hydrographique

Pour le calcul dans le réseau hydrographique, il faut définir les paramètres numériques suivants :

- Le nombre maximal d'itérations de calcul (pour la rivière).

- La variation maximale de débit entre 2 itérations successives pour considérer que les calculs ont convergé.

- Le coefficient de sous-relaxation (éventuel).

4.1.15. Résultats du calcul

Historiques relatifs aux rivières, disponibles dans des mailles sélectionnées

- Débit dans un tronçon de Rivière. C'est le débit à l'aval du tronçon.

- Débit d'Échange Rivière-Nappe.
  Le débit d'échange est positif quand la rivière alimente la nappe.

- Débit d'Injection (ou « débit extérieur ») calculé dans un tronçon de rivière.
  - Si le débit est injecté (donc > 0) : Si les calculs ont convergé, le débit d'injection calculé est égal au débit d'injection imposé.
  - Si le « débit d'Injection » imposé est < 0 : il s'agit d'un prélèvement.
    Le prélèvement calculé peut être inférieur au prélèvement imposé si le débit du cours d'eau est insuffisant.

  Dans les tronçons dans lesquels on a fixé le niveau d'eau, le « débit extérieur » calculé est le débit nécessaire pour imposer ce niveau.

- Niveau d'eau dans un tronçon de Rivière (*si on a défini une loi Hauteur - Débit*).

- Profondeur de l'eau dans la Rivière : c'est la hauteur d'eau au-dessus du fond du tronçon. En hydraulique de surface, elle est souvent appelée « Tirant d'eau ».

- Concentration dans un tronçon de Rivière (*si on prend en compte le transport de masse*).

Grilles de champs calculés

- Débit dans les mailles rivière.

- Débit Rivière-Nappe échangé avec la nappe.
  Le débit d'échange est positif quand la rivière alimente la nappe.

- Débit d'Injection calculé (ou Débit Extérieur calculé) :
  - Dans les tronçons dans lesquels le débit est injecté (donc > 0) : si les calculs ont convergé, le débit d'injection calculé est égal au débit d'injection imposé.
  - Dans les tronçons dans lesquels le « débit d'Injection » imposé est < 0 : il s'agit d'un prélèvement.
    Le prélèvement calculé peut être inférieur au prélèvement imposé si le débit dans le cours d'eau est insuffisant.

  Dans les tronçons dans lesquels on a fixé le niveau d'eau : le « Débit d'Injection calculé » est le « débit extérieur » nécessaire pour imposer ce niveau d'eau.

- Niveau d'eau dans les tronçons de rivière (*si on a défini une loi Hauteur-Débit*).

- Concentration dans les tronçons du réseau hydrographique (*si on fait un calcul de transport de masse*).

4.2. Principe des ensembles de lacs

4.2.1. Propriétés des lacs

Un ensemble de lacs peut être pris en compte avec le code de calcul MARTHE.

La définition d'un lac est la suivante :

- C'est un ensemble de mailles de surface caractérisées par un niveau uniforme.
- L'altitude du fond du lac est l'altitude de la topographie. Un lac est donc situé dans la couche affleurante.
- Le lit du lac est caractérisé par une épaisseur, qui peut être spatialisée, et une perméabilité qui peut également être spatialisée.
- Les échanges entre un lac et la nappe se font à travers le lit, de la même manière que les échanges entre la nappe et les cours d'eau.
- Un lac peut s'assécher localement ou totalement. (Dans les versions futures il sera en relation avec les rivières.
- Un lac reçoit le ruissellement du bilan hydroclimatique et le débit de débordement de la nappe.
- Un lac reçoit la pluie sur toute sa superficie (en eau ou asséchée).
- Un lac peut être soumis à l'évaporation : uniquement sur la partie de sa superficie qui n'est pas asséchée.
- Il est possible de prélever ou d'injecter un débit d'eau dans un lac.
- Il est possible d'imposer le niveau d'eau dans un lac (c'est un lac à niveau imposé).

Un calcul avec des lacs peut être réalisé en régime permanent ou bien en régime transitoire.

Il n'y a pas de calcul de transport de masse dans les lacs.

4.2.2. Principaux champs de données relatifs aux lacs

Les principaux champs de données relatifs aux lacs sont les suivants :

- Numéro de Lac (il doit être supérieur à 1000).
- Épaisseur de colmatage de lit des Lacs.
- Perméabilité de colmatage de lit des Lacs.
- Altitude absolue de l'eau dans les Lacs.
- (Altitude topographique : c'est l'altitude du fond du Lac).
- Débit d'injection (ou de pompage) dans les Lacs.

Un lac est un peu équivalent à un « Affluent de rivière ». Il doit donc apparaître dans l'« Arbre de branchement des affluents ».

4.3. Principe du réseau de Drains ou de « Conduits »

Un ensemble de drains peut être pris en compte avec le code de calcul MARTHE.

Des drains peuvent être introduits dans n'importe quelle couche aquifère, même si elle n'est pas affleurante.

Le réseau de drains peut être de deux types :

- Drains « classiques » pouvant uniquement drainer la nappe, sans jamais l'alimenter.
  Ces drains ne peuvent pas se mettre « en charge ». Ils sont toujours à pression atmosphérique. Le débit drainé est proportionnel à la différence entre la charge hydraulique locale dans la nappe et l'altitude du (fond du) du fond du drain.
  Si la charge hydraulique est inférieure à l'altitude du drain => le débit drainé est nul.
  Pour le cumul du débit drainé, la propagation d'un tronçon vers le tronçon aval est instantanée et dans un sens imposé de l'amont vers l'aval.

  Ces drains « classiques » peuvent au choix être :

  - Hiérarchisés en réseau « palmé » exactement identique à un réseau hydrographique. C'est un réseau structuré.
  - Des drains indépendants sans relation amont-aval.

- Des « Drains-conduits » : ces drains, assimilables à des conduits ou tuyaux, ont des échanges avec la nappe à travers leur paroi poreuse. Ces échanges dépendent de la différence de charge hydraulique, donc de pression, entre la nappe et le conduit. Ils peuvent donc indifféremment drainer ou alimenter la nappe. La propagation dans un conduit dépend de la différence de charge hydraulique entre un tronçon et ses voisins. Elle peut donc s'effectuer dans un sens ou l'autre, sans notion d'amont ou d'aval.
  Les drains-conduits doivent forcément être hiérarchisés, pour indiquer à MARTHE les contacts entre les tronçons de drains.
  Ces drains-conduits peuvent être utilisés pour représenter finement des conduits karstiques, ou des galeries de mine.

À la différence d'un réseau de drains classiques, un réseau de drains-conduits présente les fonctionnalités suivantes :

- Prise en compte de la charge hydraulique dans le drain.
- Possibilité de mise en charge.
- Possibilité de dénoyage.
- Prise en compte du stockage dans les drains.
- Possibilité de prélèvements ou injections dans les drains.
- Possibilité d'imposer localement la charge hydraulique dans le drain.
- Un affluent de « conduit » peut avoir plusieurs affluents aval.
- Le réseau n'est alors plus « palmé ».

4.3.1. Options de calcul

On peut choisir entre :

- Un réseau de drains « classiques » hiérarchisés en tronçons et affluents.
- Ou un ensemble de drains « classiques » non hiérarchisés.
- Ou un réseau de « conduits » (débit interne fonction des différences de charge hydraulique dans le drain). Un réseau de conduits doit (a priori) être hiérarchisé.

4.3.2. Organisation du réseau de drains

Si les drains sont hiérarchisés en réseau, le réseau de drains est organisé en affluents, eux-mêmes découpés en tronçons exactement comme un réseau hydrographique. Il est possible d'avoir simultanément un réseau de drains et un réseau hydrographique, ces 2 réseaux étant totalement indépendants.

Une maille du domaine peut donc contenir à la fois un tronçon de drain et un tronçon de rivière.

Comme pour les rivières, dans le plan, les tronçons ou affluents voisins peuvent être situés dans les **8** mailles voisines de la couche courante (N , S , E , O , NE , NO , SE , SO) obliques incluses.

(N = Nord ; S = Sud ; E = Est ; O = Ouest ; H = Haut ; B = Bas).

En multicouche, les tronçons ou affluents voisins peuvent se trouver dans une couche voisine. Les **10** directions suivantes sont possibles : H , HN , HS , HE , HO pour le haut, et B , BN , BS , BE , BO pour le bas.

Il y a donc au total 18 directions possibles.

Un drain peut être situé dans une couche qui n'affleure pas (dans le cas d'un conduit karstique par exemple).

L'altitude du fond du drain doit être au moins égale à la cote au substratum de la maille correspondante.

4.3.3. Numérotation des éléments de drain

Un tronçon de drain est défini par son « numéro d'affluent » et par son « numéro de tronçon ». Ces numéros servent à indiquer au code de calcul dans quelles mailles il y a un drain, et à définir les relations amont-aval. Pour les drains-conduits le numéro de tronçon sert uniquement à décrire l'arborescence, sans imposer de sens amont-aval.

Dans le cas où le réseau n'est pas structuré (drains non hiérarchisés) :
Il suffit de donner simplement un numéro d'affluent. On peut cependant utiliser toujours le même numéro d'affluent, par exemple un numéro égal à 1. Il n'est pas nécessaire de donner de « numéro de tronçon » : on peut donc laisser le numéro de tronçon à la valeur zéro par défaut.

4.3.4. Champs de données à définir dans chaque maille contenant un drain

Pour un drain « classique » :

- Longueur du tronçon de drain « L » : en unité utilisateur de longueur.
- Altitude du drain « z_D ». C'est, par exemple, l'altitude du fond du drain : en unité de charge hydraulique et d'altitude.
- Perméabilité d'échange du drain « K_{Ech_D} » : en unité de perméabilité.

Le débit d'échange « $Q_{Éch_ND}$ » de la Nappe vers le Drain est alors :

$$\boxed{Q_{Éch_ND} = K_{Ech_D} \cdot L \cdot (H_{Nap} - z_D)} \quad : \text{si } H_{Nap} > z_D$$
$$Q_{Éch_ND} = 0 \quad : \text{si } H_{Nap} < z_D$$

Avec : H_{Nap} = Charge hydraulique de la nappe dans la maille

Pour un drain « Conduit »

- Longueur du tronçon de drain.
- Largeur du tronçon de drain (pour une section rectangulaire équivalente).
- Hauteur (verticale) du tronçon de drain (section rectangulaire équivalente).
  Par défaut, si on ne la définit pas, cette « Hauteur verticale » est égale à la largeur du conduit (hypothèse d'un drain à section carrée).
- Porosité du drain (uniquement pour les calculs en Zone Non Saturée).
- Altitude du fond du drain.
- « Coefficient de perméabilité d'échange » du drain« C_{Ech_D} » (sans dimension) : c'est un facteur multiplicatif sur la perméabilité de nappe, utilisé pour calculer le débit d'échange« $Q_{Éch_ND}$ » de la Nappe vers le Drain.

  Le débit d'échange « $Q_{Éch_ND}$ » de la Nappe vers le Drain est alors :

$$\boxed{Q_{Éch_ND} = C_{Ech_D} \cdot K_{Nap} \cdot Satur_D \cdot L \cdot (H_{Nap} - H_D)}$$

  Avec :
  K_{Nap} = Perméabilité de la nappe dans la maille
  $Satur_D$ = Coefficient de saturation dans le drain (calculé automatiquement par MARTHE)
  H_D = Charge hydraulique dans le drain
  H_{Nap} = Charge hydraulique dans la nappe

- Charge hydraulique initiale dans le drain.
- Conductivité (perméabilité) du drain « $\mathbf{K_D}$ » pour l'écoulement « Q_{DV} »dans le drain :

$$\boxed{Q_{DV} = A_V \cdot K_D \cdot \frac{(H_{DV} - H_D)}{L_V}}$$

  Avec :
  Q_{DV} = Débit dans le drain provenant du drain voisin « *DV* »
  A_V = Aire de la section du drain en relation avec le drain voisin
  L_V = Distance vers le drain voisin
  H_{DV} = Charge hydraulique dans le drain voisin
  H_D = Charge hydraulique dans le drain de calcul

  D'où l'interprétation de la conductivité du drain :

$$\frac{1}{K_D} = \frac{(H_{DV} - H_D)}{u_D \cdot L_V}$$

Avec :
u_D = Vitesse dans le drain

- Débit extérieur injecté ou prélevé dans le drain.
  Débit positif s'il est injecté ; débit négatif s'il est pompé
  Valeur = 9999 pour imposer la charge hydraulique dans le drain

4.3.5. Données globales caractérisant le réseau de drains

- L'« Arbre de branchement des affluents de drains » (seulement dans le cas d'un système hiérarchisé) :
  C'est un fichier qui donne pour chaque affluent le numéro de l'affluent aval.

  Un affluent de « conduits » peut avoir plusieurs affluents aval. Le réseau n'est alors plus « palmé ».

  Si un affluent n'a pas d'aval, c'est-à-dire si c'est un exutoire : on lui donne « 0 » comme numéro d'affluent aval.

- Si on prend en compte le transport de masse :
  Le coefficient de diffusion de la concentration dans le réseau de drains « conduits ».

4.3.6. Affectation ou modification des champs de données de drains

Tous les champs de données de drains (numéro, hauteur, longueur, largeur, charge hydraulique, perméabilité, etc.) peuvent être définis dans les mailles avec le préprocesseur graphique WinMarthe.

Les données peuvent également, comme les autres champs de MARTHE, être définies ou modifiées par « Grille », par « Zone », par « Couche » ou par « Maille ». Les données de drains peuvent en outre être définies par « tronçon **»,** c'est-à-dire par couple « affluent-tronçon ».

4.3.7. État initial

Pour un drain « classique » :

Pas d'état initial à définir.

Pour un drain « conduit »

- Charge hydraulique initiale dans les tronçons de drain.
- Concentration initiale dans les tronçons de drain.
- Température initiale dans les tronçons de drain (si la température est prise en compte).
- Salinité initiale dans les tronçons de drain (si la salinité est prise en compte).

4.3.8. Conditions aux limites

Pour un drain « classique » :

Pas de conditions aux limites à définir.

Pour un drain « conduit »

- Imposition de la charge hydraulique dans certains tronçons de drains : par exemple en un exutoire, ou bien à l'amont. Pour imposer la charge hydraulique du drain, il faut utiliser une méthode analogue à celle utilisée pour imposer la charge hydraulique dans la nappe : on fixe le « Débit Extérieur du Drain » à la valeur code : 9999.
- Concentration extérieure à l'amont des affluents.
- Imposition de la concentration dans certains tronçons de drains.

4.3.9. Paramètres numériques pour les calculs dans le réseau de drains

Il n'y a pas de paramètres numériques à définir.

4.3.10. Résultats du calcul

Historiques relatifs aux drains, dans des mailles sélectionnées

- Débit dans des tronçons de drains
- Débit d'échange du drain vers la nappe
  Le débit d'échange est positif quand le drain alimente la nappe.

Pour les drains « Conduits »

En plus des historiques précédents, d'autres d'historiques (voir le chapitre des historiques) peuvent être sauvegardés. En particulier :

- Charge hydraulique dans des tronçons de drain
- Concentration dans des tronçons de drain.
- Température dans des tronçons de drain.
- Salinité dans des tronçons de drain.

Grilles de champs calculés

Les champs suivants peuvent être sauvegardés :

- Champs de débit dans les drains.
- Champ de débit d'échange du drain vers la nappe.
  Le débit d'échange est positif quand le drain alimente la nappe et négatif dans le cas contraire.

Pour les drains « conduits »

En plus des champs précédents, il est possible de sauvegarder en particulier les champs suivants :

- Champ de la charge hydraulique dans les tronçons de drain
- Champ de la concentration dans les tronçons de drain.
- Champ de la température dans les tronçons de drain.
- Champ de la salinité dans les tronçons de drain.

4.3.11. Schémas d'échange Drain-Nappe ou Conduit-Nappe

Pour un drain « classique » :

Un drain « classique » peut uniquement drainer une nappe ; il ne peut pas l'alimenter. Si la charge hydraulique de la nappe est inférieure à l'altitude du drain, il n'y a pas de débit échangé. Un tronçon de drain « classique » n'a pas de capacité (comme un tuyau de drainage) : il n'y a pas de charge hydraulique dans le drain mais uniquement une « altitude ». Cette altitude correspond par exemple celle du fond du drain.

Le débit échangé « $Q_{éch}$ », forcément depuis la nappe vers le drain, est calculé comme suit :

$$Q_{éch} = K \times L \times (H_{nappe} - Alti_{drain})$$

Pour un drain « Conduit »

Un drain « conduit » peut **drainer** ou **alimenter** une nappe. Il peut même s'assécher et avoir une « charge hydraulique équivalente » inférieure à son altitude. Un tronçon de conduit est caractérisé par :

- Une charge hydraulique qui peut varier en régime transitoire,
- Un débit circulant dans le drain,
- Un débit d'échange positif ou négatif avec la nappe,
- Une capacité égale à son volume.
  Puisqu'on suppose un drain en forme de parallélépipède, ce volume est :
  Volume = Largeur x Hauteur x Longueur

Le débit échangé « $Q_{éch}$ » est calculé comme suit :

$$Q_{éch} = Coef_K_{drain} \times K_{nappe} \times Satur_{drain} \times L \times (H_{nappe} - H_{drain})$$

Avec :

- $Coef_K_{drain}$ = coefficient *sans dimension* fourni par l'utilisateur qui dépend de l'état du conduit.
  ($Coef_K_{drain} = 0$ => pas d'échanges sur une portion ayant des parois imperméables).
- $Satur_{drain}$ = fonction du périmètre mouillé calculée automatiquement par MARTHE.

4.3.12. Débit dans un tronçon de drain

Pour un drain « classique » :

Le débit dans un tronçon d'un réseau hiérarchisé de drains classiques est égal au débit du ou des tronçons amont, auquel s'ajoute l'éventuel débit d'échange provenant de la nappe dans le tronçon considéré.

Pour un drain « conduit »

Le débit à l'intérieur d'un tronçon de drain-conduit dépend :

- De la charge hydraulique en début de pas de temps.
- Et des différences de charge hydraulique avec les 1 à 8 tronçons voisins (3 tronçons « amont » au maximum et 5 tronçons « aval » au maximum).

En fait, la relation amont-aval qui a été définie n'a aucune importance. Elle sert uniquement à définir les branchements entre les tronçons.

En régime permanent, le débit échangé $Q_{1\text{-}2}$ entre 2 tronçons adjacents est proportionnel à la différence de charge hydraulique entre ces 2 tronçons, ce qui suppose un débit laminaire :

$$Q_{1\text{-}2} = \text{Section} \times \text{Conductivité} \times (H_1 - H_2) / \text{Longueur}$$

La « conductivité » est directement liée à la perte de charge linéaire du conduit.

En effet, avec un débit linéaire on peut écrire :

$$(H_1 - H_2) = \text{PdC_U} \times \text{Longueur} \times \text{Vitesse}$$

Avec :

PdC_U = Perte de Charge Unitaire (par unité de longueur et par unité de vitesse [1/(m/s)]
Vitesse = Vitesse dans le conduit = $Q_{1\text{-}2}$ / Section

⇨ D'où : Conductivité = 1 / PdC_U (en m/s)

5. Principe du calcul de la recharge de la nappe et du ruissellement

À chaque pas de temps de modèle un flux de recharge de nappe et un flux de ruissellement peuvent être introduits à la surface du domaine, ou calculés à partir des données climatiques.

Dans le cas le plus simple on peut introduire directement :

- Un flux de recharge, calculé par ailleurs
- Un flux de ruissellement

5.1. Principe du bilan par zones

Le plus souvent MARTHE calcule la recharge et le ruissellement à partir :

- De données climatiques
  - Le flux de précipitations atmosphériques : pluie + neige
  - Le flux d'ÉvapoTranspiration Potentielle (ETP)
  - La température de l'air (si on tient compte de la fonte de la neige)

- De paramètres de bilan hydroclimatique
  - Une capacité de rétention du sol qui peut être une « réserve progressive du sol » ou un « déficit maximal du sol ».
  - Un paramètre de répartition de l'excédent de pluie en ruissellement et infiltration
  - Un temps de ½ percolation de l'infiltration vers la nappe => Recharge de la nappe.

Ces calculs ne sont pas faits dans chaque maille de l'extension du domaine, mais dans le cas le plus général :

- On définit des « zones Météo » dans lesquelles les données climatiques (pluie, ETP, etc.) sont uniformes. Ces zones météo dépendent par exemple :
  - Du relief
  - De la distance à la mer
  - De la disponibilité des données climatiques

- On définit des « zones de Sol » dans lesquelles les paramètres de bilan hydroclimatique sont uniformes. Ces zones de sol dépendent (ou devraient dépendre) :
  - Du type de sol
  - De l'occupation des sols et des cultures
  - De la pente moyenne
  - etc.

Les « zones Météo » et les « zones de Sol » sont définies uniquement dans les mailles de la couche n°0. Elles peuvent être définies dans des zones où il n'y a pas d'aquifères, des versants de montagne ou des zones imperméables.

Toutes les mailles de surface situées dans la même « zone Météo » et la même « zone de Sol » ont donc le même bilan hydroclimatique. Cette approche diminue considérablement le nombre de bilans, puisque s'il y a par exemple 10 zones Météo et 7 zones de Sol, il y a uniquement au maximum 70 bilans à calculer, même s'il y a 500 000 mailles affleurantes.

Remarque : si on utilise des « zones météo », les données météo seront prises en compte uniquement dans les mailles pour lesquelles on a défini une « zone de sol » (c'est-à-dire un numéro de « zone de sol » différent de 0).

Dans des cas plus simples, on peut choisir de définir les données climatiques (flux de pluie, flux d'ETP, température de l'air) par « zone de sol » plutôt que par « zone météo ». Ceci est cependant *déconseillé* dans les modèles régionaux, car les données climatiques et le paramètres du bilan hydroclimatique n'ont a priori pas la même spatialisation.

Dans les domaines de faible extension, ou bien en l'absence de données précises, on peut même avoir une valeur uniforme de recharge et de ruissellement sur tout le domaine.

5.2. Devenir de la recharge, du ruissellement et du débit de débordement

Devenir de la recharge :

La recharge (ou infiltration) rejoint la nappe, que la maille soit en eau ou bien dénoyée.

Cependant, si le bilan hydroclimatique produit de la recharge dans une maille qui n'est pas aquifère (une maille de perméabilité nulle ou égale à 9999) => cette recharge est convertie en ruissellement et transférée vers le réseau hydrographique.

Devenir du ruissellement :

S'il y a un réseau hydrographique, le ruissellement survenant au cours d'un pas de temps de modèle est généralement transféré vers ce réseau au cours du même pas de temps (sans temps de propagation à la surface du sol). Il est dirigé vers le tronçon de rivière aval de la maille. Selon les données disponibles le tronçon de rivière aval est défini par le code de calcul :

- En utilisant les directions aval d'écoulement superficiel, qui peuvent avoir être calculées à partir de données précises du champ d'altitude de la surface topographique.
- Ou bien comme le tronçon de rivière le plus proche, si on ne dispose pas des directions aval d'écoulement superficiel.

Le ruissellement n'est pas transféré un réseau de drains.

S'il n'y a *pas* de réseau hydrographique, le ruissellement est transféré vers la nappe, comme si c'était de la recharge.

Devenir du débit de débordement de nappe :

Dans le cas où il y a un réseau hydrographique, si la nappe déborde en un point extérieur au réseau hydrographique, le débit de débordement est transféré vers le tronçon de rivière aval, selon un schéma analogue à celui du ruissellement (cf. section précédente).

S'il n'y a pas de réseau hydrographique, le débit de débordement quitte l'hydrosystème.

Reprise à la nappe :

Quand le déficit maximal du sol est atteint et quand l'ETP est supérieure à la pluie, une reprise à la nappe est calculée par défaut. Il est possible de limiter ou de supprimer cette reprise à la nappe par différentes options.

Quand on modélise un système aquifère standard avec un bilan hydroclimatique et une capacité de sol, il est vivement conseillé de supprimer cette reprise à la nappe.

Il convient de noter qu'en cas de transport de masse, la reprise à la nappe par évapotranspiration prélève uniquement de l'eau (à l'exclusion de tout soluté) et peut conduire logiquement à des sur-concentrations.

5.3. Bilan hydroclimatique GARDÉNIA

Le bilan hydroclimatique Pluie - Évapotranspiration est réalisé classiquement avec le schéma GARDÉNIA (Thiéry, 2009b, 2010a, 2014b, 2015a). Les résultats du bilan sont identiques dans toutes les mailles du domaine appartenant à la fois à la même « zone Météo » et à la même « zone de Sol ».

5.3.1. Principe du schéma GARDÉNIA

Pour une description détaillée, consulter à BRGM/RP-62797-FR (Thiéry, 2014b) et BRGM/RP-64500-FR (Thiéry, 2015a) pour la validation du schéma GARDÉNIA.

Le schéma GARDÉNIA classique (Figure 30) fait intervenir 3 compartiments (3 réservoirs) :

- Un compartiment « sol » : (le réservoir RU « superficiel » soumis à l'évapotranspiration.
- Un compartiment intermédiaire (ou Zone Non Saturée) : le réservoir H (H comme Hypodermique), qui produit du ruissellement.
- Un compartiment souterrain : le réservoir G, qui correspond à la nappe.

Quand le module GARDÉNIA est couplé à un système d'aquifères, il n'y a pas de compartiment souterrain dans GARDÉNIA car ce compartiment est remplacé par les mailles aquifères (Figure 31).

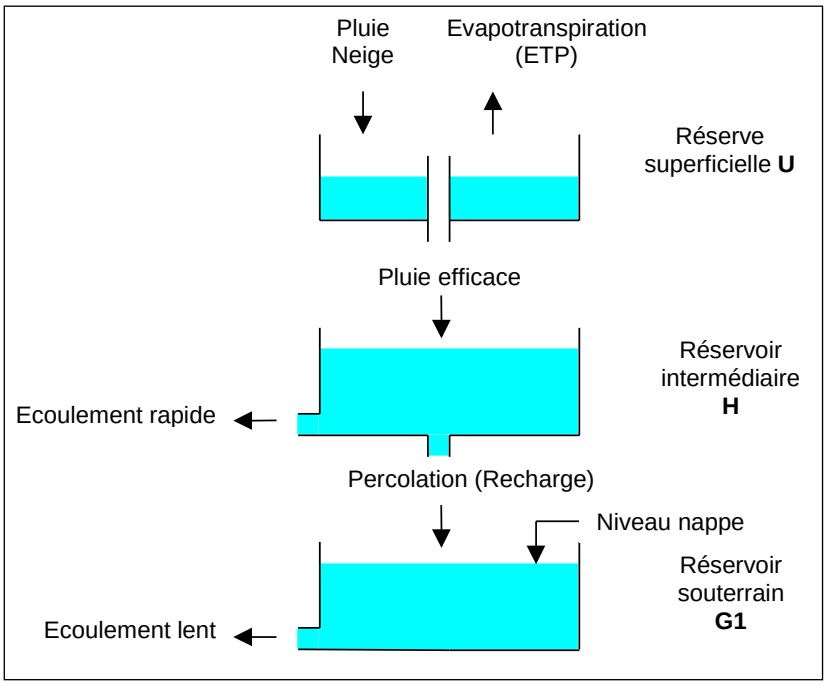


Figure 30 – Schéma de bilan hydroclimatique GARDÉNIA complet.

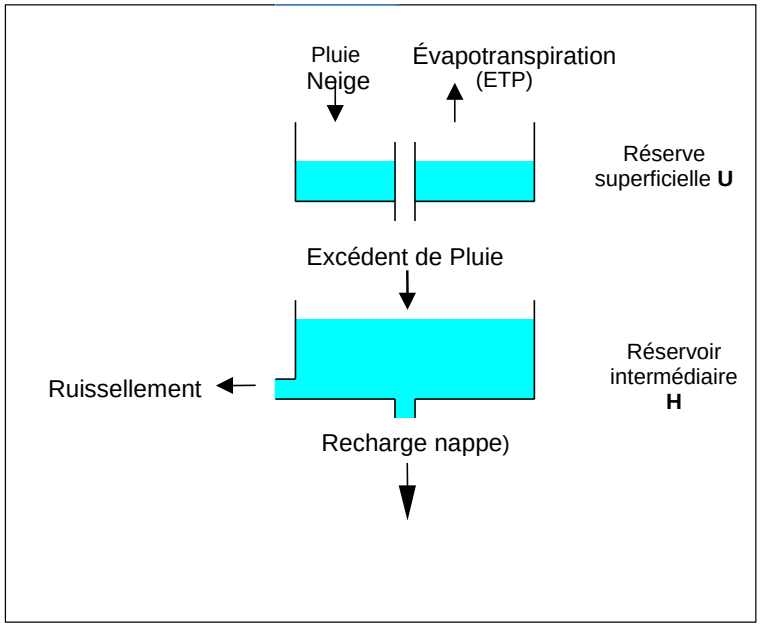


Figure 31 – Schéma de bilan hydroclimatique GARDÉNIA intégré dans MARTHE.

Le module GARDÉNIA couplé à MARTHE simule le cycle de l'eau par un système de deux réservoirs qui représentent respectivement :

- Les premières dizaines de centimètres du sol dans lesquelles se produit l'évapotranspiration (zone d'influence des racines de la végétation) ;
- Une zone intermédiaire qui produit un écoulement rapide.

Le premier réservoir assure la fonction « production » : il détermine la part évaporée (ETR) et la « Pluie Nette » (ou « Pluie Efficace »). La « Pluie Nette », (ou « Pluie Efficace ») est la part des précipitations atmosphériques en excédent après action de l'évapotranspiration.

Le deuxième réservoir assure la fonction « transfert » en répartissant la « Pluie Nette » en ruissellement et recharge, et prenant en compte le temps de percolation jusqu'à la nappe.

5.3.2. Le bilan dans le réservoir superficiel

Le réservoir superficiel, ou « réservoir sol », représente les premières dizaines de centimètres du sol soumises à l'action des racines de la végétation et à l'évaporation (Figure 32).

La fonction « Production » est réalisée uniquement dans le réservoir superficiel. La capacité du réservoir superficiel est en fait la « réserve disponible pour l'évapotranspiration » ou la « capacité de rétention » hors eau liée. Elle intègre également la capacité d'interception par les parties aériennes de la végétation, ainsi que les volumes des éventuelles dépressions à la surface du sol (flaques, sillons, etc.).

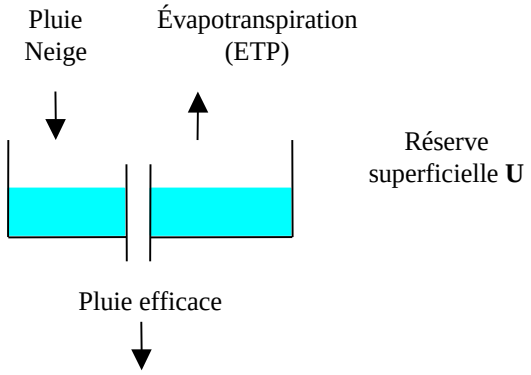


Figure 32 - Le réservoir superficiel de GARDÉNIA.

Deux schémas de réservoirs superficiels sont possibles :

- Un « réservoir sol progressif », avec des lois quadratiques fonction de l'état de remplissage de ce réservoir : c'est le schéma conseillé.
- Un réservoir sol de type « réserve utile » qui fonctionne en « tout ou rien ».

Le réservoir sol est alimenté par la pluie (et la fonte de la neige, si elle existe, au contact du sol). Il est soumis à l'évapotranspiration potentielle ETP. Il permet de calculer l'évapotranspiration réelle ETR et la « Pluie Nette » (Figure 33).

Réservoir sol « progressif »

On note : Satur = Remplissage du réservoir / Capacité du réservoir :

- Si la pluie est supérieure à l'ETP :
  Pluie Nette = (Pluie - ETP) x $Satur^2$

- Si l'ETP est supérieure à la pluie :
  ETR = (ETP - Pluie) x Satur x (2 - Satur)

Réservoir sol de type « réserve utile »

- Si la pluie est supérieure à l'ETP :
  Pluie Nette = 0 tant que le réservoir n'est pas encore totalement rempli.
  Pluie Nette = Pluie – ETP quand le réservoir sol devient totalement rempli.

- Si l'ETP est supérieure à la pluie :
  ETR = (ETP – Pluie) tant que le réservoir sol n'est pas encore totalement vide.
  ETR = 0 quand que le réservoir sol devient vide.
  Pluie Nette = 0

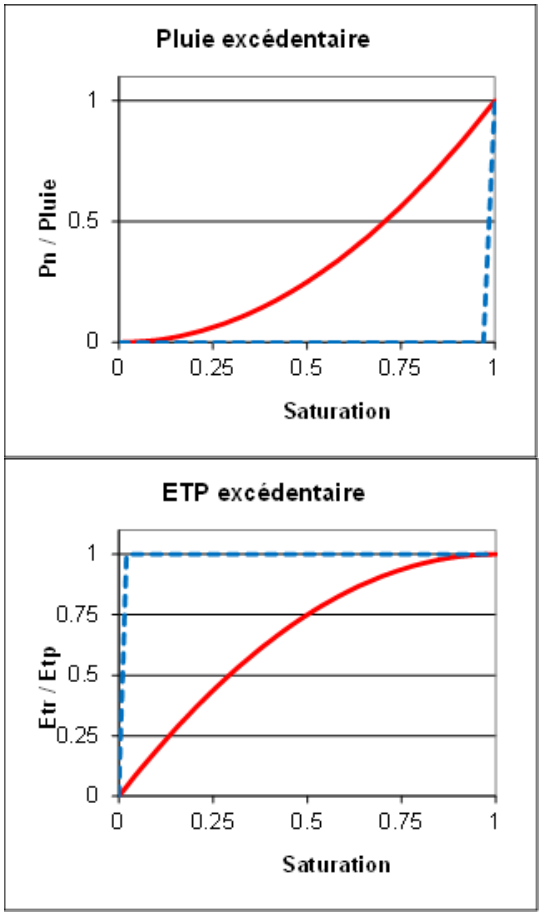


Figure 33 – Pluie Nette Pn et évapotranspiration Etr dans le réservoir sol.
En trait interrompu bleu : réservoir de type « réserve utile », en rouge : « réservoir progressif ».

Il est possible d'associer en série : un réservoir sol de type « réserve utile » et un réservoir sol « progressif » mais en pratique cela ne permet généralement pas une meilleure simulation.

5.3.3. Le réservoir intermédiaire H

Le réservoir H (Figure 34) représente la zone non saturée. La hauteur d'eau qu'il contient, à un instant donné, est notée H. Il est alimenté en eau par la « Pluie Nette » provenant du réservoir superficiel, et est vidangé par deux composantes :

- Percolation vers la nappe suivant une loi linéaire (vidange exponentielle) de constante de temps THG :

  ALIMG = H · dt / THG (dt = durée du pas de temps)

- Ruissellement QH, selon une loi non-linéaire contrôlée par le paramètre RUIPER. Ce paramètre RUIPER (RUIPER pour « RUIssellement-PERcolation ») est en fait la hauteur d'eau dans le réservoir H, pour laquelle la percolation ALIMG est égale au ruissellement QH :

  QH = H · dt / (THG . RUIPER / H)

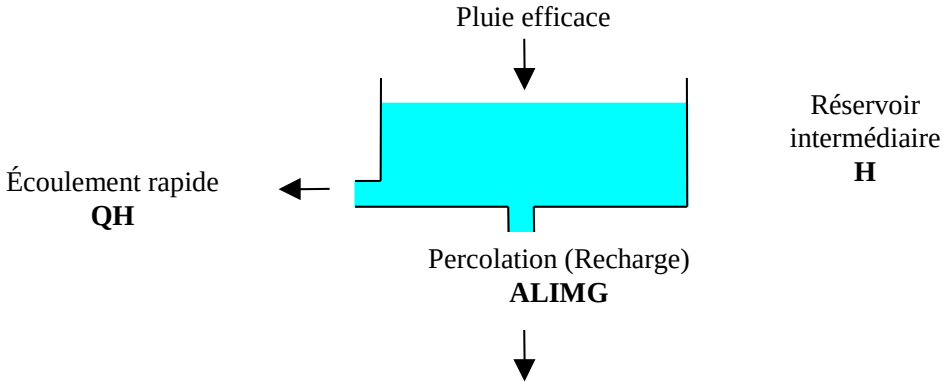


Figure 34 - Schéma du réservoir intermédiaire de GARDÉNIA (Réservoir H).

Le ruissellement QH est prépondérant quand le réservoir H a un taux de remplissage élevé. En revanche, la percolation ALIMG est prépondérante quand le réservoir H a un faible taux de remplissage. Le ratio QH / ALIMG est égal au rapport H / RUIPER. Le fonctionnement de ce réservoir H se rapproche donc de celui d'un seuil de débordement progressif à la hauteur moyenne RUIPER, mais avec une représentation plus réaliste de l'écoulement en deux composantes qui ne s'excluent pas mutuellement.
(Si on donne la valeur code : 9999 mm au paramètre RUIPER, il n'y a pas de ruissellement).

Ce réservoir H sert uniquement au transfert. Il détermine la répartition de la pluie nette, provenant du réservoir superficiel, en ruissellement et recharge.

6. Organisation des données

Dans cette description et dans les paragraphes suivants on fera la distinction sémantique entre :

- Un « champ spatialisé », ou « champ maillé », par exemple la charge hydraulique ou la perméabilité, à raison d'une valeur dans chaque maille du domaine.
- Un « paramètre », par exemple le nombre de pas de temps, ou l'unité de débit, qui n'est pas spatialisé.

6.1. Les différents types de données du code MARTHE

Le code de calcul MARTHE fait intervenir des données de plusieurs types :

- Des choix d'options ou des paramètres constants,
- Des données de champs maillés,
- Des données d'autre nature qui ne sont ni des champs maillés, ni des constantes.

6.1.1. Options ou paramètres constants

Ces options ou paramètres constants sont par exemple :

- Le numéro du solveur choisi pour les calculs d'hydraulique,
- Le nombre d'itérations de calcul,
- Le seuil de convergence,
- Le choix de calculer ou de ne pas calculer des trajectoires,
- etc.

Ces paramètres, qui sont au nombre de plusieurs centaines, sont regroupés sous forme de paragraphes, dans un fichier texte appelé fichier des « Paramètres Généraux », ayant pour extension [.mart].

Il y a également des options et des paramètres constants dans le fichier « Paramètres pour optimisation ou calibration automatique ».

6.1.2. Données de champs maillés

Ce sont les données de toutes les mailles du domaine pour un champ donné. Par exemple, les données de charge hydraulique initiale, les données d'altitude du substratum, les données de concentration initiale, etc.

Dans la version courante, il peut y avoir plus de 170 champs de données différents.

- Seuls les champs nécessaires au type de modélisation choisi ont besoin d'être définis. Par exemple il n'est pas nécessaire de définir de concentration si on ne calcule pas de transport de masse, ni de définir la salinité si on ne prend pas en compte les effets densitaires.
- Les données de chaque champ sont stockées dans un fichier distinct. Par exemple, le champ de charge hydraulique est stocké dans un fichier d'extension [.charg], le champ de la perméabilité dans un fichier d'extension [.permh], etc.

Les « extensions » des noms de fichiers sont recommandées car elles facilitent l'identification des jeux de données, ce sont celles qui sont utilisées par défaut. Elles ne sont cependant pas obligatoires.

- Par défaut tous les champs sont initialisés à zéro. Il n'est donc pas nécessaire de créer un fichier pour un champ dont toutes les valeurs sont égales à zéro.
- Les noms de tous les fichiers de données sont regroupés dans le « fichier projet de MARTHE » qui est tout simplement un « répertoire » contenant la liste des noms des fichiers de chaque champ de données.
- Il n'est pas nécessaire de créer un fichier pour un champ dont toutes les mailles du domaine ont la même valeur. Il suffit de lui donner, dans le fichier projet, un nom fictif sous la forme « =valeur ». Par exemple, si toutes les mailles ont un coefficient d'emmagasinement libre égal à 5 (unités utilisateur), on peut donner un nom de fichier fictif « =5 », (sans les guillemets).
- Il peut y avoir des maillages gigognes, c'est-à-dire des sous-maillages inclus dans le maillage principal. Un maillage gigogne concerne toutes les couches. C'est-à-dire que si on définit un raffinement de maillage dans une zone du domaine, le raffinement concernera toutes les couches à l'aplomb de cette zone. Par ailleurs il ne peut pas y avoir de gigognes inclus dans un maillage gigogne, ni de chevauchement de gigognes.
- Pour chaque champ spatialisé non uniforme, le fichier de « grilles » contient les données, successivement couche par couche, de haut en bas, de la couche n°1 en haut à la dernière couche en bas, (comme les pages d'un livre fermé). Les données de chaque couche apparaissent sous forme d'une « grille » formée de N_L lignes de N_C colonnes chacune.

  Les données des éventuels sous-maillages gigognes sont rangées après les données de la dernière couche du maillage principal. Par exemple un fichier relatif à un maillage composé de 4 couches, contenant 2 sous-maillages gigognes aura ses données disposées de la façon suivante :
  Maillage principal : couche n°1, couche n°2, couche n°3, couche n°4, puis gigogne n°1 : couche n°1 à couche n°4, puis gigogne n°2 : couche n°1 à couche n°4.
- Les données de chaque champ peuvent être modifiées, en partie ou en totalité, à n'importe quel pas de temps. Par exemple, on peut modifier des débits de pompage ou des pluies, mais aussi des perméabilités, des longueurs de cours d'eau, des perméabilités de lit de cours d'eau, des porosités, des conditions aux limites, etc.

6.1.3. Données particulières qui ne sont ni des champs maillés, ni des constantes

Ce sont des fichiers de données non maillées. En particulier des fichiers contenant :

- La description des dates de fin des pas de temps, et des modifications éventuelles de champs qui leurs sont associées : Fichier des « Pas de temps ».
- Le fichier de description des couches aquifères : Fichier « Couches aquifères et Gigognes ».

- La liste des mailles dites « à historiques », c'est-à-dire des mailles pour lesquelles on mémorise le suivi des valeurs calculées à chaque pas de temps pour certains champs : Fichier des « Mailles à historiques », d'extension [.histo].
- La liste des points de départ des trajectoires : Fichier des « Départs de trajectoires ».
- L'arbre de branchement des rivières ou des drains : Fichier « Arbre des affluents de rivières » ou « Arbre des affluents de drains ».
- Le profil d'utilisation : Fichier « Profil d'utilisation ».
- Le fichier des liaisons étanches.
- etc.

6.2. Le fichier projet de MARTHE

Le « fichier projet » de MARTHE, d'extension [.rma], rassemble les noms de tous les fichiers utilisés pour un calcul :

- Le fichier des paramètres généraux.
- Le fichier des pas de temps.
- Les fichiers des champs maillés.
- Les fichiers de données particulières non maillées.

6.3. Modifications de données d'un champ maillé

Les données d'un champ maillé peuvent être modifiées, en partie ou en totalité, à n'importe quel pas de temps.

En particulier, ces modifications peuvent apparaître au pas de temps numéro zéro, c'est-à-dire avant le début des calculs.

Les données peuvent être modifiées :

- Par grille,
- Par couche : on affecte une valeur uniforme dans une couche donnée,
- Par zone : on affecte une valeur uniforme dans une zone donnée,
- Par maille : on affecte une valeur uniforme dans une maille ou dans un groupe de mailles (un « bloc de mailles ») donné,

  Un « bloc de maille » est un ensemble de mailles adjacentes, dans un « parallélépipède » défini par un intervalle de lignes, un intervalle de colonnes et un intervalle de couches. Par exemple : colonnes 7:9, lignes 12:15, couches 3:7 ou bien : colonnes 7:9, lignes *, couche 2.
  Le numéro de lignes « 12:15 » signifie « de la ligne n°12 à la ligne n°15 ».
  Le numéro de ligne « ***** » signifie « toutes les lignes ».

- Par liste de mailles : on affecte des valeurs différentes à une liste de mailles, définies sans format particulier, par leur numéro de colonne, ligne, couche, gigogne, ou bien définies par leurs coordonnées X , Y.

Ces modifications de données peuvent être introduites dans le fichier des « Pas de temps », d'extension [.pastp].

Elles peuvent également être introduites à la fin du fichier des « Paramètres généraux », d'extension [.mart], dans le paragraphe « Initialisation avant calculs ».

6.4. Définition directe des données d'un champ maillé, sans création d'un fichier

Pour définir un champ maillé simple, il n'est pas nécessaire de créer un fichier de grilles. En effet les champs simples peuvent être définis en totalité directement sous forme de modifications, placées :

- À la fin du fichier des « Paramètres généraux » [.mart], dans le paragraphe « Initialisation avant calculs ».
- Ou au début du fichier des « Pas de temps » [.pastp], au pas de temps numéro zéro.

Bien que l'effet soit identique, on définira plutôt :

- Les données physiques (perméabilité, porosité, coefficient d'emmagasinement, conditions aux limites, concentration et température initiale) :
  - ⇨ À la fin du le fichier des « Paramètres généraux ».
  - ⇨ ou éventuellement dans un fichier de « Modifications initiales avant calcul »
- Les données de forçages (pluie, évapotranspiration, débit de pompage, etc.) :
  - ⇨ Au début du fichier des pas de temps, au pas de temps numéro zéro.

Il est important cependant de remarquer que seules les données maillées, qui sont dans des fichiers de grilles, sont visualisables graphiquement par le préprocesseur WinMarthe.

Les modifications de données maillées, introduites dans le fichier des « Paramètres Généraux » et dans le fichier des « Pas de temps », sont mises en forme par le « préprocesseur de données non maillées » et sont utilisées par le moteur de calcul MARTHE, mais elles ne peuvent pas être visualisées graphiquement.

Remarque : Le champ de perméabilité, même s'il est simple ou uniforme, doit obligatoirement être défini dans un fichier de grilles. C'est en effet ce fichier de grilles qui définit le nombre de lignes et de colonnes des grilles ainsi que les hauteurs des lignes et les largeurs des colonnes.

6.5. Exemples de modifications ou de création d'un champ maillé, sans génération de fichier

Exemple n°1 : pour définir un champ de débit ayant uniquement un pompage, de valeur 50 dans une maille donnée, et des charges hydrauliques imposées (débit = 9999) dans la ligne n°1.

/DEBIT/GRILLE N: =0
(*débit dans tout le domaine [toutes les « grilles »] : Valeur = 0*)
(*« N : » signifie Nom du fichier Grille : ici fichier fictif : grille uniforme = 0*)

/DEBIT/MAILLE C= 25L= 63P= 1V= -50;
(*débit dans la maille : colonne n°25, ligne n°63, couche n°1 : Valeur = -50*)
(« C= » = Colonne, « L= » = Ligne, « P= » = Plan, c'est-à-dire « Couche »)

/DEBIT/MAILLE C= ***** L= 1P= 1V= 9999;
(*débit : dans les mailles : toutes les Colonnes, Ligne n°1,*
Couche n°1, Valeur = 9999)
(*« ***** » signifie « toutes », c'est-à-dire ici : toutes les colonnes.*)

Ces « modifications » sont introduites automatiquement avec le « préprocesseur de données non maillées » qui gère automatiquement les formats. Il est vivement *déconseillé* d'introduire de telles modifications avec un éditeur de texte. En effet, ces données sont formatées.

Exemple n°2 : pour définir une valeur de perméabilité uniforme dans différentes formations.

/PERMEABILITE/GRILLE	N: =1	(*On commence par mettre la valeur 1 : dans toute la grille*)
/PERMEABILITE/ZONE	Z= 43:63 V= 6;	(*On met la valeur 6 : dans les zones n°43 à n°63)*
/PERMEABILITE/COUCHE	C= 3:7 V= 0.1;	(*Puis on met la valeur 0.1 : dans les couches n°3 à n°7)*

Exemple n°3 : pour définir des valeurs de débit par « Liste de mailles ».

La liste de mailles est en format libre, sous une des formes suivantes :

- Valeur, Colonne, Ligne [Couche, Gigogne]
- x, y, valeur
- x, y, couche, valeur
- x, y, z, valeur

La forme des données dans un fichier « Liste de mailles » doit être uniforme.
Cette forme est précisée à MARTHE par un paramètre géré par le préprocesseur.

Chaque ligne du fichier « Liste » correspond à une maille.

Par exemple pour le format « Valeur, Colonne, Ligne, Couche » le fichier à la forme suivante :

10 10 7 1 (*Valeur 10 dans la maille : colonne n°10, ligne n°7, couche n°1*).

10 5 14 1 (*Valeur 10 dans la maille : colonne n°5, ligne n°14, couche n°1*).

9999. ***** 21 1 (*Valeur 9999 dans les mailles : de **toutes** les colonnes, de la ligne n°21, couche n°1*)

7. Le fichier profil d'utilisation

Ce fichier est un fichier de confort qui sert uniquement à masquer les fichiers et paramètres inutiles pour le d'utilisation profil sélectionné.

Il est utilisé uniquement par les préprocesseurs (WinMarthe, Paramart). Le moteur de calcul (MARTHE) n'en tient pas compte.

L'utilisation d'un fichier de « profil d'utilisation » permet de simplifier considérablement l'utilisation de MARTHE. Par exemple, pour faire une modélisation hydrodynamique simple, sans transport ni calcul en Zone Non Saturée : on voit apparaître uniquement 11 paragraphes au lieu de 22 dans le cas général. Dans le paragraphe relatif au calcul hydrodynamique, on voit apparaître 15 paramètres au lieu de 24. Dans le choix des unités : 12 lignes au lieu de 24. Pour les historiques : on voit apparaître 17 types possibles au lieu de 119.

La définition du profil d'utilisation, d'extension [.prfu], est réalisée *via* le module de « Gestion des données non maillées », accessible par le bouton PAR de la barre d'outils du bas du cadre de WinMarthe. On choisit alors la ligne « Profil d'utilisation » (Figure 35).

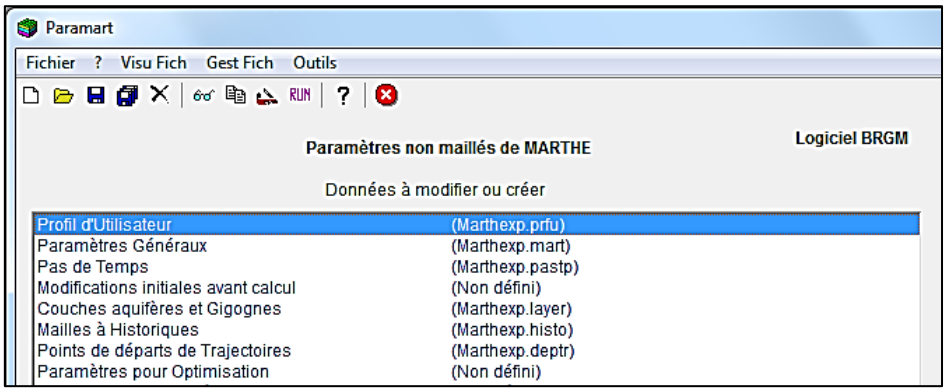


Figure 35 - Sélection du fichier « Profil d'utilisation ».

Un exemple de fichier de « profil d'utilisation » généré est présenté Figure 36.

```
Nappe en régime transitoire [Titre descriptif]
 *** Profils d'Utilisation    [Logiciel MARTHE 7.5]  ***
 1=Hydrodynamique simple en régime permanent
 1=Régime Transitoire
 0=/// Transport ///
 0=Transport de masse Classique
 0=Zone Non Saturée
 0=Rivières, Drains, Lacs (1=Rivières et/ou Lacs  ;  2=Drains  ;  3=tous les 3)
 0=Hydroclimatologie, Cultures, Nitrates
 0=Salinité (1=Oui  ;  2=Calcul de la Salinité et de la Densité)
 0=Interface Eau douce/Eau salée
 0=Température (1=Oui  ;  2=Calcul de la Température)
 0=Multiphasique
 0=Écoulements de Gaz
 0=Couplage Géochimique  ou  Multicomposant. (1= Chaine ; 2=PHREEQC ; 3=TREACT)
 0=Utilisation Avancée
 0=Compatibilité avec des versions antérieures
 0=Utilisation très avancée = Tout
```

Figure 36 – Exemple de fichier profil d'utilisation.

8. Le fichier des paramètres généraux de calcul

Ce chapitre se rapporte aux paramètres rassemblés dans le fichier des « Paramètres Généraux ». Ce fichier est géré *via* le module de « Gestion des données non maillées », accessible par le bouton PAR de la barre d'outils du bas du cadre de WinMarthe. On choisit alors la ligne « Paramètres Généraux » (Figure 37).

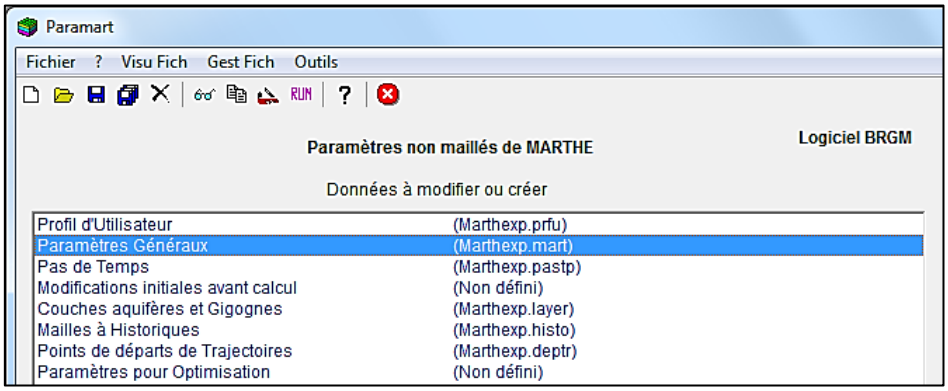


Figure 37 – Sélection du menu des « Paramètres Généraux ».

Ce fichier des « Paramètres Généraux » est utilisé uniquement par le moteur de calcul MARTHE.

Le fichier, d'extension [.mart], est organisé en paragraphes, chacun étant relatif à des fonctionnalités différentes. Ces paragraphes sont les suivants :

- Sauvegardes et contrôles
- Pas de Temps et sous-pas de temps
- Contrôle de la Résolution Hydrodynamique
- Unités des données
- Options de Géométrie, États de Référence, Processeurs
- Couplage et Transport Concentration, Chaleur, Salinité
- Salinité, Densité
- Température, effets Thermiques
- Concentration et Trajectoires
- Zone Non-Saturée et Multiphasique
- Eau, Gaz, Huile, Eau Salée
- Écoulement d'Huile, Eau Salée, Phase Non Aqueuse
- Écoulement de Gaz
- Géochimie
- Optimisation / Calibration automatique / Analyse de sensibilité
- Réseau Hydrographique, Drains, Lacs
- Hydroclimatologie
- Contrôles sur écran
- Allégements des écritures du fichier Bilan
- Cultures, Nitrates
- Initialisation avant calculs

Dans le présent rapport, seuls sont décrits les paramètres relatifs aux calculs d'hydrodynamique classique avec bilan hydroclimatique et réseaux de rivières, de drains et de lacs. Les paragraphes concernés sont les suivants :

- Sauvegardes et contrôles
- Pas de Temps et sous-pas de temps
- Contrôle de la Résolution Hydrodynamique
- Unités des données
- Options de Géométrie, États de Référence, Processeurs
- [Concentration et] Trajectoires
- Réseau Hydrographique, Drains, Lacs
- Hydroclimatologie
- Contrôles sur écran
- Allégements des écritures du fichier Bilan
- Initialisation avant calculs

Quand on a sélectionné le fichier des « Paramètres Généraux », on l'ouvre en général avec le préprocesseur. Il est cependant possible de l'ouvrir avec l'« Éditeur de Texte » intégré pour faire une modification ponctuelle. Il faut alors procéder avec soin, en respectant la structure et les « alignements en colonnes ». L'utilisateur averti qui modifie directement un fichier avec un éditeur de texte le fait « à ses risques et périls ».

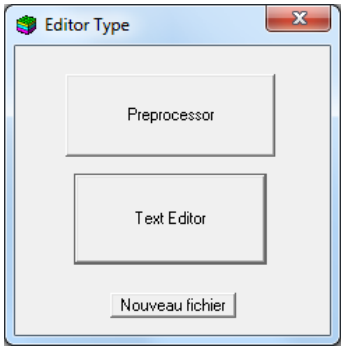


Figure 38 – Ouverture du fichier des paramètres avec l'éditeur de texte intégré.

L'éditeur de texte permet aussi d'ajouter jusqu'à 10 lignes de commentaires en tête du fichier pour décrire la simulation. Ces commentaires doivent se placer entre la 1ère ligne du fichier, qui est un titre descriptif, et la ligne :

« #<V7.5># --- Fin du texte libre --- ; Ne pas modifier/retirer cette ligne »

Le début du fichier des paramètres généraux pourra alors, par exemple, avoir la forme suivante :

```
Simulation multicouche
 < Nouvelle simulation avec augmentation de la perméabilité de la Craie >
 < Bilan hydrographique au pas de temps journalier >
 < Niveaux d'eau fixes dans les rivières >
 #<V7.5># --- Fin du texte libre --- ; Ne pas modifier/retirer cette ligne
```

Remarque : Dans les paragraphes suivants, quand on indique la valeur « rien » pour un paramètre, cela signifie qu'on ne lui fixe aucune valeur et qu'on et qu'on laisse « en blanc » l'emplacement associé. Cela ne signifie pas qu'on introduit le texte « rien »

8.1. Paramètres de sauvegarde et de contrôles

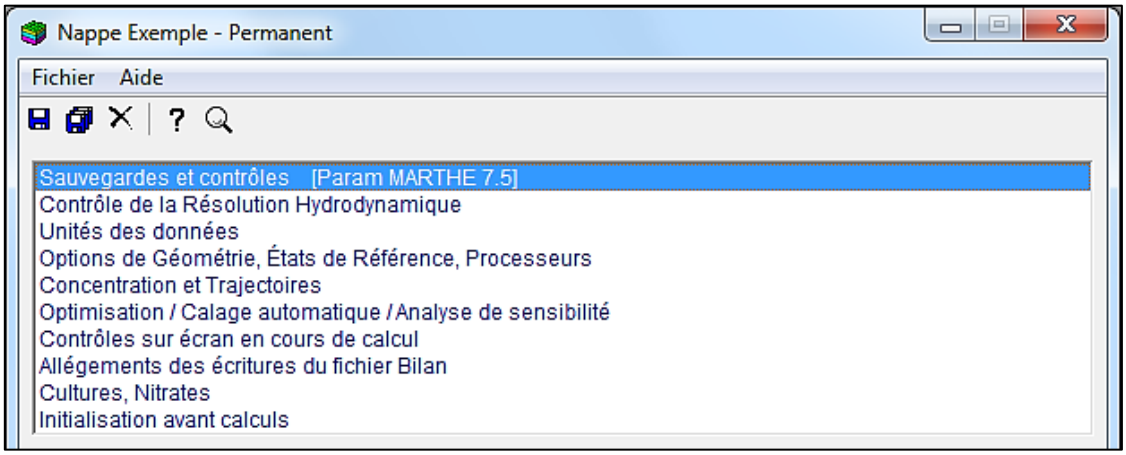


Figure 39 - Fichier des paramètres généraux : Paragraphe de sauvegarde et contrôles.

Les paramètres de ce paragraphe de sauvegardes et contrôles sont les suivants :

- Génération d'un « fichier liste » détaillé
- Écriture sur listing de toutes les données de mailles lues (et déduites)
- Sauvegarde de l'état du projet en fin de calcul
- Contrôle de la convergence dans une maille particulière
- Allégement du fichier bilan
- Vérification seule sans calculs
- Sauvegarde des historiques du bilan massique et/ou du bilan de chaleur par zones
- Sauvegarde des historiques du bilan hydrodynamique
- Sauvegarde des historiques de variations par rapport au début de la simulation
- Annulation du calcul du bilan de débit de fluide
- Format d'écriture des historiques et des profils calculés
- Sauvegarde des champs calculés à tous les pas de temps de modèle
- Sauvegarde des historiques du bilan hydroclimatique
- Sauvegarde des historiques du bilan massique
- Sauvegarde des historiques du bilan hydrodynamique par zones
- Sauvegarde des historiques du bilan des débits des drains
- Sauvegarde des historiques du bilan des volumes cumulés des drains
- Sauvegarde des historiques de convergence de géochimie
- Format de sauvegarde des champs calculés
- Écriture des dates sous forme calendaire
- Facteur de dilatation y/x pour les fichiers de dessin des vitesses
- Périodicité de sauvegarde des historiques
- Sauvegarde des historiques du bilan de nitrates
- Écriture d'un fichier « Maillage » : Identificateur , X , Y , dx , dy
- Listage des données des réseaux de rivière, drains, lacs

Génération d'un « fichier liste » détaillé

- 0 = Pas de création de fichier listing
- 1 = Création d'un fichier listing

Le « fichier liste » (listing), de nom « marthe.txt », contient tous les détails des données lues et transformées.

Écriture sur listing de toutes les données de mailles lues (et déduites)

Si on choisit cette option, les données de mailles lues (ou transformées) seront écrites dans le « fichier liste » de nom : « marthe.txt ».

Sauvegarde de l'état du projet en fin de calcul

Option permettant de sauvegarder dans un nouveau « fichier projet » tous les champs du domaine dans leur état de fin de calcul.

Valeur par défaut : 0 => Non, pas de sauvegarde de l'état de fin de calcul.

Cette option permet :

- D'une part, de pouvoir enchaîner ultérieurement des simulations :
  Par exemple, un calcul en régime transitoire après un premier calcul en régime permanent.
- D'autre part de contrôler a posteriori les données des champs, notamment des champs spatialisés générés selon le processus décrit au chapitre « Définition directe des données d'un champ maillé, sans création d'un fichier ».

Options possibles :

- 0 => Pas de sauvegarde
- 1 => Sauvegarde et écriture en fichier texte.
- -1 => Sauvegarde et écriture en binaire : rapide et compacte, mais moins transportable.

Le format binaire peut être réutilisé par le moteur de calcul MARTHE, mais il ne peut pas être utilisé par la version v4.8 (d'Août 2015) du préprocesseur WinMarthe.

Si on choisit une option de sauvegarde, MARTHE demande un nom de « fichier projet en fin de calcul ». On peut donner par exemple le nom « Fin_Calcul » pour créer le fichier projet « Fin_Calcul.rma » en fin de calcul.

Si après lecture, la valeur d'un champ a été modifiée dans au moins une maille :

- Par modifications dans le paragraphe « Initialisation avant calculs »
- Par un fichier de « Modifications initiales avant calcul »
- Par modification au cours des pas de temps
- Par calcul d'un nouveau champ

⇨ Un nouveau fichier pour ce champ est constitué en fin de calcul, avec la racine du nom de ce fichier projet, par exemple « Fin_Calcul.charg » pour le champ de la charge hydraulique calculée, et son nom apparaît dans le fichier projet.

Les noms des autres fichiers ne sont pas changés et sont conservés tels quels.

Contrôle de la convergence dans une maille particulière

Possibilité de désigner une maille dans laquelle on suivra tous les termes d'échanges et la convergence des calculs hydrodynamiques.

Cette option n'est à utiliser qu'exceptionnellement, uniquement en cas de problème ponctuel.

Valeur par défaut : 0 => Non, *pas* de suivi de la convergence dans une maille particulière
1 => Oui, suivi de la convergence dans une maille particulière. Les résultats seront écrits dans un fichier de nom « converg.txt »

Il faut alors définir la maille de suivi à l'aide des paramètres suivants

Numéro de Ligne de la maille à contrôler

Numéro de Colonne de la maille à contrôler

Numéro de Couche à contrôler
Si on donne le numéro 0 => c'est la maille ayant le débit résiduel maximal qui sera suivie.

Numéro du Gigogne de la maille à contrôler
Par défaut, si on laisse ce numéro à 0, c'est le maillage principal qui est concerné

Nombre d'itérations finales à contrôler
Par exemple, si on donne la valeur 3, on aura, à chaque pas de temps, le suivi de la convergence au cours des 3 dernières itérations de calcul.

Allégement du fichier bilan

- <rien> = 0 => Tous les détails sont conservés
- « Allég » = 1 => Fichier « bilandeb » Allégé
- « Très_Allég » = 2 => Fichier « bilandeb » Très Allégé
- « Annul » = 9999 => Fichier « bilandeb » Supprimé

Vérification seule sans calculs

Cette option permet de faire une vérification complète de tous les fichiers de données, avec lecture des données et passage par tous les pas de temps, mais sans exécuter les calculs Une telle vérification, très rapide, est recommandée avant de lancer une simulation faisant appel à un grand nombre de fichiers de données, surtout lorsque les calculs associés sont longs. Elle permet de s'assurer que la simulation ne sera pas interrompue par une erreur dans un fichier survenant après une longue phase de calcul.

Cette option permet en particulier de :
- Vérifier les données.
- Générer les champs après introduction de modifications ponctuelles. Elle rend alors possible un contrôle et une visualisation par WinMarthe.

Les valeurs possibles de l'option sont :
- 0 = Exécution normale
- +1 ou -1 = Vérification seule, sans calculs.
  Les données seront uniquement lues et mises en forme, mais aucun calcul ne sera effectué.

+1 = Écriture des résultats en format texte.
-1 = Écriture des résultats en binaire.

Sauvegarde des historiques du bilan massique et/ou du bilan de chaleur par zones

Sauvegarde des historiques du bilan massique ou du bilan de chaleur uniquement si applicable, donc pour les simulations avec transport de masse ou transfert thermique.

Ces historiques sont sauvegardés dans les fichiers « histomas.prn » (et « histomas.out »).

- Les flux massiques sont exprimés en unité de masse par unité de temps,
- Les flux de chaleur sont exprimés en Joules par unité de temps.

Les valeurs possibles de l'option sont :

- 0 => Non : pas de sauvegarde
- 1 => Bilans par « zones de géométrie » classiques
- 2 => Bilans par « zones de géométrie » de Type_2
- 3 => Bilans par « zones de géométrie » de Type_3

Remarque : Cette option n'est pas disponible avec les schémas de transport à particules (schéma MOC ou RW).

Sauvegarde des historiques du bilan hydrodynamique

Sauvegarde de l'évolution au cours du temps des termes du bilan des débits de la nappe (Entrées, Sorties, Convergence).

- 0 = Automatique :
  - ⇨ Pas de sauvegarde en régime permanent.
  - ⇨ Sauvegarde en régime transitoire
- 1 = Oui : Sauvegarde toujours
- -1 = Non : Pas de sauvegarde

Les historiques des termes du bilan des débits de la nappe sont sauvegardés dans le fichier texte de nom « histobil_debit.prn ». Ce fichier peut être importé directement sous Excel ® (ou un tableur équivalent). Tous les débits sont exprimés en unité utilisateur de débit.

Les termes du bilan de la nappe apparaissent également, en unité utilisateur de volume :

- En volume cumulé dans le pas de temps :
  Fichier « histobil_nap_pastp.prn ».
- En volume cumulé depuis le début de la simulation :
  Fichier « histobil_nap_cumu.prn ».

Sauvegarde des historiques de variations par rapport au début de la simulation

(Disponible uniquement en régime transitoire).

- 0 = Non, pas d'historiques de variations.
- 1 = Oui : sauvegarde des historiques de variations par rapport au début de la simulation.

En plus des valeurs des historiques temporels, qui sont sauvegardées dans le fichier de nom « historiq.prn », les historiques des variations sont sauvegardés dans le fichier de nom « histodif.prn ».

Cette option génère également le fichier « histobil_dif_debit.prn » qui contient l'historique de la variation des termes du bilan de débit, par rapport au début de la simulation.

Annulation du calcul du bilan de débit de fluide

Annulation possible du calcul du bilan de débit pour accélérer les calculs.
Dans certains cas cependant, le bilan de débit, quand il est nécessaire, sera quand même calculé.

- 0 = Non, pas d'annulation => Calcul
- 1 = Annulation => Pas de calcul, sauf si le code de calcul décide que c'est nécessaire

Format d'écriture des historiques et des profils de données calculés

- 0 = Style « Excel » : tableau (Date , valeur_1 , valeur_2 , ...)
  ou bien (Ordonnée , valeur_1 , valeur_2 , ...).
  Le fichier est en format texte et les nombres des différentes colonnes sont séparés par des tabulations.
  Dans cette version, le tableau généré est limité à 4000 colonnes.
- 2 = Format style « Excel » et aussi format « successif », les 2 formats sont dans 2 fichiers différents
  Le format « successif » est du type : « Date , valeur » (ou bien « Ordonnée , valeur »)
  Le nombre de champs (historiques ...) de ce format « successif » n'est pas limité
- -1 = Format « successif » uniquement (*obsolète*).

Sauvegarde des champs calculés à tous les pas de temps de modèle

- 0 = Cas général : Sauvegarde uniquement aux pas de temps de modèle choisis par l'utilisateur.
- 1 = Sauvegarde des champs (des variables choisies) à tous les pas de temps de modèle.
- 2 = Sauvegarde des champs à tous les pas de temps de modèle et à tous les sous-pas de temps.

Utilisation : Quand on a demandé, dans le fichier des pas de temps, la sauvegarde de certains champs calculés à un pas de temps de modèle donné, ces champs seront alors sauvegardés également à tous les pas de temps ultérieurs.

Sauvegarde des historiques du bilan hydroclimatique

Sauvegarde de l'évolution au cours du temps des termes du bilan hydroclimatique (Pluie, ETR, Transpiration, Ruissellement, Recharge) et de leurs cumuls.

- 0 = Non, pas de sauvegarde
- « Flux » = 1 = Oui : Écriture en Flux et Hauteur (par ex: en mm/j , mm)
- « Débit » = 2 = Oui : Écriture en Débit et en Volume.

L'historique des termes du bilan hydroclimatique est sauvegardé dans le fichier « histoclim.prn », sous forme d'un fichier texte importable directement sous Excel ® (ou un tableur équivalent).

Sauvegarde des historiques du bilan massique

Sauvegarde de l'évolution au cours du temps des termes du bilan massique de la nappe (Entrées, Sorties, Dégradation, Stockage).
Ces historiques seront sauvegardés dans le fichier : « histomas.prn ».

Cette sauvegarde est conseillée.

- 0 = Automatique :
  - ⇨ Pas de sauvegarde si le calcul est réalisé en régime permanent.
  - ⇨ Sauvegarde si le calcul est réalisé en régime transitoire
- 1 = Oui : Sauvegarde toujours
- -1 = Non : Pas de sauvegarde

Sauvegarde des historiques du bilan hydrodynamique par zones

Sauvegarde des bilans de débit fluide dans chaque zone du domaine.
Ces historiques seront sauvegardés dans le fichier de nom : « histobil_debit.prn ».

- Valeur = 0 => Non, pas de sauvegarde
- Valeur = 1 => Bilans par « zones de géométrie » classiques
- Valeur = 2 => Bilans par « zones de géométrie » de Type_2
- Valeur = 3 => Bilans par « zones de géométrie » de Type_3

Sauvegarde des historiques du bilan de débit des drains

Cette sauvegarde est conseillée s'il y a un réseau de drains-conduits.

- Valeur = 0 => Non : Pas de sauvegarde
- Valeur = 1 => Oui : Sauvegarde

Sauvegarde des historiques du bilan des volumes cumulés des drains

Cette sauvegarde est conseillée s'il y a un réseau de drains-conduits.
Les volumes qui sont sauvegardés sont les volumes cumulés depuis le début de la simulation. Ils sont exprimés en unité de volume d'eau.

- 0 = Non : pas de sauvegarde
- 1 = Oui : Sauvegarde

Sauvegarde des historiques de convergence de géochimie

Cette sauvegarde concerne uniquement les calculs avec géochimie couplée.

- -1 = Non : Pas de sauvegarde
- 1 = Oui : Sauvegarde
- 0 = Oui, uniquement si les calculs sont en régime transitoire

Dans cette version : la sauvegarde est possible uniquement avec le moteur géochimique TReact.

L'historique de convergence de géochimie est sauvegardé dans le fichier « histocvgchim.prn » importable directement dans Excel ®.

Format de sauvegarde des champs calculés

Au lieu de sauvegarder les champs calculés par défaut sous forme de « Grille Marthe » compacte, il est possible de les sauvegarder sous un autre format d'exportation :

- 0 = Grille Marthe (compatibles WinMarthe).
- 1 = « Colonne , Ligne , Couche , Num_Gigogne , Valeur ».
- 2 = « X , Y , Couche , Valeur »
- 3 = « X , Y , Z , Valeur »
- 4 = « Identif, X , Y , Z ,Colonne, Ligne, Couche, Gigogne, Valeur, Variable, Date, etc. »

Dans tous les cas, le fichier contient toutes les mailles, y compris les mailles extérieures au domaine.

Pour tous les formats, sauf le format « grille », les données sont écrites à raison d'une maille par ligne de fichier.

Écriture des dates sous forme calendaire

Cette option est applicable uniquement quand la date initiale est sous la forme calendaire, c'est-à-dire sous la forme « jj/mm/aaaa hh:mm » ou « jj/mm/aaaa » (par exemple : « 14/07/2018 17:30 » ou bien « 14/07/2018 »). L'éventuelle heure (par exemple « 17:30 ») est séparée de la date par un espace, et *non pas* par une tabulation.

Les dates de calcul apparaissent également sous forme calendaire dans les fichiers d'historiques calculés au cours de la simulation.

- 0 = JMA hh:mm => Les dates seront sous forme calendaire « jj/mm/aaaa hh:mm ».
- 1 = JMA => Les dates seront sous forme calendaire « jj/mm/aaaa » (plus lisible) si les durées de pas de temps sont toujours d'au moins 1 jour.
- -1 => Il n'y aura pas de dates calendaires.

Remarque 1 : Même pour les versions anglaises de MARTHE, la date est toujours sous la forme « jj/mm/aaaa » et *jamais* sous la forme « mm/jj/aaaa ».

Remarque 2 : Quand les dates sont sous forme calendaire, les fichiers historiques contiennent toujours une colonne avec des dates décimales. Pour faciliter la lecture, cette date décimale correspond au temps écoulé depuis le début de la première année de simulation.
Par exemple :

- Si le pas de temps n°0 est le 31/07/1999 et le pas de temps n°1 est le 01/08/1999 : la date décimale du pas de temps n°0 sera 212 jours (et celle du pas n°1 sera 213 jours).
- Si le pas de temps n°0 est le 31/12/2017 et le pas de temps n°1 est le 01/01/2018 : la date décimale du pas de temps n°0 sera 0 (et celle du pas n°1 sera 1 jour).

Remarque 3 : Quand la date initiale du « fichier des pas de temps » est sous forme calendaire et les dates suivantes sont sous forme décimale => Les dates décimales sont interprétées comme le temps écoulé (en unité de temps) depuis la date initiale.

Facteur de dilatation y/x pour le fichier de dessin des vitesses

Ce facteur de confort permet une représentation graphique correcte des vecteurs de vitesse quand la visualisation fera intervenir une dilatation des ordonnées y par rapport aux abscisses x.
Ceci est souvent le cas pour des modélisations en coupe verticale.
Seules les valeurs du fichier dessin de vitesse « velocity.bln » seront modifiées, les vitesses réelles sauvegardées dans le fichier « veloci.out » restant pour leur part inchangées.

Ce facteur doit être identique au facteur de dilatation de y qui sera utilisé par WinMarthe pour la visualisation.

Valeur par défaut : « Rien » ou 0 => Il n'y a pas de dilatation, comme si on avait donné la valeur 1.

Périodicité de sauvegarde des historiques

Ce paramètre permet de réduire la taille des fichiers quand il y a de très nombreux pas de temps (plusieurs dizaines de milliers ou centaines de milliers).

- 0 : Par défaut : sauvegarde à tous les pas de temps.
- k : Périodicité k : les sauvegardes se feront tous les « k » pas de temps.

Sauvegarde des historiques du bilan de nitrates

- 0 = Non : Pas de sauvegarde des historiques du bilan de nitrates.
- 1 = Oui : Sauvegarde des historiques.

Sauvegarde uniquement s'il y a prise en compte de bilans de nitrates.

Les bilans de nitrates sont sauvegardés dans le fichier « histo_no3.prn »

Écriture d'un fichier « Maillage » : Identifiant, X, Y, dx, dy

- 0 = Non : »: Pas d'écriture
- 1 = Oui : écriture

Le fichier contient la structure horizontale du maillage, identique pour toutes les couches du domaine modélisé. Il a pour nom : « maillage_grid.prn ».

Chaque ligne décrit la géométrie d'une maille :

Identifiant de la maille, abscisse X du centre, ordonnée Y du centre, longueur du côté DX, longueur du côté DY

L'identifiant de la maille est constitué de la façon suivante : Colonne Ligne Gigogne (4 caractères, 4 caractères, 2 caractères) : par exemple « 0327015302 » pour la colonne n°327, la ligne n°153 du gigogne n°2.

Listage des données des réseaux de rivière, drains, lacs

Listage des tronçons et de toutes leurs propriétés physiques.

- 0 = Non : Pas de listage.
- 1 = Oui : Listage des données.

Quand on choisit cette option on obtient également :

- La superficie de bassin versant en amont de chaque tronçon de rivière ou maille de lac. Ce champ de résultat est sauvegardé dans le fichier « surf_drainee_riv.out ». Ce champ peut être utilisé pour vérifier que la superficie du bassin versant en amont d'une station hydrométrique est correcte.

- Le numéro d'élément de rivière (ou de lac) associé au ruissellement sur chaque maille du domaine. Le numéro d'élément est un numéro d'ordre interne.
  Ce champ de « numéro d'élément de rivière associé » est sauvegardé dans le fichier « num_riv_aval.out ». Ce fichier peut être utilisé ultérieurement pour éviter de le recalculer à chaque simulation.

8.2. Paramètres de définition des unités des données

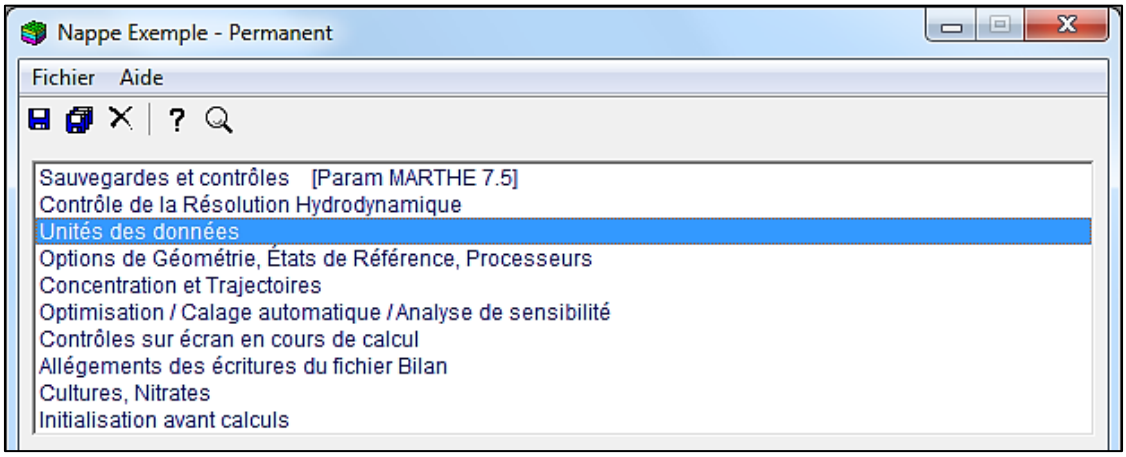


Figure 40 - Paramètres généraux : Paragraphe des unités de données.

Il est possible de définir des unités utilisateur pour la plupart des données utilisées dans la modélisation. Ces données sont utilisées pour les données d'entrée et pour les résultats calculés. Ces unités sont indépendantes les unes des autres : par exemple il est possible de définir le débit en m^3/h, la charge hydraulique en cm, le temps en jours, la masse en grammes et la concentration en mg/L

Par défaut, sauf pour une ou deux exceptions signalées, si on ne précise pas l'unité c'est le système international (S.I.) qui est utilisé (mètre, seconde, kg).

Il est possible d'utiliser :

- Soit des unités en clair : par exemple « cm/s », « L/s », « % ». Pour définir ces unités la « casse » (majuscules, minuscules, accents, cédilles) n'a pas d'importance.
- Soit un facteur numérique qui permet de transformer l'unité utilisateur en unité S.I. : par exemple $2.77778\ 10^{-4}$ si on utilise des m^3/h, puisque $1\ m^3/h = 2.77778\ 10^{-4}\ m^3/s$.

Il n'est pas possible de définir une unité du type « 10 L » ou « 1e-3 cm/s ». Il faudrait alors utiliser respectivement « 1e-2 » ou « 1e-5 » comme facteur d'échelle vis-à-vis des unités S.I.

Ces unités utilisateur ont été rassemblées en 2 groupes :

- Les unités utilisateur relatives aux calculs d'hydrodynamique classique, avec bilan hydroclimatique et réseau hydrographique :
  - Unité de perméabilité des aquifères en : m/s (ou en m^2)
  - Type de perméabilité
  - Unité de débit : en m^3/s
  - Unité de débit de rivière
  - Unité de charge hydraulique, altitude, pression hydraulique : en m
  - Type de coefficient d'emmagasinement captif utilisé
  - Unité de coefficient d'emmagasinement captif
  - Unité de coefficient d'emmagasinement libre
  - Unité de hauteur hydroclimatique : en mm
    (pour les flux de Pluie, ETP, Recharge, Infiltration)
  - Unité de hauteur d'excédent d'irrigation : en mm

- Unité de durée hydroclimatique
- Unité de temps (des pas de temps de modèle)
- Unité de coordonnées horizontales : en m
- Coefficient uniforme d'anisotropie verticale Kv/Kh de la perméabilité
- Coefficient uniforme d'anisotropie horizontale Kx/Ky de la perméabilité
- Unité de porosité = Teneurs en eau
- Unité de volume d'eau (ou unité de stock) : en m^3.

- Les unités utilisateur relatives à d'autres fonctionnalités : transport de masse, effets densitaires, calcul en zone Non Saturée, écoulements de gaz :
  - Unité de concentration : en kg/m^3.
  - Unité de salinité : en kg/m^3.
  - Unité de masse : en kg
  - Type de débit massique et de débit de chaleur en entrée
  - Unité de volume pour la concentration géochimique
  - Type de lecture de la concentration des minéraux
  - Unité de pression de gaz : en m d'eau

8.2.1. Les unités relatives aux calculs d'hydrodynamique classique, avec bilan hydroclimatique et réseau hydrographique.

Unité de perméabilité des aquifères : en m/s (ou en m^2)

Unités abrégées : m/s , cm/s , m2 , m/h , cm/h , mm/h , m/j , cm/j , mm/j
: m/an , cm/an , mm/an , Darcy , mDarcy

Si on utilise des « m2 » ou « Darcy » => MARTHE saura automatiquement que les données des fichiers sont des perméabilités intrinsèques. Dans les autres cas, il faudra le préciser par un paramètre.

Si on utilise des perméabilités intrinsèques : l'unité de référence est le m^2.

1 Darcy = $0.9869233 \times 10^{-12}$ m^2.

Note : Pour l'eau pure à 20°C : 1 m/s => (environ) 10^{-7} m^2.
Note : Pour l'eau pure à 20°C : 1 Darcy => (environ) 0.987×10^{-5} m/s.

Attention : cette unité s'applique à la perméabilité (horizontale et verticale) des aquifères mais pas aux éventuelles épontes semi-perméables (*obsolescentes*) dont l'unité de perméabilité est définie dans le « fichier des Couches ».

Type de perméabilité

Type par défaut : « Rien » ou 0 => Perméabilité à l'eau des hydrogéologues
Types abrégés : « Hydrau », « Intrins »

C'est le type de perméabilité utilisée dans les fichiers :
- « Hydrau » = 0 = Perméabilité à l'eau des hydrogéologues [LT^{-1}] (par défaut)
- « Intrins » = 1 = Perméabilité Intrinsèque [L^2]

Unité de débit : en m^3/s

Unités abrégées : m^3/s , m^3/h , m^3/j , $m^3/mois$, m^3/an , L/s , L/h , L/J , cm^3/s
: $mega_m^3/an$, $kilo_m^3/j$, $kilo_m^3/an$.
: m/an , mm/an (= mm/an sur 1 m^2) , kg/s , g/s.

L'unité de référence du débit fluide (eau, huile) est le m^3/s.
L'unité de référence du débit de gaz est le kg/s.

Unité de débit de rivière

Par défaut (« rien » ou « 0 ») => c'est l' « unité de débit » qui est utilisée

Unités abrégées : m^3/s , m^3/h , m^3/j , $m^3/mois$, m^3/an , L/s , L/h , L/j , cm^3/s
: $mega_m^3/an$, $kilo_m^3/j$, $kilo_m^3/an$

Cette unité concerne uniquement les rivières, mais pas les drains.

Cette « Unité de débit de rivière » ne s'applique pas au débit d'échange Rivière => Nappe calculés qui est exprimé en « unité générale de débit » (car il est donnée dans l'optique de la nappe).

Unité de charge hydraulique, altitude, pression hydraulique

Unité par défaut : « rien » ou « 0 » => mètres
Unités abrégées : m , dm , cm , mm.

La Charge hydraulique, la Succion, la Pression hydraulique, l'Altitude du toit et du substratum, l'Altitude du fond de rivière, l'Altitude de drain, etc. sont exprimés dans cette même unité.

⇨ C'est l'unité de hauteur verticale.

On rappelle les coefficients de conversion entre les « mètres d'eau douce », les Pascals, les bars et les atmosphères :

1 mètre d'eau = 9806.7 Pa
1 bar = 10^{+5} Pa = 10.197 mètres d'eau.
1 atmosphère = 1013.25 mb = 1.01325 bar = 10.33211 mètres d'eau.

Type de coefficient d'emmagasinement captif utilisé

Type par défaut : « rien » ou « 0 » => Coefficient d'emmagasinement captif « des hydrogéologues »
Types abrégés : Hydrog , Specif , Compres

Cet index définit le type de coefficient d'emmagasinement captif qui est utilisé :

- « Hydrog » = 0 = Coefficient d'emmagasinement captif. des hydrogéologues [sans unité]
- « Specif » = 1 = Coefficient d'emmagasinement Spécifique Ss (unité par défaut : m^{-1}).
  Ce choix est vivement conseillé, surtout en 3D.

- « Compres » = 2 = Compressibilité des pores (unité par défaut : m^{-1})

Si on utilise la compressibilité des pores : MARTHE en déduit le coefficient d'emmagasinement captif spécifique par la relation :

$$\boxed{S_s = \omega \times (C_{Por} + C_w)} \quad = \quad \boxed{S_s = C_{Terr} + \omega \times C_w}$$

Avec :
S_s = Coefficient d'emmagasinement captif spécifique (en m^{-1}).
ω = Porosité (sans unité).
C_{Por} = Compressibilité des pores (en m^{-1}).
C_{Terr} = Compressibilité du terrain, c'est-à-dire du milieu poreux (en m^{-1}).
C_w = Compressibilité de l'eau ($5\ 10^{-6}\ m^{-1}$).

Unité de coefficient d'emmagasinement captif

Unité par défaut : « rien » ou 0 => 1
Unités abrégées : « [-] » , « m-1 »

- Si les emmagasinements captifs sont des emmagasinements spécifiques :
  ⇨ alors l'unité de référence est le **m^{-1}**.
- Si les emmagasinements captifs sont des « emmagasinements des hydrogéologues » (choix par défaut) :
  ⇨ alors l'unité de référence est sans dimension.

Si on choisit l'unité abrégée « m-1 » => Le coefficient d'emmagasinement captif est automatiquement considéré comme un coefficient d'emmagasinement spécifique.

Unité de coefficient d'emmagasinement libre

Unité par défaut : « rien » ou 0 => 1
Unités abrégées : « % »

- Si le coefficient d'emmagasinement donné est un nombre sans dimension (par ex. 0.08) :
  ⇨ Laisser ce coefficient vide (« rien » ou 0.
- Si le coefficient d'emmagasinement libre est donné en % :
  ⇨ Donner l'unité = « % » (ou bien 0.01)

Unité de hauteur hydroclimatique : en mm (pour les flux de Pluie, ETP, Recharge, Infiltration)

Unité par défaut : « rien » ou 0 => mm.
Unités abrégées : mm , L/m^2 , cm , m.

Attention : Noter que l'unité de référence pour les hauteurs hydroclimatiques est le « mm » et non le « m » qui est l'unité du système international, puisqu'on exprime traditionnellement les hauteurs de pluie ou d'évapotranspiration en mm.

Cette unité est utilisée :
- Pour définir des hauteurs de réservoirs hydroclimatiques, ou des hauteurs de neige.

- Pour définir des « unités de flux hydroclimatiques » : dans ce cas on associe une « unité de durée hydroclimatique » pour obtenir une unité de flux hydroclimatique.

Par exemple, si les données de flux sont en mm/an :
- Laisser : « rien » ou 0 = défaut => « hauteur par défaut en mm »,
- Et donner plus bas « Unité de durée hydroclimatique » = « Année »

Attention : Les données de Pluie, ETP, Recharge, Infiltration, Ruissellement sont des Flux (par exemple des mm/mois), et non pas des hauteurs.
Par exemple, on peut avoir un flux de pluie constant de 650 mm/an, associé à des pas de temps de modèle de 1 jour

Unité de Hauteur d'excédent d'irrigation : en mm

Unité par défaut : « rien » ou 0 => mm.
Unités abrégées : mm , L/m^2 , cm , m.

Attention : Noter que l'unité de référence pour la hauteur d'excédent d'irrigation est le « mm » et non pas l'unité du système international qui est le « m ».

Attention : Les données d'Excédent d'Irrigation sont des Flux (par exemple des mm/mois) et non *pas* des hauteurs.

Par exemple, si les données de flux sont en mm/an :
- Laisser : « rien » ou 0 = défaut => « hauteur par défaut en mm »,
- Et donner plus bas « Unité de durée hydroclimatique » = « Année »

Unité de durée hydroclimatique

Valeurs possibles : seconde, minute, heure, jour, semaine, décade, mois, année
Unités abrégées : seconde, minute, heure, jour, semaine, décade, mois, année.
(« Décade », « Année », etc. en minuscule, ou en majuscule, avec ou sans accent)

On définit : 1 mois = 365.25/12 = 30.4375 jours.
: 1 décade = 365.25/36 = 10.14583 jours.
: 1 semaine = 7 jours (il y a donc 52.1786 semaines par an).

Remarque : Cette unité de durée hydroclimatique est aussi utilisée pour les applications (épandages) de nitrates (NO_3), la dégradation de nitrates, etc.

Unité de temps (des pas de temps de modèle)

Valeurs possibles : seconde, minute, heure, jour, semaine, décade, mois, année
Unités abrégées : seconde, minute, heure, jour, semaine, décade, mois, année.
(« Décade », « Année », etc. en minuscule, ou en majuscule, avec ou sans accent)

On définit : 1 mois = 365.25/12 = 30.4375 jours.
: 1 décade = 365.25/36 = 10.14583 jours.
: 1 semaine = 7 jours (il y a donc 52.1786 semaines par an).

Remarque : Cette unité de temps est utilisée également pour les temps de ½ dégradation, le débit massique, le débit de chaleur, les cinétiques de ½ échange, etc.

Unité de coordonnée horizontale : en m

Unités abrégées : m , km , hm , dm , cm , mm

Il s'agit uniquement des coordonnées horizontales.

Cette unité concerne : les dimensions des mailles, les largeurs et longueurs des tronçons de rivières, les largeurs et longueurs des tronçons de drains, etc.

Attention : Pour une rivière et un drain : la largeur aussi est exprimée en unité utilisateur de coordonnées de maillage, donc par exemple en km si c'est l'unité de coordonnées de maillage.

Coefficient uniforme d'anisotropie verticale Kv/Kh de la perméabilité

C'est le rapport uniforme : $A_{Kz/Kh}$ = Perméabilité Verticale / Perméabilité Horizontale.

Valeur par défaut : 0 ou « rien » => 1 => Pas d'anisotropie verticale.

À partir de la perméabilité horizontale « **K_H** » introduite dans le fichier de données du modèle, la perméabilité verticale est déterminée par la relation :

$$K_z = K_H \cdot A_{Kz/Kh}$$

Ce paramètre est pris en compte uniquement dans les écoulements 3D ou multicouches. Sa valeur par défaut est 1.
Par exemple, si la perméabilité verticale est 100 fois plus faible que la perméabilité horizontale, il faut donner la valeur 0.01 à ce coefficient.

Dans la pratique, dans des formations sédimentaires ce coefficient d'anisotropie est souvent de l'ordre de 0.1 à 0.01.

Remarque 1 : Il est aussi possible de définir une anisotropie verticale différente dans chaque couche (fichier « Couches aquifères et Gigognes » d'extension [.layer]) [*mais cette fonctionnalité est obsolescente, et donc déconseillée*].

Remarque 2 : Il est aussi possible de définir un champ maillé d'anisotropie verticale, avec des valeurs différentes dans chaque maille.

On retiendra que le code de calcul utilise :

- En premier choix : la valeur du champ maillé d'anisotropie verticale, si un nom de fichier d'anisotropie verticale est donné dans le fichier projet (ou bien si des valeurs ponctuelles pour ce champ ont été définies).
- Sinon, en deuxième choix : la valeur (obsolescente) du fichier [.layer], si elle est différente de 0.
- Sinon, en troisième choix : cette valeur uniforme du fichier des paramètres.

Coefficient uniforme d'anisotropie horizontale Kx/Ky de la perméabilité

Valeur par défaut : 0 (ou « rien ») => pas d'anisotropie horizontale

C'est le rapport uniforme :
$A_{Kx/Ky}$ = Perméabilité sur l'axe Ox / Perméabilité sur l'axe Oy.
Ce coefficient d'anisotropie est d'utilisation assez exceptionnelle.

À partir de la perméabilité horizontale « **K_H** » introduite dans le fichier de données du modèle, MARTHE calcule :

- $K_x = K_H \cdot \sqrt{A_{Kx/Ky}}$
- $K_y = K_H / \sqrt{A_{Kx/Ky}}$

Remarque : Il est aussi possible de définir un champ maillé d'anisotropie horizontale, avec des valeurs différentes dans chaque maille.

On retiendra que le code de calcul utilise :

- En premier choix : la valeur du champ maillé d'anisotropie horizontale, si un nom de fichier d'anisotropie horizontale est donné dans le fichier projet (ou bien si des valeurs ponctuelles pour ce champ ont été définies), ce qui est exceptionnel.
- Sinon, en deuxième choix : cette valeur uniforme du fichier des paramètres.

Unité de porosité = teneurs en eau

Unité par défaut : « rien » ou 0 => 1
Unités abrégées : « % »

Cette unité de porosité est utilisée pour le calcul des trajectoires et de la vitesse d'écoulement.

Elle est aussi utilisée pour les calculs en Zone Non Saturée et pour les calculs de transport de masse et de transfert thermique.

- Si les porosités utilisées sont sans dimension (par ex. 0.08) :
  - ⇨ Laisser ce coefficient « vide » ou à 0.
- Si les porosités sont en % :
  - ⇨ Donnez l'unité = « % » (ou bien 0.01)

Attention : Dans les calculs de transport, les Rho_Kd volumiques doivent aussi être donnés dans cette même unité

Unité de volume d'eau (ou unité de stock) : en m^3

Unités abrégées : m^3 , dm^3 , L , cm^3 , mL.

Cette unité est utilisée uniquement en sortie, pour les volumes cumulés ou les stocks.

En cas de calculs diphasiques Eau - Gaz : les masses cumulées sont affichées avec ce facteur d'unité.

Si, par exemple, ce facteur est 0.001, les masses cumulées de gaz seront affichées en 0.001 kg, c'est-à-dire en grammes.

8.2.2. Les unités relatives à d'autres fonctionnalités : transport de masse, effets densitaires, calcul en Zone Non Saturée, écoulements de gaz

Unité de concentration : en kg/m^3

Unités abrégées : kg/m^3 , g/l , mg/L , mug/L , mug/m^3 , ppm , ppb
: mol/l , mmol/l (seulement si l'unité de masse est en mole)

Rappel : 1 g/L <=> 1 kg/m^3

Note : « mug » signifie « µg »

Si on réalise des calculs hydrochimiques => Laisser cette unité à « rien »

Unité de salinité : en kg/m^3

Unités abrégées : kg/m^3 , g/l , mg/l , mug/l, mug/m^3 , ppm , ppb

Rappel : 1 g/L <=> 1 kg/m^3.

Note : « mug » signifie « µg »

La « Salinité » est la « Concentration_Dense ».

Unité de masse en kg

Unités abrégées : kg , g , mg , mug , t , mol
« mug » = µg ; « t » = Tonne ; « mol » = mole

Cette unité est utilisée :

- Pour les particules de transport, les Diracs de masse et le débit massique
- En sortie : pour le stock, ou la masse cumulée, de produit dissout ou de gaz.

Type de débit de masse et de débit de chaleur en entrée

Type par défaut : « rien » ou 0 => débit massique (et de chaleur) par maille
Types abrégés : Maille , m2 , Surfac

C'est le type de débit de masse et de débit de chaleur (et de Diracs) utilisé en entrée :

- « Maille » = 0 => Débit massique et de chaleur (et Dirac) donné par maille et par tronçon de Rivière ou de Drain.
- « m2 » ou « Surfac » = -1 => Débit massique et de chaleur (et Dirac) par m^2 de surface (perpendiculaire à la pesanteur) et par mètre de longueur de Rivière ou de Drain.

Unité de volume pour la concentration géochimique

Unité par défaut : « rien » ou 0 => Litre (on a une concentration en mol/litre)
Unités abrégées : L , dm^3 , m^3

Remarque : Cette unité n'est pas utilisée avec le moteur géochimique PHREEQC pour lequel les concentrations des solutions chimiques sont en mol/litre.

Type de lecture de la concentration des minéraux

Types par défaut : « rien » ou 0 => moles par m^3 de terrain
moles par Litre de terrain pour Phreeqc-RM
Types abrégées : mol/m3 , %Vol

Type de lecture de la concentration des minéraux pour les calculs de géochimie

Remarque : Ce paramètre n'est pas utilisé avec le moteur géochimique PHREEQC

- « rien » = « mol/m3 » = 0 => Moles par m^3 de terrain.
- « %Vol » = 1 => Pourc. volumique de la matrice solide. (en %).

La lecture en pourcentage volumique est possible uniquement si on dispose d'un fichier de « volumes molaires » et si la porosité a déjà été définie.

Les concentration des minéraux calculées sont toujours exprimées en mol/m^3 de terrain, sauf avec le moteur géochimique Phreeqc-RM pour lequel elles sont en « mol / L de terrain ».

Unité de pression de gaz : en m d'eau

Unité par défaut : « rien » ou 0 => « Unité de charge et d'altitude »
Unités abrégées : Pa , Bar, mbar, atmos, hPa, kPa

« atmos » est l'abréviation de « atmosphère »

On rappelle les coefficients de conversion entre les « mètres d'eau douce », les Pascals, les bars et les atmosphères :

1 mètre d'eau = 9806.7 Pa
1 bar = 10^{+5} Pa = 10.197 mètres d'eau.
1 atmosphère = 1013.25 mb = 1.01325 bar = 10.33211 mètres d'eau.

8.3. Paramètres pour les pas de temps de modèle et les sous-pas de temps

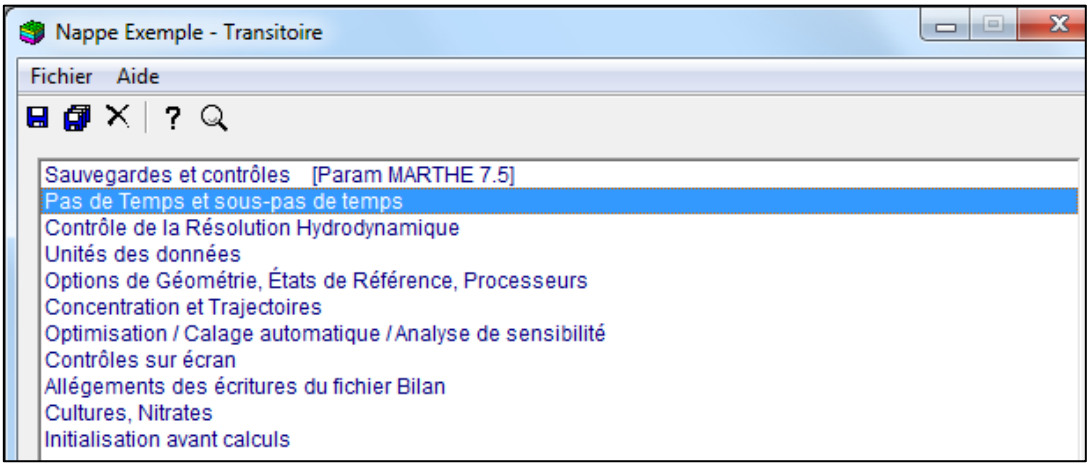


Figure 41 - Paramètres généraux : Paragraphe des pas de temps et sous-pas de temps.

Au cours d'une simulation en régime transitoire, le temps est découpé en « pas de temps de modèle ».

Ces pas de temps de modèle sont définis par leur « date de fin de pas de temps », c'est-à-dire par la date à laquelle ils se terminent. Un pas de temps de modèle commence donc à la date de fin du pas de temps précédent et se termine à sa propre date de fin de pas de temps.

Les pas de temps de modèle sont définis dans le fichier des « Pas de temps », d'extension [.pastp]

Le pas de temps numéro zéro correspond au début du calcul. Si on a demandé des itérations pour le calcul en régime permanent : ce pas de temps numéro zéro correspond au régime permanent initial.

À n'importe quel pas de temps de modèle on peut :

- Modifier des valeurs de champs de données en début de pas de temps, donc avant calcul.
- Sauvegarder des champs de données calculés en fin de pas de temps.
- Les données sauvegardées dans les historiques sont les valeurs calculées à la fin de chacun des pas de temps de modèle.

Pour des raisons numériques, ces pas de temps de modèle peuvent être découpés en plusieurs sous-pas de temps de calcul (tous de même durée dans un pas de temps donné).

Les paramètres de ce paragraphe de pas de temps et de sous-pas de temps sont les suivants :

- Nombre maximal possible de pas de temps de modèle en régime transitoire.
- Nombre de sous-pas de temps de modèle.
- Numéro du pas de temps (réel) pour un redémarrage.

Nombre maximal possible de pas de temps de modèle en régime transitoire

Valeur par défaut : 0 => Tous les pas de temps du fichier des pas de temps

Ce paramètre est utilisé uniquement en régime transitoire.
C'est le nombre maximal de pas de temps de modèle qui sera pris en compte.

Par opposition à un éventuel sous-pas de temps interne de calcul, un « pas de temps de modèle » est un vrai pas de temps auquel on peut :

- Introduire des modifications de champ,
- ou bien demander des sauvegardes.

Valeurs de ce paramètre :

- 0 => Tous les pas de temps du fichier des « Pas de temps » sont pris en compte : c'est la valeur par défaut.
- -1 => Seul le pas de temps n°0 est pris en compte.
- n => Seuls les « n » premiers pas de temps du fichier des « Pas de temps »sont pris en compte.
  On peut ainsi, par exemple, faire une vérification sur les 3 premiers pas de temps en donnant la valeur 3.

Nombre de sous-pas de temps de modèle

Valeur par défaut : 0 => Pas de sous-pas de temps de modèle

Par ce paramètre Il est possible de découper chaque pas de temps de modèle en un nombre uniforme de sous-pas de temps.

Par exemple ; si on donne la valeur 5 et s'il y a 10 pas de temps de modèle :

⇨ Le calcul s'effectue comme s'il y avait 50 pas de temps de modèle chacun ayant une durée 5 fois plus courte. En revanche le découpage en sous-pas de temps n'affecte pas la prise en compte d'éventuels fichiers d'« évolution temporelle ».

Numéro du pas de temps (réel) pour un redémarrage

Valeur par défaut : 0 => Pas de redémarrage

Si on donne un numéro supérieur à 0, la simulation redémarre directement à ce pas de temps en sautant les calculs des pas précédents.

Il s'agit du numéro réel du pas de temps, tel qu'il apparaît dans le fichier des pas de temps [.pastp], indépendamment d'éventuels sous-pas de temps.

Il faut, bien entendu, que les états initiaux du domaine (champ de charge hydraulique, champ de concentration, etc.) à ce pas de temps aient été définis :

- soit dans le fichier projet [.rma],
- soit dans le fichier [.pastp] à ce pas de temps.

8.4. Options de Géométrie, États de Référence, Processeurs

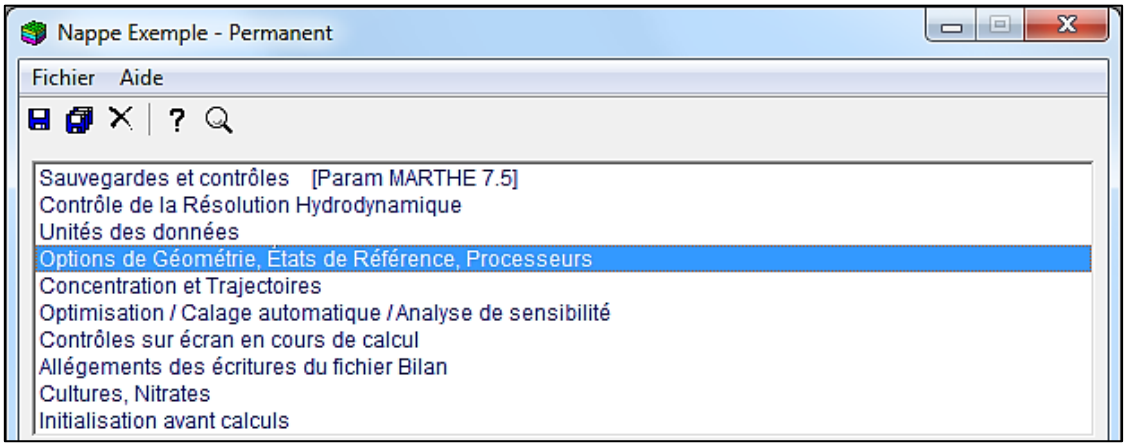


Figure 42 - Fichier des paramètres généraux : Paragraphe Options de Géométrie, etc.

Les paramètres relatifs à ce paragraphe sont les suivants :

- Épaisseur de la tranche de coupe
- État initial lu
- Orientation du maillage
- Angle correcteur de la direction de la pesanteur (degrés)
- Effet de l'angle correcteur de la direction de la pesanteur
- Calcul à symétrie cylindrique. *[obsolète. Utiliser plutôt un maillage radial en coupe]*.
- Viscosité (dynamique) de l'eau si on utilise en entrée des perméabilités intrinsèques
- Compressibilité de l'eau
- Nombre de processeurs à utiliser
- Couplage avec le coupleur OpenPalm (0=Non ; 1=Couplage Météo)

Épaisseur de la tranche de coupe

Elle est exprimée en unité utilisateur de coordonnées de maillage ou bien en degrés d'angle.

- En cas de coupe verticale :
  - ⇨ c'est l'épaisseur de la tranche de coupe : en unités utilisateur de coordonnée de maillage
- En cas de pseudo-coupe verticale (schéma de calcul en Zone Non Saturée) : C'est une sécurité, en effet :
  - ⇨ Il faut définir la tranche par la Topographie et le Substratum (ex: Altitude de Topographie = 0 et Altitude de Substratum = -100 cm).
  - ⇨ Attention : comme on considère généralement une pseudo-coupe verticale d'épaisseur uniforme, il est fortement conseillé de définir une « Altitude Topographique » uniforme et une « Altitude de substratum » uniforme.
- En cas de maillage Radial en coupe verticale (*ou bien de maillage à symétrie cylindrique [obsolescent]*) :
  - ⇨ C'est l'angle du secteur de coupe en degrés [par défaut : 0 => 360°]

État initial lu

Ce paramètre concerne uniquement les calculs avec schéma en Zone Non Saturée ou avec effets densitaires.

Orientation du maillage

Ce paramètre définit l'orientation du maillage :

Valeur par défaut : « rien » ou 0 => Orientation standard : Pesanteur sur Oz.

« Coup_Vert » = « Vertic » = « Coupe » = 1 => Coupe verticale : Pesanteur sur Oy, dirigée vers le bas.

Angle correcteur de la direction de la pesanteur (degrés)

Il est pris en compte uniquement en cas de coupe verticale (pesanteur sur l'axe Oy).

L'angle est donné en degrés, dans le sens trigonométrique (sens inverse des aiguilles d'une montre).

Par ex : avec un angle de +20°, le maillage penche vers la droite (Figure 43, en haut).

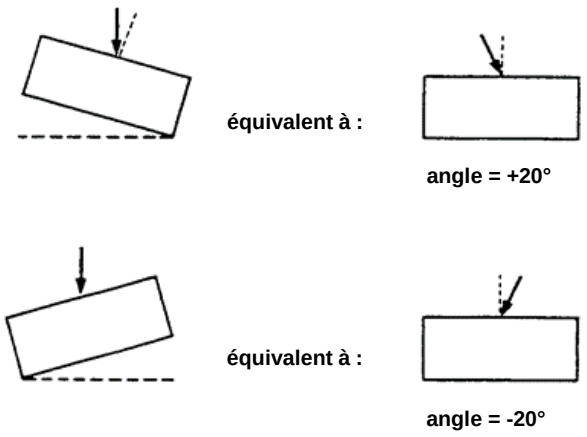


Figure 43 - Angle correcteur de la direction de la pesanteur.

Effet de l'angle correcteur de la direction de la pesanteur

Effet de l'angle correcteur de la direction de la pesanteur (Figure 44).

Ce paramètre est pris en compte uniquement si :

- On a précisé une orientation de maillage en coupe verticale
- Et on a donné un angle correcteur de la direction de la pesanteur

La valeur de ce paramètre « effet de l'angle correcteur » est :

- 0= Rotation du maillage => maillage Orthonormé.

- 1= Rotation du maillage => maillage en Escalier
  Les verticales restent verticales : (équivalent à des parallélogrammes).

Dans les deux cas (orthonormé ou en escalier), les mailles sont des parallélépipèdes de dimensions dx, dy et dz. Les distances entre deux nœuds (centres de mailles) adjacents i et j sont :

Distance = (dxi + dxj) / 2 avec : x = X , Y ou Z

Seules les altitudes sont calculées différemment et dépendent de l'angle.

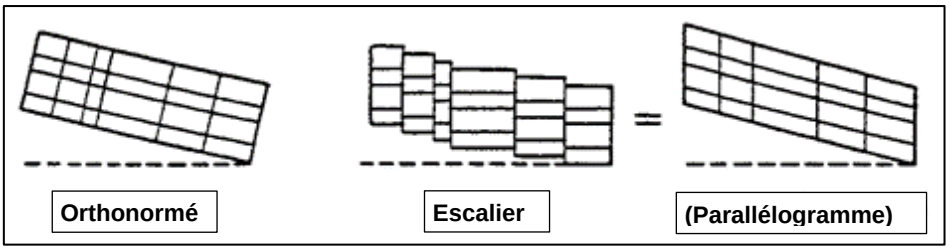


Figure 44 - Effet de l'angle correcteur de la direction de la pesanteur.

Calcul à symétrie cylindrique

Il s'agit ici de « symétrie cylindrique » et non pas de maillage radial.

Il est souvent préférable d'utiliser un maillage radial en coupe verticale. Le choix d'un tel maillage radial se fait dans le fichier « Couches aquifères et Gigognes ».

Valeur par défaut : « rien » ou 0 => Pas de coordonnées cylindriques.
Calcul classique en coordonnées cartésiennes (ou en radial).
« Cylind » = 1 => Maillage cylindrique : Le maillage (x,y) correspond à (r,y)
ou bien à (r,z) pour un secteur d'angle donné (0 à 360°).

La prise en compte du secteur d'angle se fait par génération automatique d'une « épaisseur de couche » égale à : r x alpha, « r » étant le rayon et « alpha » étant le « secteur d'angle ».

Avec cette géométrie cylindrique : La nappe doit être partout en charge, ou bien le calcul doit être réalisé avec un schéma de « Zone Non Saturée ».

Le secteur d'angle est défini plus haut par l'« Épaisseur de tranche de coupe » (dont la valeur par défaut est 360°).

Viscosité (dynamique) de l'eau si on utilise en entrée des perméabilités intrinsèques

C'est la « Viscosité Dynamique » de l'eau en Pa.s, généralement notée « μ » (mu) : Elle est utilisée uniquement si on a choisi l'option « Perméabilité intrinsèque » pour la perméabilité en entrée. (Pa.s ⇔ kg/m/s).

Valeur par défaut : 0 => Viscosité de l'eau douce à 20°C = $1.002\ 10^{-3}$ Pa.s

Remarque : Eau douce à 10° C => $1.307\ 10^{-3}$ Pa.s

: 1 Poise = 0.1 Pa.s (=> eau à 20°C ≈ 1 centiPoise).

: Viscosité Dynamique = ρ_w x Viscosité Cinématique (« nu »)
=> Viscosité Dynamique = 1000 x nu (environ).

Compressibilité de l'eau

Ce paramètre est utilisé uniquement si on utilise en entrée la compressibilité des pores, au lieu du coefficient d'emmagasinement captif.
C'est la compressibilité de l'eau, exprimée en **m^{-1}**.

Valeur par défaut : 0 => 5 10^{-6} m^{-1}.

Nombre de processeurs à utiliser [0 = Tous, -1 = Tous sauf 1]

Uniquement pour les calculs sur les systèmes multi-processeurs ou multi-cœurs.

Dans cette version seuls les calculs géochimiques avec PHREEQC sont parallélisés.

Couplage avec le coupleur OpenPalm (0=Non ; 1=Couplage Météo)

Mode de fonctionnement spécial avec couplage des calculs météorologiques avec le coupleur Open_PALM.

Valeur par défaut : 0 => Pas de couplage (cas général).
Option : 1 => Couplage.

8.5. Contrôle de la résolution de l'hydrodynamique (calcul du champ de charge hydraulique et du champ de débit)

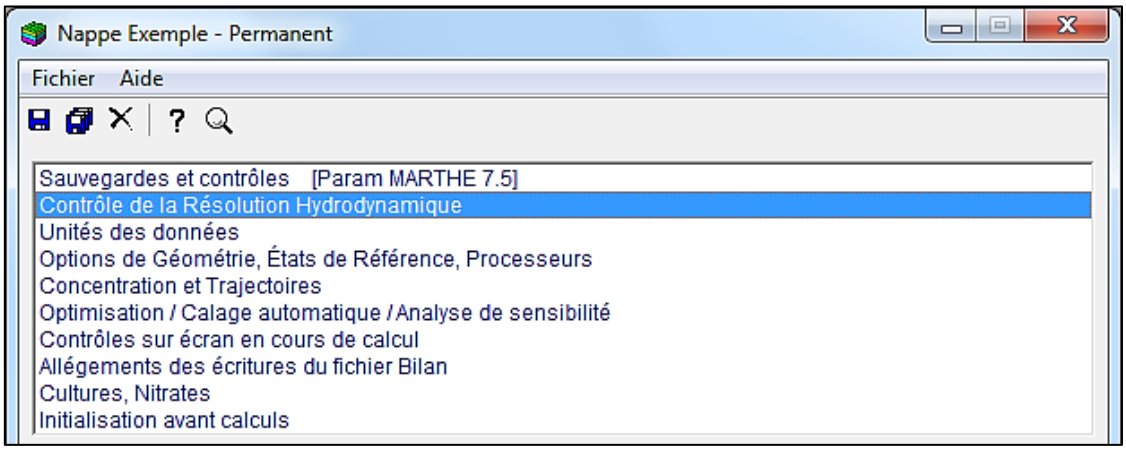


Figure 45 - Paramètres généraux : Paragraphe de la résolution de l'hydrodynamique.

Les paramètres de ce chapitre contrôlent les calculs de l'hydrodynamique (appelés aussi calculs de l'hydraulique). Il s'agit du calcul des champs de charge hydraulique, de débit d'eau et de vitesse d'écoulement.

Ces paramètres ont été rassemblés en 3 groupes :

- Les paramètres les plus classiques qui doivent le plus souvent être définis :
  - Régime de l'Hydrodynamique
  - Nombre maximal d'Itérations pour les pas de temps suivant le pas n°0
  - Nombre maximal d'Itérations pour le pas de temps n°0
  - Variation moyenne de charge hydraulique entre 2 itérations pour convergence
  - Coefficient de sous-relaxation des calculs
  - Nombre d'Itérations internes pour le solveur pour les calculs hydrodynamiques
  - Périodicité des calculs hydrodynamiques

- Des paramètres plus avancés qui peuvent souvent être laissés à leur valeur par défaut :
  - Pondération de deux perméabilités voisines
  - Solveur utilisé pour les calculs hydrodynamiques
  - Résolution compacte (rapide) par gradients conjugués (Eisenstat)
  - Schéma de calcul pour les dénoyages de nappe
  - Saturation en eau minimale (en %) lors des dénoyages en schéma pseudo-zns
  - Saturation en eau minimale (%) pour la limitation des pompages
  - Hauteur de garde au-dessus des crépines pour limitation des pompages
  - Erreur maximale de bilan de débit pour la convergence des itérations externes
  - Type de critère de bilan de débits : 0 = Suffisant ; 1 = Doit en plus être satisfait

- Des paramètres d'un usage peu fréquent ou bien pour une utilisation avancée :
  - Rapport = (Épaisseur minimale de dénoyage) / (Épaisseur moyenne de couche)
  - Perméabilité verticale nominale si schéma Pseudo-Zns
  - Fichier de coefficients d'échange ou de fractures verticales conductrices
  - Type de coefficients d'échange dans le fichier
  - Débit résiduel maximal pour convergence interne du solveur GMG

- Index de lissage de grille du solveur GMG
- Index de pré-conditionnement du solveur GMG [Défaut=0]
- Schéma Newton-Raphson

8.5.1. Paramètres classiques pour les calculs de l'hydrodynamique

Régime de l'Hydrodynamique

Valeur par défaut : « rien » ou 0 => Régime hydrodynamique Transitoire

C'est le type de régime des calculs hydrodynamiques :

« Transit » = 0 = Régime hydrodynamique Transitoire

« Perman » = 1 = Régime hydrodynamique Permanent,
c'est-à-dire sans emmagasinement de fluide (mais la simulation peut cependant être en régime transitoire, par exemple si on modélise du transport transitoire).

Nombre maximal d'Itérations pour les pas de temps suivant le pas n°0 [Régime Transitoire]

C'est le nombre maximal d'itérations (externes) autorisé pour les pas de temps qui suivent le pas de temps n°0.

Ces pas de temps se rapportent au régime transitoire (même si l'hydrodynamique est en régime hydrodynamique permanent, car il peut y avoir par exemple du transport transitoire).

En nappe captive : il suffit d'1 seule itération externe, puisque les coefficients d'échanges (les transmissivités équivalentes) ne dépendent pas de la charge hydraulique. Cependant, quand il y a un réseau de rivières avec calcul du niveau d'eau dans la rivière il faut plusieurs itérations car les échanges nappe-rivière dépendent du niveau de l'eau dans la rivière.

Remarque : Il n'y a pas de valeur par défaut : si on met 0 itération, l'hydraulique ne sera pas recalculée au cours des pas de temps suivant le pas de temps n°0

Nombre maximal d'Itérations pour le pas de temps n°0 [Régime Permanent Initial]

Valeur par défaut : 0 => Pas de régime hydrodynamique permanent initial

C'est le nombre maximal d'itérations (externes) autorisé pour le pas de temps de modèle n°0. Typiquement, c'est le nombre d'itérations pour calculer le régime permanent.

Si on fait un calcul en régime transitoire, sans régime permanent initial :
- ⇨ Donner la valeur zéro.

Si on fait un calcul en régime permanent :
- ⇨ Donner un nombre d'itérations supérieur à 0.
  En nappe captive : il suffit d'1 seule itération externe.

Variation moyenne de charge hydraulique entre 2 itérations pour convergence

Valeur par défaut : 0 => 10^{-8} unité utilisateur de charge hydraulique.
Valeur conseillée : de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-7}.

C'est le critère d'arrêt du calcul itératif de la charge hydraulique.

Le calcul itératif est arrêté quand la variation moyenne, en valeur absolue, des charges hydrauliques calculées d'une itération à la suivante est inférieure à ce critère.
Par sécurité le calcul itératif est de toute façon arrêté quand le nombre maximal prévu d'itérations a été effectué.

Attention : il s'agit bien d'un écart entre deux itérations successives et non pas d'une erreur ou d'une précision sur la charge hydraulique calculée.

Coefficient de sous-relaxation des calculs

Valeur par défaut : 0 => Pas de sous-relaxation

- Systèmes linéaires (nappes captives) : Laisser à 0 => Pas de sous-relaxation.
- Systèmes non linéaires (nappes libres, ZNS), si nécessaire : 0.7 à 0.3
- Systèmes très non linéaires (Multiphasique ...) : 0.3 à 0.001

Remarque : La valeur du coefficient de sous-relaxation doit toujours être inférieure ou égale à 1.

L'interprétation du coefficient de sous-relaxation est la suivante, pour le calcul itératif de la charge hydraulique H_k à l'itération « k » dans une maille du domaine :

Soient :
- Relax = Coefficient de sous-relaxation
- H_k = Charge hydraulique à la nouvelle itération k
- H_{k-1} = Charge hydraulique calculée à l'itération précédente
- H_{cal} = Charge hydraulique calculée par résolution du système d'équations (à l'itération k).
- $dH_{cal} = H_{cal} - H_{k-1}$

$$H_k = H_{k-1} + Relax \,.\, (H_{cal} - H_{k-1})$$

c'est-à-dire :

$$H_k = H_{k-1} + Relax \,.\, dH_{cal}$$

Donc, par défaut, quand Relax = 1 : => $H_k = H_{cal}$ (*pas de sous-relaxation*)
Si par exemple Relax = 0.3 : => $H_k = H_{k-1} + 30\% \,.\, dH_{cal}$

Les calculs sont d'autant plus stabilisés (et ralentis) que **Relax** est petit. Le nombre d'itérations devra donc être augmenté si on utilise un coefficient **Relax** très inférieur à 1. Le nombre d'itérations devra au moins être égal à **Nc** défini par la relation :

$$Nc = -1.7 / Log_{10}(1 - Relax)$$

Ceci conduit aux valeurs suivantes du nombre minimal d'itérations :

Coefficient de relaxation	0.7	0.5	0.3	0.1	0.05	0.01	0.001
Nombre min. d'itérations	3	6	11	37	76	390	3900

Nombre d'Itérations internes pour le solveur pour les calculs hydrodynamiques

Valeur par défaut : 0 => 10 itérations internes avec le solveur Cholesky
20 itérations avec les autres solveurs

C'est le nombre maximal d'itérations (internes) pour la résolution matricielle (à chaque itération externe).

- En nappe toujours captive : on choisit 1 (ou quelques) itération(s) externes, et un grand nombre d'itérations Internes (30 , 50 , 1000, …)
- En nappe Libre, ou avec un schéma de calcul en Zone Non Saturée (non-linéaire) : on choisit les ordres de grandeur suivants :
  - 10 itérations internes (valeur par défaut) pour un petit maillage.
  - 20 ou 50 pour un maillage de 10 000 mailles.
  - 100 itérations pour un plus grand maillage (50 000 à 150 000 mailles).

Le nombre d'itérations nécessaire est plus grand si le champ de perméabilité est très hétérogène.

On pourra contrôler *a posteriori* si ce nombre maximal est atteint.

Périodicité des calculs hydrodynamiques

Valeur par défaut : 0 => Calcul hydrodynamique à tous les pas de temps.

Ce paramètre permet d'effectuer les calculs hydrodynamiques (calcul de la charge hydraulique, etc.) uniquement tous les « n » pas de temps de modèle (n > 1).

Ceci permet par exemple de faire un calcul de bilan hydroclimatique, et/ou un calcul de transport tous les pas de temps de 1 jour, mais de réactualiser la piézométrie uniquement toutes les semaines (« k » = 7).

Valeur de ce paramètre :

- 0 => calcul tous les pas de temps.
- k => Calcul lors du pas de temps n°1 puis tous les « k » pas de temps.

8.5.2. Paramètres plus avancés pour les calculs de l'hydrodynamique

Ces paramètres qui contrôlent les calculs hydrodynamiques peuvent souvent être laissés à leur valeur par défaut (« 0 » ou « rien »), mais ils peuvent être modifiés si nécessaire.

Pondération de deux perméabilités voisines

C'est la pondération des perméabilités de 2 mailles adjacentes.

Valeur par défaut : 0 => Méthode automatique, souvent optimale

- « Opti » = 0 = Pondération Optimale choisie automatiquement selon le schéma hydraulique.
- « Geom = 1 = Moyenne Géométrique (Optimal en calcul en Zone Non Saturée).
- « Amont » = 3 = Schéma Amont : (Optimal en calcul Multiphasique).
- « Harmon » = 4 = Moyenne Harmonique (Optimal en nappe captive ou libre).
- « Arithm » = 5 = Moyenne Arithmétique ... (utilisation exceptionnelle).

Solveur utilisé pour les calculs hydrodynamiques

Valeur par défaut : 0 <=> « Choles » = Cholesky

Choix du solveur pour la résolution Hydrodynamique :

- « Choles » = 0 = Gradients Conjugués Cholesky (solveur par défaut).
- « Eisen » = 6 = Méthode Eisenstat (Gradients Conjugués) <= conseillée.
- « GMG » = 7 = Méthode GMG (Géométrique Multi-Grid) : pour grilles régulières (en régime permanent).
- « Polyn » =3 = Gradients Conjugués, préconditionnement Polynomial. (*Pour mémoire*)
- « Ortho » = 5 = Méthode Orthomin (Gradients Conjugués non symétriques). (*Pour mémoire car méthode peu adaptée*).

Le solveur Eisenstat est généralement très rapide. Le solveur Cholesky est également rapide et robuste.

Lors de calculs diphasiques, le solveur Eisenstat n'est pas utilisable avec certains schémas numériques.

Le solveur GMG est très rapide pour de gros maillages, mais à condition d'avoir très peu d'itérations externes. En pratique, il est utilisable uniquement en nappe captive (1 seule itération externe)

Résolution compacte (rapide) par gradients conjugués (Eisenstat)

Valeur par défaut : 0 => Résolution compacte

La résolution compacte pour l'hydrodynamique permet d'accélérer significativement les calculs quand il y a de nombreuses mailles inactives.

Dans cette version : cette option est implémentée uniquement avec le solveur Eisenstat.

Valeurs possibles :

- 0 = Oui : Résolution compacte (valeur par défaut).

- -1 = Non : Pas de résolution compacte.

Schéma pour les dénoyages de mailles (hors schéma en Zone Non Saturée)

Valeur par défaut : 0 => Calcul en Pseudo Zone Non Saturée. (Pseudo-Zns)

- « Pseudo » = 0 = Pseudo-Zns (Pseudo Zone Non Saturée) : *conseillé*.
- « Nap_Libre » = -1 = Schéma « en nappe libre » : *déconseillé*.
- « Zns_Auto » = 2 = Schéma « ZNS_automatique »

Ce paramètre ne concerne pas les calculs en « Zone Non Saturée ».

- Calculs Hydrodynamiques avec le schéma Pseudo-Non Saturé (schéma par défaut) :

  Avec ce schéma, la charge hydraulique peut être inférieure à l'altitude du substratum de la maille, ce qui correspond à une succion.

  Il n'y a alors jamais de « dénoyage » mais une saturation en eau minimale qui induit une transmissivité minimale.

  Ce schéma est conseillé dans tous les cas où des dénoyages sont possibles, particulièrement en 3D ou multicouche.

  Pour éviter de désaturer la nappe dans des mailles contenant des pompages, ce qui n'est pas physique : **il est conseillé de définir également une** « Saturation en eau minimale pour la limitation des pompages » (voir plus bas).

- Schéma de calcul « ZNS_automatique » = Schéma de calcul en Zone Non Saturée automatique équivalent.

- Calculs Hydrodynamiques avec schéma « Nappe libre » (*schéma déconseillé*) :

  Avec ce schéma, la charge hydraulique ne peut pas être inférieure à l'altitude du substratum de la maille. Si la charge hydraulique tend à être inférieure à l'altitude du substratum, elle est légèrement remontée pour permettre, dans certaines conditions, des échanges avec les mailles voisines. Ce schéma rend le plus souvent la convergence plus difficile et moins stable qu'avec le schéma « Pseudo-Non Saturé » qui est le schéma par défaut.

Saturation en eau minimale (en %) lors des dénoyages en schéma pseudo-zns

Valeur par défaut : 0 => 1 (%)
Valeur conseillée : de l'ordre de 1 (%)

Pour les calculs hydrodynamiques en Pseudo-Non Saturé :
Ce paramètre définit une saturation en eau minimale, pour calculer les transmissivités d'échange entre une maille dénoyée et ses mailles voisines.

La « saturation en eau » est l'épaisseur en eau divisée par l'épaisseur de la couche.

Cette saturation en eau minimale est exprimée en % :
100% = complètement saturé ; 0% = complètement asséché.

Saturation en eau minimale (%) pour la limitation des pompages

Valeur par défaut : 0 => 20 % de saturation en eau minimale.
Valeur conseillée : 20 %.

Valeur => Valeur de la saturation en eau minimale, exprimée en %.
Donner « N » (sans les guillemets) pour fixer 0 % de saturation en eau minimale.

Ce paramètre est utilisé uniquement s'il n'y a pas de fichier d'« Altitude limite des mailles pompées ».

La « saturation en eau » est l'épaisseur en eau divisée par l'épaisseur de la couche.

Quand la saturation en eau dans la maille est inférieure à la « saturation en eau minimale pour les pompages », le débit pompé est diminué automatiquement.

- S'il n'y a pas de « Hauteur de garde au-dessus des crépines » :
  => Le débit diminue linéairement :
  - Depuis sa valeur nominale : pour une charge hydraulique égale à :
    Substratum + 0.01 x Saturat_mini x Épaisseur_de_Couche_Locale.
  - Jusqu'à : un débit de pompage nul pour une charge hydraulique égale à l'altitude du Substratum de la maille.

- S'il y a une « Hauteur de garde au-dessus des crépines » :
  => Le débit diminue :
  - Depuis sa valeur nominale : pour une charge hydraulique égale à :
    Substratum + 0.01 x Saturat_mini x Épaisseur + Hauteur de Garde.
  - Jusqu'à : un débit de pompage nul pour une charge hydraulique égale au Substratum + 0.01 x Saturat_mini x Épaisseur.

Hauteur de garde au-dessus des crépines pour limitation des pompages

Valeur par défaut : 0 (ou « rien ») => 15 % de l'épaisseur de la maille.

Cette hauteur de garde est utilisée pour la limitation du débit de pompage selon la charge hydraulique.

Il faut alors définir un champ d'« Altitude limite des mailles pompées » qui est l'altitude en dessous de laquelle le débit pompé s'annule. Cette altitude correspond à l'altitude du bas des crépines du forage.
(Ou bien il faut définir une « Saturation en eau minimale pour la limitation des pompages »).

- L'ouvrage est pompé à son débit nominal tant que la charge hydraulique est supérieure à : (Altitude limite + Hauteur de Garde des crépines)
- En dessous de cette charge hydraulique, le débit de pompage diminue linéairement au prorata de la hauteur d'eau au-dessus de l'Altitude limite.
- Le débit de pompage est égal à 0 lorsque : Charge hydraulique = Altitude limite.

La « Hauteur de garde » est donnée en unité utilisateur de charge et d'altitude

Remarque : Si on fixe une « Hauteur de garde » est < 0 => ce paramètre sera interprété par MARTHE comme un pourcentage de l'épaisseur de la maille.

Remarque : Il faut donner « N » ou « Zéro » pour fixer une valeur de 0 %

Erreur maximale de bilan de débit pour la convergence des itérations externes

Valeur par défaut : 0 (ou « rien ») => Pas d'effet de ce critère.

C'est un critère sur la somme des débits résiduels, pour l'arrêt du calcul itératif de la charge hydraulique :

Les itérations externes de calcul sont arrêtées quand la somme des débits résiduels, (en valeur absolue) est inférieure à ce seuil.
Voir le paramètre suivant pour le mode de prise en compte.

Ce seuil de convergence sur les débits résiduels est donné en unité utilisateur de débit.

Remarque : Le critère de convergence sur la variation de charge hydraulique contrôle toujours l'arrêt des itérations internes, en particulier, pour les nappes captives ... (qui n'utilisent en général qu'une seule itération externe).

Type de critère sur les débits résiduels

Ce paramètre précise comment interpréter le paramètre précédent de critère de convergence du bilan de débit

Selon la valeur de ce paramètre, pour arrêter les itérations externes :

- 0 ou « rien » => Il suffit de respecter le critère de bilan de débit.
- 1 => Il faut respecter les 2 critères : le critère sur la variation de charge hydraulique + le critère sur les débits résiduels.

Dans les deux cas cependant, le critère sur la variation de charge hydraulique contrôle toujours l'arrêt des itérations internes, en particulier pour les nappes captives ... (1 seule itération externe).

8.5.3. Paramètres très avancés, ou d'usage moins fréquent pour les calculs de l'hydrodynamique

Ces paramètres qui contrôlent les calculs hydrodynamiques sont d'un usage peu fréquent ou bien pour une utilisation avancée. Ils peuvent le plus souvent être laissés à leur valeur par défaut (« 0 » ou « rien »), mais peuvent exceptionnellement être modifiés.

Rapport = (Épaisseur mini de dénoyage) / (Épaisseur moyenne de couche)

Valeur par défaut : 0 => $5\ 10^{-3}$

Paramètre utilisé principalement avec l'option de calcul « en nappe libre » (*option déconseillée*)

En cas de dénoyage, ce paramètre donne alors le ratio :
Épaisseur mouillée minimale / Épaisseur moyenne de la couche.

Remarque : Il est généralement plus efficace d'utiliser l'option de calcul en « Pseudo-Non-Saturé » définie plus bas.

- Avec l'option « Pseudo-Non-Saturé » : ce paramètre n'a pas besoin d'être défini.
- Avec l'option « Zone-Non Saturée » : ce paramètre n'est pas utilisé.

Perméabilité verticale nominale si schéma Pseudo-Zns

Valeur par défaut : 0 => Non : La perméabilité pour les échanges verticaux dépend de la saturation en eau.

Option avancée utilisée uniquement en 3D avec le schéma de calcul Pseudo-Zns.

Valeurs possibles :
- 0 = Non : La perméabilité pour les échanges verticaux dépend de la saturation en eau. C'est la valeur par défaut.
  La perméabilité verticale est multipliée par le pourcentage de saturation
  (Ce schéma est plus proche du schéma de calcul en « Zone Non Saturée »).
- 1 = Oui : La perméabilité pour les échanges verticaux est prise à sa valeur nominale.
  (Ce schéma est plus proche du schéma « en nappe libre »).

Fichier de coefficients d'échange ou de fractures verticales conductrices

Option Avancée :
- 0 = Pas de fichier de coefficients d'échange ni de fractures verticales.
- 1 = Fichier de coefficients d'échange.
- 2 = Fichier de fractures verticales conductrices.

Les Fractures verticales dont définies dans un fichier de « fractures » décrivant :

- Leurs trace horizontale (couples X,Y),
- Leur transmissivités,
- Les couches affectées.

Il n'est pas possible de définir des fractures « peu conductrices ».

En revanche, il est possible de définir des « liaisons étanches » en donnant une transmissivité de fracture = 0.

Type de fichier de coefficients d'échange

Option Avancée : si on utilise un fichier de coefficients d'échange
- 0 = les coefficients d'échange du fichier sont des Transmissivités.
- 1 = les coefficients d'échange du fichier sont des Perméabilités.

Débit résiduel maximal pour convergence interne du solveur GMG

Valeur par défaut : 10^{-4} unité utilisateur de débit.

Paramètre avancé : ce solveur GMG est peu fréquemment utilisé.

C'est le critère d'arrêt de la résolution matricielle du solveur GMG.

Les calculs itératifs de la résolution interne sont arrêtés quand la somme des débits résiduels est inférieure à ce seuil.

Index de lissage de grille du solveur GMG

Paramètre avancé : ce solveur GMG est peu fréquemment utilisé.

C'est le type de lissage du solveur GMG sur une grille plus grossière.

- 0 = Dans toutes les directions (Colonnes, Lignes, et Plans).
- 1 = Sur les Colonnes et les Lignes (conseillé en 3D avec peu de couches).
- 2 = Sur les Lignes et les Couches.
- 3 = Sur les Colonnes et les Couches.
- 4 = Aucun lissage (=> dégénère en gradient conjugués classiques).

Index de pré-conditionnement du solveur GMG [Défaut=0]

Paramètre avancé : ce solveur GMG est peu fréquemment utilisé.

- 0 = Pré-conditionnement ILU (Incomplete Lower Upper) : Conseillé
- 1 = Pré-conditionnement SGS (Symmetric Gauss Seidel)

(La méthode SGS nécessite un peu moins de mémoire mais elle est moins robuste et peut échouer).

Schéma Newton-Raphson

Option Avancée, disponible uniquement pour les calculs en Zone Non Saturée.
Résultats ... non garantis

- 0 = Non = Valeur par défaut
- 1 = Oui

8.6. Paramètres pour le calcul de trajectoires

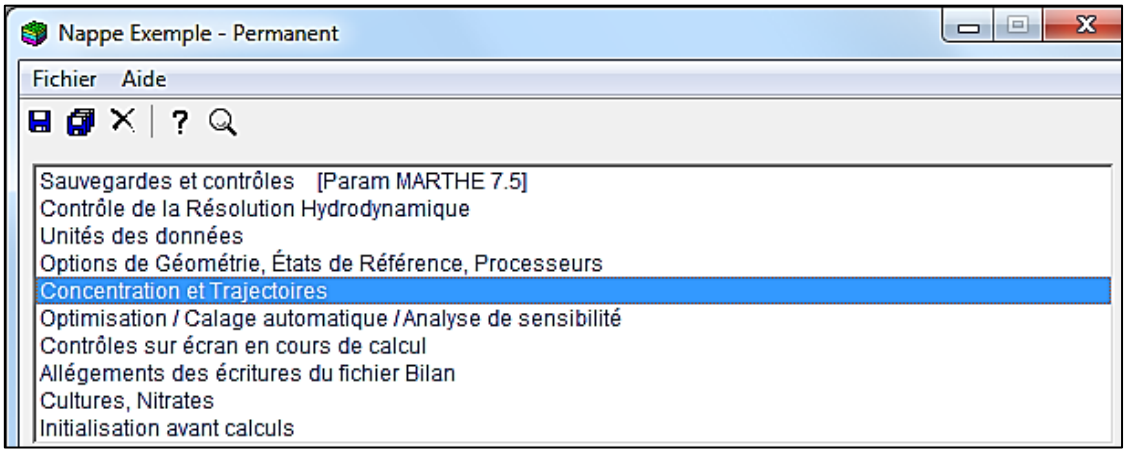


Figure 46 - Fichier des paramètres généraux : Paragraphe de concentration et trajectoires.

Les quelques paramètres contrôlant le calcul de trajectoires sont regroupés dans le paragraphe « Concentration et Trajectoires » du fichier des paramètres.

Les trajectoires calculées seront sauvegardées dans des fichiers de trajectoires.

Ce paragraphe rassemble à la fois les paramètres relatifs au transport de masse (décrits dans une autre notice d'utilisation) et ceux relatifs au calcul de trajectoires.

Par ailleurs, pour calculer des trajectoires, il faut également définir un fichier de « Points de départ de Trajectoires », d'extension [.deptr] et donner son nom dans le fichier projet de MARTHE.

Réciproquement : donner un fichier de « Points de départ de trajectoires » dans le fichier projet ne suffit pas pour calculer des trajectoires. Il faut aussi sélectionner l'option de « calcul de trajectoires » dans le fichier des paramètres.

Ceci est conforme à la philosophie du fichier projet de MARTHE qui liste les noms des fichiers pouvant potentiellement être utilisés au cours de la simulation, si les fonctionnalités sélectionnées les rendent nécessaires.

Les paramètres relatifs au calcul des trajectoires sont les suivants :

- Calcul de trajectoires
- Numéro du pas de temps du démarrage des trajectoires
- Nombre de points intermédiaires pour le dessin des trajectoires

Calcul de trajectoires

Valeur par défaut : « rien » ou 0 => Pas de calcul de trajectoires

1 = Calcul de trajectoires (directes)
« Invers » = -1 = Calcul de trajectoires inverses.

Dans les deux cas, trajectoires ou trajectoires inverses, le fichier de « Départs de trajectoires » doit avoir été défini dans le fichier projet.

Numéro du pas de temps du démarrage des trajectoires

Valeur par défaut : « rien » ou 0 => Départ des trajectoires au début de la simulation.

Si on donne un numéro supérieur à 0, le calcul des trajectoires démarrera à ce pas de temps.

Il s'agit du numéro réel du pas de temps, tel qu'il apparaît dans le fichier des pas de temps [.pastp], indépendamment des éventuels sous-pas de temps.

Nombre de points intermédiaires pour le dessin des trajectoires

Valeur par défaut : « rien » ou 0 => Pas de points intermédiaires.

Si on a demandé un calcul de trajectoires : ce paramètre peut permettre d'obtenir un dessin moins anguleux, en calculant des points intermédiaires en plus de ceux qui sont situés sur la grille du maillage. Les points d'intersections avec les mailles sont cependant inchangés, ainsi que les points singuliers.

Remarque : Si le nombre de Courant est largement supérieur à 1, donc si la distance parcourue au cours d'un pas de temps est très supérieure à une dimension de la maille, il faut choisir un grand nombre de points intermédiaires pour observer une un tracé moins anguleux.

8.7. Paramètres pour le bilan hydroclimatique

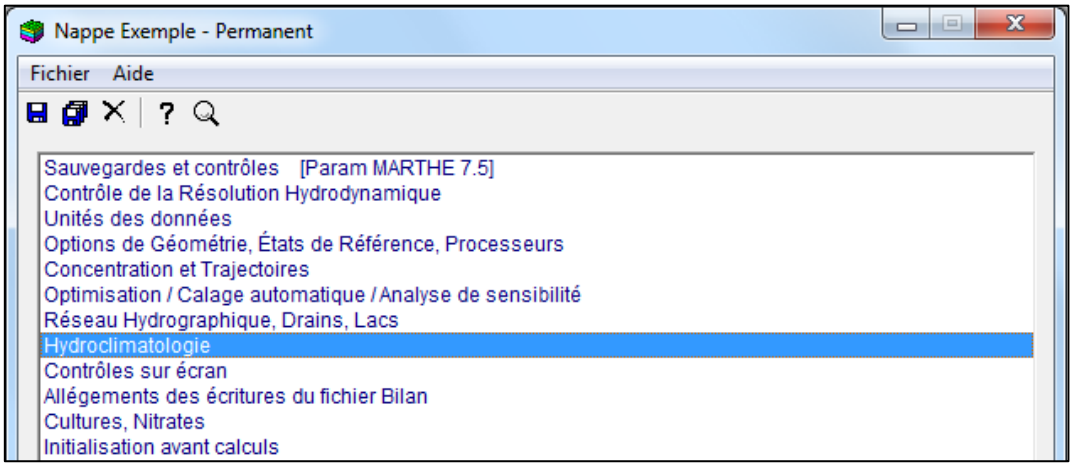


Figure 47 - Paramètres généraux : Paragraphe du bilan hydroclimatique.

Les paramètres de ce chapitre contrôlent les calculs du bilan hydroclimatique, c'est-à-dire du bilan entre les précipitations et l'évapotranspiration, et de la répartition entre le ruissellement et la recharge de la nappe.

Les paramètres relatifs au bilan hydroclimatique sont les suivants :

- Limitation de la reprise à la nappe par ETR.
- Sauvegarde des bilans hydroclimatiques par zones (fichier « bilandeb.txt »).
- Type de bilan hydroclimatique.
- Prise en compte de la fonte de la neige.
- Type de zones pour les Pluie, ETP, Recharge, etc.
- Apports hydroclimatiques limités au seul domaine aquifère.
- Infiltration du ruissellement s'il n'y a pas de réseau hydrographique.
- Transfert maille par maille du ruissellement avec retard possible.
- Nombre de zones climatiques dans les « fichiers Météo séquentiels ».
- Type des fichiers Météo séquentiels.
- Type des données des fichiers Météo binaires ou en « accès direct ».
- Numéro du pas de temps de fichier Météo <=> Pas de temps n°0.
- Option spécifiant si le fichier « Direction aval » contient le numéro d'élément de rivière associé au ruissellement.

Limitation de la reprise à la nappe par ETR

Attention : **Dans le cas général il est conseillé d'utiliser l'option 2** : « Pas de reprise à la nappe »

- 0 = Pas de limitation de la reprise à la nappe par ETR
  ⇨ Donc reprise à la nappe par ETR sans limite
  (*Usage exceptionnel : le plus souvent pour un de calcul en Zone Non Saturée*).
- 1 = Limitation de la reprise à la nappe par ETR :
  Deux paramètres spatialisés précisent cette limitation :
  - La profondeur limite de reprise maximale à la nappe par ETR.
  - La profondeur d'extinction de la reprise à la nappe par ETR.

  - Avec cette option, si on laisse les 2 paramètres (profondeur limite et profondeur d'extinction) à zéro, la reprise à la nappe est supprimée.
- **2** = Suppression de la reprise à la nappe par ETR.

  Suppression = ***Généralement conseillé***, sauf si on utilise un schéma de calcul en Zone Non Saturée.

Sauvegarde des bilans hydroclimatiques par zones (fichier bilandeb)

- 0 = Pas d'écriture des bilans hydroclimatiques par zones
- 1 = Écriture des bilans dans le fichier « bilandeb.txt »
  Attention : Le fichier « bilandeb.txt » peut alors être volumineux.

Type de bilan hydroclimatique

Valeur par défaut : 0 ⇔ Bilan hydroclimatique selon le schéma GARDÉNIA

- GARDEN = 0 = Bilan hydroclimatique selon le schéma GARDENIA.
- MODSUR = 1 = Bilan hydroclimatique selon le schéma MODSUR.
- Ruis_Rech= 2 = Lecture de Flux de Ruissellement et de Flux de Recharge pré-calculés, au lieu de la lecture de flux de Pluie et de flux d'ETP, et routage (éventuel) du Ruissellement et de la Recharge (GARDÉNIA)
- GR4 = 3 = Bilan hydroclimatique selon le schéma GR3/GR4.
- Ruis+Infil = 4 = Lecture de Flux de Ruissellement et de Flux de Recharge pré-calculés et passage de la somme Ruissellement + Recharge à travers GARDÉNIA

Si on choisit le schéma « Ruis_Rech » : MARTHE lira en entrée, à chaque pas de temps, un flux de ruissellement et un flux de recharge (ou de « drainage »), calculés par ailleurs. Dans ce cas le flux de ruissellement et le flux de recharge peuvent :

  - Soit être transférés directement respectivement vers le réseau hydrographique et vers la nappe.
  - Soit être « routés », c'est-à-dire retardés.
    Le routage de la recharge (ou infiltration) se fait par le « temps de ½ percolation ».
    Le routage du ruissellement se fait par l'intermédiaire de 2 paramètres :
    - Le temps de ½ retard du ruissellement.
    - La hauteur d'équi-ruissellement.
      Ces 2 paramètres sont décrits dans le paragraphe relatif paramètres du bilan hydroclimatique avec le schéma Ruissellement/Recharge.

    ⇨ Si la hauteur d'équi-ruissellement est égale à 0 => Il y aura un routage linéaire.
    ⇨ Si la hauteur d'équi-ruissellement est supérieure à 0 => Cette hauteur joue le rôle de seuil. Il y aura un routage quadratique quand la hauteur d'eau dans le réservoir de ruissellement est supérieure à ce seuil.

Voir en particulier comment définir les flux climatiques.

Prise en compte de la fonte de la neige

- 0 = Pas de prise en compte de la fonte de neige
  L'équivalent en eau de la neige est transformé en Pluie, ce qui correspond à une fonte immédiate.

- 1 = Prise en compte de la fonte de la neige :
  Il faut alors disposer de la température de l'air.

Type de zones pour les Pluie, ETP, Recharge, etc.

- 0 = Utilisation des « Zones de Sol » pour définir les données de Météo : Valeur par défaut
  (Flux de pluie, Flux d'ETP, Température de l'air, Flux de ruissellement, Flux de recharge)
  ⇨ Les « **Zones Climatiques** » sont alors les « Zones de Sol ».
  Option à réserver uniquement aux cas les plus simples).

- 1 = Utilisation de « Zones Météo », différentes des zones de Sol, pour définir les données de Météo.
  ⇨ Les « **Zones Climatiques** » sont alors les « Zones Météo ».
  Attention : Même dans ce cas d'utilisation de zones Météo => Les données climatiques sont prises en compte uniquement là où il y a une Zone de Sol différente de 0.
  Option conseillée : pour les modélisations de grande extension.

Apports hydroclimatiques limités au seul domaine aquifère

- 0 = Valeur par défaut : Apports hydroclimatiques non limités.
- 1 = Oui : Apports hydroclimatiques limités au domaine aquifère.

Par défaut, option = 0 : il peut y avoir des apports hydroclimatiques en dehors du domaine aquifère, à condition d'y avoir fixé un numéro de « Zone de Sol » différent de 0, et éventuellement fixé un numéro de « Zone Météo ». Il peut s'agir de précipitations sur une zone imperméable, par exemple des précipitations sur une montagne composée de roches quasiment imperméables.

L'option « 1 » est une option de sécurité : même s'il y a un numéro de « Zone de Sol » (et un numéro de « Zone Météo ») : les apports hydroclimatiques sont pris en compte uniquement dans les mailles affleurantes du domaine aquifère, c'est-à-dire uniquement dans les mailles affleurantes ayant une perméabilité différente de 0 et différente de 9999.

Infiltration du ruissellement s'il n'y a pas de réseau hydrographique

Ce paramètre définit le devenir du ruissellement quand la simulation ne prend pas en compte de réseau hydrographique.

- 0 = Valeur par défaut : Le ruissellement quitte le domaine modélisé. (il ne participe pas aux écoulements souterrains et superficiels).
- 1 = Oui : Le ruissellement est transformé en recharge de la nappe.

Remarque : Quand il y a un réseau hydrographique, le ruissellement est toujours transféré vers ce réseau comme expliqué dans le paragraphe « Devenir du ruissellement ».

Transfert maille par maille du ruissellement avec retard possible.

Ce schéma de calcul, plus lent, nécessite un fichier de directions de drainage.

Schéma déconseille. (Il n'est pas opérationnel avec les sous-maillages gigognes).

Nombre de zones climatiques dans les fichiers Météo séquentiels

Valeur par défaut : 0 zones.

C'est le nombre de valeurs qui sera lu, à chaque pas de temps, dans les fichiers « Météo Séquentiels ».

Ce nombre est :
- Le nombre de Zones Météo, si les données climatiques sont définies par Zones Météo.
- Le nombre de Zones de Sol, si les données climatiques sont définies par Zones de Sol.

Remarque : Si on fixe : un nombre de zones climatiques égal à 0 => Aucun fichier « Météo Séquentiel » ne sera pris en compte.

Type des fichiers Météo

Ce paramètre décrit le type de fichiers Météo, si la simulation utilise des fichiers Météo.

- 0 = Fichiers textes classiques (séquentiel).
- 1 = Fichiers en accès direct.
  (simple ou double précision, précisé par un paramètre).
- 2 = Fichiers binaires (simple ou double précision, précisé par un paramètre).

Type des données des fichiers Météo binaires ou en « accès direct »

Ce choix permet de préciser si les éventuels fichiers Météo binaires ou en accès direct comportent des valeurs écrites en « simple précision » ou bien en « double précision ».

- 0 = Simple Précision
- 1 = Double Précision

Ce choix s'applique uniquement aux fichiers en « accès direct » ou aux fichiers binaires. Les fichiers texte séquentiels ne sont pas concernés.

Numéro du pas de temps de fichier Météo <=> Pas de temps n°0

Valeur par défaut : 0 => Pas de décalage.

Décalage éventuel permettant, par exemple, de sauter les 365 premiers pas de temps des fichiers Météo séquentiels.

Utilisation particulière.

Option spécifiant que : le fichier « Direction aval » contient le numéro d'élément de rivière associé au ruissellement

Option par défaut : 0 => Non : pas de fichier de numéro d'« Élément de rivière associé au ruissellement ».

Cette option peut permettre d'éviter à MARTHE de recalculer en début de chaque simulation le numéro d'élément de rivière associé au ruissellement de chaque maille du domaine, et donc de diminuer les temps de calcul.

- 0 = Non : Le fichier de « Direction Aval pour le ruissellement », s'il existe, contient bien les directions aval pour le ruissellement.
- 1 = Oui : Le fichier de « Direction Aval » contient le numéro d'élément rivière associé au ruissellement (calculé au préalable).

Pour le routage du ruissellement vers le réseau hydrographique, en début de simulation, le code de calcul détermine pour chaque maille le numéro « d'élément de rivière de destination » associé au ruissellement. Cet élément de rivière associé au ruissellement est :

- Par défaut l'élément de rivière le plus proche de la maille,
- ou bien, si on donne des directions de drainage, l'élément de rivière situé à l'aval.

Pour éviter un recalcul à chaque simulation du numéro « d'élément de rivière de destination » associé au ruissellement, on peut procéder comme suit :

- Dans le paragraphe « Sauvegarde et de contrôles » du fichier des « Paramètres Généraux » dans on demande Le « Listage des données des réseaux de rivière » :
  «**1** = Listage des données des réseaux de rivière, drains, lacs »,

- Les numéros « d'éléments de rivière associés » sont alors sauvegardés en fin de calcul dans le fichier « num_riv_aval.out ».
  Le numéro « d'élément de rivière associé » est un numéro d'ordre interne.

Quand on n'a pas de fichier de « Directions aval pour ruissellement » : on peut utiliser directement ces « numéros d'éléments de rivière associés » et éviter ainsi à MARTHE de les recalculer à chaque fois (à condition de n'avoir modifié ni le maillage ni le réseau hydrographique). La procédure à utiliser est la suivante :

a) Fixer cette option à « 1 » :
« **1** = Le fichier 'Direction Aval' contient le numéro d'élément rivière associé ».

b) et donner, après l'avoir renommé, le nom de ce fichier « num_riv_aval.out » comme nom de fichier de « Direction aval pour ruissellement ».

8.8. Paramètres pour le réseau hydrographique : Rivières, Drains, Lacs

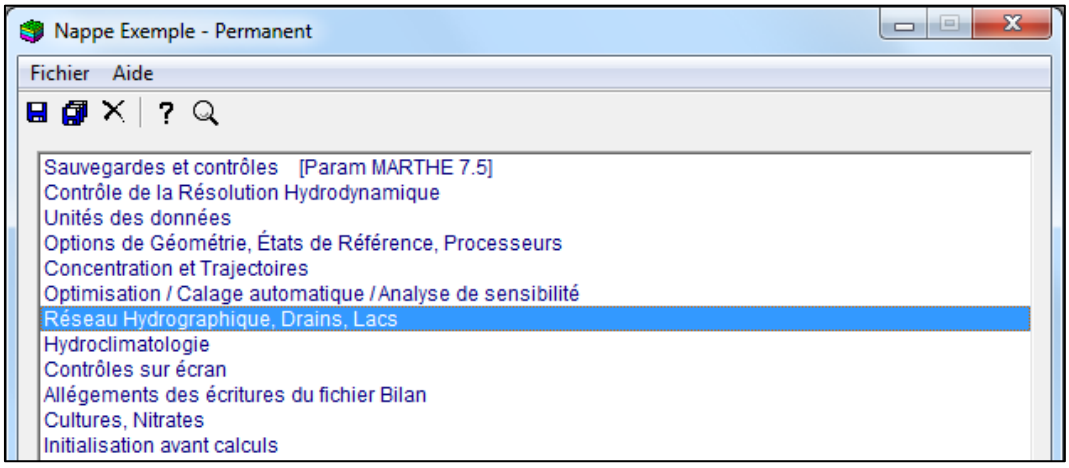


Figure 48 - Paramètres généraux : Paragraphe des réseaux hydrographiques.

Ce chapitre décrit les paramètres qui contrôlent la prise en compte du réseau hydrographique comprenant les rivières et les lacs. Il décrit également les paramètres qui contrôlent les réseaux de drains. Il convient de rappeler que dans cette version de MARTHE, la prise en compte des lacs est seulement partiellement implémentée.

Les paramètres relatifs au réseau hydrographique et au réseau de drains ont été rassemblés en 3 groupes :

- Les paramètres relatifs au réseau hydrographique de rivières :
  - Couplage avec un réseau hydrographique de rivières.
  - Nombre maximal d'itérations pour le calcul des débits rivières.
  - Variation moyenne de débit de rivière entre 2 itérations pour convergence.
  - Nombre maximal de tronçons de rivière.
  - Schéma d'échanges nappe – rivière.
  - Type de loi Hauteur-Débit des rivières.
  - État initial des rivières s'il y a une loi Hauteur-Débit.
  - Routage des débits de rivières.
  - Schéma de calcul du routage.
  - Solveur pour le routage du réseau de rivières.
  - Débits de débordements de nappe dirigés vers les rivières et lacs.
  - Calcul des débits de rivière à tous les pas de temps de modèle.
  - Facteur de correction sur les vitesses de ruissellement superficiel.
  - Vitesse minimale de ruissellement superficiel (sécurité).
  - Coefficient de diffusion pour le transport en rivières.
  - Annulation du transport dans les rivières et les drains classiques.

- Les paramètres relatifs au réseau de drains ou de « conduits » :
  - Couplage avec un système de drains
  - Système de drains hiérarchisé en réseau
  - Nombre maximal de tronçons de drains
  - Tous les drains-conduits sont verticaux
  - Tous les affluents de drains sont indépendants
  - Débordements de nappe => vers les drains-conduits

- Coefficient de diffusion pour le transport dans les drains-conduits

- Les paramètres relatifs aux lacs :
  - Couplage avec un ensemble de Lacs
  - Nombre maximal de mailles de Lacs
  - Nombre maximal d'itérations pour le calcul des Lacs
  - Profondeur maximale possible pour les Lacs (sécurité)
  - Coefficient de sous-relaxation pour le calcul des Lacs

8.8.1. Réseau hydrographique de Rivières

Couplage avec un réseau hydrographique de rivières

- 0 = Pas de Couplage avec un réseau hydrographique.
- 1 = Couplage avec un réseau hydrographique.

Nombre maximal d'itérations pour le calcul des débits rivières

Valeur par défaut : 0 => 2 fois le nombre de « sources » du réseau hydrographique.

Une « source » est un tronçon de rivière qui n'a pas d'amont(s).

Variation moyenne de débit de rivière entre 2 itérations pour convergence

Valeur par défaut : 0 => 10^{-5} unités de débit de rivière.

C'est le critère d'arrêt du calcul itératif du débit de rivière.

Les calculs itératifs sont arrêtés quand, d'une itération à la suivante, la variation moyenne de débit dans les tronçons de rivière est inférieure à ce critère.

Attention : Avec l'option selon laquelle le débordement de nappe est dirigé vers le réseau hydrographique et les lacs (option par défaut) :

Dans le calcul de la charge hydraulique de nappe, les itérations externes de calcul se poursuivent tant que la variation de débit de débordement dépasse ce seuil de variation de débit.

⇨ Donc avec cette option : S'il y a du débordement de nappe, il faut fixer un critère de « Variation moyenne de Débit de Rivière » pas trop petit, sous peine d'allonger le processus itératif de calcul de la charge hydraulique dans la nappe.

Nombre maximal de tronçons de rivière

Valeur par défaut : 0 => 1500 tronçons au maximum.

C'est le nombre maximal de tronçons de rivière prévus. Si le nombre de tronçons rencontrés dépasse ce maximum, le calcul s'arrête avec un message.

Il faut donc prévoir un nombre maximal de tronçons pas trop petit. Si on fixe un nombre trop grand … on consomme un peu trop de mémoire.

Schéma d'échanges nappe - rivière

Schéma par défaut : 0 => Schéma d'échange MARTHE.

Différents schéma d'échanges Nappe – Rivière possibles :

- 0 = Schéma « MARTHE » avec débordement (valeur par défaut).
- 7 = Schéma « Continu » (*pour mémoire*).
- 8 = Schéma « Linéaire » (*pour comparaison avec des solutions analytiques*).
- 9 = Schéma « MODFLOW » ... (*pour comparaisons*).

Type de loi Hauteur-Débit des rivières

⇨ 0 = Pas de loi Hauteur-Débit.
⇨ 1 = Loi de Manning-Strickler approchée, convenant aux rivières larges.
⇨ 2 = Loi de Manning-Strickler complète.

La formulation approchée « Manning-Large » (option 1) est plus rapide à calculer mais est une approximation acceptable uniquement si la profondeur d'eau est faible devant la largeur du cours d'eau.

Remarque : Il faut avoir choisi une loi « Hauteur-Débit » (Manning-Large ou Manning-Complète) pour que d'éventuels seuils en rivière puissent être pris en compte.

État initial des rivières s'il y a une loi Hauteur-Débit

Option par défaut : 0 => L'état initial pris en compte est le niveau d'eau dans les tronçons de rivière.

Cette option est utilisée uniquement s'il y a une loi « Hauteur – Débit ». Ell permet de choisir si l'état initial pris en compte est le fichier de « niveau d'eau des tronçons de rivière » ou bien le fichier de « débit de rivière des tronçons de rivières »

⇨ 0 = L'état initial pris en compte est le niveau d'eau des tronçons.
⇨ 1 = L'état initial pris en compte est le débit de rivière des tronçons.
C'est cette option (débit de rivière des tronçons) qui est conseillée.

Routage des débits de rivières

Valeur par défaut : 0 => Pas de routage.

Le « routage » (ou *routing*) est la prise en compte de la variation de volume d'eau dans la rivière, résultant de la variation de niveau d'eau dans la rivière.

⇨ s'il n'y a pas de routage l'écoulement vers le tronçon aval est instantané, sans effet de retard.

Options possibles :

- 0 = Non : Pas de routage.
- 1 = Oui : Routage des débits.

La prise en compte du routage est possible :

⇨ Uniquement en régime transitoire.

- Et uniquement s'il y a une loi Hauteur-Débit (Loi de Manning-Strickler ou autre).

Schéma de calcul du routage

Option par défaut : 0 => Calcul du routage en débit de rivière : valeur recommandée (sauf s'il y a des seuils dans certains tronçons de rivière).

Paramètre avancé, à utiliser uniquement pour des utilisations particulières.

Le routage est généralement calculé avec le débit comme variable de calcul. Dans des cas particuliers, il est cependant possible d'utiliser un schéma différent : en utilisant le niveau d'eau dans le tronçon comme variable.

Les valeurs possibles pour cette option avancée sont :

- 0 = Calcul du routage en débit : Valeur conseillée
- 1 = Calcul du routage en débit, sauf quand le débit est égal à 0, auquel cas le routage est calculé en fonction du niveau d'eau de rivière (*déconseillé)*.
- 2 =Calcul du routage toujours en niveau d'eau de rivière (*conseillé uniquement s'il y a des « seuils en rivière »*).

Remarque : S'il y a un « Seuil en rivière », le calcul du routage doit se faire en « niveau d'eau de rivière » si on souhaite pouvoir :

- Simuler des assecs.
- Ou bien simuler des hauteurs d'eau en rivière inférieurs à la hauteur du seuil.

Solveur pour le routage du réseau de rivières

Option par défaut : 0 => Parcours selon l'ordre de Strahler (*optimal et conseillé*).

Autres possibilités (pour mémoire) : 1 => Parcours par « Jonctions » *déconseillé*.
2 => Parcours par « Sources » *déconseillé*.

Coefficient de sous-relaxation pour le calcul des débits de rivières

Valeur par défaut : 0 => 1 = Pas de sous-relaxation (*Valeur conseillée*).

Une sous-relaxation est nécessaire uniquement s'il y a un fort couplage des rivières avec la nappe, ou bien s'il y a un routage avec fortes variations de niveau. On peut alors être amené à utiliser un coefficient de sous-relaxation inférieur à 1.

<< *Il est conseillé de choisir une valeur égale à 1 à chaque fois que possible*. >>

Remarque : La valeur du coefficient de sous-relaxation doit toujours être inférieure ou égale à 1.

Débits de débordement de nappe dirigés vers les rivières et lacs

Option par défaut : 0 (ou 1) => Oui, les débits de débordement de nappe sont dirigés vers les rivières et les lacs.

Par défaut : Le débit de débordement de nappe, comme le ruissellement, est dirigé vers le tronçon de rivière ou le lac aval, ou bien vers le tronçon le plus proche s'il n'y a pas de directions de drainage.

Options possibles :

- 0 *ou* 1 = Oui : Le débit de débordement est dirigé vers les rivières et les lacs.
- -1 = Non : Le débit de débordement de nappe quitte le système modélisé, sans rejoindre le réseau hydrographique ou les lacs (il ne participe pas aux écoulements superficiels).

Calcul des débits de rivières à tous pas de temps de modèle

Option par défaut : 0 => Calcul des rivières : uniquement les pas de temps avec calcul hydrodynamique de nappe.

Ce paramètre est utilisé uniquement si les calculs hydrodynamiques ne sont pas effectués à tous les pas de temps de modèle.

Dans ce cas, on a les options possibles :

- 0 => Calcul des rivières : uniquement aux pas de temps pour lesquels on effectue un calcul hydrodynamique de nappe.
- 1 => Calcul des rivières : tous les pas de temps de modèle, même s'il n'y a pas de calcul hydrodynamique.

Remarque : L'option 1 peut être instable si le couplage nappe-rivière est fort.

Facteur de correction sur les vitesses de ruissellement superficiel

Valeur par défaut : 0 => 100 % => Pas de correction

Paramètre d'utilisation exceptionnelle.

Cet éventuel facteur de correction est actif uniquement si on utilise des « directions aval de ruissellement » et des « vitesses de ruissellement de surface ».

Il est appliqué au champ maillé de vitesse de ruissellement de surface, c'est-à-dire des vitesses en dehors des tronçons de rivières.

Ce facteur de correction est exprimé en %.

Vitesse-utilisée = Vitesse-lue x Facteur en %

Donc, si ce facteur est, par exemple, égal à 75, toutes les vitesses de ruissellement de surface sont multipliées par 75 %, c'est-à-dire par 0.75.

Vitesse minimale de ruissellement superficiel (sécurité)

Valeur par défaut : 0 => 0.05 m/s

Ce paramètre, exprimé en m/s, est actif uniquement si on utilise des « Directions aval » et des « Vitesses de ruissellement de surface ».

Il permet d'éviter des vitesses (quasi) nulles qui bloqueraient le transfert du ruissellement de surface.

Remarque : Cette vitesse minimale de ruissellement est exprimée en m/s.

Coefficient de diffusion pour le transport en rivières

Valeur par défaut : 0 m^2/s. => Pas de diffusion, uniquement de l'advection

C'est le coefficient de diffusion macroscopique pour le transport en rivière, en m^2/s.
Ce coefficient ne caractérise pas uniquement la diffusion moléculaire mais la diffusion totale (diffusion + dispersion cinématique).

Annulation du transport dans les rivières et les drains classiques

Option par défaut : 0 => Transport aussi dans les rivières et dans les drains classiques

Avec cette option par défaut : En cas de transport (en aquifère), il y aura aussi un calcul de transport dans les rivières et dans les drains.

Options possibles :

- 0 => Transport aussi dans les rivières en les drains
- -1 ou +1 => Pas de transport dans les rivières et dans les drains classiques.

Remarque : Cette option n'annule pas le transport dans les drains-conduits qui est toujours couplé à celui dans la nappe.

8.8.2. Réseau de Drains

Couplage avec un système de drains

- 0 = Pas de couplage avec un réseau de drains.
- 1 = Couplage avec un réseau de drains.
- 2 = Couplage avec un réseau de drains-conduits [débit = Fonction(charge hydraulique)].

Les « conduits » ou « Drains-Conduits » sont des drains particuliers, caractérisés par une charge hydraulique (et pas seulement une altitude de débordement comme les drains « classiques »). Le débit à l'intérieur d'un drain-conduit fait intervenir les charges hydrauliques des drains-conduits voisins. Un réseau de conduits peut être utilisé pour représenter des conduits karstiques, des macropores en zone saturée ou non saturée, des réseaux de drainage en charge, etc.

Système de drains hiérarchisé en réseau

Option par défaut : 0 => Drains non hiérarchisés.

- 0 = Drains non hiérarchisés.
- 1 = Drains hiérarchisés en réseaux.

- 2 = Drains hiérarchisés en réseaux complexes à plusieurs avals.

Remarque : Par défaut les drains « classiques » ne sont pas hiérarchisés en réseaux.
: Par défaut les drains-conduits doivent être hiérarchisés en réseaux.

Les réseaux simples peuvent avoir plusieurs tronçons amont, mais un seul tronçon aval.
Les réseaux complexes peuvent avoir plusieurs avals. Ce sont forcément des « conduits », puisque le débit calculé dans chaque aval dépend des charges hydrauliques des différents tronçons de conduits voisins.

Nombre maximal de tronçons de drains

Valeur par défaut : 0 => 1500 tronçons au maximum.

C'est le nombre maximal de tronçons de drains prévus. Si le nombre de tronçons rencontrés dépasse ce maximum, le calcul s'arrête avec un message.

Il faut donc prévoir un nombre maximal de tronçons pas trop petit. Si on fixe un nombre trop grand … on consomme un peu trop de mémoire.

Tous les drains-conduits sont verticaux

- 0 = Non : seuls les drains indiqués comme verticaux sont verticaux.
- 1 = Oui : tous les drains-conduits sont automatiquement considérés comme verticaux.
  Cette option est équivalente à attribuer à chaque tronçon de drain-conduit une « orientation verticale »

Tous les affluents de drains sont indépendants

- 0 = Non : tous les affluents de drains ne sont pas indépendants.
- 1 = Oui : tous les affluents de drains non décrits dans l'arbre de branchement sont automatiquement considérés comme indépendants.

Cette option est utile pour un réseau de drains parallèles indépendants, ou pour des drains verticaux parallèles.

Si on choisit cette option spécifiant que « tous les affluents de drains sont indépendants », il n'est alors pas nécessaire de définir un fichier d'« arbre de branchement des drains ».

Débordements de nappe => vers les drains-conduits

Option par défaut : 0 => Pas de débordement de nappe vers les Drains-Conduits.

Options possibles :
- 0 => Pas de débordement de la nappe vers les Drains-Conduits.
- 1 => Possibilité de débordement de la nappe dans les Drains-Conduits.

Si on choisit cette option 1 :

Dans une maille contenant un tronçon de drain-conduit : quand la nappe déborde
⇨ Le débit de débordement de la nappe est introduit dans le tronçon de drain-conduit.

Si le drain-conduit déborde, le débit de débordement est routé vers le réseau hydrographique (s'il y en a un).

Coefficient de diffusion pour le transport dans les drains-conduits

Valeur par défaut : 0 m^2/s. => Pas de diffusion, uniquement de l'advection.

C'est le coefficient de diffusion macroscopique pour le transport dans les conduits, en m^2/s.
Ce coefficient ne caractérise pas uniquement la diffusion moléculaire mais la diffusion totale (diffusion moléculaire + dispersion cinématique).

8.8.3. Réseau de Lacs

Remarque : Dans cette version de MARTHE, la fonctionnalité de calcul des lacs est seulement partiellement opérationnelle.

Couplage avec un ensemble de Lacs

0 = Pas de couplage avec un ensemble de Lacs.
1 = Couplage avec un ensemble de Lacs.

Nombre maximal de mailles de Lacs

Valeur par défaut : 0 => 1500 mailles de lac au maximum.

C'est le nombre maximal de mailles de lac prévus. Si le nombre de mailles rencontrées dépasse ce maximum, le calcul s'arrête avec un message.

Il faut donc prévoir un nombre maximal de mailles pas trop petit. Si on fixe un nombre trop grand … on consomme un peu trop de mémoire.

Nombre maximal d'itérations pour le calcul des Lacs

C'est le nombre maximal d'itérations pour le calcul des niveaux des lacs et des échanges.

Profondeur maximale possible pour les Lacs (sécurité)

Valeur par défaut : 0 => Profondeur des lacs limitée à 500 unités de charge et d'altitude

Cette valeur est utilisée par sécurité numérique ... en régime permanent.

La « Profondeur d'eau du lac » dans une maille est la hauteur d'eau au-dessus du fond du lac de cette maille.

Coefficient de sous-relaxation pour le calcul des Lacs

Valeur par défaut : 0 => 1 = Pas de sous-relaxation.

Une sous-relaxation est nécessaire uniquement s'il y a un fort couplage des lacs avec la nappe. On peut alors être amené à utiliser un coefficient de sous-relaxation inférieur à 1.

Remarque : La valeur du coefficient de sous-relaxation doit toujours être inférieure ou égale à 1.

8.9. Paramètres pour les contrôles sur écran et l'allégement des écritures dans le fichier « bilandeb.txt »

8.9.1. Contrôles sur écran en cours de calcul

Pour tous ces paramètres, excepté si spécifié autrement : 0 => Non ; 1 => Oui.

- Contrôle maximal sur écran
- Contrôle à l'écran du bilan des débits
- Contrôle à l'écran du bilan de masse et du bilan de chaleur
- Contrôle à l'écran des couplages
- Contrôle des bilans des rivières
- Contrôle des bilans hydroclimatiques
- Contrôle à l'écran des itérations Externes de résolution
- Contrôle à l'écran des itérations Internes de résolution
- Contrôle de la lecture des fichiers de données
- Type d'exécution
- Intervalle (en secondes) entre les affichages à l'écran des calculs géochimiques

Contrôle maximal sur écran

Valeur par défaut : 0 => Non

1 = Contrôle maximal : affichage de tous les détails.
(*Conseillé uniquement pour vérifications, en cas de problèmes*).

Contrôle à l'écran des itérations externes de résolution

Conseillé pour suivre le déroulement des calculs (sauf pour les calculs en « batch »).

Contrôle à l'écran des itérations internes de résolution

Conseillé uniquement pour un gros domaine modélisé (car les affichages sont alors peu fréquents).

Contrôle de la lecture des fichiers de données

Conseillé uniquement pour vérifications en cas de problèmes

Type d'exécution

Valeur par défaut : « Rien » => Exécution normale avec quelques affichages à l'écran

« M » => Exécution (quasi) Muette, pour exécution batch
« C » => Exécution Conversationnelle pas à pas (lente), vérifications

Intervalle (en secondes) entre les affichages à l'écran des calculs géochimiques

Valeur par défaut : 0 => Affichages toutes les 10 à 30 secondes environ

Nbre => Affichage tous les « Nbre » secondes environ.

<< Ce paramètre ne s'applique pas au moteur géochimique PHREEQC_RM >>.

8.9.2. Allégements des écritures dans le fichier « bilandeb.txt »

Pour tous ces paramètres, excepté si spécifié autrement : 0 => Non ; 1 => Oui.

- Suppression totale : aucune écriture
- Suppression de l'écriture des itérations internes de résolution
- Suppression de l'écriture des itérations externes de résolution
- Suppression de l'écriture du détail des sous-pas de temps de calcul
- Suppression de l'écriture du bilan des débits
- Suppression de l'écriture du bilan des débits par couche
- Suppression de l'écriture des bilans de masse et de chaleur
- Suppression de l'écriture des détails des couplages
- Suppression de l'écriture des bilans des Rivières et des Drains
- Suppression de l'écriture des « warnings » de résolution géochimique

Suppression totale : aucune écriture

Valeur par défaut : 0 => Conserve le fichier bilan « bilandeb.txt »
1 => Supprime totalement le fichier « bilandeb.txt »

Suppression de l'écriture des itérations internes de résolution

Valeur par défaut : 0 => Allège, sauf s'il n'y a pas plus de 2 itérations externes

-1 => Affiche toujours (même s'il y a 1 ou 2 itérations externes au maximum)

Il est conseillé de laisser la suppression par défaut, surtout quand il y a des itérations externes.

Suppression de l'écriture du détail des sous-pas de temps de calcul

Concerne en particulier les schémas de calcul en Zone Non Saturée.

8.10. Options supplémentaires (pour accessoires)

Ce sont des options prévues éventuellement pour des versions futures et pour permettre plus facilement une compatibilité ascendante du fichier des « Paramètres Généraux ». Pour les utilisations normales ce paragraphe n'est pas utilisé.

8.11. Paragraphe d'« Initialisation avant calculs »

Le paragraphe d'« Initialisation avant calculs » permet de définir des modifications ponctuelles apportées aux champs de données qui ont été lues dans les fichiers.

Par exemple on peut définir ici les valeurs de débits de quelques pompages.

Il est également possible d'y définir des champs de données par blocs de mailles, par zones, par couches ou même par grille. Ceci est pratique lors de la calibration des paramètres d'un modèle :

Par exemple, pour essayer d'améliorer la calibration, si on a défini des zones de perméabilité, on peut modifier les valeurs de perméabilité affectées à ces zones sans modifier les fichiers de référence.

Il est même possible de définir ici les valeurs de champs uniformes dans des couches ou des zones, sans qu'il soit nécessaire de créer les fichiers relatifs à ces champs.

Ce paragraphe, qui fait partie du fichier des « Paramètres Généraux », est lu par le module de « Gestion des données non maillées » et par le moteur de calcul MARTHE.

En revanche, il n'est pas lu par le préprocesseur WinMarthe de visualisation des champs maillés. Les champs modifiés ou définis dans ce paragraphe ne peuvent donc pas être visualisés graphiquement (sauf si on sélectionne l'option de sauvegarder les champs du modèle dans l'état de fin de calcul : on pourra alors les visualiser a posteriori avec WinMarthe).

Les initialisations ou modifications introduites dans ce paragraphe d'« Initialisation avant calculs » sont identiques aux « modifications » qui peuvent être définies à n'importe quel pas de temps de modèle du « fichier des pas de temps », et en particulier au pas de temps n°0.

Il est important de se souvenir que dans MARTHE les données sont toujours définies « du plus général au plus particulier ». La séquence des affectations de valeurs dans les champs est la suivante :

1. Lecture les fichiers de champs de données de toutes les mailles.
2. Lecture de ce paragraphe d'« Initialisation avant calcul ».
3. Vérifications préliminaires et édition de données sur listing.
4. Lecture du pas de temps n°0 avec éventuellement modifications avant calcul.
5. Calculs avec modifications ponctuelles au cours des pas de temps.

Il est quasiment identique d'introduire des modifications :

- Dans ce paragraphe d'« Initialisation avant calcul » du fichier des « Paramètres Généraux »
- Au pas de temps n°0, donc avant le début des calculs

La différence entre les deux étant les vérifications préliminaires, qui peuvent générer des messages d'alerte (« warnings ») si des données importantes sont définies tardivement, au pas de temps n°0.

On retiendra que :

- Dans le paragraphe d'Initialisation avant calcul : il est plus approprié de définir des paramètres physiques, par exemple :
  - Des valeurs de porosité,
  - Des limites à charge hydraulique imposée.
  - etc.
- Au pas de temps n°0 (donc avant début des calculs), il est plus approprié de définir des données qui ne sont pas structurelles :
  - Des éventuels débits de pompage qui vont commencer au premier pas de temps.
  - Des flux de recharge.
  - etc.

9. Le fichier des pas de temps

Ce chapitre se rapporte au fichier des « Pas de temps ».

Ce fichier, d'extension [.pastp] est géré *via* le module de « Gestion des données non maillées », accessible par le bouton

de la barre d'outils du bas du cadre de WinMarthe, en choisissant la ligne « Pas de Temps » (Figure 49).

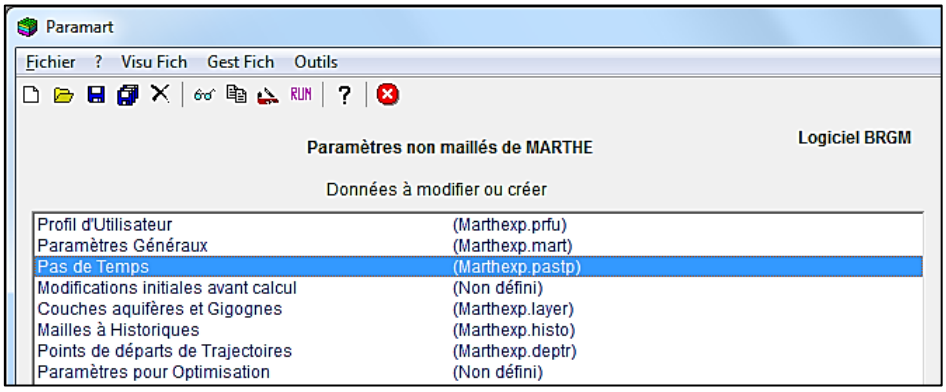


Figure 49 - Sélection du fichier des « Pas de Temps ».

Remarque : Ici on sélectionne le fichier des « Pas de Temps », d'extension de fichier [.pastp]. À ne pas confondre avec la sélection du paragraphe « pas de temps et sous-pas de temps » dans le fichier des Paramètres Généraux »

Ce fichier permet de définir les dates de fin des « pas de temps de modèle », et donc les durées des pas de temps.

La date de fin d'un pas de temps doit être strictement supérieure à celle du pas de temps précédent, sinon la durée serait négative ou nulle et le calcul s'arrêterait. Les durées des pas de temps peuvent être variables d'un pas à l'autre, au libre choix de l'utilisateur, sans « loi de croissance » ou autre contrainte. Le début des calculs est défini par la date du pas de temps n°0, en unité utilisateur de temps ou en date calendaire (jj/mm/aaaa ou jj/mm/aaaa hh :mm), Figure 50. La date de fin de pas de temps est donnée sous forme de date absolue, dans l'unité utilisateur de temps (seconde, minute, heure, jour, semaine, décade, mois ou année) ou en date calendaire.

Ce fichier des pas de temps contient aussi les actions qui sont faites à ces pas de temps. Ces actions sont de deux types :

- Modifications ponctuelles de données en début de ce pas de temps : par exemple, modifications de débit de pompages, modifications de flux de pluie.
  Les données modifiées restent appliquées, jusqu'à une éventuelle modification ultérieure.

- Demande de sauvegarde de certains champs calculés en fin de ce pas de temps : par exemple, sauvegarde du champ de l'amplitude de la vitesse d'écoulement, sauvegarde du champ de la charge hydraulique calculée, etc.

Si on fait un calcul en régime permanent : le régime permanent correspond au pas de temps n°0.

Même dans le cas d'un régime permanent, il est donc conseillé, bien que pas obligatoire, de définir un fichier de « Pas de temps ».

En effet c'est dans ce fichier, au pas de temps n°0, qu'on sélectionnera les champs calculés à sauvegarder : par exemple les vitesses d'écoulement, le champ du taux de saturation, le champ de débit de débordement de nappe, etc. On peut également introduire à ce pas de temps n°0, des « forçages » comme le flux de recharge, quelques débits de pompage ponctuels, etc.

Quand on a sélectionné le fichier des « Pas de Temps », on l'ouvre le plus souvent avec le préprocesseur. il est cependant possible, pour les utilisateurs avancés, de l'ouvrir avec l'« Éditeur de Texte » intégré pour faire une modification ponctuelle. Il faut alors procéder avec soin, en respectant la structure et les « alignements » du fichier, etc. L'utilisateur averti qui modifie directement le fichier avec un éditeur de texte le fait « à ses risques et périls ».

Une utilisation de l'éditeur de texte est de mettre des commentaires, jusqu'à 10 lignes, en tête du fichier, pour décrire la simulation. Ces commentaires doivent se placer après la 1ère ligne du fichier, qui est un titre descriptif, mais avant la ligne :

« #<V7.5># --- Fin du texte libre --- ; Ne pas modifier/retirer cette ligne »

Le début du fichier des paramètres généraux pourra alors être par exemple :

```
Simulation multicouche
 < Nouvelle simulation avec augmentation de la perméabilité de la Craie >
 < Bilan hydrographique au pas de temps journalier >
 < 10 postes pluviométriques ; ETP Penman >
 #<V7.5># --- Fin du texte libre --- ; Ne pas modifier/retirer cette ligne
```

9.1. Création automatique de pas de temps de modèle

Par opposition aux éventuels sous-pas de temps internes de calcul, les « pas de temps de modèle » sont des pas de temps définis par l'utilisateur, auxquels on peut :

- Introduire des modifications,
- ou bien demander des sauvegardes.

9.1.1. Définition de la date de début de simulation

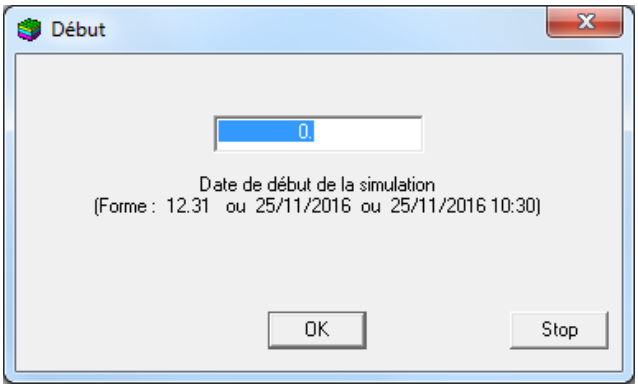


Figure 50 – Définition de la date de début de simulation.

Cette date peut être donnée au choix (Figure 50) :

- Sous forme décimale : le plus souvent « 0 », mais éventuellement par un nombre comme : 12.31 (unité utilisateur de temps)
- Sous forme calendaire : par exemple : 21/09/2018 ou bien « 21/09/2018 10:30 »

Si on effectue uniquement une simulation en régime permanent, la date « 0 » est généralement appropriée.

Remarque : Le pas de temps n°0 n'a pas de durée.

9.1.2. Création initiale de pas de temps

Il est possible de créer automatiquement des pas de temps (Figure 51). Si la durée de chaque pas de temps est uniforme, on peut la préciser (Figure 52).

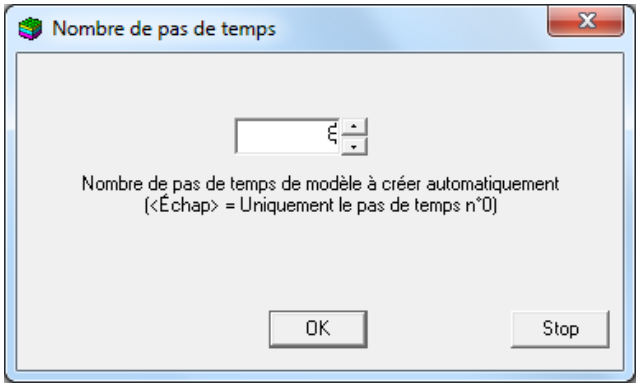


Figure 51 – Création automatique de 8 pas de temps.

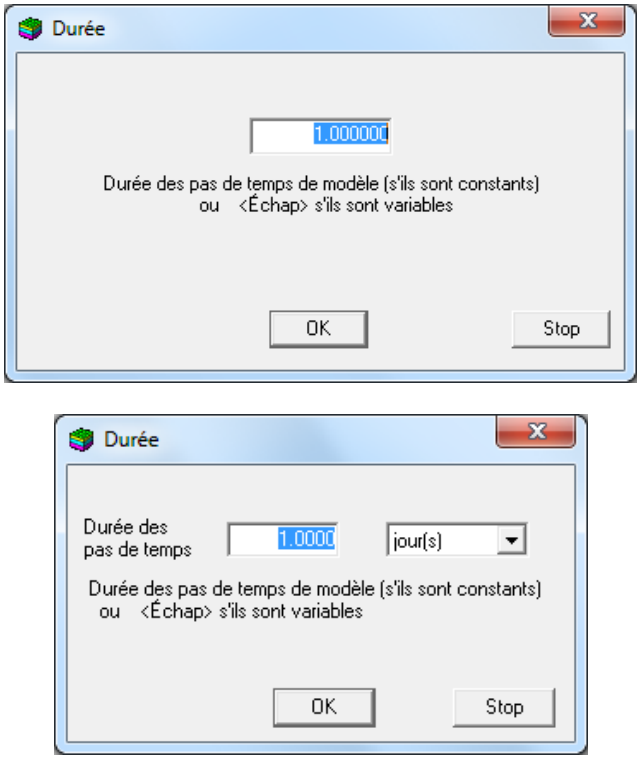


Figure 52 – Définition de la durée des pas de temps à créer, si elle est uniforme
En haut, si on utilise des dates décimales ; en bas, avec des dates calendaires.

Sinon, si les durées des pas de temps sont variables, on peut choisir (Figure 53) de définir les dates de fin de pas de temps :

- Par un tableur intégré (sous forme décimale), ce qui est pratique uniquement si le nombre de pas de temps n'est pas trop grand (par exemple 20 ou 50 pas de temps : Figure 54).
- Ou bien par lecture d'un fichier.

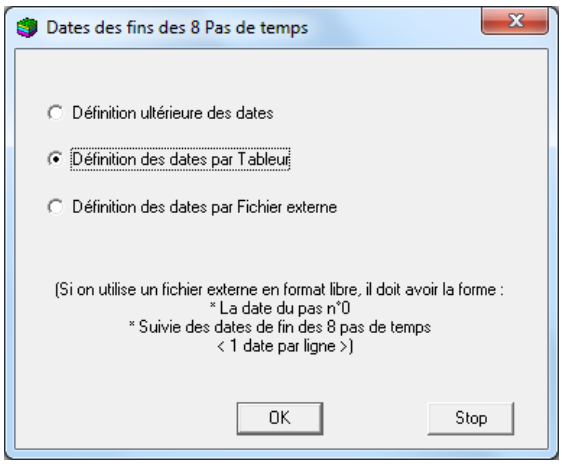


Figure 53 – Choix de la méthode de définition des dates de fin des pas de temps.

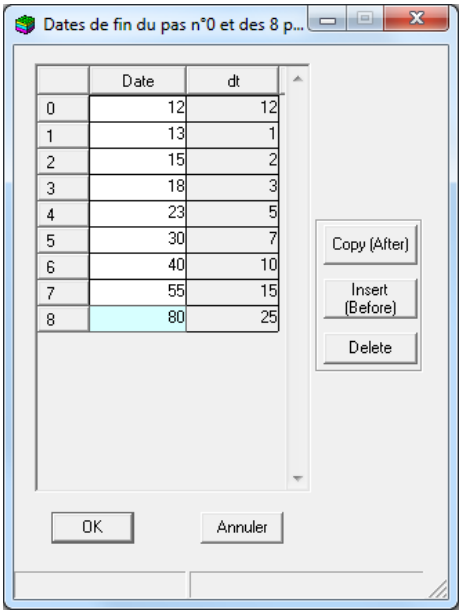


Figure 54 – Définition par tableur des dates de fin de pas de temps.

Un fichier de dates est un fichier texte qui contient les dates de fin des différents pas de temps de modèle, à raison d'une date par ligne. Ce fichier peut être constitué avec un éditeur de texte, ou bien être « exporté » depuis un fichier Excel ® ayant servi à le constituer. Les dates doivent être exportées au format texte, avec une extension [.prn], par exemple (Figure 55 et Figure 56).

Les dates doivent bien évidemment être croissantes sinon les calculs s'arrêteront à la première date régressive rencontrée puisqu'il n'est pas possible de remonter le temps.

La fin d'un pas de temps de modèle constitue le début du pas de temps suivant. La durée d'un pas de temps est donc la différence entre la fin du pas de temps et la fin du pas de temps précédent.

```
! Dates pour fichier pas de temps (commence par : "!")
* Ceci est une ligne de commentaire (commence par : "*")
# Cette ligne aussi qui commence par : "#"
 12.31
 13.1
 15.2
 18.3
 23.4
 30.5
 40.6
 55.7
 80.8
```

Figure 55 – Fichier texte pour définir les dates des pas de temps sous forme décimale.

```
! Dates pour fichier pas de temps (commence par : "!")
* Ceci est une ligne de commentaire (commence par : "*")
# Cette ligne aussi qui commence par : "#"
 14/07/1918  10:30
 15/07/1918  17:29
 17/07/1918
 20/07/1918  06:12
 22/07/1918  07:13
 26/07/1918  08:14
 28/07/1918
 30/07/1918  11:37
```

Figure 56 - Fichier texte pour définir les dates des pas de temps sous forme calendaire.

Si les dates sont des dates calendaires (Figure 56), elles doivent obligatoirement être de la forme « jj/mm/aaaa hh:mm » ou « jj/mm/aaaa » (par exemple : « 14/07/2018 17:30 » ou « 14/07/2018 »).

L'éventuelle heure (par exemple « 17:30 ») est séparée de la date par un espace.

Remarque : Même pour les versions anglaises de MARTHE, la date est toujours écrite sous la forme « jj/mm/aaaa » ; *jamais* sous la forme « mm/jj/aaaa », ni sous la forme « aaaa/mm/jj ».

9.2. Choix d'un pas de temps

À chaque pas de temps, y compris au pas de temps n°0, on peut faire un certain nombre de modifications.

On doit commencer par choisir un pas de temps (Figure 57)

Figure 57 – Choix d'un pas de temps.

Il aussi est possible par ce menu de créer un nouveau pas de temps. Il faudra alors définir sa date.

9.3. Nouvelles actions ou modification d'actions existantes

Les actions, qui s'appliquent à des champs ou « objets », sont de trois types :

- Modification ponctuelles de données en début de ce pas de temps. Ces modifications peuvent par exemple permettre :
  - De modifier localement des valeurs de charge imposée (variation du niveau d'un cours d'eau, d'un lac, de la mer, ...),
  - De modifier un index de débordement (modification d'une émergence de source, de la position d'un drain),
  - De modifier des débits captés (ou injectés) pour simuler une croissance des besoins,
  - De modifier les flux de recharge selon les variations climatiques,
  - De modifier le maillage en changeant la position des mailles à perméabilité nulle,
  - De changer l'extension d'éventuelles fissures ou gravières par modification de l'extension des zones équipotentielles,
  - D'imposer ou de libérer localement la charge hydraulique en ajoutant ou en retirant des débits codés à 9999.

- Demande de sauvegarde de certains champs calculés en fin de ce pas de temps : par exemple, sauvegarde du champ de l'amplitude de la vitesse d'écoulement, sauvegarde du champ de la charge hydraulique calculée, etc.

- (Éventuellement, déclenchement d'un calcul ou bien d'une actualisation).

Les données d'un champ maillé peuvent être modifiées :

- Par grille,
- Par couche : on affecte une valeur uniforme dans une couche donnée,
- Par zone : on affecte une valeur uniforme dans une zone donnée,
- Par maille : on affecte une valeur uniforme dans une maille, ou dans un groupe de mailles (un « bloc de mailles ») donné.

  Un « bloc de maille » est un ensemble de mailles adjacentes, dans un « parallélépipède » défini par un intervalle de lignes, un intervalle de colonnes et un intervalle de couches. Par exemple : colonnes 7:9, lignes 12:15, couches 3:7 ou bien : colonnes 7:9, lignes *, couche 2.
  Le numéro de lignes « 12:15 » signifie « de la ligne n°12 à la ligne n°15 ».
  Le numéro de ligne « ***** » signifie « toutes les lignes ».

- Par liste de mailles : on affecte des valeurs différentes à une liste de mailles, définies sans format particulier, par leur numéro de colonne, ligne, couche, gigogne, ou bien définies par leurs coordonnées X , Y.

  La liste de mailles est en format libre, sous une des formes suivantes :

  - Valeur, Colonne, Ligne [Couche, Gigogne]
  - x, y, valeur
  - x, y, couche, valeur
  - x, y, z, valeur

  La forme des données dans un fichier « Liste de mailles » doit être uniforme. Cette forme est précisée à MARTHE par un paramètre géré par le préprocesseur.
  Chaque ligne du fichier « Liste » correspond à une maille.

Par exemple pour le format « Valeur, Colonne, Ligne, Couche », le fichier se présente sous la forme :

10 10 7 1 (*Valeur 10 dans la maille : colonne n°10, ligne n°7, couche n°1*)

10 5 14 1 (*Valeur 10 dans la maille : colonne n°5, ligne n°14, couche n°1*)

9999. ***** 21 1 (*Valeur 9999 dans les mailles : de toutes les colonnes, de la ligne n°21, couche n°1*)

Remarque :
Les modifications sont faites dans l'ordre où elles sont définies. Si on réalise plusieurs modifications successives sur le même champ, il est nécessaire de les faire dans l'ordre : Grille, Couche, Zone et Maille c'est-à-dire de l'élément le plus étendu (le plus général) à l'élément le plus petit (le plus particulier).

9.3.1. Création de nouvelles actions

- On choisit l'option « Nouvelles Actions » (Figure 58).

- On voit alors apparaître une boîte de dialogue (Figure 59) pour choisir un « Thème » d'actions.

- Après avoir choisi un thème, on voit alors apparaître les champs ou « Objets » de ce thème correspondant au profil d'utilisation (Figure 60). Il est possible d'obtenir des précisions sur les Objets en appuyant sur la touche [F3]. On sélectionne alors un « Objet ».

- On voit enfin apparaître les « Actions » qu'il est possible à appliquer à cet Objet (Figure 61). Sur cette figure, on a choisi l'objet « DEBIT » auquel on peut appliquer une des 6 « Actions » suivantes :

    - Lecture d'un nouveau fichier pour ce champ (de débit), ou bien affectation d'une valeur uniforme à toutes les mailles du champ (de débit) : Code = GRILLE.
    - Affectation d'une même valeur (de débit) à toutes les mailles d'une couche : Code = COUCHE.
    - Affectation d'une même valeur (de débit) à toutes les mailles ayant un numéro de « Zone Géométrique » donné : Code = ZONE_GEO.
    - Affectation d'une valeur (de débit) à une maille définie par son numéro de colonne, ligne, couche, gigogne, ou bien à toutes les mailles d'un « bloc de mailles » : Code = MAILLE.
    - Lecture d'un fichier « Liste de mailles » pour affecter des valeurs (de débit) à un certain nombre de mailles : Code = LIST_MAIL.
    - Sauvegarde du champ (de débit) calculé en fin de pas de temps : Code = EDITION.

- On choisit une Action, par exemple l'Action « MAILLE » pour affecter une valeur, ou une succession de valeurs, (de débit dans notre exemple) à une maille ou à un « bloc de mailles »
  La Figure 62 montre la boîte de dialogue qui apparaît pour définir la maille ou le bloc de mailles. Sur la figure, on affecte un débit de pompage de -95 unités de débit aux mailles des colonnes n°23 à n°25, de la ligne n°7, de la couche n°1.

On note que, quand on introduit une modification (ici du débit), la nouvelle valeur s'applique à partir de ce pas de temps et reste active pour tous les pas de temps suivants, jusqu'à une éventuelle nouvelle modification. En conséquence :

- Il n'est *pas* nécessaire de redéfinir la valeur si elle reste constante (dans l'exemple, tant que le débit reste égal à -95, il n'y a pas lieu de le redéfinir).
- Si on veut mettre une modification uniquement pour un, ou quelques pas de temps, il faudra remettre la valeur initiale (un débit égal à 0 dans notre exemple) lorsque nécessaire.

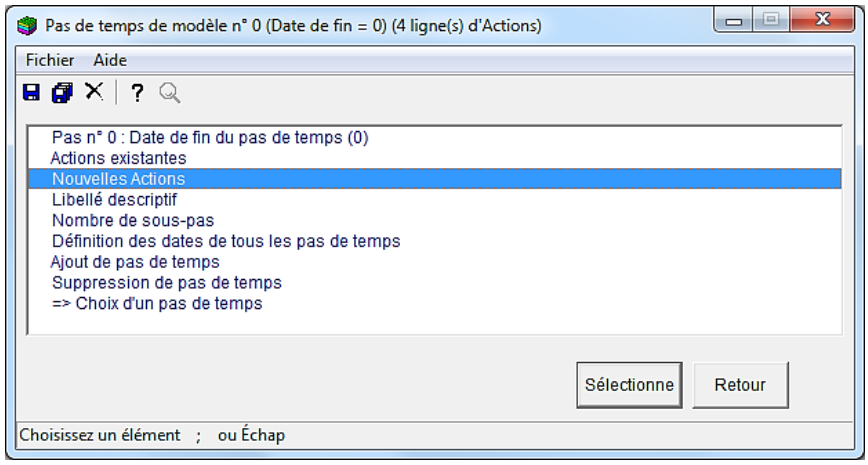


Figure 58 – Option de créer de nouvelles actions.

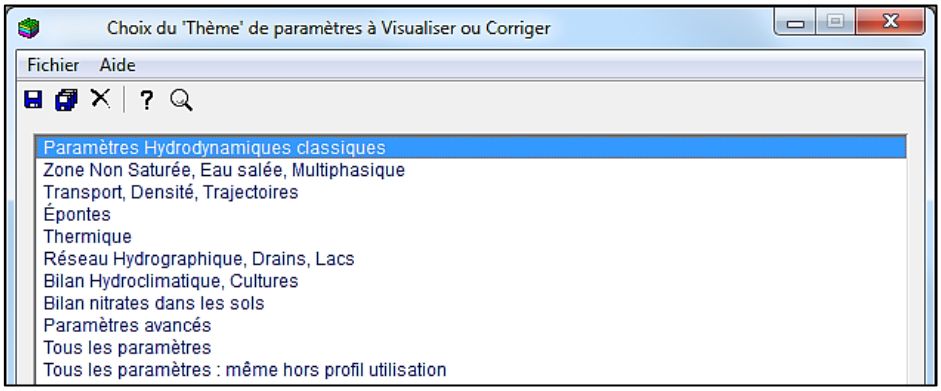


Figure 59 – Sélection d'un « Thème » d'actions à créer.

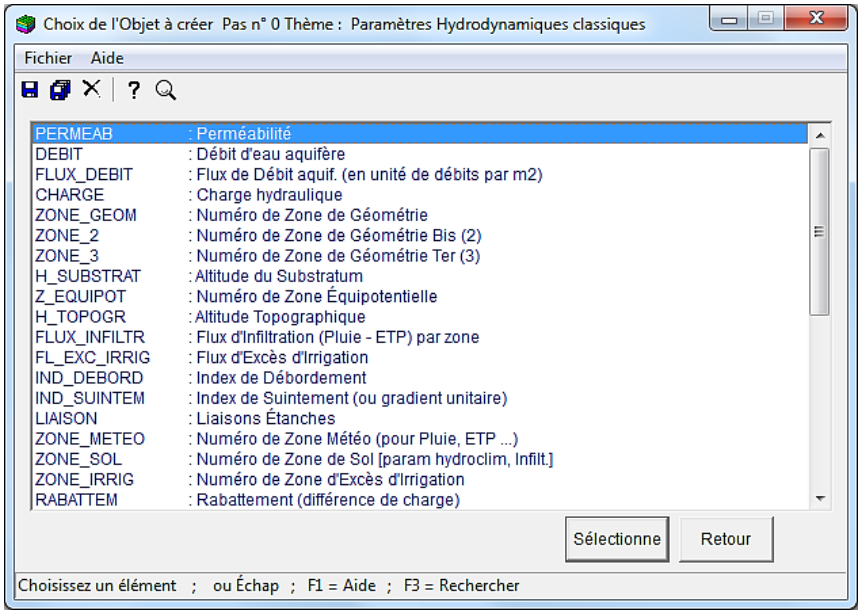


Figure 60 – Liste des champs ou « Objets » du thème choisi, correspondant au profil d'utilisation.

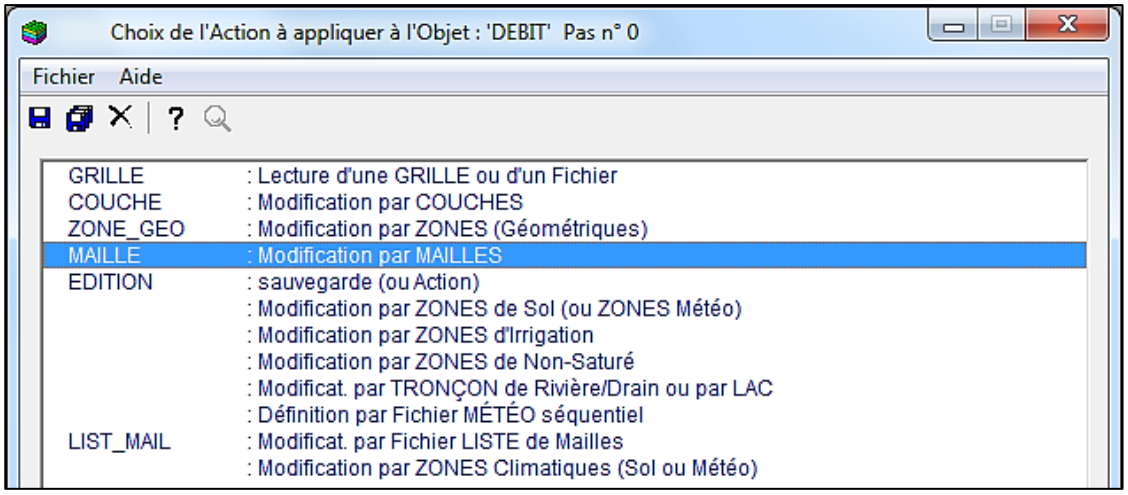


Figure 61 – Liste des « Actions » possible pour l'« Objet » choisi.
Ici l'Objet est le « DEBIT » et on choisit l'Action « MAILLE » (Modification par mailles).

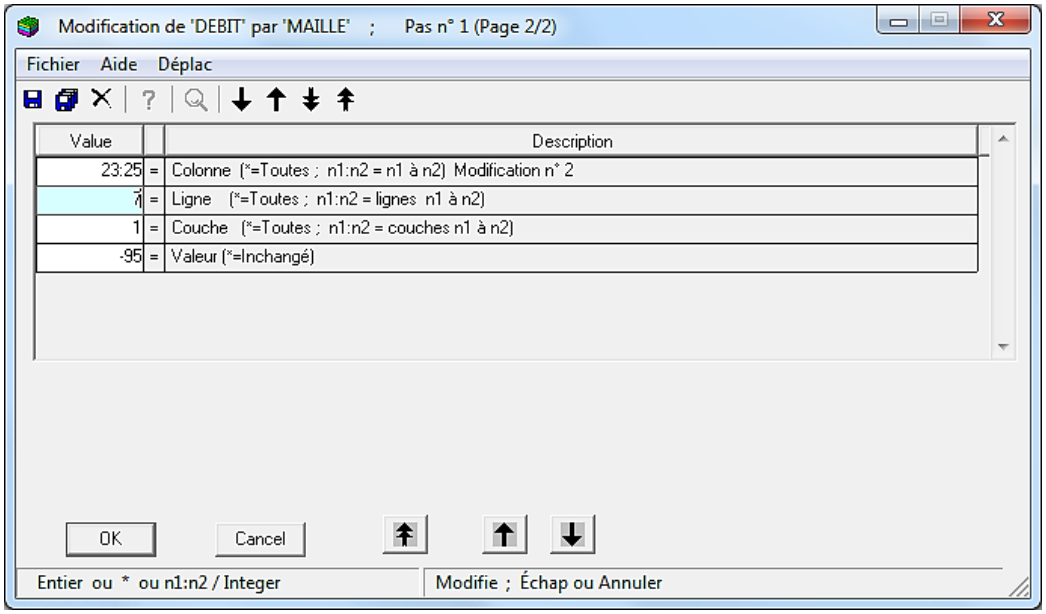


Figure 62 – Introduction d'une modification par bloc de mailles.

9.3.2. Affectation d'un fichier d'« évolution temporelle »

Quand on a un petit nombre de mailles ou de groupes de mailles (par exemple une cinquantaine de groupes de mailles) auxquels on doit affecter des modifications à de très nombreux pas de temps (plusieurs centaines ou milliers), il est nécessaire d'introduire de très nombreuses modifications : plusieurs milliers ou dizaines de milliers.

Il est alors plus efficace d'utiliser une autre méthode, par utilisation de fichiers d'« évolution temporelle ». Un tel fichier contient, en format libre, les valeurs successives à affecter à un groupe de mailles au cours de tous les pas de temps de modèle de la simulation.

Ce fichier d'« évolution temporelle » doit contenir les valeurs à affecter à tous les pas de temps de modèle à partir du pas de temps n°1 (il ne contient donc pas la valeur du pas de temps n°0).

Si on a défini des sous-pas de temps de modèle (dans le fichier des « Paramètres Généraux ») cela n'a pas d'influence sur les fichiers d'évolution temporelle, lesquels concernent uniquement les « pas de temps de modèle ».

Dans sa forme la plus simple, ce fichier texte a la forme d'une colonne de nombres, une valeur par ligne du fichier. Le fichier peut être précédé par une ligne de commentaire décrivant le contenu fichier.
La première ligne est reconnue comme une « ligne de commentaire » si elle ne commence pas par un nombre. Une bonne pratique est alors de la faire commencer par le caractère « # » ou le caractère « ! » (Figure 63).

Ce fichier peut également contenir plusieurs colonnes de valeurs, chaque colonne correspondant à un groupe de maille. Il est également possible, mais facultatif, de mettre en plus, dans la colonne la plus à droite, un indicateur mnémotechnique correspondant à la date (Figure 64).

```
# Valeurs de débits dans 1 groupe de mailles (8 pas de temps)
   -100
   -110
    -90
    -80
    -70
    -50
    -50
    -50
```

Figure 63 – Fichier d'« évolution temporelle » simple pour un groupe de mailles.

```
# Valeurs de débits dans 3 mailles au cours des 8 pas de temps
   -100     -70   -140   12/08/2018
   -110     -80   -150   15/08/2018
    -90     -60   -120   18/08/2018
    -80     -50   -100   20/08/2018
    -70     -40    -80   25/08/2018
    -50     -30    -70   31/08/2018
    -50     -30    -70   10/09/2018
    -50     -30    -70   30/08/2018
```

Figure 64 - Fichier d'« évolution temporelle » simple pour 3 groupes de mailles, avec une colonne (facultative) indiquant la date, pour vérifications.

C'est uniquement au pas de temps n°0 du fichier des « Pas de temps » qu'il est possible d'affecter un ou des fichiers d'« évolution temporelle » à des mailles individuelles ou des groupes de mailles.

Au pas de temps n°0, quand on affecte une valeur à une maille, à un bloc de mailles, à une couche ou à une zone, par la méthode décrite ci-dessus, on voit apparaître dans la boîte de dialogue un emplacement pour désigner, si on le souhaite, un fichier d'« évolution temporelle ». Juste à droite de cet emplacement, on peut également indiquer la « colonne du fichier » à prendre en compte (Colonne n°1 par défaut) (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Comme le fichier d'« évolution temporelle » ne contient pas la valeur du pas de temps n°0, c'est dans la boîte de dialogue que l'on précise la valeur du pas de temps n°0.

Si, à ce pas de temps n°0, on souhaite laisser la valeur inchangée (à sa valeur définie dans les grilles par exemple), on donne la valeur code « ***** » qui, comme indiqué dans la boîte de dialogue, signifie « inchangé ».

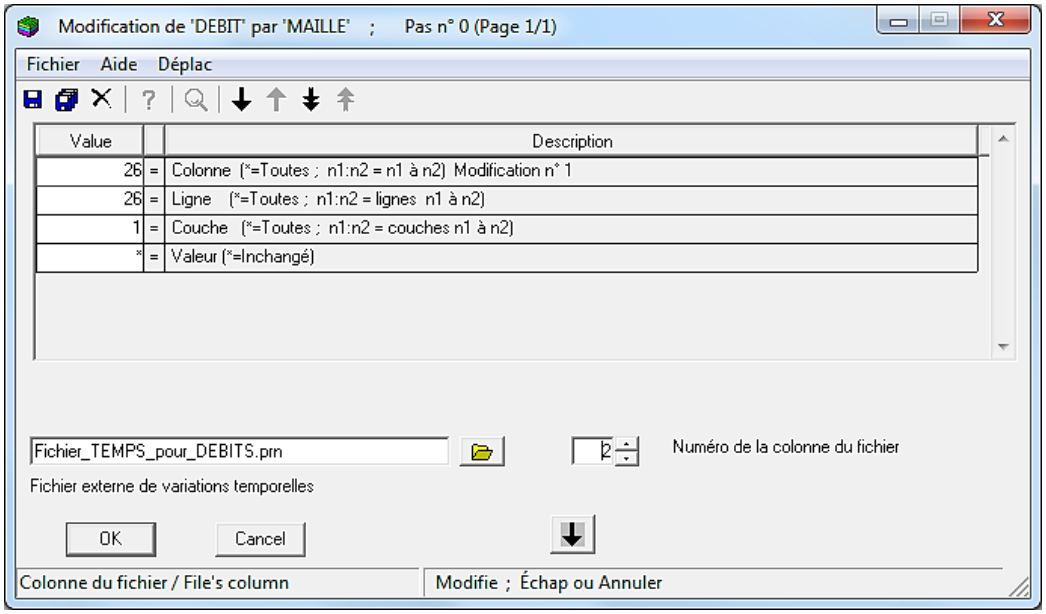


Figure 65 – Affectation d'un fichier d'évolution temporelle
à une maille (ou à un groupe de mailles)
(Affectation possible uniquement au pas de temps de modèle n°0).

Par exemple, en affectant les 3 colonnes du fichier d'évolution temporelle précédent (de nom « Fich_TEMPS_DEBITS.prn ») respectivement aux 3 mailles (26, 26), (24, 29), et (28, 29), on obtient le fichier de pas de temps de la Figure 66.

À titre de comparaison, la Figure 67 montre le début du fichier des « Pas de temps » qu'on obtiendrait sans fichiers d'évolutions temporelles. Il apparaît nettement que, même pour un exemple très simple, ce fichier des « Pas de temps » est beaucoup compliqué, plus difficile à générer, plus difficile à actualiser et surtout plus difficile à contrôler.

```
Exemple Maillage Monocouche Carré [Titre descriptif du fichier]
 << Avec fichier temporel >> [Commentaire]
 #<V7.5># - Fin du texte libre - ; Ne pas modifier/retirer cette ligne
 *** Début de la simulation    à la date :         0; ***
 /DEBIT/MAILLE C= 26L= 26P= 1V= *; File= Fich_TEMPS_DEBITS.prn
 /DEBIT/MAILLE C= 24L= 29P= 1V= *; File= Fich_TEMPS_DEBITS.prn; Col=2
 /DEBIT/MAILLE C= 28L= 29P= 1V= *; File= Fich_TEMPS_DEBITS.prn; Col=3
 /*****/***** Fin de ce pas
 *** Le pas :    1: se termine à la date :  1; ***
 /*****/***** Fin de ce pas
 *** Le pas :    2: se termine à la date :  2; ***
 /*****/***** Fin de ce pas
 *** Le pas :    3: se termine à la date :  4; ***
 /*****/***** Fin de ce pas
 *** Le pas :    4: se termine à la date :  6; ***
 /*****/***** Fin de ce pas
 *** Le pas :    5: se termine à la date : 12; ***
 /DEBIT/EDITION         *= 1;V= 0;L= 0;S= 0;Z= 0;
 /*****/***** Fin de ce pas
 *** Le pas :    6: se termine à la date : 18; ***
 /*****/***** Fin de ce pas
 *** Le pas :    7: se termine à la date : 24; ***
 /*****/***** Fin de ce pas
 *** Le pas :    8: se termine à la date : 36; ***
 /CHARGE_PUITS/EDITION    I= 1;
 /*****/***** Fin de ce pas
 ***        :     : Fin de la simulation :   ; ***
```

Figure 66 – Fichier « Pas de Temps » avec utilisation de fichiers d'évolution temporelle.

```
Exemple Maillage Monocouche Carré [Titre descriptif du fichier]
 << Sans Fichiers Temporels >> [Commentaire]
 #<V7.5># - Fin du texte libre - ; Ne pas modifier/retirer cette ligne
 *** Début de la simulation    à la date :  0; ***
 /*****/***** Fin de ce pas
 *** Le pas :    1: se termine à la date :  1; ***
 /DEBIT/MAILLE C= 26L= 26P= 1V= -100;
 /DEBIT/MAILLE C= 24L= 29P= 1V=  -70;
 /DEBIT/MAILLE C= 28L= 29P= 1V= -140;
 /*****/***** Fin de ce pas
 *** Le pas :    2: se termine à la date :  2; ***
 /DEBIT/MAILLE C= 26L= 26P= 1V= -110;
 /DEBIT/MAILLE C= 24L= 29P= 1V=  -80;
 /DEBIT/MAILLE C= 28L= 29P= 1V= -150;
 /*****/***** Fin de ce pas
 *** Le pas :    3: se termine à la date :  4; ***
 /DEBIT/MAILLE C= 26L= 26P= 1V=  -90;
 /DEBIT/MAILLE C= 24L= 29P= 1V=  -60;
 /DEBIT/MAILLE C= 28L= 29P= 1V= -120;
 /*****/***** Fin de ce pas
 *** Le pas :    4: se termine à la date :  6; ***
 /DEBIT/MAILLE C= 26L= 26P= 1V=  -80;
 /DEBIT/MAILLE C= 24L= 29P= 1V=  -50;
 /DEBIT/MAILLE C= 28L= 29P= 1V= -100;
 /*****/***** Fin de ce pas
 *** Le pas :    5: se termine à la date : 12; ***
 /DEBIT/MAILLE C= 26L= 26P= 1V=  -70;
 /DEBIT/MAILLE C= 24L= 29P= 1V=  -40;
 /DEBIT/MAILLE C= 28L= 29P= 1V=  -80;
 /*****/***** Fin de ce pas
```

Figure 67 – Début du fichier « Pas de Temps » sans utilisation de fichiers d'évolutions temporelle.

9.3.3. Modification d'« Actions » existantes

- On choisit l'option « Actions existantes » (Figure 68).
- On voit alors apparaître la même boîte de dialogue (Figure 69) pour choisir un « Thème » et visualiser les actions existantes dans ce thème.
- Après avoir choisi un thème, on voit alors apparaître les champs ou « Objets » concernés par les actions existantes de ce thème (Figure 70). Il est possible d'obtenir des précisions sur les champs concernés en appuyant sur ta touche [F3]. On sélectionne alors un des champs.
- S'il y a plusieurs actions existantes concernant cet « Objet », on choisit l'action par une boite de dialogue, sinon on voit directement apparaître l'action qu'il est alors possible de modifier, ou de supprimer.

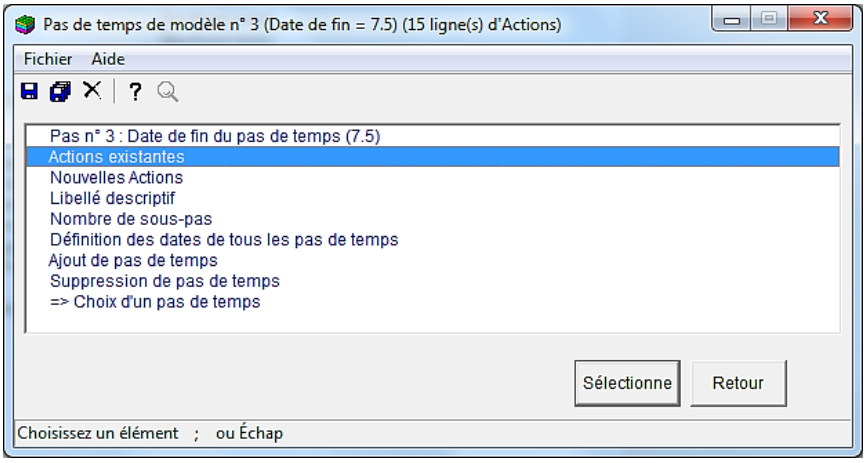


Figure 68 – Option de modifier des actions existantes.

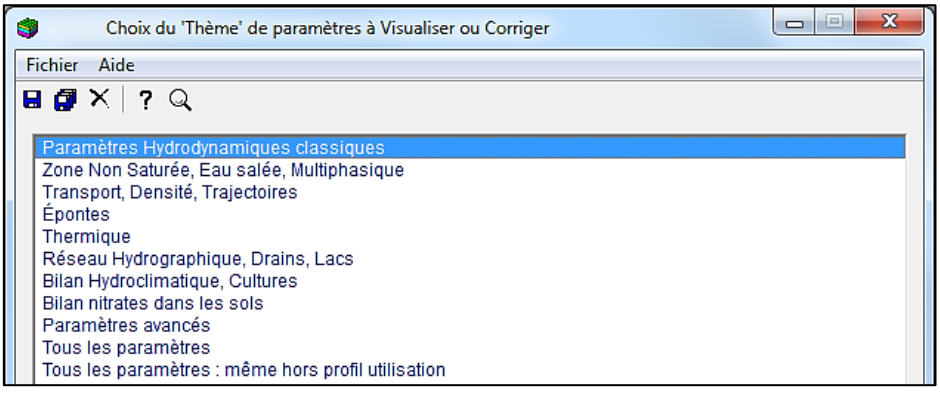


Figure 69 – Sélection d'un « Thème » pour les actions à modifier.

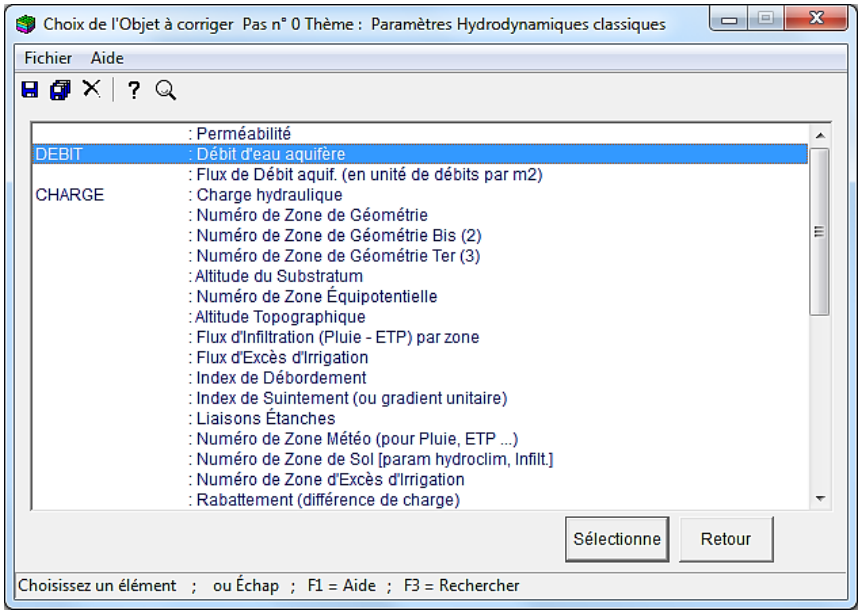


Figure 70 – Visualisation des actions existantes dans le thème choisi.

9.4. Ajout ou suppression de pas de temps

La Figure 58 montre qu'il est possible d'ajouter des pas de temps, après un pas de temps donné (Figure 71), ou de supprimer des pas de temps (Figure 72). Il est possible également de redéfinir les dates de tous les pas de temps.

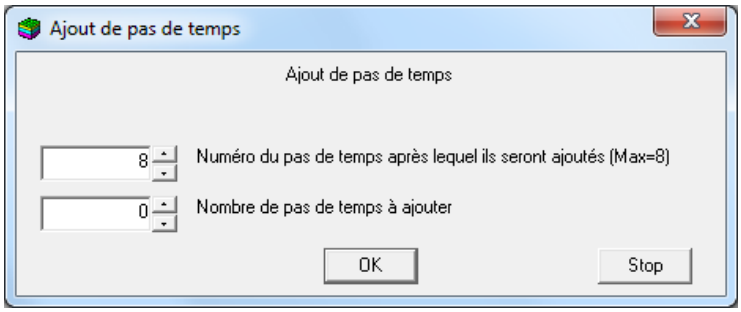


Figure 71 – Insertion de pas de temps (dans le fichier des pas de temps).

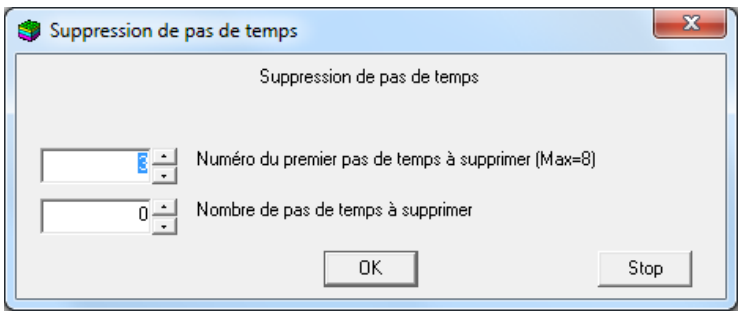


Figure 72 – Suppression de pas de temps (du fichier des pas de temps).

9.5. Autres options

D'autres options sont possibles à un pas de temps donné :

- Découper le pas de temps courant en un certain nombre de sous-pas de temps égaux (option « Nombre de sous-pas »).
  Cette option peut être utile quand la convergence est difficile à obtenir à certains pas de temps particulier : par exemple lors de la survenue d'une forte pluie sur une nappe quasi-dénoyée.
  - Si un pas de temps est découpé en 5 sous-pas par exemple, il s'agit de sous-pas de temps « internes » et non pas de « pas de temps de modèle ». L'introduction locale de sous-pas de temps ne produit donc pas de décalages si on utilise des fichiers d'évolution temporelle.
  - Le découpage du pas de temps courant en sous-pas se substitue à l'éventuel découpage de tous les pas de temps en un certain nombre de sous-pas (défini dans le fichier des « Paramètres Généraux », au paragraphe « Pas de temps »).
    Par exemple, si on a défini que tous les pas de temps sont découpés en 5, et qu'on découpe le pas de temps courant en 3, le pas de temps courant sera découpé en 3 (et non *pas* en 3 x 5).

- Ajouter un libellé descriptif pour ce pas de temps. Ce libellé mnémotechnique apparaît dans le fichier des pas de temps et dans le fichier bilan. Il peut par exemple être du type « Arrêt du pompage » ou bien « Début de la crue ».

10. Les champs de données spatialisées en entrée

Ce chapitre définit les champs de données utilisés en entrée :

- Les champs de données pour un calcul d'hydrodynamique classique
- Les champs de données pour le bilan hydroclimatique
- Les champs de données pour le réseau hydrographique (rivières) et le réseau de drains

Les données des champs spatialisés sont rassemblées dans des « fichiers de grilles », chaque champ dans un fichier différent.

MARTHE permet de diminuer le nombre de fichiers à créer et facilite ainsi un éventuel changement de maillage ultérieur par la propriété suivante :

Il n'est pas nécessaire de créer un fichier pour un champ dont toutes les mailles du domaine ont la même valeur. Il suffit de donner à ce champ, dans le fichier projet, un nom fictif sous la forme « =valeur ». Par exemple, si toutes les mailles ont un coefficient d'emmagasinement libre égal à 5 (unités utilisateur), on peut utiliser un nom de fichier fictif « =5 » (sans les guillemets). Quand on attribue avec WinMarthe une valeur uniforme à toutes les mailles d'un champ spatialisé, un nom de la forme « =valeur » est créé automatiquement dans le fichier projet.

Remarque : Cette utilisation d'un nom fictif de type « =valeur » ne peut cependant pas être appliquée au « fichier de perméabilité » qui doit être obligatoirement un vrai fichier. En effet, c'est dans ce fichier de perméabilité que sont décrits les nombres et dimensions des colonnes et des lignes du maillage, ainsi que les coordonnées des centres des lignes et colonnes.

Organisation des fichiers de données spatialisées pour les maillages multicouches ou 3D

Pour chaque champ qui n'est pas uniforme, le fichier de « grilles » contient les données, successivement couche par couche, de la couche n°1 à la dernière couche, de haut en bas (comme les pages d'un livre fermé). Les données de chaque couche apparaissent sous forme d'une « grille » formée de N_L lignes de N_C colonnes chacune.

Les données des éventuels sous-maillages gigognes sont rangées après les données de la dernière couche du maillage principal. Par exemple, un fichier relatif à un maillage de 4 couches, contenant 2 sous-maillages gigognes a la forme suivante :

Maillage principal : couche n°1, couche n°2, couche n°3, couche n°4, puis gigogne n°1 : couche n°1 à couche n°4, puis gigogne n°2 : couche n°1 à couche n°4.

10.1. Les champs de données (quasiment) toujours nécessaires

La simulation la plus simple qui peut être effectuée est un calcul hydrodynamique (appelé parfois aussi calcul hydraulique) pour obtenir le champ de charge hydraulique et le champ de débit d'eau dans un aquifère ou dans un système aquifère.

Pour effectuer une telle simulation simple, les fichiers nécessaires sont au minimum les suivants :

- Quelques fichiers de champs spatialisés de géométrie. Au minimum :
  - Un fichier maillé de « Perméabilité » qui définit en particulier l'extension du maillage, les dimensions des mailles et l'extension des aquifères dans le maillage. Ce fichier de « Perméabilité » joue aussi le rôle de fichier de « Présence » (mailles actives).
  - Un fichier maillé d'« Altitude du substratum » des différentes couches.
  - Un fichier maillé d'« Altitude topographique » servant de limite supérieure aux différentes couches aquifères.
  - Éventuellement, un fichier de « Débits d'eau » définissant les pompages et injections et permet aussi d'imposer les charges hydrauliques sur certaines mailles.
  - Un fichier de charge hydraulique initiale, indispensable même en régime permanent, pour initialiser les calculs itératifs.

- Un fichier de « Couches aquifères et Gigognes » : pour décrire le nombre de couches et le type de maillage.
  Ce fichier est généré automatiquement lors de la création d'un nouveau projet par WinMarthe. Il peut ensuite être modifié avec le module de « Gestion des données non maillées ».

10.2. Le fichier des « Couches aquifères et Gigognes »

Ce fichier, d'extension [.layer], n'est pas un champ de données maillées mais il est présenté ici parce qu'il leur est étroitement lié.

Ce fichier de « Couches aquifères et Gigognes » comporte 2 paragraphes :

- Le 1er paragraphe définit le nombre de couches. Pour chaque couche il définit :
  - Le numéro de couche : ce paramètre est généré automatiquement par WinMarthe et ne devrait pas être modifié.

  - Un ordre de grandeur indicatif de l'épaisseur de la couche. Cette épaisseur est utilisée dans les calculs comme critère de précision pour déterminer les états de dénoyage ou de débordement de nappe. L'épaisseur est donnée en unité utilisateur de charge et d'altitude.

  - Un nom de couche (facultatif). Ce nom apparaît lors des affichages dans WinMarthe. Il apparaît également dans les bilans par couche sur les listings. Ce nom sert à identifier les formations, par exemple « Néocomien », « Sol altéré », etc.

  - D'autres paramètres, « Uni Ke » et « Anisot » qui considérés comme obsolètes ne sont pas décrits ici, mais dans l'**Annexe 3**

- Le 2ème paragraphe permet de préciser la présence de sous-maillages gigognes ou de géométries particulières. Il définit :
  - Le nombre de sous-maillages gigognes. Ce paramètre est généré automatiquement par WinMarthe et ne devrait pas être modifié.
  - Un choix de géométrie particulière avec « Coupe verticale à substratums irréguliers ».
  - Le choix d'un « maillage radial » de type (Rayon, Angle), éventuellement en coupe verticale à substratums horizontaux.
    En cas de coupe verticale, le maillage est alors de type (Rayon, Altitude Z)

En résumé :

- WinMarthe définit le nombre de couches et le nombre de maillages gigognes
- Les autres paramètres sont définis *via* le module de « Gestion des données non maillées », accessible par le bouton de la barre d'outils du bas du cadre de WinMarthe, en sélectionnant la ligne « Couches aquifères et gigognes » (Figure 73).

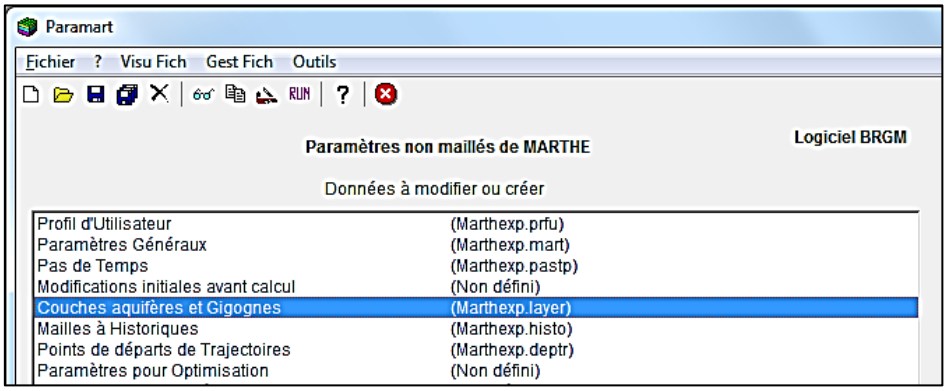


Figure 73 – Sélection du paragraphe « Couches aquifères et gigognes ».

La Figure 74 montre un exemple de fichier « Couches aquifères et Gigognes », pour un maillage à 3 couches.

```
Description des Couches et des Gigognes BdP [Titre descriptif]
Cou= 1;Épais= 100;Épon Sup =0;Uni Ke= 1;Anisot= 0; Name= Craie Compac
Cou= 2;Épais= 200;Épon Sup =0;Uni Ke= 1;Anisot= 0; Name= Albien
Cou= 3;Épais= 250;Épon Sup =0;Uni Ke= 1;Anisot= 0; Name= Néocomien
*** Sous-maillages Gigognes, Coupe, Radial          ***
  2=Nombre de sous-maillages Gigognes
  0=Coupe Verticale à Substratums Irréguliers (0=Non ; 1=Oui)
  0=Maillage Radial [Rayon , Angle] (0=Non ; 1=Oui)
```

Figure 74 – Exemple de fichier de « Couches aquifères et gigognes ».

Par ailleurs, de manière conventionnelle, on définit la **couche n°0** comme une couche fictive, située au-dessus du domaine et couvrant son extension totale. Elle se rapporte donc à tous les affleurements. Elle est formée de la réunion des affleurements de toutes les couches.

10.3. Les champs de données pour un calcul d'hydrodynamique classique

Les champs utilisés pour un calcul d'hydrodynamique servent au calcul de charge hydraulique et de débit d'eau. Ce sont principalement les champs de perméabilité, altitude du substratum, altitude topographique, coefficients d'emmagasinement, et débit. D'autres champs peuvent s'y ajouter, selon le contexte hydrogéologique : index de débordement, anisotropie de perméabilité, etc.

Perméabilité de l'aquifère

Ce fichier sert à définir à la fois :

- La perméabilité à saturation de chacune des mailles du système l'aquifère.
- La présence d'aquifère, c'est-à-dire l'appartenance au domaine de calcul des écoulements en nappe (« mailles actives »).
- La géométrie des grilles du maillage : les nombres de colonnes et de lignes, les largeurs des différentes colonnes et des différentes lignes, les abscisses des centres des colonnes et les ordonnées des centres des lignes.

La perméabilité à saturation ou « perméabilité à l'eau », ou encore « conductivité hydraulique », est donnée en « unité utilisateur de perméabilité » (par défaut en m/s)
Cependant on peut également utiliser des « perméabilités intrinsèques » dont l'unité par défaut est alors le m^2.

C'est par un paramètre du fichier des « Paramètres généraux », au paragraphe « Unités des données », qu'on indique à MARTHE si les valeurs de perméabilité contenues dans le fichier de perméabilité sont :

- Des « perméabilités à l'eau ».
- Ou bien des « perméabilités intrinsèques ».

La perméabilité à l'eau (ou conductivité hydraulique) est égale à la transmissivité du milieu divisée par l'épaisseur saturée d'aquifère.

S'il n'y a pas d'anisotropie, la perméabilité est identique dans les 3 directions :

$$Kx = Ky = Kz$$

On peut introduire des coefficients d'anisotropie :

- $\mathbf{A_{Kx/Ky}}$ = Perméabilité selon l'axe Ox / Perméabilité selon l'axe Oy.
- $\mathbf{A_{Kz/Kh}}$ = Perméabilité Verticale / Perméabilité Horizontale.

Ces coefficients d'anisotropie peuvent être des coefficients uniformes, définis dans le fichier des « Paramètres généraux » au paragraphe des « Unités des données », ou bien être des champs maillés.

La perméabilité introduite dans le fichier de perméabilité est toujours la perméabilité horizontale K_{Hor}.

Dans un milieu isotrope on a : $K_x = K_y = K_z = K_{Hor}$

Dans un milieu anisotrope, on a :

- $K_x = K_{Hor} \cdot \sqrt{A_{Kx/Ky}}$
- $K_y = K_{Hor} / \sqrt{A_{Kx/Ky}}$
- $K_z = K_{Hor} \cdot A_{Kz/Kh}$

Valeurs particulières (valeur 0, ou valeur 9999) :

- Une perméabilité égale à la valeur code « 9999 » : indique une maille dont la perméabilité est « infiniment petite » : il n'y a pas de calcul de charge hydraulique dans une telle maille.
- Une perméabilité égale à 0 : indique une maille qui n'existe pas et n'est pas une maille de calcul.
  Par exemple : si sur une verticale la couche n°3 est en contact avec la couche n°6, parce que les couches n°4 et n°5 se sont biseauté et ont disparu => La perméabilité des couches n°4 et n°5 sur cette verticale sera mises à 0 (puisque ces couches sont localement absentes sur cette verticale).
  En revanche, si on mettait une perméabilité égale à la valeur code 9999, les mailles des couches n°4 et n°5 existeraient, mais auraient une perméabilité « infiniment petite » et donc isoleraient la couche n°3 de la couche n°6.

  En résumé :
  - Une perméabilité égale à 0 => Indique une maille qui n'existe pas. C'est le cas général à privilégier.
  - Une perméabilité égale à 9999 dans un système multicouche ou 3D => Isole sur la verticale (« granite sain », argile imperméable, etc.) : *ce qui est relativement rare*.
- Dans un système monocouche, il est équivalent de mettre une perméabilité égale à 0 ou bien égale à la valeur code « 9999 » : dans les deux cas il n'y aura pas de calcul de charge hydraulique.
- Une maille affleurante ayant une perméabilité égale à 0 ou bien égale à la valeur code « 9999 » peut cependant contenir un cours d'eau. Ce cas correspond par exemple un cours d'eau sur une formation argileuse, ou bien un torrent de montagne en formation de socle.

Même si la perméabilité est uniforme dans tout le domaine, WinMarthe constituera toujours un fichier réel de perméabilité. Il n'est pas possible d'utiliser un nom fictif de type « =valeur ». En effet comme expliqué ci-dessus, c'est dans ce fichier de perméabilité que sont décrites les nombre et dimensions des colonnes et des lignes du maillage, ainsi que leurs coordonnées.

Altitude du substratum (cote du substratum)

L'altitude du substratum est exprimée en unité utilisateur de charge et d'altitude.

C'est la limite inférieure de la maille.

- Avec un schéma de calcul en « nappe libre » ou en « Pseudo Non Saturé », la maille est désaturée si la charge hydraulique est inférieure à l'altitude du substratum.
- Avec un schéma de calcul en « Pseudo Non Saturé », la charge hydraulique peut être inférieure à l'altitude du substratum : dans ce cas les échanges horizontaux avec les mailles voisines se font alors à travers une petite épaisseur résiduelle.
- Avec un schéma de calcul en « Zone Non Saturée », la charge hydraulique n'est pas limitée inférieurement par l'altitude du substratum.

Altitude topographique (cote topographique)

La « topographie » est la limite supérieure du système aquifère. Elle couvre l'extension totale du domaine, formée de la réunion, ou de la projection, de toutes les couches. Cette extension totale est appelée la couche fictive n°0.

L'altitude topographique est exprimée en unité utilisateur de charge et d'altitude.

- En fait, l'altitude topographique n'est pas réellement l'altitude de la topographie mais, en chaque maille, l'altitude de la « limite supérieure de la couche aquifère la plus haute ».

  Par exemple, si la couche aquifère la plus haute est recouverte d'une couche imperméable : l'« altitude topographique » est alors l'altitude de la base de cette couche imperméable.

- L'altitude topographique est utilisée pour déterminer si la nappe déborde ou devient en charge, et aussi pour déterminer si la rivière déborde.

  Chaque fois qu'une formation aquifère affleure, c'est cette topographie qui lui sert de toit. Ce toit peut être soit une limite étanche qui confine l'aquifère et peut induire une mise en charge de la nappe, soit une altitude de débordement. La nature du toit est définie par l'« index de débordement ».

- L'altitude topographique de tout le domaine se rapporte à la couche fictive appelée couche n°0. En pratique, cependant, les données d'altitude topographique sont écrites dans la couche n°1.
  Par exemple dans une zone du domaine où c'est la couche n°3 qui affleure, son altitude topographique est donnée dans la couche n°1, et non pas dans la couche n°3.

- Dans un maillage en coupe verticale : l'altitude topographique doit être définie dans la ligne n°1, qui correspond à la « couche n°0 ».

- Dans un maillage en pseudo-coupe verticale (calcul en ZNS) : l'altitude topographique et l'altitude du substratum servent à définir l'épaisseur de la coupe. Pour définir une épaisseur uniforme, il faut définir une « Altitude Topographique » et une « Altitude de substratum » uniformes : par exemple : Topographie = 0 et Substratum = -1 m, ou bien Topographie = -10 m et Substratum = -11 m.

Débit d'eau (débit de fluide)

C'est le débit volumique de fluide introduit ou prélevé dans les mailles du domaine (pompages, injections).

- Le débit de fluide est exprimé en unité utilisateur de débit.
- Un débit entrant ou injecté est positif ; un débit sortant ou pompé est négatif.

Valeurs particulières (valeur 9999, ou valeur -9999) :
- Une valeur égale à 9999 => Impose la charge hydraulique dans la maille (Figure 75).
- En écoulement multiphasique : une valeur égale à -9999 => Impose la teneur en fluide de la phase dans la maille.

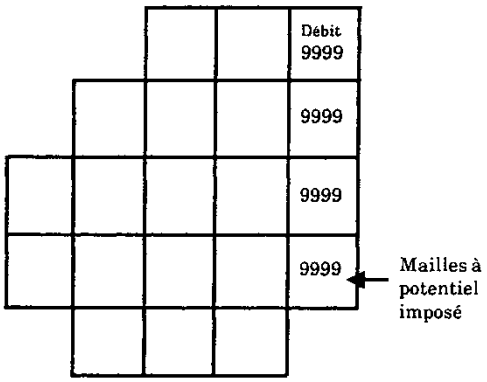


Figure 75 - Limite à charge hydraulique imposée (définie par des débits = 9999).

Si on voulait justement introduire un débit entrant égal à 9999, il suffirait par exemple de le fixer à 9999.1. On aurait alors quasiment la valeur souhaitée, mais en évitant la valeur code 9999.

Charge hydraulique

C'est la charge hydraulique initiale introduite dans les mailles du le domaine. Dans les calculs classiques, sans schéma de calcul en « Zone Non Saturée » : il faut donner une charge hydraulique initiale dans chaque maille du domaine de calcul. Si on ne donnait pas de valeur, par défaut une charge hydraulique égale à 0 serait utilisée, ce qui serait le plus souvent inapproprié et engendrerait des difficultés de calcul.

La charge hydraulique est exprimée en unité utilisateur de charge et d'altitude. C'est la charge hydraulique moyenne de la nappe dans la maille.
En cas de calculs avec effets densitaires : il s'agit de la charge hydraulique réelle en eau dense (eau salée par exemple).

Nappe localement dénoyée :

- Avec le schéma de calcul en « Pseudo Non saturé » (*conseillé*) : la charge hydraulique peut être inférieure à l'altitude du substratum de la maille (comme avec les schémas en Zone Non Saturée). Cela ne pose pas de problème. Il peut y avoir des échanges avec les mailles voisines à travers une faible épaisseur saturée.
  En fin de calcul, les valeurs des charges hydrauliques de ces mailles sont sauvegardées normalement dans les fichiers de résultats, même si elles sont inférieures à l'altitude su substratum.

- Avec le schéma de calcul en « nappe libre » (*déconseillé*) : Si la charge hydraulique est inférieure à l'altitude du substratum de la maille, l'aquifère est localement dénoyé. En fin de calcul, la charge hydraulique de ces mailles est indiquée dans les fichiers de résultats par une valeur code égale à 9999.

Index de Débordement

C'est un index qui concerne l'extension totale du domaine, formée de la réunion de toutes les couches, c'est-à-dire la couche fictive n°0. Il caractérise la topographie.

L'index de débordement précise, en chaque maille, le comportement de la « topographie » quand la charge hydraulique l'atteint et tente de la dépasser.
Cet index s'applique uniquement aux mailles affleurantes :

- Index = 0 : La « topographie » est une limite « étanche ». Si la charge hydraulique réelle dépasse l'altitude topographique => La nappe devient localement en charge (l'emmagasinement est alors caractérisé par le coefficient d'emmagasinement captif).
  C'est la valeur par défaut.
- Index = 1 : La « topographie » est une limite de débordement. Si la charge hydraulique réelle dépasse l'altitude topographique => Un débit de débordement, sortant de l'aquifère, est généré.
- Cas particulier : Index = 99 => Le débordement peut se produire mais n'est pas transféré vers le réseau hydrographique. Il sort du système et ne participe plus aux écoulements superficiels.

Remarque : Si on a défini une « Altitude de débordement », le débordement survient si la charge hydraulique dépasse l'altitude de débordement de la maille, et non pas la cote topographique.

Remarque : Avec un schéma de calcul en Zone Non Saturée : Le débordement survient si la charge hydraulique dépasse l'altitude de la maille (c'est-à-dire la mi-hauteur de la maille) et non pas la cote topographique (ou l'altitude de débordement).

Remarque : L'index de débordement de tout le domaine se rapporte à la couche fictive n°0. En pratique cependant les données sont rangées dans la couche n°1.
Par exemple, dans une zone où la couche n°3 affleure, son index de débordement est donné dans la couche n°1 et non pas dans la couche n°3.

Remarque : Un index de débordement égal à 0 permet une éventuelle mise en charge mais n'empêche *pas* une alimentation par les précipitations ou par irrigation.

Index de Suintement (ou gradient unitaire)

C'est une généralisation de l'« Index de débordement ». Ce champ est plus général car l'index de suintement peut être défini dans n'importe quelle couche du domaine modélisé : par exemple dans une galerie, un puits ou sur une paroi.

- Index = 1 => Suintement possible.
- Index = 0 => Pas de suintement possible.

Comme pour le débordement, le suintement se produit :

- Schéma de calcul classique : quand la charge réelle atteint le toit de la maille.
- Schéma en Zone Non Saturée (ZNS) : quand la charge hydraulique atteint l'altitude de la mi-hauteur de la maille (appelée « altitude de la maille »), et non pas son toit.

Cas particuliers :
- Index = 99 => S'il y a suintement, le débit de suintement n'est pas transféré vers le réseau hydrographique. Il sort du système et ne participe pas aux écoulements superficiels.
- Index = 9 => Impose un « Gradient Unitaire » (ce n'est pas un suintement).
  (S'applique uniquement pour les calculs en « Pseudo-ZNS » ou en Zone Non Saturée).

Altitude de débordement (ou de suintement)

Par défaut le débordement, ou suintement, se produit quand la charge hydraulique dépasse :

- L'altitude du toit de la maille : lors des calculs Pseudo-Non Saturé, ou en « nappe libre » (*obsolète*) ;
- L'altitude de la mi-hauteur de la maille (« altitude de la maille ») : dans les calculs en Zone Non Saturée (ZNS) ou multiphasique.

L'altitude de débordement, quand elle est définie, remplace alors le toit de la couche : c'est-à-dire que le débordement (ou le suintement) se produit quand la charge hydraulique dépasse cette altitude de débordement.

- Quand on utilise un fichier d'« altitude de débordement » pour y définir des valeurs ponctuelles, il est conseillé de l'initialiser à 9999, car les valeurs 9999 ne sont pas prises en compte => le débordement se produit alors au toit de la maille. En revanche les valeurs laissées à 0 (valeur par défaut) à 0 induiraient un débordement à l'altitude 0.
  Si on n'utilise pas de fichier d'« Altitude de débordement », les valeurs sont initialisées à 9999.
- L'altitude de débordement doit être supérieure ou égale à celle du substratum de la maille.
  A priori, elle devrait être inférieure ou égale à l'altitude du toit de la maille, sauf dans la couche qui affleure.
  Dans la couche qui affleure, l'altitude de débordement peut être supérieure à l'« altitude topographique », c'est-à-dire au « toit du domine modélisé ».
- Cette altitude de débordement n'est pas applicable dans les calculs en ZNS ou en multiphasique, puisque l'éventuel débordement est contrôlé par l'altitude de la maille.

Coefficient d'emmagasinement en nappe captive

Le coefficient d'emmagasinement captif est utilisé uniquement en régime hydrodynamique transitoire.
Il est utilisé principalement quand la nappe est localement captive.

Remarque : Avec le schéma de calcul en « Pseudo Non-Saturé » ou en « Zone Non Saturée » (ZNS) : ce coefficient d'emmagasinement captif est cependant utilisé même si la nappe n'est pas captive.

On peut introduire dans ce champ au choix :
- Le coefficient d'emmagasinement captif (c'est le cas général).
- La compressibilité des pores.

C'est par un paramètre du fichier des « Paramètres généraux », au paragraphe « Unités des données », qu'on indique à MARTHE si les valeurs contenues dans le fichier de « Coefficient d'emmagasinement captif » sont :

- Des « Coefficients d'emmagasinement captif spécifique » S_S : recommandé. (Unité par défaut : m^{-1}).
- Des « Coefficients d'emmagasinements captifs des hydrogéologues » S_C : déconseillé, sauf éventuellement dans une nappe monocouche. (Unité par défaut : sans unité)
- Des « coefficients de compressibilité des terrains » (Unité par défaut : m^{-1})

Le « Coefficient d'emmagasinement captif des hydrogéologues » « S_C » est le produit S_S x E, de

l'emmagasinement spécifique S_S par l'épaisseur « E » de l'aquifère qui n'est pas intrinsèque. Il n'est donc *pas* intrinsèque.

Le coefficient d'emmagasinement captif spécifique est obtenu à partir de la porosité, la compressibilité de l'eau et la compressibilité du terrain par la relation suivante :

$$S_s = \omega \times (C_{Por} + C_w) \quad \Leftrightarrow \quad S_s = C_{Terr} + \omega \times C_w$$

Avec :
S_S = Coefficient d'emmagasinement captif spécifique (en m^{-1})
ω = Porosité (sans unité)
C_{Por} = Compressibilité des pores (en m^{-1})
C_{Terr} = Compressibilité du terrain, c'est-à-dire du milieu poreux (en m^{-1})
C_w = Compressibilité de l'eau ($5\ 10^{-6}\ m^{-1}$)

On notera que, même pour les formations les plus incompressibles, l'emmagasinement spécifique S_S est au moins égal à ω . C_w c'est-à-dire $S_s > \omega$. $5\ 10^{—6}\ m^{-1}$

Freeze et Cherry (1979), cités par G. de Marsily (1981), donnent les valeurs suivantes de compressibilité du terrain C_{Terr} :

Compressibilité du terrain (en m^{-1})	
Argile	10^{-2} à 10^{-4}
Sable	10^{-3} à 10^{-5}
Gravier	10^{-4} à 10^{-6}
Roche fracturée	10^{-4} à 10^{-6}
Roche saine	10^{-5} à 10^{-7}

Avec ces valeurs on trouve les valeurs approximatives suivantes :

Formation	ω	C_{Terr} (m^{-1})	**S_S** (m^{-1})
Sable	0.20	10^{-4}	**10^{-4}**
Roche fracturée	0.01	10^{-5}	**10^{-5}**
Roche saine	0.001	10^{-6}	**10^{-6}**

Coefficient d'emmagasinement en nappe libre

Le coefficient d'emmagasinement libre est utilisé uniquement en régime hydrodynamique transitoire.

- Il est utilisé uniquement quand la nappe est localement libre, c'est-à-dire dans une maille, de n'importe quelle couche, qui n'est pas entièrement saturée :
  C'est la quantité d'eau, par unité de volume de milieu poreux, qui peut être stockée/déstockée lorsque la surface libre monte/descend.
- C'est une grandeur souvent proche d'une porosité efficace. C'est le coefficient d'emmagasinement qui serait déduit d'un pompage d'essai dans une région homogène où la nappe est libre.
- C'est un coefficient sans dimension. On peut cependant choisir de l'exprimer en **%**.

Des ordres de grandeurs du coefficient d'emmagasinement libre sont :

- 1 à 2 % dans des roches dures (granite fissuré).
- 5 % dans du calcaire.
- 5 à 10 % dans du grès.
- 7 à 25 % dans du sable.
- 30 % dans de la craie.

Remarque : Les schémas de calcul en « Zone Non Saturée » (ZNS), n'utilisent pas de coefficient d'emmagasinement libre, mais utilisent la porosité qui sert de teneur en eau à saturation.

En cas de calcul avec transport, le coefficient d'emmagasinement libre devrait toujours être identique à la porosité efficace.

Numéro de Zone de Géométrie

C'est un numéro de zone affecté à chaque maille du domaine.

Ce numéro peut être « volatil », c'est-à-dire être redéfini après un premier usage, même dans le même pas de temp.

Le numéro maximum pris en compte est égal à 999. Les valeurs supérieures sont ignorées.

- Utilisation 1 : Définition de paramètres uniformes dans des zones du domaine modélisé :
  Par exemple on peut affecter une perméabilité égale à 5 à toutes les mailles qui ont « 15 » comme numéro de zone de géométrie.
- Utilisation 2 : Édition de bilans de débit, de masse ou de chaleur dans chaque zone du domaine modélisé.

Une maille peut avoir un numéro de zone égal à 0, mais on ne peut pas affecter de valeurs de champ par zone aux mailles ayant un numéro de zone égal à 0.

L'utilisation de zones de géométrie permet de faciliter la calibration des paramètres d'un modèle. On peut en effet calibrer le modèle par modifications successives de la perméabilité de chaque zone de géométrie.

On peut également simuler facilement des variations au cours du temps de paramètres (altitude de l'eau dans des rivières, colmatage du lit de rivières, creusement d'une mine, remblaiement d'une gravière, etc.) en modifiant un nombre réduite de valeurs.

Numéro de Zone de Géométrie Bis (2)

C'est un numéro de zone de « Type 2 », en tout point similaire au « Numéro de zones de géométrie » et au « Numéro de zones de géométrie Ter » décrit dans la section suivante. L'usage combiné de ces trois zones de géométrie démultiplie les possibilités offertes par chacune d'elles.

Il est peut être, comme eux, « volatil ».

Le numéro maximum pris en compte est 999. Les valeurs supérieures sont ignorées.

Ce numéro de zone peut être utilisé pour définir des paramètres par plages, ou bien pour faire des bilans par zone, comme le numéro de « Zone de Géométrie ».

On peut, par exemple, utiliser ces « Zones de Géométrie Bis » pour faire des bilans dans certaines zones, alors que les « Zones de Géométrie » sont utilisées pour affecter des valeurs particulières à des paramètres dans d'autres zones.

Numéro de Zone de Géométrie Ter (3)

C'est un numéro de zone de « Type 3 », », en tout point similaire au « Numéro de zones de géométrie » et au « Numéro de zones de géométrie Bis » décrits dans les sections précédentes. Il peut être, comme eux, volatil. L'usage combiné de ces trois zones de géométrie démultiplie les possibilités offertes par chacune d'elles.

Le numéro maximum pris en compte est 999. Les valeurs supérieures sont ignorées.

Ce numéro de zone peut être utilisé pour définir des paramètres par plages, ou bien pour faire des bilans par zone, comme le numéro de « Zone de Géométrie ».

On peut par exemple utiliser ces « Zones de Géométrie Ter » pour faire un bilan dans certaines zones, alors que les « Zones de Géométrie Bis » sont utilisées pour affecter des valeurs particulières à des paramètres dans d'autres zones.

Numéro de Zone Équipotentielle

C'est un numéro de zone qui peut être utilisé pour simuler une gravière.

- Toutes les mailles ayant le même numéro de zone équipotentielle auront le même « potentiel », c'est-à-dire la même charge hydraulique (ou la même pression hydraulique, selon le schéma de résolution).
  Ce potentiel, uniforme dans la zone équipotentielle mais inconnu, est calculé par le code de calcul.
- Il ne pas utiliser de « zones équipotentielles » si on veut faire un calcul de transport de masse, de transfert thermique, ou un calcul de trajectoires.
  En effet, comme la charge hydraulique est uniforme dans toute la zone, il n'y a pas de gradient de charge hydraulique, donc pas de transport par convection-dispersion à l'intérieur d'une zone équipotentielle.

On peut définir jusqu'à 99 zones équipotentielles différentes.

L'utilisation de « zones équipotentielles » est devenue quasi-obsolète. En effet, avec les solveurs actuels on obtient des résultats presque équivalents en introduisant dans la zone considérée une perméabilité beaucoup plus forte que les perméabilités des mailles voisines. Par exemple, on peut introduire une perméabilité 500 ou 1000 fois plus grande. Si on introduisait une perméabilité 10^5 ou 10^6 fois plus forte, on risquerait cependant d'avoir des difficultés pour faire converger les calculs.

L'intérêt d'utiliser cette méthode, avec une perméabilité augmentée, plutôt qu'une « zone équipotentielle », est qu'il est alors possible de calculer des trajectoires ou de simuler un transport de masse ou un transfert thermique.

Liaison Étanche

Une « Liaison étanche » est une isolation qui interdit les échanges entre 2 mailles adjacentes. Elle permet de simuler une paroi étanche (palplanche, fondation de bâtiment, faille, etc.)

- Une isolation est possible vers le Nord, le Sud, l'Est et l'Ouest.
- Une isolation est possible également vers le Haut ou le Bas.
- Dans cette version, une « Liaison étanche » est aussi une liaison adiabatique, c'est-à-dire qu'elle interdit aussi les échanges thermiques.

La définition des liaisons étanches se fait avec le préprocesseur WinMarthe en cliquant sur le bouton situé sur la barre d'outils située à droite du cadre. Il suffit alors de double-cliquer sur une maille. La boîte de dialogue qui apparaît permet de sélectionner les côtés de la maille sur lesquels on veut imposer une liaison étanche (Figure 76).

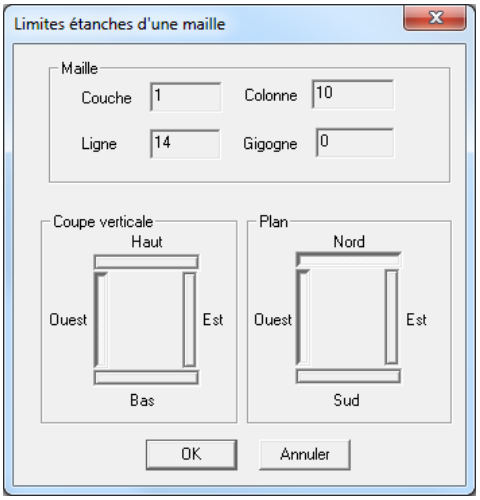


Figure 76 - Boite de dialogue pour définir les liaisons étanches.

Le fichier généré, d'extension [.liais] n'est pas un champ de données maillées.

Pour information, ce fichier, qui en utilisation normale n'a pas à être modifié de manière externe, a la forme illustrée par la Figure 77.

```
 Col  Lig  Cou;HBNESW   #
  37   72    4    1      0
  37   71    4      1    0
  38   72    4    1      0
  38   71    4      1    0
  38   59    8     1     0
  39   72    4    11     0
  39   71    4      1    0
  39   60    8    11     0
  39   59    8      11   0
```

Figure 77 - Exemple de fichier de liaisons étanches.

Les libellés de la ligne d'entête ont la signification suivante :

« Col » = Colonne, « Lig » = Ligne, « Cou » = Couche, « # » = Gigogne

« HBNESW » = **H**aut , **B**as, **N**ord, **E**st, **S**ud, **W**est (sens des aiguilles d'une montre).

Les liaisons étanches sont indiquées par un « 1 » dans la colonne correspondante. Dans l'exemple de fichier présenté : la première ligne indique que dans la maille : Colonne = 37, Ligne = 72, Couche = 4, il y a une liaison étanche au Nord. Il n'est pas nécessaire d'indiquer que réciproquement la maille (37, 71, 4) a une liaison étanche au Sud, car WinMarthe génère automatiquement les liaisons réciproques.

Ce fichier étant « formaté », il ne peut pas être modifié de manière externe qu'avec le plus grand soin.

Points de départ de trajectoires

Ce fichier, d'extension [.deptr], n'est pas un champ de données maillées mais il est présenté ici par commodité.

Ce fichier contient les coordonnées des points de départ des trajectoires.

Un point de départ peut être défini de 2 façons :
- par leurs coordonnées (X, Y, Z) du point,
- ou bien par les numéros de Colonne, Ligne, Couche, Gigogne de la maille concernée

Quand on donne les numéros de colonne, ligne, couche, gigogne de la maille, il est possible :
- De donner des nombres décimaux :
  - Par exemple, la colonne 3.4 désigne la colonne n°3, à 40 % de sa largeur, en direction de la colonne n°4 (donc vers l'Est).
  - Par exemple, la ligne 8.2 désigne la ligne n°9, à 20 % de sa hauteur, en direction de la ligne n°9 (donc vers le Sud).

- D'utiliser le caractère « ***** » (le joker) pour signifier « toutes » :
  - Par exemple, la « maille » colonne = *****, ligne = 12, couche = 2 désigne en fait toutes les mailles définies par « toutes les colonnes » de la ligne n°12 de la couche n°2.
  - Par exemple, la « maille » colonne = 3, ligne = 357, couche = ***** désigne en fait toutes les mailles définies par colonne n°3, ligne n°357 pour « toutes les couches ».

    Il est possible de choisir « toutes les colonnes » ou bien « toutes les lignes » ou bien « toutes les couches », mais pas simultanément 2 ou 3 fois « toutes », ce qui n'aurait d'ailleurs que peu d'intérêt.

Pour chaque point de départ sélectionné, on peut également préciser :
- un « rayon de cercle »
- et un « nombre de rayons »

Ceci permet de générer des trajectoires autour d'un point, généralement :
- autour d'un puits d'injection,
- ou autour d'un puits de pompage (pour calculer des trajectoires inverses).

Pour obtenir de bons résultats quand on utilise un cercle de départ autour d'un puits, le cercle doit inclure complètement la maille contenant le puits. Il est donc conseillé de donner un rayon égal à la demi-diagonale de la maille, c'est-à-dire 0.7 fois la dimension de la maille si elle est carrée.

La définition des points de départ de trajectoires est réalisée *via* le module de « Gestion des données non maillées », accessible par le bouton PAR de la barre d'outils du bas du cadre de WinMarthe. On choisit alors la ligne « Points de départ de trajectoires » (Figure 78). On obtient alors une boite de dialogue (Figure 79).

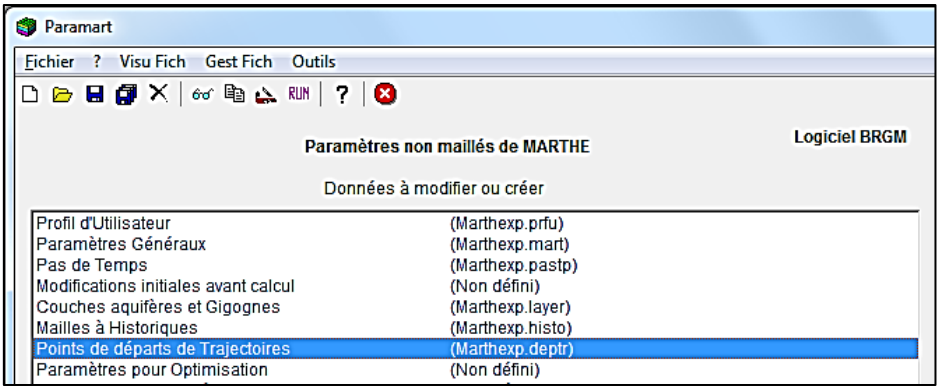


Figure 78 – Sélection du fichier « Points de départ de trajectoires ».

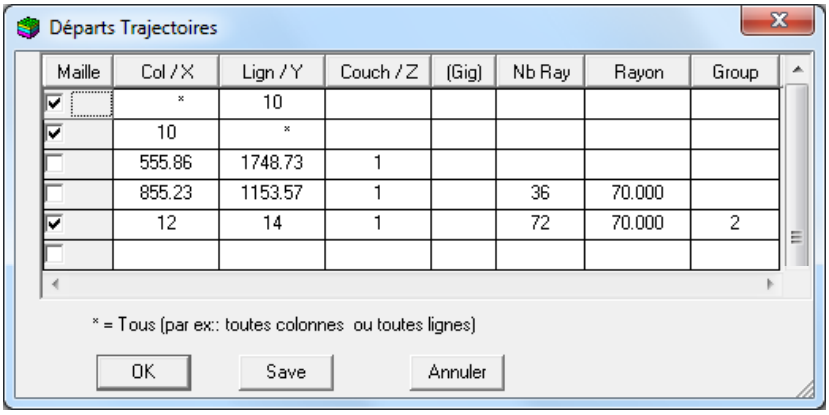


Figure 79 – Sélection des points de départ de trajectoire.

Dans l'exemple présenté :

- Quand il y a une « coche » (ou « check ») dans la colonne « Maille », la définition du point de départ de trajectoire se fait par colonne, ligne, couche, gigogne : c'est le cas des lignes n°1, n°2 et n°5 de l'exemple.
- Quand il n'y a pas de « coche » (lignes n°3 et n°4) le point de départ est défini par X, Y, Couche (l'éventuel numéro de gigogne n'est alors pas pris en compte).
- Si on ne précise pas le numéro de couche : c'est la couche n°1 qui est choisie
- Le numéro de groupe (dans la dernière colonne) est facultatif. Il apparaît dans le fichier de trajectoires calculées « trajmar.out » et peut servir à distinguer des faisceaux de trajectoires d'origines différentes.

Arrêt des trajectoires :

Plusieurs cas sont possibles :
- Si le calcul est réalisé en régime permanent : les trajectoires sont calculées pour un temps infini (en pratique 10^{12} unités utilisateur de temps), jusqu'à ce que les trajectoires soient captées par un pompage ou bien sortent par une limite à charge hydraulique imposée.
- Si le calcul est réalisé en régime transitoire : les trajectoires sont parcourues uniquement pendant la durée de la simulation.

Les trajectoires calculées sont rassemblées dans deux fichiers de résultats : Le fichier « trajmar.out » et le fichier de dessin « trajmar.bln ».

Anisotropie verticale de perméabilité : K_vertical / K_horizontal spatialisée

C'est le rapport : $A_{Kz/Kh}$ = Perméabilité Verticale / Perméabilité Horizontale.

Valeur par défaut : 0 ou « rien » => 1 => Pas d'anisotropie verticale

Dans la pratique, ce coefficient d'anisotropie est souvent de l'ordre de 0.1 à 0.01 dans des formations sédimentaires.

À partir de la perméabilité horizontale « $\mathbf{K_H}$ » introduite dans le fichier de données spatialisées du modèle, MARTHE calcule :

$$K_z = K_H \cdot A_{Kz/Kh}$$

Ce paramètre est pris en compte uniquement dans les écoulements multicouches ou 3D.

Remarque 1 : Dans le fichier des « Paramètres généraux », au paragraphe « Unités des données », il est possible de définir un coefficient d'« Anisotropie Verticale de perméabilité » uniforme pour tout le domaine, qui est utilisé par défaut.

Remarque 2 : Il est aussi possible de définir une anisotropie verticale différente dans chaque couche (fichier « Couches aquifères et Gigognes » d'extension [.layer]) [*mais cette fonctionnalité est obsolescente, donc déconseillée*].

Ce champ spatialisé d'anisotropie verticale est donc nécessaire uniquement si l'anisotropie verticale de perméabilité est différente : d'une couche à l'autre, ou bien d'une zone à l'autre.

On retiendra que le code de calcul utilise :

- En premier choix : la valeur de ce champ maillé d'anisotropie verticale, si un nom de fichier est donné pour de champ dans le fichier projet (ou bien si des valeurs ponctuelles ont été définies pour ce champ).
- Sinon, en deuxième choix : la valeur (obsolescente) du fichier [.layer], si elle est différente de 0.
- Sinon, en troisième choix : la valeur uniforme définie dans le fichier des « Paramètres généraux ».

Anisotropie horizontale de perméabilité : Kx / Ky spatialisée

C'est le rapport : $\mathbf{A_{Kx/Ky}}$ = Perméabilité sur l'axe Ox / Perméabilité sur l'axe Oy.

C'est-à-dire le rapport : K_Ouest-Est / K_Nord-Sud.

Valeur par défaut : 0 ou « rien » => 1 => Pas d'anisotropie horizontale

À partir de la perméabilité horizontale « **K_H** » introduite dans le fichier de données du modèle, MARTHE calcule :

- $K_x = K_H \cdot \sqrt{A_{Kx/Ky}}$
- $K_y = K_H / \sqrt{A_{Kx/Ky}}$

Remarque 1 : Dans le fichier des « Paramètres généraux », au paragraphe « Unités des données », il est possible de définir un coefficient d'« Anisotropie Horizontale de perméabilité » uniforme pour tout le domaine
L'utilisation de ce champ spatialisé est donc d'une utilisation assez exceptionnelle.

On retiendra que le code de calcul utilise :

- En premier choix : la valeur de ce champ maillé d'anisotropie horizontale, si un nom de fichier est donné pour de champ dans le fichier projet (ou bien si des valeurs ponctuelles ont été définies pour ce champ), ce qui est exceptionnel.
- Sinon, en deuxième choix : la valeur uniforme définie dans le fichier des « Paramètres généraux ».

Mailles à Historiques

Ce fichier de définition des mailles à historiques, d'extension [.histo], n'est *pas* un champ de données maillées mais il est présenté ici parce qu'il est étroitement associé aux grilles de données.

Il permet la définition des mailles dans lesquelles on souhaite suivre l'évolution de certains champs, au cours des pas de temps de modèle.

Seules les valeurs calculées lors des « pas de temps de modèle » sont sauvegardées. En revanche, lors les calculs avec un schéma de Zone Non Saturée, les valeurs des sous-pas de temps internes de calcul ne sont pas sauvegardées.

Dans cette version, le nombre total d'historiques est limité à 4000.

La sélection des mailles et des champs est réalisée *via* le module de « Gestion des données non maillées », accessible par le bouton

de la barre d'outils du bas du cadre de WinMarthe, en cliquant sur la ligne « Mailles à Historiques » (Figure 80).

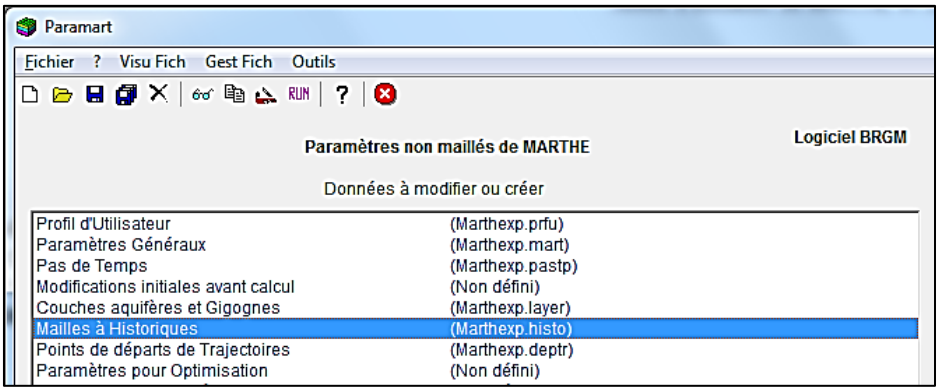


Figure 80 – Sélection du fichier des mailles à historiques.

On choisit ensuite le type d'historique à créer ou à modifier (Figure 81), puis le numéro d'historique de ce type à consulter (Figure 82). On précise enfin les coordonnées de la maille et on peut attribuer un éventuel nom au point de suivi (Figure 83).

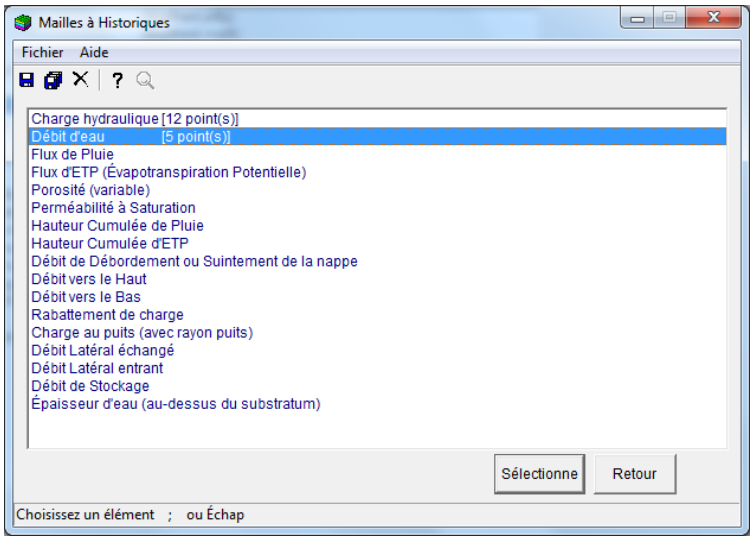


Figure 81 – Sélection du type d'historique.

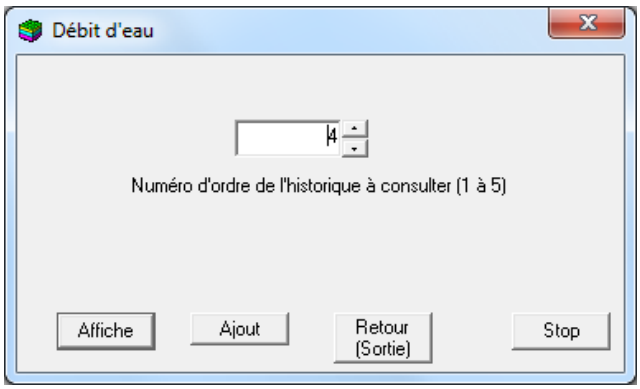


Figure 82 – Consultation du 4ème historique de débit parmi les 5 historiques existants.

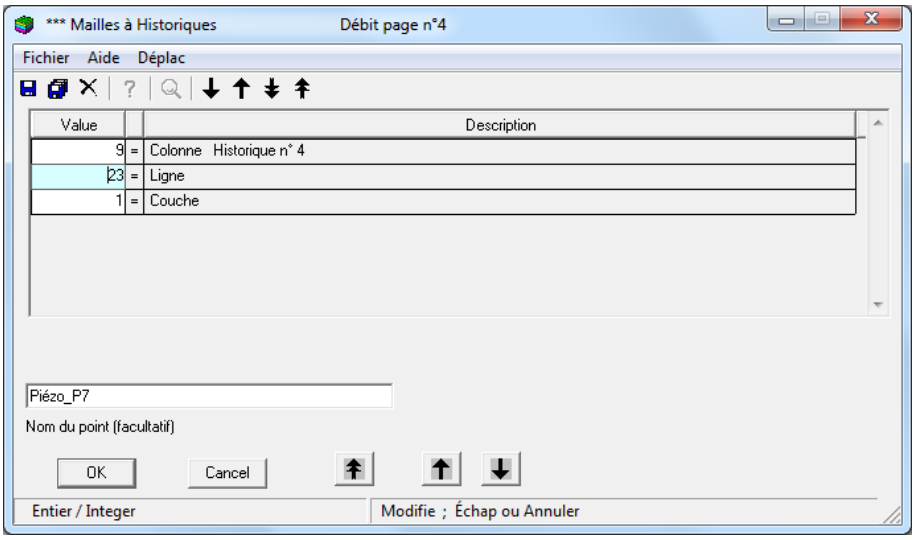


Figure 83 – Modification du nom (facultatif) ou du numéro de colonne, ligne ou couche.

Il n'est *pas* nécessaire de mettre le nom entre guillemets, même s'il y a un espace dans le nom, par exemple « Seine Paris ».

Pour supprimer un historique, il suffit de mettre à 0 les numéros de colonne, de ligne et de couche.

On peut créer un nouvel historique du type courant (bouton « ajout »). On doit alors choisir si on veut définir le point :

- Par le centre d'une maille (définie par ses numéros de Colonne, Ligne, Couche) (Figure 84).
- Ou par ses coordonnées exactes, ainsi que sa couche (Figure 85 et Figure 86).

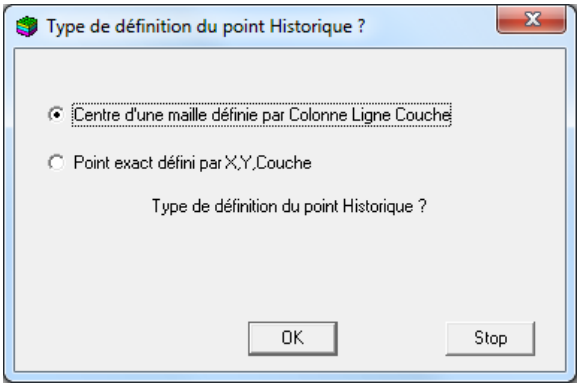


Figure 84 - Définition d'un nouvel historique par appui sur le bouton « Ajout », puis choix du mode de sélection de la maille (colonne, ligne, couche).

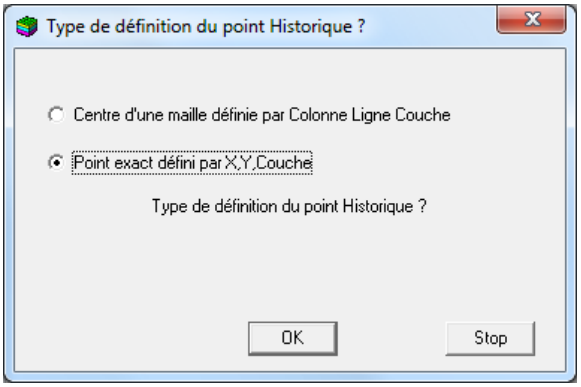


Figure 85 – Définition du point par ses coordonnées.

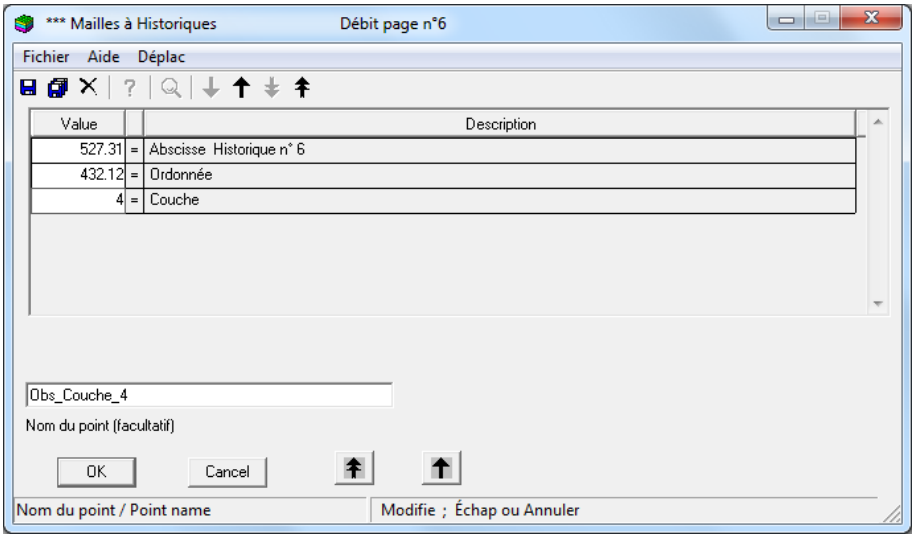


Figure 86 - Définition du nom, des coordonnées réelles de la maille et de son numéro de couche.

Quand on sélectionne un historique à partir de coordonnées réelles : la valeur du champ est interpolée au point exact à partir des valeurs calculées au centre des 4 mailles voisines. Lors de cette interpolation, les éventuelles « liaisons étanches » ne sont cependant pas prises en compte.

Les valeurs des historiques des mailles sélectionnées sont rassemblées dans un fichier texte de nom « historiq.prn » directement importable dans Excel ® ou un tableur équivalent. Les valeurs des différentes colonnes du fichier historiq.prn sont séparées par des « tabulations ».

Évolution selon les itérations du coefficient de sous-relaxation

Ce fichier permet de faire évoluer, au cours des itérations, le coefficient de sous-relaxation utilisé pour le calcul de la charge hydraulique.

Remarque : C'est une fonctionnalité pour utilisation avancée (Il faut donc un « Profil d'utilisation avancé » pour voir le nom de ce fichier).

- Il est possible, en début de calcul ou à n'importe quel pas de temps, de lire un fichier contenant des couples (n°itération , Coefficient de sous-relaxation) :

  « n°itération » est le numéro de l'itération à partir de laquelle s'applique la valeur du nouveau « Coefficient de sous-relaxation » pour le calcul de la charge hydraulique.

- On peut également lire une valeur uniforme en donnant le nom de fichier sous la forme « =valeur »

Exemple de fichier d'évolution, selon les itérations, du coefficient de sous-relaxation :

```
Itérations et Relaxation (Titre descriptif)
   1  0.7
  15  0.5
  31  0.2
  51  0.1
  70  0.07
```

Altitude limite de maille pompée (crépines)

Ce champ sert à diminuer le débit qui peut être pompé quand la charge hydraulique s'abaisse et se rapproche de l'altitude de la crépine de la pompe ou de celle de l'ouvrage de captage.

- C'est l'altitude en dessous de laquelle le débit de pompage s'annule.
- Pour activer cette fonctionnalité : dans le fichier des « Paramètres généraux », au paragraphe « Contrôle de la Résolution Hydrodynamique », il faut définir une « Hauteur de garde au-dessus des crépines ».

- Le débit pompé diminue linéairement en fonction de la charge hydraulique calculée :
  - Il est égal à 100% de sa valeur nominale demandée :
    Pour une charge hydraulique ≥ Altitude limite + Garde crépine
  - Il diminue alors linéairement jusqu'à un débit égal à zéro
    Pour une charge hydraulique = Altitude limite.

- L'altitude limite est donnée en unité utilisateur de charge et d'altitude.

Il y a aussi, dans le fichier des « Paramètres généraux », des paramètres constants qui permettent de limiter le débit de pompage en fonction du taux de saturation d'eau dans la maille.

Rayon du puits de pompage ou d'injection (m)

Ce rayon de puits est utilisé pour calculer la charge hydraulique au puits, à partir de la charge hydraulique « moyenne » de la nappe calculée en une maille, par une correction en prenant en compte :

- La dimension de la maille dans laquelle est situé le puits.
- Le rayon du puits.

- La charge hydraulique corrigée est sauvegardée dans le champ « Charge au puits ».

- Aucune correction n’est effectuée si le rayon du puits ou si le débit est nul. Le champ « Charge au puits » contient alors la charge hydraulique « moyenne » dans la maille.

- On suppose un puits (vertical) avec localement un écoulement radial vers le puits (débit négatif) ou depuis le puits (débit positif).

- Le rayon du puits (attention ce n'est pas le diamètre) est exprimé en mètres.

- Les pertes de charges quadratiques dans le puits ne sont pas prises en compte.

10.4. Les champs de données pour le bilan hydroclimatique

Le bilan hydroclimatique permet de calculer :

- La recharge des nappes sur les affleurements (par infiltration des précipitations)
- Le ruissellement vers les cours d'eau

La recharge et le ruissellement sont calculés par un bilan à partir de :

- Les précipitations atmosphériques : pluie + neige
- L'évapotranspiration potentielle (ETP)
- Si la fonte de la neige doit être prise en compte, le calcul utilise également la température de l'air.

  On notera qu'il n'y a *pas* de fichier de « précipitations neigeuses ». L'équivalent en eau de la neige est ajouté à la pluie. Lorsque l'on prend en compte la fonte de la neige : si la température de l'air d'un pas de temps est inférieure à 0°C (ou inférieure à un seuil proche de 0°C), l'équivalent en eau de la somme pluie + neige de ce pas de temps est considéré comme de la neige.

Dans les modèles les plus simples on peut affecter directement :

- Un flux de recharge moyenne, calculée ou estimée au préalable sur tout ou partie des affleurements.
- Un flux de ruissellement estimé au préalable.

Dans les modèles plus élaborés, un bilan est calculé automatiquement, à chaque pas de temps de modèle, à partir de la Précipitation et de l'Évapotranspiration Potentielle (ETP), en fonction de paramètres hydroclimatiques.

- Les données climatiques (Flux de Pluie, Flux d'ETP) sont généralement définies dans des « Zones Météo » dont le nombre peut être de plusieurs milliers.
  C'est le choix *conseillé*.

- Les paramètres du bilan hydroclimatiques (capacité du sol, temps de ½ percolation, etc.) sont définis dans des « Zones de Sol », qui peuvent être au nombre de plusieurs centaines sur l'extension du domaine modélisé.

Les chapitres suivants montrent :

- Quelles zones doivent être utilisées et où elles doivent être définies (« Zones Météo », « Zones de Sol »).
- Quels flux climatiques doivent être utilisés : Flux de Pluie et Flux d'ETP, ou bien Flux de Ruissellement et Flux de Recharge.
- Comment préparer des fichiers de ces différents flux.

Remarque sémantique : Au lieu du terme « Recharge », on utilise parfois par abus de langage le terme « Infiltration ». Cependant, dans MARTHE, le « Flux d'Infiltration » (*obsolescent*) désigne la différence « Pluie – ETP ».

10.4.1. Les champs à utiliser pour les cas les plus simples

On a vu que dans les modèles les plus simples on peut affecter directement :

- Un flux de recharge moyenne calculée ou estimée sur tout ou partie des affleurements.
- Un flux de ruissellement estimé au préalable.

Dans ces modèles très simples, les variables à utiliser sont :

- Pour le ruissellement :
  RUISSEL = Flux de Ruissellement superficiel

  Ce flux de ruissellement peut être défini par maille, par bloc de mailles, par zone, ou bien sur tous les affleurements.

- Pour la recharge :
  RECHARG = Flux de Recharge de nappe

  Ce flux de recharge peut être défini par maille, par bloc de mailles, par zone, ou bien sur tous les affleurements. Le flux de recharge peut être négatif, c'est alors un flux de reprise à la nappe par évapotranspiration.

  Dans ces modèles très simples, on peut aussi utiliser comme variable, par zone :

  - Soit FL_PLUV = Flux de Précipitations : toujours positif
  - Soit INFILTR = Flux d'Infiltration (Pluie - ETP), positif ou négatif (*obsolescent*).

  Pour ces cas simples, si le flux est positif, les résultats seront identiques quelle que soit la variable utilisée : FL_PLUV, RECHARG ou INFILTR.

Conseil : Il est généralement conseillé, car plus pratique, d'utiliser un flux de recharge, (« RECHARGE ») plutôt qu'un flux d'infiltration.

10.4.2. Les champs de numéros de « zones » pour le bilan hydroclimatique

Dans le cas général il faut définir 2 champs de numéros de zones :

- Un champ de numéro de Zone de Sol : pour les paramètres du bilan hydroclimatiques Capacité de la réserve du sol, temps de ½ percolation, Hauteur d'équi-ruissellement, etc.

- Un champ de numéro de Zone Météo : pour les données climatiques : Flux de Pluie, Flux d'ETP, Température de l'air, etc.

Cependant pour des *modélisations simples*, de *faible extension*, il est possible de définir les données climatiques (Flux de Pluie, Flux d'ETP, etc.) par Zone de Sol.
Par compatibilité avec les versions antérieures de MARTHE, cette méthode de définition est la méthode par défaut.

Une option du fichier des « Paramètres Généraux », dans le paragraphe « Hydroclimatologie » :

Type de Zones pour les Pluie, ETP, Recharge etc. [0=Zones de Sol ; 1=Zones Météo]

permet de choisir si les données climatiques (Flux de Pluie, Flux d'ETP, etc.) sont définies :

- Soit par Zones de Sol (*valeur par défaut*) => « Zone Climatique » = « Zone de Sol »
- Soit par Zones Météo (*valeur conseillée*) => « Zone Climatique » = « Zone Météo »

Selon ce choix le terme « Zone Climatique » (mot-clé ZONE_CLIM) désignera :

- « Zone de Sol » ou « Zone Météo »

Dans le paragraphe d'« Initialisation avant calcul », ou au cours des pas de temps, des données climatiques (Flux de pluie, Flux d'ETP, Température de l'air, etc.) pourront être affectées par « Zones Climatiques » (mot clé : ZONE_CLIM).

Définition : Un « mot clé » correspond à un Champ, une Variable ou à une Action

Ces mots clés sont utilisés dans le module de « Gestion des données non maillées » et ils apparaissent dans les fichiers mis en forme par ce module : fichier des « Pas de Temps » et paragraphe « Initialisation avant calcul » du fichier des « Paramètres Généraux ».

Par exemple :

```
/FLUX_PLUV/ZONE_CLIM      Z=       *V=         20;
/T_DEMI_PERCOL/ZONE_SOL   Z=  1:15 V=        1.5;
```

Il peut être nécessaire de définir également :

- Un champ de numéro de Zone d'Excès d'Irrigation.
- La liste des numéros des Zones Climatiques des fichiers Météo séquentiels *(ce n'est pas un champ maillé du domaine modélisé, mais une « liste »)*.

Champ de numéro de « Zone de Sol » [pour paramètres hydroclimatiques]

Mot clé : ZONE_SOL

C'est un numéro qui concerne les mailles de l'extension totale du domaine, formée de la réunion de toutes les couches, c'est-à-dire la couche fictive n°0.

Le numéro de « Zone de Sol », qui est affecté à chaque maille du domaine, est utilisé pour introduire :

- Les paramètres de Sol (Réserve utile du sol, Temps de ½ percolation, etc.), en cas de bilan hydroclimatique,

  Exceptionnellement, pour les modélisations simples :
- Le Flux de Pluie et le Flux d'ETP, si le bilan hydroclimatique sont réalisés par « zone de sol ».
- (ou le flux d'Infiltration : *obsolescent*)

Attention : un bilan climatique est effectué même dans une maille non aquifère (c'est-à-dire ayant une perméabilité = 0 ou une perméabilité = 9999).

Attention : un bilan climatique est effectué uniquement là où il y a une « zone de sol » ayant un numéro différent de 0.

Il y a au maximum 500 zones de sol (du n°1 au n°500).

Champ de Numéro de « Zone Météo » (pour Pluie, ETP, Température de l'air ...)

Mot clé : ZONE_METEO

C'est un numéro qui concerne les mailles de l'extension totale du domaine, formée de la réunion de toutes les couches, c'est-à-dire la couche fictive n°0.

Le numéro de zone Météo (Numéro différent de 9999 et ne dépassant pas 99 9999) est affecté à chaque maille du domaine.

Les « zones Météo » peuvent avoir plusieurs usages :

- Elles peuvent correspondre à des données lues dans des « fichiers Météo séquentiels » : Pluie, ETP, Température de l'air, (ou bien Ruissellement/Recharge).
  Mots clés (Nom de Variables) : METEO_PLUIE, METEO_ETP, METEO_TEM_AIR, METEO_RUISSEL, METEO_RECHARG.

- Elles peuvent aussi correspondre à des données météo sans « fichiers Météo séquentiels » : Pluie, ETP, Température de l'air, Recharge, Ruissellement, Infiltration, etc.
  Mots clés (nom de Variables) : FL_PLUV, FL_ETP, TEMPER_AIR, RECHARGE, RUISSEL, FLUX_INFILTR.

Attention : un bilan climatique est effectué même dans une maille non aquifère (perméabilité = 0 ou perméabilité = 9999).

Attention : un bilan climatique est effectué uniquement là où il y a une « zone de sol » ayant un numéro différent de 0.

Liste des « Numéros des Zones Météo » des fichiers Météo séquentiels

Mot clé : NUM_ZON_METEO

Ce sont les numéros des zones correspondant aux données des fichiers Météo séquentiels (Pluie, ETP, Température de l'air).

Attention : ce ne sont pas des numéros affectés aux mailles du domaine.
Ce sont les numéros des zones qui correspondent aux données dans les fichiers Météo séquentiels.

Ce fichier est facultatif. => Il peut être utilisé uniquement quand il y a des « fichiers Météo séquentiels ».

Par exemple : les fichiers Météo séquentiels contiennent les Pluies, ETP, Température de 4 « Zones Météo » : les zones Météo n°40, n°35, n°50 & n°10

- Le fichier des « Numéros des Zones Météo des fichiers Météo séquentiels » contiendra donc le fichier contenant les 2 lignes suivantes :

```
Numéros des 4 zones Météo des fichiers Météo [Titre descriptif]
40   35   50   10  [en format totalement libre]
```

Par défaut, s'il n'y a pas de fichier « Liste des Numéros des Zones Météo », les fichiers Météo séquentiels se rapportent aux zones météo n°1, 2, 3, 4, etc.

Champ de Numéro de « Zone d'Excès d'Irrigation »

Mot clé : ZONE_IRRIG

C'est un numéro de zone, affecté à chaque maille du domaine, qui est utilisé pour définir l'« Excès d'irrigation ».

Dans cette zone, c'est le flux d'Excès d'irrigation qui devra être introduit.
La part du flux consommé par les cultures devra donc être déduite.

Il y a 500 zones d'excès d'irrigation au maximum (du n°1 au n°500).

10.4.3. Définition des champs de numéros de « zones » avec les maillages en coupe verticale

Numéros de zone de sol et numéros de zone météo

Dans les maillages en « coupe verticale », ou en « pseudo coupe verticale » pour les calculs en ZNS, Les numéros de « Zone de Sol » et éventuellement de « Zone Météo » doivent être définis dans la ligne n°1 (qui est l'équivalent de la couche n°1 dans les modèles coupe classiques).

Il faut les définir dans la ligne n°1, même s'il n'y a pas de maille active dans la ligne n°1 (Figure 87).

Pour sélectionner automatiquement la ligne n°1 avec WinMarthe quand certaines mailles de la ligne n°1 ne sont pas des mailles actives : il faut sélectionner auparavant l'icône (« Accès aux mailles extérieures au domaine ») de la barre outils située à gauche du cadre.

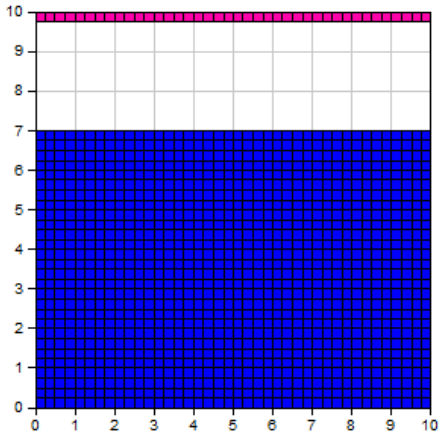


Figure 87 – Sélection de la ligne n°1 (en rose-violet) pour y définir un numéro de « Zone de sol », ou un numéro de « Zone Météo ».

Un « Flux de Précipitations », un « Flux d'ETP », la « Température de l'air », un « Flux de Recharge » pourra alors être défini par « Zone Climatique ».

Selon une option choisie dans le fichier des « Paramètres Généraux » [.mart], les « Zones Climatiques » désignent soit les « Zones de Sol », soit les « Zones Météo ».

Flux de recharge

Un flux de recharge peut être défini par « Zone Climatique ». Il peut également être défini par « Grille », par « Couche », par « Zone géométrique » ou par « Maille ». Si on définit un flux de recharge par maille (ou par groupe de maille), seules les valeurs définies dans les mailles affleurantes seront prises en compte.

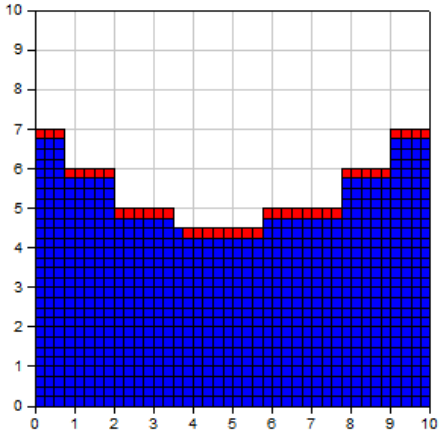


Figure 88 – Maillage en coupe : Définition de flux de recharge par « maille » :
Seuls les flux de recharge définis dans les mailles affleurantes (en rouge) sont pris en compte

10.4.4. Les données climatiques en entrée (flux climatiques, température)

Ces données climatiques en entrée (flux, température) sont les suivantes :

- Flux de Précipitations (Pluie + Neige).
- Flux d'Évapotranspiration Potentielle (ETP).
- Température de l'Air (pour la fonte de la neige).

- Flux de Ruissellement superficiel.
- Flux de Recharge de nappe.

- Flux d'Infiltration (Pluie - ETP) par zone (*obsolescent*).
- Flux d'Excès d'Irrigation.

Ces flux climatiques, ou température de l'air, peuvent :

⇨ Soit être définis par « Zones Météo » dans des « Fichiers Météo séquentiels »
⇨ Soit être définis par « Zones Climatiques »

Selon l'option choisie dans le fichier des « Paramètres Généraux », les « Zones Climatiques » se rapportent :

- ♦ Soit aux Zones de Sol (option par défaut, *déconseillée*)
- ♦ Soit aux Zones Météo

Les 5 « Fichiers Météo séquentiels » disponibles sont les suivants :

- Météo : Fichier Séquentiel de Précipitations (*extension [.m_plu]*)

- Météo : Fichier Séquentiel d'Évapotranspiration Potentielle (*extens. [.m_etp]*)
- Météo : Fichier Séquentiel de Température de l'Air (*extens. [.m_tem]*)

- Météo : Flux de ruissellement (*extension [.m_rui]*)
- Météo : Flux de recharge de Nappe (*extension [.m_rec]*)

Un « Fichier Météo séquentiel » est un fichier (texte ou binaire) relatif à un paramètre climatique, par exemple le flux de pluie (cf. Figure 90 et Figure 91).
Il contient, pour un certain nombre de pas de temps, la valeur de ce paramètre dans toutes les « Zones Climatiques » du domaine modélisé.

Remarques :

- Ces flux climatiques, ou température de l'air, peuvent être affectés uniquement par zones.
- Il n'y a pas de champ maillé de ces données, à l'exception du « Flux de Ruissellement superficiel » et du « Flux de Recharge ».
- Le « Flux d'Infiltration » et le « Flux d'Excès d'Irrigation » ne peuvent *pas* être définis par des « Fichiers Météo séquentiels ».
- Le « Flux de Recharge », même s'il est défini par maille, est pris en compte uniquement dans les mailles affleurantes.
- Le « Flux d'Excès d'Irrigation » peut être défini uniquement par « Zones d'Irrigation ».
- Les « Flux de Ruissellement » et le « Flux de Recharge » peuvent subir un routage, par passage à travers un réservoir.
- Le flux d'infiltration (Pluie - ETP) est la différence Pluie – ETP (*obsolescent*).
  S'il n'y a pas de bilan hydroclimatique il est comparable à un flux de recharge.

La Figure 89 montre les différentes possibilités pour définir un flux climatique ou la température de l'air.

	Peut être défini dans un Fichier Météo séquentiel	Peut être affecté par Zone Climatique	Peut être défini dans un Champ maillé	Doit être défini Par Zone d'Irrigation
Flux de Précipitations	Oui	Oui		
Flux d'ETP	Oui	Oui		
Température de l'air	Oui	Oui		
Flux de Ruissellement	Oui	Oui	Oui	
Flux de Recharge	Oui	Oui	Oui	
Flux d'Infiltration		Oui		
Flux d'Excès d'Irrigation				Oui

Figure 89 – Différentes possibilité pour affecter un flux climatique ou la température de l'air.

Quand ces flux climatiques, ou la température de l'air, sont affectés à une zone, ou à une maille (donc pas par des « fichiers Météo séquentiels ») : on peut donner à chaque pas de temps de

modèle la valeur de ce flux relative à la zone ou à la maille, sous forme de « Modification », comme pour tous les paramètres de MARTHE.

On peut également, beaucoup plus simplement, affecter au pas de temps n°0 un « Fichier d'Évolution Temporelle » à cette zone ou à cette maille. Les valeurs de tous les pas de temps suivants seront alors prises dans ces fichiers.

Les différences entre un « Fichier d'Évolution Temporelle » et un « Fichier Météo séquentiel » sont les suivantes :

- Un « Fichier d'Évolution Temporelle » :
  - Il peut concerner n'importe quel champ (le champ de « débit prélevé », le champ de « Flux de Recharge », mais aussi le champ de « Flux de Précipitation », etc.).
  - Il peut comporter les données d'une ou plusieurs zones ou maille (le fichier peut comporter une ou plusieurs colonnes)
  - Il faudra, pour chaque zone souhaitée : affecter son nom et le numéro de la colonne. S'il y a 500 zones, il faudra 500 lignes d'affectation.
  - Il ne peut pas être changé au cours du temps, puisque le nom et le numéro de colonne est défini obligatoirement au pas de temps n°0 et pour tous les pas de temps suivants.
- Un fichier « Fichier Météo séquentiel » :
  - Il peut concerner uniquement un des 5 flux climatiques (Précipitations, ETP, Température de l'air, Ruissellement, Recharge)
  - Il se rapporte uniquement aux « Zones climatiques » et doit comporter les données de toutes les zones climatiques, dont le nombre a été défini dans le fichier des « Paramètres Généraux ».
  - Il est affecté, d'une seule ligne, pour toutes les zones climatiques.
  - Il ne peut pas se rapporter à des mailles.
  - Il peut être sous forme binaire, ou en « accès direct ».
  - Il peut être changé au cours du temps, par redéfinition d'un nouveau nom de fichier, par exemple tous les 365 jours.

En résumé pour affecter des données climatiques :

- Un « Fichier d'Évolution Temporelle » peut être pratique : uniquement s'il n'y a que quelques zones climatiques, ou pour affecter des flux par maille, ou pour affecter des flux d'infiltration.
- Un « Fichier Météo séquentiel » est plus pratique s'il y a un grand nombre de zones climatiques.

Étant donné que les « zones climatiques » se rapportent aux mailles de la couche qui affleure, ces différents flux sont appliqués aux mailles de la couche qui affleure, même si celles-ci sont localement dénoyées. Une « maille qui affleure » signifie ici une maille qui est dans la couche existante la plus haute, même si elle n'affleure pas réellement.

Ces flux sont toujours appliqués à la couche qui affleure, même si la maille concernée a un toit « étanche » (caractérisé par un « Index de Débordement » égal à 0, ce qui est la valeur par défaut).

Les zones à charge hydraulique imposée (débit = 9999) font partie du domaine aquifère. Elles reçoivent donc normalement les flux climatiques.

Description d'un « Fichier Météo séquentiel » :

Un « Fichier Météo séquentiel » est un fichier texte ou binaire relatif à un paramètre, par exemple le flux de pluie. Il a la structure suivante :

- Il contient successivement les données d'un certain nombre de pas de temps de modèle.
- À chaque pas de temps, il contient successivement les valeurs du paramètre pour toutes les « Zones Climatiques » du domaine modélisé.
- Toutes les valeurs sont écrites les unes à la suite des autres, de la 1ère zone météo à la dernière zone météo.
- Le nombre de valeurs par pas de temps de ce fichier doit être précisé dans le fichier des « Paramètres généraux », au paragraphe « Hydroclimatologie » : par le paramètre « Nombre de Zones Climatiques dans les fichiers Météo séquentiels ».

Si le Fichier Météo séquentiel est un « fichier texte » (un fichier ASCII) :

- Les valeurs sont écrites les unes à la suite des autres, en format libre, et sont séparées par des espaces ou des tabulations.
- La première ligne du fichier peut être une ligne titre descriptive. Un « titre » est reconnu comme comportant du texte en début de ligne.
- Les données d'un pas de temps peuvent être écrites sur plusieurs « lignes » du fichier.
- Il est possible de mettre, pour vérification, un indicateur, de date par exemple, à la fin de chaque pas de temps. Cependant si les valeurs d'un pas de temps occupent plusieurs lignes, cet indicateur ne doit *pas* se trouver seul sur une ligne.
- Un « Fichier Météo séquentiel » peut être constitué facilement par exportation d'un fichier Excel ®, ou d'un tableur équivalent, en fichier texte avec séparateur « Tabulation » ou séparateur « Espace ».

La Figure 90 et la Figure 91 donnent deux exemples de fichiers « Fichier Météo séquentiel ».

```
Flux de pluie en mm/j sur le bassin de la Somme
3.4   4.4  4.2   2.8   4.4   4.95  12.8  01/11/1989
5.6   4.8  5.8   5.8   6.6   5.31  6.8   02/11/1989
0.4   0.2  0.4   0.4   0.4   0.27  0.2   03/11/1989
11.2  1.8  14.4  12.2  12.6  5.4   2.2   04/11/1989
5.8   6.2  14.4  6.8   16.6  0     2.8   05/11/1989
0     0    0     0     0     0     0     06/11/1989
1.2   0.4  1.2   1.4   1     0.18  0     07/11/1989
6.6   4    12.6  13.4  12.6  2.34  3.4   08/11/1989
```

Figure 90 – « Fichier Météo séquentiel » avec 7 zones climatiques : et 8 pas de temps.

```
Flux de pluie en mm/j sur le bassin de la Somme
0.4   0.2   0.4   0.4   3.4   4.4  4.2   2.8   4.4
4.95  12.8
5.8   6.2   14.4  6.8   16.6  4.8  5.8   5.8   6.6
5.31  6.8
3.4   4.4   4.2   2.8   4.4   0.2  0.4   0.4   0.4
0.27  0.2
6.6   4     12.6  13.4  12.6  1.8  14.4  12.2  12.6
5.4   2.2
4.8   5.8   5.8   6.6   5.8   6.2  14.4  6.8   16.6
12.6  1.8
```

Figure 91 – « Fichier Météo séquentiel » avec 11 zones climatiques et 5 pas de temps.
Chaque pas de temps est écrit ici sur 2 lignes.

Si le fichier Météo séquentiel est un fichier binaire, les données sont écrites successivement en « simple précision » ou bien en « double précision », sans séparation ni indicateur, sans titre descriptif, sans séparateur, ni indicateur de date.

Définition des noms des « fichiers Météo séquentiels » :

Les noms des éventuels « Fichiers Météo séquentiels » sont déclarés dans le fichier projet [.rma] de MARTHE. Cependant ces noms peuvent être modifiés :

Pour un champ climatique donné, par exemple le flux de pluie, il est possible d'utiliser successivement plusieurs « Fichiers Météo », chacun correspondant à une période donnée, par exemple une année hydrologique. On procède alors de la manière suivante :

- On commence par indiquer le nom du « fichier Météo séquentiel », par exemple le fichier « Pluie_J_2018_2019.m_plu ».
- On affecte alors ce fichier à un flux climatique, par exemple le « flux de Précipitations » FL_PLUV.
- On pourra alors recommencer 365 pas de temps plus tard avec le fichier « Pluie_jour_2019_2020.m_plu ».

Exemple d'application n°1 (Figure 92) :

Au pas de temps n°**1** : on indique le nom du « fichier Météo séquentiel » de pluie « Pluie_J_2018_2019.m_plu », (et celui du fichier d'ETP « ETP_J_2018_2019.m_etp »).

Après avoir défini les noms de fichier : on lui affecte le flux de Précipitation par la syntaxe FL_PLUV/FICH_METE, et le flux d'ETP par la syntaxe FLUX_ETP/FICH_METE, pour tous les pas de temps suivants (syntaxe N= *****) le « ***** » signifiant « tous » les pas de temps.

Au pas de temps n°**366**, après un an, on indique un autre nom de fichier Météo de pluie : « Pluie_J_2019_2020.m_plu » et on lui affecte le flux de Précipitations. (On fait la même chose pour l'ETP).

Remarque : Dans cet exemple les noms des « fichier Météo séquentiel » de pluie et d'ETP du fichier projet [.rma] ne sont pas utilisés. Il n'y a donc pas lieu de les définir.

La Figure 92 montre un extrait du fichier pas de temps résultant, généré par le préprocesseur.

```
*** Le pas :   1: se termine à la date : 01/08/2018 ; ***
 /METEO_PLUIE/FICHIER  N: Pluie_J_2018_2019.m_plu
                          [Connection d'un fichier Météo de Pluie]
 /METEO_ETP/FICHIER    N: ETP_J_2018_2019.m_etp
                          [Connection d'un fichier Météo d'ETP]
 /FLUX_PLUV/FICH_METE  N=      *
                     [Les Pluies de tous les pas de temps suivants (* = tous)
                      seront lues sur le fichier Météo]
 /FLUX_ETP/FICH_METE   N=      *
                     [Les ETP de tous les pas de temps suivants (* = tous)
                      seront lues sur le fichier Météo]
 /*****/***** Fin de ce pas

 *** Le pas :   2: se termine à la date : 02/08/2018 ; ***
 /*****/***** Fin de ce pas

 *** Le pas : 366: se termine à la date : 01/08/2019 ; ***
                          [Début d'une autre année hydrologique
                           Connection d'un autre fichier Météo de Pluie]
 /METEO_PLUIE/FICHIER  N: Pluie_J_2019_2020.m_plu
 /METEO_ETP/FICHIER    N: ETP_J_2019_2020.m_etp
                          [Début d'une autre année hydrologique.
                           Connection d'un autre fichier Météo d'ETP]
 /FLUX_PLUV/FICH_METE  N=      *
 /FLUX_ETP/FICH_METE   N=      *
 /*****/***** Fin de ce pas
```

Figure 92 – Exemple de fichier de pas de temps avec définition de fichiers Météo séquentiels, puis affectation de flux de Pluie et de flux d'ETP à ces fichiers. Redéfinition de nouveaux fichiers Météo après 365 jours.

Exemple d'application n°2 (Figure 93) :

Au pas de temps n°**1** : on indique le nom du « fichier Météo séquentiel » de Ruissellement « Ruissel_J_2018_2019.m_rui », (et celui du fichier de Recharge « Drainag_J_2018_2019.m_rec »).

Après avoir défini les noms de fichier : on lui affecte le flux de Ruissellement par la syntaxe RUISSEL/FICH_METE, et le flux de Recharge par la syntaxe RECHARGE/FICH_METE, pour tous les pas de temps suivants (syntaxe N= *****) le « ***** » signifiant « tous » les pas de temps.

```
*** Le pas :   1: se termine à la date : 01/08/2018 ; ***
 / METEO_RUISSEL/FICHIER  N: Ruissel_J_2018_2019.m_rui
                        [Connection d'un fichier Météo de Ruissellement]
 / METEO_RECHARG/FICHIER  N: Drainag_J_2018_2019.m_rec
                        [Connection d'un fichier Météo de Recharge (Infiltr.)]
 /RUISSEL/FICH_METE   N=      *
              [Les Ruissellements de tous les pas de temps suivants (* = tous)
               seront lus sur le fichier Météo]
 /RECHARGE/FICH_METE  N=      *
              [Les Recharges de tous les pas de temps suivants (* = tous)
               seront lues sur le fichier Météo]
 /*****/***** Fin de ce pas
```

Figure 93 – Exemple de fichier de pas de temps avec définition de fichiers Météo séquentiels, puis affectation de flux de Ruissellement et de flux de Recharge à ces fichiers.

Flux de Précipitations (Pluie + Neige)

Mot clé : FL_PLUV

Les flux de précipitations sont exprimés en unité utilisateur de « flux hydroclimatique », c'est-à-dire en unité utilisateur de « hauteur hydroclimatique » par unité utilisateur de « durée hydroclimatique ».

Attention : Ces données sont donc des Flux, par exemple des mm/mois, et non pas des hauteurs de pluie.

Ces flux peuvent être définis par un « Fichier Météo séquentiel » ou bien par « Zones Climatiques ». Il n'y a pas de champ maillé de Flux de précipitations.

On notera que, dans cette version, il n'y a *pas* de flux de « précipitations neigeuses ». L'équivalent en eau de la neige est ajouté à la pluie. Lorsque l'on prend en compte la fonte de la neige : si la température de l'air d'un pas de temps est inférieure à 0°C (ou inférieure à un seuil proche de 0°C) l'équivalent en eau de la somme pluie + neige de ce pas de temps est considéré comme de la neige.

Flux d'Évapotranspiration Potentielle (ETP)

Mot clé : FL_ETP

Les flux d'ETP sont exprimés en unité utilisateur de « flux hydroclimatique », c'est-à-dire en unité utilisateur de « hauteur hydroclimatique » par unité utilisateur de « durée hydroclimatique ».

Attention : Ces données sont donc des Flux, et non pas des hauteurs.

Ces flux peuvent être définis par un « Fichier Météo séquentiel » ou bien par « Zones Climatiques ». Il n'y a pas de champ maillé de Flux d'ETP.

Température de l'Air (pour la fonte de la neige)

Mot clé : TEMPER_AIR

La température de l'air est donnée en degrés Celsius (°C).

Cette température est utilisée uniquement pour la fonte de la neige.

La température peut être définie par un « Fichier Météo séquentiel » ou bien par « Zones Climatiques ». Il n'y a *pas* de champ maillé de température de l'air.

Flux de Ruissellement superficiel

Mot clé : RUISSEL

Ce sont les flux de ruissellement dans l'extension du domaine modélisé.

Le flux de ruissellement est exprimé en unité utilisateur de « flux hydroclimatique », c'est-à-dire en unité utilisateur de « hauteur hydroclimatique » par unité utilisateur de « durée hydroclimatique ».

Attention : Le « Flux de Ruissellement », de mot clé « RUISSEL », est donc un flux, exprimé par exemple en mm/an

Remarque : Les valeurs de flux égales à 9999 sont ignorées.

Remarque : Ce fichier est utilisé uniquement en présence d'un réseau hydrographique.

Ce flux peut être défini par un « Fichier Météo séquentiel » ou bien par « Zones Climatiques ». Le Flux de Ruissellement peut également être défini dans un champ maillé. Les données de ce champ peuvent alors être modifiées par bloc de mailles, par zones, par couche, etc.

Dans cette version : ces données peuvent être définies par fichier Météo séquentiel uniquement si, dans le fichier des « Paramètres généraux », au paragraphe « Hydroclimatologie », on a choisi le bilan hydroclimatique de type « Ruissellement/Recharge »

Le flux de ruissellement est en fait la valeur de : « Pluie – ETR – Recharge ». Il est exprimé en unité utilisateur de « flux hydroclimatique ».

Le flux de ruissellement peut subir un routage avant d'aboutir au réseau hydrographique.

Attention : En dehors de l'aquifère (dans les mailles de perméabilité = 0 ou 9999), l'éventuel « flux de recharge » est transformé en « flux de ruissellement », dirigé vers les éventuels cours d'eau.

Flux de Recharge de nappe

Mot clé : RECHARGE

Ce sont les flux de recharge dans l'extension du domaine modélisé.

Si le flux est négatif : c'est alors un flux de reprise à la nappe par ETR (ÉvapoTranspiration Réelle)

En « Édition » : C'est le flux de recharge à la Nappe, calculé après bilan hydroclimatique.

Le flux de recharge est exprimé en unité utilisateur de « flux hydroclimatique », c'est-à-dire en unité utilisateur de « hauteur hydroclimatique » par unité utilisateur de « durée hydroclimatique ».

Attention : Le « Flux de Recharge », de mot clé « RECHARGE », est donc un flux, exprimé par exemple en mm/an, et non *pas* une hauteur.

Remarque : Les valeurs de flux égales à 9999 sont ignorées.

Ce flux peut être défini par un « Fichier Météo séquentiel » ou bien par « Zones Climatiques ».
Le Flux de Recharge de nappe peut également être défini dans un champ maillé. Les données de ce champ peuvent alors être modifiées par bloc de mailles, par zones, par couche, etc.

Dans cette version : ces données peuvent être définies par « Fichier Météo séquentiel » uniquement si, dans le fichier des « Paramètres généraux », au paragraphe « Hydroclimatologie », on a choisi le bilan hydroclimatique de type « Ruissellement/Recharge »

Le flux de recharge est en fait la valeur de « Pluie – ETR – Ruissellement » il est exprimé en unité utilisateur de « flux hydroclimatique ».

Le flux de recharge peut subir un routage avant d'aboutir à la nappe.

Attention : En dehors de l'aquifère (dans une maille à perméabilité = 0 ou 9999), le « flux de Recharge » calculé est transformé en « flux de ruissellement », dirigé vers les éventuels cours d'eau.

Flux d'Infiltration (Pluie - ETP) par zone

Mot clé : FLUX_INFILTR

Cette donnée climatique est *obsolescente*.

Dans MARTHE le « flux d'infiltration » désigne en fait la « Pluie Nette ». Ce flux peut être positif (infiltration) ou bien négatif (évapotranspiration).

Le flux d'infiltration, de mot clé « FLUX_INFILTR », est exprimé en unité utilisateur de « flux hydroclimatique », c'est-à-dire en unité utilisateur de « hauteur hydroclimatique » par unité utilisateur de « durée hydroclimatique ».

Conseil :
- Au lieu d'un « Flux d'Infiltration », il est plutôt conseillé, car plus pratique, d'utiliser :
  - Un « Flux de Pluie », positif ou nul. (Mot clé : FL_PLUV),
  - et un « Flux d'ETP », positif ou nul. (Mot clé : FL_ETP),
    associés à des paramètres hydroclimatiques (Réserve Utile, etc.) éventuellement nuls.

- Ou bien, on peut utiliser un « Flux de Recharge à la nappe » (Mot clé : RECHARGE).

Le « Flux d'Infiltration » peut être affecté uniquement par « Zones Climatiques ».

Il n'y a *pas* de champ maillé de Flux d'Infiltration. Le Flux d'Infiltration ne peut pas être défini par fichier Météo séquentiel, contrairement au Flux de Pluie et au Flux d'ETP.
D'où l'intérêt d'utiliser plutôt ces flux (FL_PLUV, FL_ETP, RECHARGE).

Flux d'Excès d'Irrigation

Mot clé : FL_EXC_IRRIG

Attention : Il s'agit uniquement de l'excès d'irrigation qui percole vers la nappe.
Le flux consommé par les cultures et par l'évaporation doit donc être déduit par un calcul préalable.

Le flux d'« Excès d'Irrigation » est exprimé en unité utilisateur de « flux hydroclimatique », c'est-à-dire en unité utilisateur de « hauteur hydroclimatique » par unité utilisateur de « durée hydroclimatique ».

Ce flux peut être affecté uniquement par Zones d'Irrigation. Il n'y a *pas* de champ maillé d'excès d'irrigation.

Météo : Fichier Séquentiel de Précipitations

Mot clé : METEO_PLUIE *Extension de fichier [.m_plu]*

C'est un fichier « Météo séquentiel » de données de Flux de Pluie+Neige par Zones Climatiques.

Le nombre de valeurs à lire dans ce fichier à chaque pas de temps (nombre de zones climatiques) doit être défini. Ce nombre de zones est défini dans le fichier des « Paramètres généraux », au paragraphe « Hydroclimatologie » : par le paramètre « Nombre de Zones Climatiques dans les fichiers Météo séquentiels ».

La seule « modification » possible au cours des pas de temps est l'affectation d'un autre nom de fichier météo séquentiel.

On notera que, dans cette version, il n'y a *pas* de fichier de « précipitations neigeuses ». L'équivalent en eau de la neige est ajouté à la pluie. Lorsque l'on prend en compte la fonte de la neige : si la température de l'air d'un pas de temps est inférieure à 0°C (ou inférieure à un seuil proche de 0°C), l'équivalent en eau de la somme pluie + neige de ce pas de temps est considéré comme de la neige.

Météo : Fichier Séquentiel d'Évapotranspiration Potentielle

Mot clé : METEO_ETP *Extension de fichier [.m_etp]*

C'est un fichier « Météo séquentiel » de données de flux d'ETP correspondant aux Zones Climatiques.

Le nombre de valeurs à lire dans ce fichier à chaque pas de temps (nombre de zones climatiques) doit être défini. Ce nombre de zones est défini dans le fichier des « Paramètres généraux », au paragraphe « Hydroclimatologie » : par le paramètre « Nombre de Zones Climatiques dans les fichiers Météo séquentiels ».

La seule « modification » possible au cours des pas de temps est l'affectation d'un autre nom de fichier météo.

Météo : Fichier Séquentiel de Température de l'Air

Mot clé : METEO_TEM_AIR *Extension de fichier [.m_tem]*

C'est un fichier « Météo séquentiel » de données de température de l'air (en °C) correspondant aux Zones Climatiques.

Le nombre de valeurs à lire dans ce fichier à chaque pas de temps (nombre de zones climatiques) doit être défini. Ce nombre de zones est défini dans le fichier des « Paramètres généraux », au paragraphe « Hydroclimatologie » : par le paramètre « Nombre de Zones Climatiques dans les fichiers Météo séquentiels ».

La seule « modification » possible au cours des pas de temps est l'affectation d'un autre nom de fichier météo.

Météo : Flux de ruissellement

Mot clé : METEO_RUISSEL *Extension de fichier [.m_rui]*

C'est un fichier « Météo séquentiel » de données de Flux de Ruissellement correspondant aux Zones Climatiques. Ces flux de ruissellement doivent au préalable avoir été calculés par ailleurs.

Météo : Flux de recharge de Nappe

Mot clé : METEO_RECHARG *Extension de fichier [.m_rec]*

C'est un fichier « Météo séquentiel » de données de Flux de Recharge de Nappe correspondant aux Zones Climatiques. Ces flux de recharge de nappe doivent au préalable avoir été calculés par ailleurs.

10.4.5. Les champs de paramètres pour le bilan hydroclimatique avec le schéma GARDÉNIA

Les champs de paramètres pour le bilan hydroclimatique GARDÉNIA sont les suivants :

- Capacité du réservoir sol progressif de GARDÉNIA
- Déficit maximal du sol (« réserve utile »)
- Niveau d'Équi Ruissellement/Percolation
- Durée de ½ percolation

- Déficit (initial) du réservoir sol progressif
- Déficit (initial) du réservoir sol (« réserve utile »)
- Hauteur (initiale) du Réservoir « H »

- Coefficient correcteur de Pluie (%)
- Coefficient correcteur d'ETP (%)

Tous ces paramètres sont définis par « Zones de Sol ».

Pour une description détaillée, consulter BRGM/RP-62797-FR (Thiéry, 2014b) et BRGM/RP-64500-FR (Thiéry, 2015a) pour la validation du schéma GARDÉNIA.

Capacité du réservoir sol progressif de GARDÉNIA

C'est la capacité du réservoir sol « progressif » (quadratique) du bilan GARDÉNIA.

Elle est exprimée en unité utilisateur de « hauteur hydroclimatique » : par défaut en mm

L'utilisation de cette capacité du « réservoir sol progressif » permet le plus souvent d'obtenir de meilleurs résultats qu'avec un « Déficit maximal du sol ».

Mot clé : CAP_SOL_PROGR

Déficit maximal du sol (« réserve utile »)

Ce paramètre correspond à la « réserve utile du sol ».

Il est exprimé en unité utilisateur de « hauteur hydroclimatique » : par défaut en mm.

Mot clé : RUMAX

Niveau d'équi Ruissellement/Percolation

C'est la hauteur d'équi-ruissellement du module GARDÉNIA.

Elle est exprimée en unité utilisateur de « hauteur hydroclimatique » : par défaut en mm.

Mot clé : EQU_RUIS_PERC

Durée de ½ percolation

C'est le temps nécessaire pour une ½ vidange du réservoir « Hypodermique » (réservoir « H ») du module GARDÉNIA.

Ce temps correspond au temps de ½ percolation à travers la zone non saturée.

Il est exprimé en unité utilisateur de « durée hydroclimatique ».

Mot clé : T_DEMI_PERCOL

Déficit (initial) du réservoir sol progressif

C'est le déficit initial dans le réservoir sol « progressif » pour le bilan hydroclimatique avec le schéma GARDÉNIA.

Par défaut, le déficit initial est égal à 0, donc le réservoir sol progressif est initialement plein.

Il est exprimé en unité utilisateur de « hauteur hydroclimatique » : par défaut en mm.

Mot clé : DEF_SOL_PROGR

Déficit (initial) du réservoir sol (« réserve utile »)

C'est le déficit initial dans le réservoir sol pour les bilans hydroclimatiques :

Par défaut, le déficit initial est égal à 0, donc le réservoir sol « réserve utile » est initialement plein.

Il est exprimé en unité utilisateur de « hauteur hydroclimatique » : par défaut en mm.

Mot clé : DEFIC_SOL

Hauteur (initiale) dans le réservoir « H »

C'est le niveau initial dans le réservoir intermédiaire « H » du module GARDÉNIA.

Par défaut, le niveau initial dans le réservoir H est égal à 0. Le réservoir est donc vide.

Il est exprimée en unité utilisateur de « hauteur hydroclimatique » : par défaut en mm.

Mot clé : NIV_RESERV_H

Coefficient correcteur de pluie (%)

C'est une éventuelle correction globale, c'est-à-dire uniforme pour tous les pas de temps, exprimée en %.

Mot clé : CORREC_PLUIE

Coefficient correcteur d'ETP (%)

C'est une correction éventuelle globale, c'est-à-dire uniforme pour tous les pas de temps sur l'Évapotranspiration Potentielle, exprimée en %.

Mot clé : CORR_ETP

10.4.6. Les champs de paramètres pour le bilan hydroclimatique avec le schéma Ruissellement/Recharge

Les champs de paramètres pour le bilan hydroclimatique avec le schéma « Ruissellement/Recharge » sont les suivants :

- Durée de ½ percolation.
- Temps de ½ retard de ruissellement.
- Niveau d'Équi Ruissellement : utilisé en tant que seuil de ruissellement quadratique.
- Hauteur (initiale) dans le Réservoir de ruissellement.

Tous ces paramètres sont définis par « Zones de Sol »

Durée de ½ percolation

C'est le temps nécessaire pour une ½ percolation (routage) de la recharge (ou « drainage ») jusqu'à la nappe.

Ce temps correspond au temps de ½ percolation à travers la zone non saturée.

Il est exprimé en unité utilisateur de « durée hydroclimatique ».
S'il est égal à 0, la percolation est instantanée.

Mot clé : T_DEMI_PERCOL

Temps de ½ retard de ruissellement

C'est le temps nécessaire pour la propagation du ruissellement vers le réseau hydrographique.

Il est exprimé en unité utilisateur de « durée hydroclimatique ».
S'il est égal à 0, la propagation est instantanée.

Mot clé : T_RUISS

Niveau d'équi Ruissellement (utilisé en tant que seuil de ruissellement quadratique)

Ce paramètre est la hauteur d'équi-ruissellement du module GARDÉNIA. Il est utilisé ici comme seuil. Si le niveau dans le « réservoir de ruissellement » est supérieur à ce seuil, le routage du ruissellement est quadratique, dans le cas contraire il est linéaire.

Si ce paramètre est égal à 0, le routage est toujours linéaire, avec le « Temps de ½ retard de ruissellement ».

Il est exprimé en unité utilisateur de « hauteur hydroclimatique » : par défaut en mm

Mot clé : EQU_RUIS_PERC

- Routage quadratique : $qruis = \frac{H^2}{TR \cdot Niv_Equ} \cdot dt$
- Routage linéaire : $qruis = \frac{H}{TR} \cdot dt$

Avec : qruis = flux de ruissellement routé
H = Niveau d'eau dans le réservoir de routage
TR = Constante de temps liée au « temps de ½ retard »
Niv_Equ = Niveau d'éaui ruissellement
dt = Durée du pas de temps

Hauteur (initiale) dans le réservoir « H »

C'est le niveau initial dans le réservoir intermédiaire « H » pour la percolation (routage) de la recharge (ou « drainage ») jusqu'à la nappe.

Par défaut, le niveau initial dans le réservoir H est égal à 0. Le réservoir est donc initialement vide.

Le niveau initial est exprimé en unité utilisateur de « hauteur hydroclimatique » : par défaut en mm.

Mot clé : NIV_RESERV_H

Hauteur (initiale) dans le réservoir de ruissellement

C'est le niveau initial dans le « réservoir de ruissellement » pour le routage du ruissellement.

Par défaut, le niveau initial dans le réservoir de ruissellement est égal à 0. Le réservoir est donc initialement vide.

La hauteur initiale est exprimée en unité utilisateur de « hauteur hydroclimatique » : par défaut en mm.

Mot clé : NIV_RUI

10.4.7. Les champs de paramètres de contrôle de la fonte de la neige

Le schéma de calcul de la fonte de la neige est celui du code de calcul GARDÉNIA.

Pour une description détaillée du schéma calcul de la fonte de la neige, consulter BRGM/RP-62797-FR (Thiéry, 2014b) et BRGM/RP-64500-FR (Thiéry, 2015a) pour la validation du schéma GARDÉNIA.

Les champs de paramètres qui contrôlent la fonte de la neige sont les suivants :

- Température de l'air (pour la fonte de la neige)
- Correction de température de l'air (degrés C)
- Capacité de rétention d'eau dans la neige (%)
- Taux d'évaporation de la neige (%)
- Coefficient de fonte de neige par la pluie (%)
- Température seuil pour la fonte de la neige (degrés)
- Degré-Jour => Fonte de la neige (mm / degré / jour)
- Fonte de la neige par le sol (mm/j)
- Stock initial de neige (exprimé en équivalent en eau)

Ces paramètres sont définis par « Zone de Sol ».

Température de l'air (pour la fonte de la neige)

La température est donnée en degrés Celsius (°C).

Cette température est utilisée uniquement pour la fonte de la neige.

Mot clé : TEMPER_AIR

Correction de température de l'air (degrés C)

C'est une éventuelle correction, en °C, appliquée à la température de l'air lue.

⇨ Température utilisée = Température lue + cette correction

Mot clé : CORR_TEMP_AIR

Capacité de rétention d'eau dans la neige (%)

C'est la quantité maximale (en %) d'eau qui peut être retenue dans le stock de neige.

Par exemple, un stock de neige de 200 mm (d'équivalent eau), associé à une densité maximale de 5 %, peut retenir 10 mm d'eau de fonte avant qu'elle ne s'écoule.

L'ordre de grandeur est de 5% à 15%.

Mot clé : RETEN_NEIGE

Taux d'évaporation de la neige (%)

C'est un éventuel coefficient de correction (en %) appliqué à l'ETP en cas de présence de neige.

- 0% => Pas de correction : l'ETP est appliquée normalement.
- -100% => Aucune évaporation n'est appliquée à la neige.

Mot clé : EVAP_NEIGE

Coefficient de fonte de neige par la pluie (%)

C'est un coefficient de correction (en %), éventuellement appliqué à la fonte de la neige par les calories de la pluie.

- 0% => Pas de correction : 80 calories par gramme de neige (chaleur latente de liquéfaction.
- -100% => Aucune fonte par les calories de la pluie.

Mot clé : COEF_FONTE_PLU

Température seuil pour la fonte de la neige (degrés)

C'est la température de l'air (en °C) à partir de laquelle la neige commence à fondre (sous l'effet du « degré-jour »).

Elle doit être proche de 0°C.

Mot clé : TEMPER_FONTE

Degré-Jour => Fonte de la neige (mm / degré / jour)

C'est la quantité de neige (en mm d'eau) qui fond en 1 jour, quand la température de l'air est de 1 degré au-dessus du seuil de fonte.

- Valeur par défaut : 4 mm / degré / jour
- Valeur raisonnable : de l'ordre de 3 à 5 mm / degré / jour.

C'est le paramètre le plus important pour gérer la fonte de la neige.

Mot clé : DEGR_JOUR_NEI

Fonte de la neige par le sol (mm/j)

C'est la quantité de neige (en mm d'eau) qui fond en 1 jour sous l'influence de la chaleur venant du sol.

Cette quantité est indépendante de la température (inconnue) du sol.

L'ordre de grandeur est de 0.5 mm / jour.

Mot clé : FONT_SOL_NEIG

Stock initial de neige (équivalent en eau)

C'est le stock de neige. En fait c’est l’équivalent en eau du stock de neige.

Il est exprimé en unité utilisateur de « hauteur hydroclimatique », par défaut en mm.

Mot clé : STOCK_NEIGE

10.4.8. Les données pour la prise en compte des cultures

Ces données pour la prise en compte des cultures sont les suivantes :

- Numéro de Zone de Cultures.
- Paramètres culturaux des Cultures.
- Numéro de la Culture affectée à une Zone de culture.
- Facteur sur la Concentration Racinaire multi-composant.

Numéro de Zone de Culture

C'est un numéro de « Zone de Culture », affecté à chaque maille affleurante du domaine, qui est utilisé pour la prise en compte des cultures. (n°1 à n°99).

Dans une Zone de Culture se succèderont des cultures identifiées par leur numéro de culture.

Ce numéro de Zone de Culture sera utilisé uniquement :

- Si, dans le fichier des « Paramètres généraux », au paragraphe « Cultures, Nitrates », on a choisi l'option « Cultures et Nitrates : par zones de Cultures ».
- Sinon : les cultures seront définies par « Zone de Sol ».

Les apports de NO_3, par application et par minéralisation, ainsi que les besoins en NO_3, peuvent aussi être définis par Zone de Culture.

Mot clé : ZONE_CULTUR

Paramètres culturaux des Cultures

Ce fichier contient les paramètres relatifs à chaque culture :
« Date de Maturation », « Facteur cultural », « Crop facteur », « LAI », « paramètres des Racines », etc.

Mot clé : PARAM_CULTUR

Numéro de la Culture affectée à une Zone

C'est le numéro de la Culture qui est affectée à une « Zone de Culture », à partir de la date courante.

La date à laquelle on affecte cette culture devient le début de la germination de cette culture dans zone concernée.

Les paramètres relatifs à cette culture (n° de culture, date de germination, etc.) sont décrits dans le fichier des « Paramètres Culturaux des Cultures ».

Lors d'un changement de culture : un numéro égal à 0 est ignoré => pas de changement.

Mot clé : NUM_CULTUR

Facteur sur la Concentration Racinaire multi-composant

C'est un facteur appliqué sur la concentration prélevée par les racines de la culture.

Ce paramètre est nécessaire uniquement s'il y a prise en compte de Cultures et aussi calcul de transport de masse.

- ⇨ Flux prélevé par les racines = Q_prélèv x Facteur x Concentrat_Locale

Par défaut : si on ne donne pas de nom pour ce fichier, ce facteur est égal à 1.

- ⇨ Il faut donner le nom « =0 » pour avoir réellement un facteur = 0.

Remarque : La valeur courante du facteur de l'ordre de 0.6.

Mot clé : F_CONC_RACIN

10.5. Les champs de données pour le réseau hydrographique (rivières) et le réseau de drains

10.5.1. Les champs de données pour le réseau hydrographique

Les champs de données pour le réseau de rivières sont les suivants :

- Numéro d'affluent de Rivière
- Numéro de tronçon de Rivière
- Arbre de branchement des affluents de Rivières et Lacs
- Longueur de tronçon de Rivière
- Largeur de tronçon de Rivière
- Niveau d'eau absolu dans le tronçon de Rivière
- Épaisseur de colmatage du lit et des berges du tronçon de Rivière
- Perméabilité de colmatage du lit et des berges du tronçon de Rivière
- Débit (écoulement) dans le tronçon de Rivière
- Débit d'injection (ou de pompage) dans le tronçon de Rivière
- Débit amont (ou débit de source) du tronçon de Rivière
- Rugosité du tronçon de Rivière
- Pente du tronçon de Rivière
- Hauteur du seuil situé à l'aval du tronçon de Rivière
- Facteur de la loi de débit du seuil à l'aval du tronçon de Rivière
- Exposant de la loi de débit du seuil à l'aval du tronçon de Rivière
- Altitude du fond dans le tronçon de Rivière (rivière à sec)
- Dérivations de débit du réseau hydrographique
- Flux de ruissellement superficiel
- Météo : Flux de ruissellement
- Direction aval pour le ruissellement superficiel
- Vitesse pour le ruissellement superficiel

Numéro d'affluent de rivière

Un affluent est un ensemble de tronçons en série sans branchements intermédiaires, c'est-à-dire ayant chacun 1 seul tronçon amont au maximum.

Un affluent est caractérisé par un numéro d'affluent (quelconque), uniforme pour tous les tronçons le composant. Ce numéro ne doit pas dépasser 1000, puisqu'à partir de 1001 un numéro d'affluent correspond à un « Lac » et non *pas* à une rivière.

Les connexions entre affluents de rivière sont décrites dans l' « Arbre de branchement des affluents », sous forme du numéro de l'affluent aval de chaque affluent.

Les affluents doivent être situés dans la couche affleurante. Ils sont définis dans la couche fictive n°0.

Cas particuliers :

- Numéro d'affluent = -1 => Numéro de colonne de la maille contenant le tronçon.
- Numéro d'affluent = -2 => Numéro de ligne de la maille contenant le tronçon.
- Numéro d'affluent = -3 => Numéro de couche de la maille contenant le tronçon.

- Numéro d'affluent = -4 ou inférieur => « Étang » ou « Estuaire » non connecté aux rivières.
  Un affluent ayant un numéro inférieur à –4 n'est pas « structuré », c'est-à-dire qu'il n'est pas nécessaire de lui donner de « numéro de tronçon ». Par ailleurs, il n'est pas nécessaire de faire figurer son numéro d'affluent dans l'« Arbre de branchement des affluents de Rivières et de Lacs ».

Numéro de tronçon de rivière

Les tronçons d'un affluent doivent avoir un numéro de tronçon croissant depuis l'amont de l'affluent jusqu'à son aval.

Les numéros peuvent être quelconques et n'ont pas besoin de se suivre (par exemple : 2 , 5 , 10 , 12, etc. est une séquence correcte).

Le numéro de tronçon doit être au moins égal à 1 et ne pas dépasser 999998.

Les tronçons ou affluents voisins peuvent se situer :

- Dans la couche courante, dans une des **8** directions voisines, obliques incluses :
  N, S, E, O, NE, NO, SE, SO.
- En multicouche, dans la couche sus- ou sous-jacente à condition qu'elle soit affleurante. Les **8** directions suivantes sont possibles : HN, HS, HE, HO et BN, BS, BE, BO.

  (N = Nord ; S = Sud ; E = Est ; O = Ouest ; H = Haut ; B = Bas).

Cas particuliers :
- Numéro de tronçon = -1 => Numéro de colonne de la maille contenant le tronçon.
- Numéro de tronçon = -2 => Numéro de ligne de la maille contenant le tronçon.

La Figure 94 montre un système aquifère (théorique) formé de 3 couches, avec un réseau hydrographique composé de 6 « affluents » sur les affleurements.

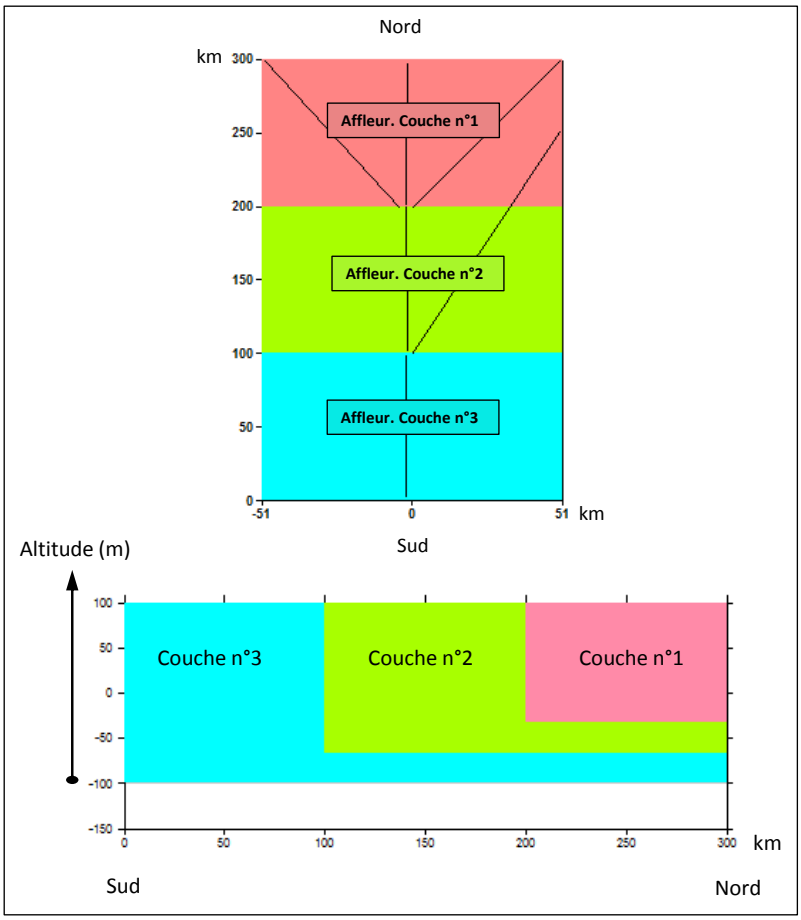


Figure 94 – Exemple de réseau hydrographique dans un système aquifère multicouche
En haut : vue en plan ; en bas : vue en coupe verticale.

Arbre de branchement des affluents de Rivières et Lacs

L'« Arbre de branchement des affluents » décrit les connexions entre affluents sous forme du numéro de l'affluent aval de chaque affluent.

Par convention, l'affluent le plus en aval, l'exutoire, a pour affluent aval un affluent de n°0 (C'est un code adopté pour désigner un exutoire).

Remarque : Il peut y avoir plusieurs affluents exutoires. Ceci se produit quand il y a plusieurs systèmes indépendants

Remarque : Les lacs sont considérés comme des affluents de numéro supérieur à 1000.

Remarque : S'il y a un seul affluent, il n'est pas nécessaire de définir un arbre de branchement.

Ce fichier, d'extension [.arb_r], n'est pas une grille. Il peut être constitué *via* le module de « Gestion de données non maillées », accessible par le bouton

de la barre d'outils du bas du cadre de WinMarthe, en choisissant la ligne « Arbre de branchement des affluents de rivières et de lacs » (Figure 95).

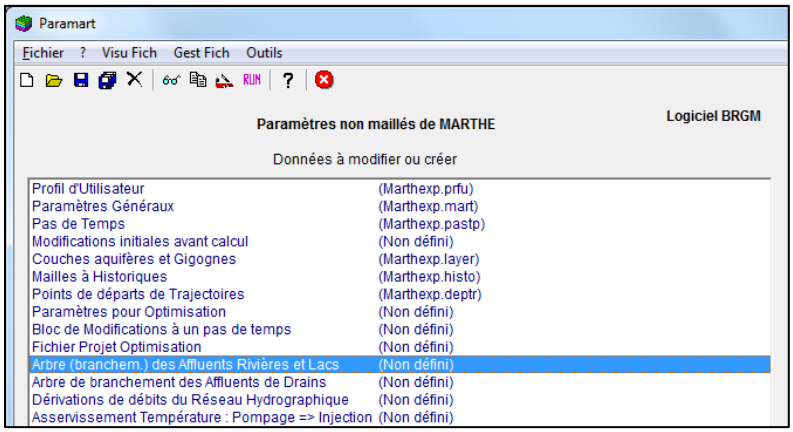


Figure 95 – Sélection du fichier « Arbre de branchement des affluents de rivières et des lacs ».

On voit alors apparaître un tableur pour définir les affluents aval. (Figure 96). Dans l'exemple présenté, les affluents n°10, n°40 et n°50 ont pour aval l'affluent n°20. Les affluents n°20 et n°60 ont pour aval l'affluent n°30. L'affluent n°30 n'a pas d'aval : c'est un affluent exutoire.

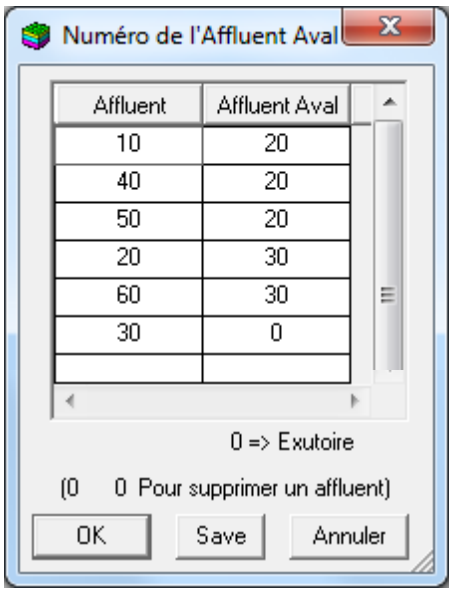


Figure 96 – Tableur pour la création de l'« Arbre de branchement des affluents de rivières ».

Longueur de tronçon de rivière

La longueur est exprimée en unité utilisateur de coordonnées de maillage.

Ou bien automatiquement :

- Longueur de tronçon = -1 => Longueur = Dimension « dx » de la maille.
- Longueur de tronçon = -2 => Longueur = Dimension « dy » de la maille.

Largeur de tronçon de rivière

Attention : La largeur du tronçon est exprimée en unité utilisateur de coordonnées de maillage, donc par exemple en km si l'unité utilisateur de coordonnées de maillage est le km.

Niveau d'eau absolu dans le tronçon de rivière

C'est l'altitude (absolue) de l'eau dans le repère des charges hydrauliques.
Elle est exprimée en unité utilisateur de charge hydraulique et d'altitude.

Attention : Ce n'est pas une profondeur d'eau, mais une altitude.

Épaisseur de colmatage du lit et des berges du tronçon de Rivière

Elle est exprimée en unité utilisateur de charge hydraulique et d'altitude.

Perméabilité de colmatage du lit et des berges du tronçon de Rivière

Elle est exprimée en unité utilisateur de perméabilité.

Débit (écoulement) dans le tronçon rivière

Le débit d'écoulement, dans un tronçon de rivière désigne ici le débit à l'aval du tronçon. Il est obtenu par la somme algébrique des termes suivants :

- La somme des débits des tronçons amont.
- Le débit de ruissellement provenant de mailles amont.
- Le débit pompé ou injecté dans le tronçon
- Le débit d'échange avec la nappe (positif s'il alimente le tronçon).

Somme à laquelle on retranche le débit de stockage (positif si le stockage augmente).
Le terme de stockage est comptabilisé uniquement si le « routage » est pris en compte.

Le débit dans un tronçon de rivière est exprimé en unité utilisateur de « débit de rivière ». Si on n'a pas défini d'unité utilisateur de « débit de rivière » : par défaut c'est l'unité utilisateur de débit (de nappe) qui est utilisée.

Débit d'injection (ou de pompage) dans le tronçon de Rivière

C'est un débit injecté (quand il est positif) ou pompé (quand il est négatif) dans un tronçon de rivière.

Un débit égal à la valeur code : 9999 impose le niveau de l'eau dans le tronçon de rivière. L'imposition du niveau d'eau s'applique uniquement quand le « niveau de l'eau » est calculé par le code de calcul, c'est-à-dire quand il y a une relation « Hauteur – Débit » : selon la relation de Manning-Strickler, ou selon une loi de seuil en rivière.

Débit amont (ou débit de source) du tronçon de Rivière

C'est le débit à l'amont du tronçon source d'un affluent de rivière.

Si un tronçon n'est pas un tronçon source, c'est-à-dire s'il a un ou des tronçons amont : si on lui attribue un « débit amont », ce débit sera ignoré.

Rugosité du tronçon de rivière [si relation de Manning-Strickler]

C'est le « n » de la relation de Manning-Strickler.

Cette rugosité est utilisée uniquement en cas de routage et de relation hauteur-débit.

Les valeurs courantes du paramètre « n » sont :

- 0.03 : pour un cours d'eau propre, rectiligne, bien rempli.
  Jusqu'à 0.05 ou 0.06 ou davantage à bas niveau, avec des herbes et pierres dans le lit.
- 0.017 : pour un canal en maçonnerie.
- 0.010 : pour un canal en ciment propre, ou en métal.

Ce coefficient « n » est exprimé en [$m^{-1/3}$.s].

Remarque : Au lieu du coefficient « **n** » de Manning-Strickler, on trouve parfois dans la littérature la valeur du coefficient « **K** = 1/n » de Manning Strickler, exprimé en [$m^{1/3}.s^{-1}$]. Dans MARTHE, il faut alors introduire la valeur correspondante n = /K.

Pente du tronçon de rivière [si relation Manning-Strickler]

Cette pente est utilisée uniquement en cas de routage et de relation hauteur-débit avec la formule de Manning-Strickler.

La pente d'un cours d'eau naturel est le plus souvent dans la gamme 5 10^{-4}.à 10^{-3}. C'est un nombre sans dimension.

Hauteur du seuil situé à l'aval du tronçon de Rivière

C'est la hauteur d'un l'éventuel seuil (barrage) situé à l'aval d'un tronçon de rivière. C'est la hauteur du seuil au-dessus du fond (et *non pas* son altitude absolue).

Elle est exprimée en unité utilisateur de charge hydraulique et d'altitude.

Si on définit une « Hauteur de seuil » supérieure à 0 : alors le débit à l'aval du tronçon suit une « loi de seuil » à la place d'une loi de Manning-Strickler.

Une loi de seuil classique est de la forme suivante :

$$Q = Larg \cdot FactQ \cdot \sqrt{2g} \cdot (H_{Riv} - H_{Seuil})^{Expos}$$

Avec :

Q = Débit d'écoulement à l'aval du tronçon (m^3/s)
FactQ = Facteur (sans unité) dont la valeur par défaut est égale à 0.40
g = Accélération de la pesanteur = 9.81 m/s^2 (à Paris)
Larg = Largeur du tronçon (m)
H_{Riv} = Hauteur d'eau dans le tronçon au-dessus du fond (m)
H_{Seuil} = Hauteur au-dessus du fond, du seuil situé à l'aval du tronçon (m)
Expos = Exposant : très généralement égal à 1.5 (sans dimension)

Soit classiquement : $Q = Larg \cdot 0.4 \cdot \sqrt{2g} \cdot (H_{Riv} - H_{Seuil})^{1.5}$

et : $Q = 0$ si $H_{Riv} \leq H_{Seuil}$

Remarque 1 : L'effet du seuil est pris en compte uniquement si on a défini une « Loi Hauteur-Débit » dans le paragraphe « Réseau Hydrographique » du fichier des « Paramètres Généraux ». (Loi de Manning-Strickler)

Remarque 2 : Quand il y a un seuil, le débit à l'aval du tronçon de rivière est indépendant de la rugosité et de la pente du lit, puisque la loi de Manning-Strickler n'est pas utilisée dans ce tronçon.

Remarque 3 : Par défaut, si on ne définit pas de hauteur de seuil, la hauteur de seuil est égale à 0 et aucun seuil n'est pris en compte

Facteur de la loi de débit du seuil à l'aval du tronçon de Rivière

C'est le facteur de débit de la loi de seuil : Débit_Rivière = F(Hauteur_Rivière).

Ce facteur est pris en compte uniquement si on a défini une « Hauteur de seuil » supérieure à 0 pour ce tronçon de rivière. C'est le facteur « FactQ » de la relation :

$$Q = Larg \cdot FactQ \cdot \sqrt{2g} \cdot (H_{Riv} - H_{Seuil})^{Expos}$$

Par défaut, si on ne définit pas ce facteur, sa valeur est égale à 0.4 (sans dimension)

Exposant de la loi de débit du seuil à l'aval du tronçon de Rivière

C'est l'exposant de la loi de seuil : Débit_Rivière = F(Hauteur_Rivière).

Cet exposant est pris en compte uniquement si on a défini une « Hauteur de seuil » supérieure à 0 dans ce tronçon de rivière. C'est « Expos » de la relation :

$$Q = Larg \cdot FactQ \cdot \sqrt{2g} \cdot (H_{Riv} - H_{Seuil})^{Expos}$$

Très généralement cet exposant a la valeur 1.5.

Par défaut, si on ne définit pas cet exposant, sa valeur est égale à 1.5 (sans dimension)

Altitude du fond dans le tronçon de rivière (rivière à sec)

Elle est exprimée en unité utilisateur de charge et d'altitude.

Quand le tronçon de rivière est situé dans une maille aquifère (perméabilité ni égale à 0, ni égale à 9999) :

- ⇨ L'altitude du fond d'un tronçon de rivière doit généralement être supérieure ou égale à l'altitude du substratum de la maille.

Dérivations de débit du réseau hydrographique

Le fichier de dérivations de débit permet la définition de tronçons de réseau hydrographique dans lesquels on prélève un pourcentage du débit calculé pour le réinjecter dans un autre tronçon (ou bien nulle part).

Ce fichier, d'extension [.der_qri], n'est pas une grille. Il peut être constitué *via* le module de « Gestion de données non maillées », accessible par le bouton PAR de la barre d'outils du bas du cadre de WinMarthe, en choisissant alors la ligne « Dérivations de débit du Réseau Hydrographique » (Figure 97).

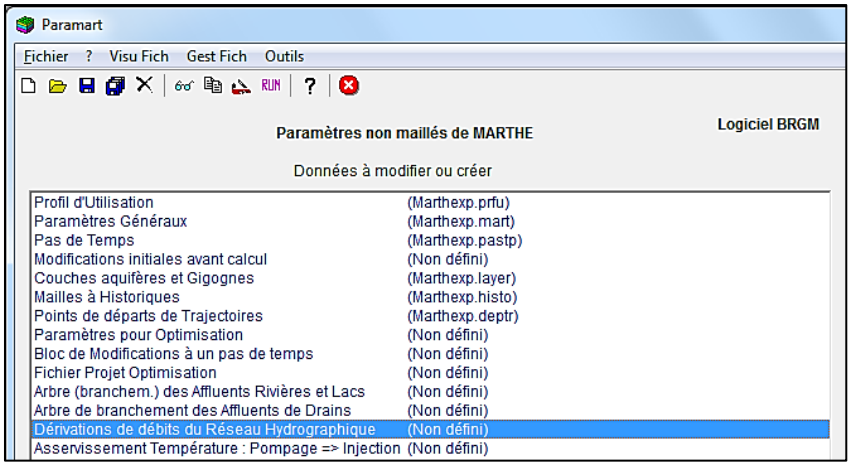


Figure 97 – Sélection du fichier de « Dérivations de débit du Réseau Hydrographique ».

On voit alors apparaître un tableur pour définir les paramètres de chaque dérivation de débit. (Figure 98).

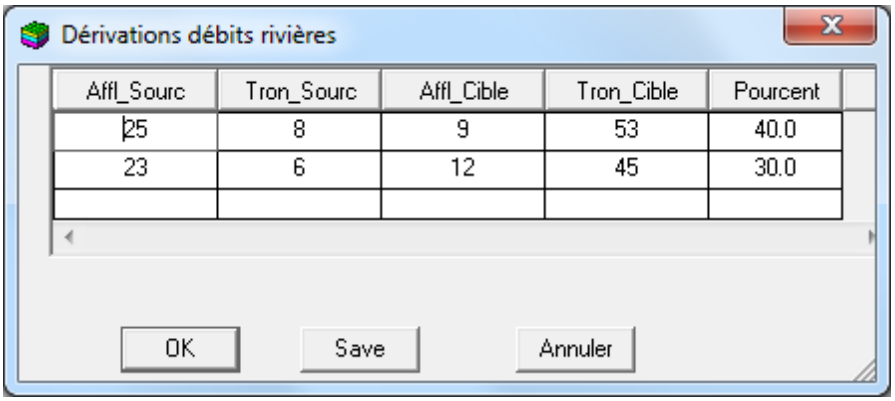


Figure 98 – Tableur pour la définition des « Dérivations de débit du réseau hydrographique ».

Le tableur permet de définir 5 paramètres pour chaque dérivation :

- Le numéro de l'affluent source
- Le numéro du tronçon source
- Le numéro de l'affluent cible
- Le numéro du tronçon cible
- Le pourcentage de débit prélevé

Dans l'exemple présenté : il y a 2 dérivations :

Première dérivation : source de la dérivation = affluent n°25, tronçon n°8. On y prélève 40 % du débit pour le réinjecter dans la cible qui est l'affluent n°9, tronçon n°53.

Deuxième dérivation : source = affluent n°23, tronçon n°6. On y on prélève 30 % du débit qu'on réinjecte dans la cible = affluent n°12, tronçon n°45.

Le fichier, d'extension [.der_qri], qui est créé ou modifié avec le tableur, a la forme suivante :

```
Bassin du Rhône : Titre descriptif
! Affl_Sourc  Tronç_Sourc   Affl_Cible  Tronç_Cible      %_Débit
      25           8             9           53             40
      23           6            12           45             30
```

Flux de ruissellement superficiel

Ce sont les flux de ruissellement dans les mailles affleurantes du domaine modélisé.

Les flux de ruissellement sont exprimés en unité utilisateur de « flux hydroclimatique », c'est-à-dire en unité utilisateur de « hauteur hydroclimatique » par unité utilisateur de « durée hydroclimatique ».

Attention : Ces données sont donc des flux, par exemple des mm/an, et non pas des hauteurs.

Remarque : Les valeurs de flux égales à 9999 sont ignorées.

Mot clé : RUISSEL

Météo : Flux de ruissellement

C'est un fichier « Météo séquentiel » de données de Flux de Ruissellement par Zones Climatiques. Ces flux de ruissellement doivent avoir été calculés par ailleurs au préalable.

Dans cette version : ces données sont utilisées uniquement si, dans le fichier des « Paramètres généraux », au paragraphe « Hydroclimatologie », on a choisi le bilan hydroclimatique de type « Ruissellement/Recharge »

Ce flux de ruissellement est en fait la valeur de « Pluie – ETR – Recharge ». Il est exprimé en unité utilisateur de « flux hydroclimatique ».

Ce flux de ruissellement peut subir un routage avant d'aboutir au réseau hydrographique.

Attention : En dehors de l'aquifère (dans les mailles de perméabilité = 0 ou 9999), l'éventuel « flux de recharge » est transformé en « flux de ruissellement » dirigé vers les éventuels cours d'eau selon les « Directions aval pour le ruissellement ».

Mot clé : METE_FL_RUIS

Direction aval pour le ruissellement superficiel

En présence d'un réseau hydrographique, ce fichier est utilisé pour :

- Transférer le ruissellement vers le réseau hydrographique ou les lacs.
- Transférer le débit de débordement de nappe vers le réseau hydrographique.

Il y a 8 directions aval possibles : N , NE , E , SE , S , SO , O.
(N = Nord ; S = Sud ; E = Est ; O = Ouest).

Méthode de définition de la direction aval :

⇨ La direction peut être donnée sous forme d'un nombre 1001 à 1008
  ⇨ 1001 à 1004 = N, E, S, O ; 1005-1008 = NE, SE, SO, NO. *C'est la méthode conseillée*.
⇨ Ou bien sous forme d'un angle (0 - 360°) à partir du Nord, dans le sens des aiguilles d'une montre (comme avec une boussole)
  ⇨ 0 = Nord ; 90 = Est ; 180 = Sud ; 270 = Ouest ; 45 = Nord-Est, etc.

S'il n'y a pas de fichier de directions aval, le ruissellement superficiel est transféré dans le tronçon de rivière le plus proche de la maille qui reçoit le ruissellement ou le débit de débordement. C'est une approximation souvent acceptable quand il y a de nombreux tronçons de rivière.

Ce champ concerne uniquement les mailles affleurantes (couche fictive n°0). Les données sont écrites dans la couche n°1.

Remarque : Il est possible, sur option, de d'indiquer directement dans ce champ le numéro de tronçon de rivière associé.

Vitesse pour le ruissellement superficiel

C'est la vitesse à laquelle s'écoule le ruissellement de surface, hors du réseau hydrographique.

Ce fichier est utilisé uniquement en présence d'un réseau hydrographique, et de « directions aval de ruissellement ».

Les vitesses sont exprimées en m/s.

Les valeurs réalistes sont généralement de l'ordre de 0.2 à 1 m/s.

Ce champ concerne uniquement les mailles affleurantes (couche fictive n°0). Les données sont écrites dans la couche n°1.

10.5.2. Les champs de données pour le réseau de drains-conduits

Les champs de données pour le réseau de drains-conduits sont les suivants :

- Numéro d'Affluent de Drain
- Numéro du Tronçon de Drain
- Arbre de branchement des affluents de Drains
- Longueur du tronçon de Drain
- Largeur du tronçon de Drain-Conduit
- Orientation du tronçon de Drain-Conduit (0=Horizontal ; 1=Vertical)

- Altitude du fond du tronçon de Drain
- Hauteur du tronçon de Drain-Conduit horizontal
- Charge hydraulique de l'eau dans le tronçon de Drain-Conduit
- Débit d'injection ou pompage dans le tronçon de Drain-Conduit
- Coefficient de perméabilité d'échange dans le tronçon de Drain
- Conductivité (perméabilité) du tronçon de Drain-Conduit
- Index de suintement-débordement / Gradient-unitaire du tronçon de Drain-Conduit
- Porosité du Drain-Conduit si les calculs sont réalisés en Zone Non Saturée

Numéro d'affluent de Drain

Si les drains ne sont pas hiérarchisés : donner un numéro d'affluent égal à 1

Si les drains sont hiérarchisés : un affluent est un ensemble de tronçons en série sans branchements intermédiaires, c'est-à-dire ayant chacun 1 seul tronçon amont au maximum.

Un affluent est caractérisé par un numéro d'affluent (quelconque) uniforme. Ce numéro ne doit pas dépasser 999998.

Les connexions entre affluents sont décrites dans l'« Arbre de branchement des affluents de drains », sous forme du numéro de l'affluent aval de chaque affluent.

Un drain peut être situé dans n'importe quelle couche. L'altitude de son fond doit être supérieure ou égale au substratum de la maille qui le contient.

Cas particuliers :

- Numéro d'affluent = -1 => Numéro de colonne de la maille contenant le tronçon.
- Numéro d'affluent = -2 => Numéro de ligne de la maille contenant le tronçon.
- Numéro d'affluent = -3 => Numéro de couche de la maille contenant le tronçon.

Numéro du tronçon de Drain

Si les drains ne sont pas hiérarchisés : donner un numéro de tronçon = 1

Si les drains sont hiérarchisés : dans un affluent, les tronçons ont un numéro de tronçon croissant depuis son amont jusqu'à son aval.

Les numéros peuvent être quelconques et n'ont pas besoin de se suivre (par exemple : 2 , 5 , 10 , 12, etc. est une séquence correcte).

Le numéro de tronçon doit être au moins égal à 1 et ne pas dépasser 999998.

Les tronçons ou affluents voisins peuvent se situer dans 18 directions possibles :

- Dans la couche courante, dans une des 8 directions voisines, obliques incluses :
  N, S, E, O, NE, NO, SE, SO.
- En multicouche, dans la couche voisine supérieure ou inférieure. Les 10 directions suivantes sont possibles : H, HN, HS, HE, HO et B, BN, BS, BE, BO.

  (N = Nord ; S = Sud ; E = Est ; O = Ouest ; H = Haut ; B = Bas).

Cas particuliers :

- Numéro de tronçon = -1 => Numéro de colonne de la maille contenant le tronçon.
- Numéro de tronçon = -2 => Numéro de ligne de la maille contenant le tronçon.
  Si un drain-conduit a une « orientation-verticale » alors :
  - Numéro de tronçon = 0 (ou négatif) => Numéro de couche de la maille contenant le tronçon.

Arbre de branchement des affluents de Drains

L'arbre de branchement est utilisé uniquement si les drains sont hiérarchisés.

L'« Arbre de branchement des affluents » décrit les connexions entre les affluents sous forme du numéro de l'affluent aval de chaque affluent.

Par convention, l'affluent le plus en aval, l'exutoire, a pour affluent aval l'affluent de n°0 (c'est un code pour désigner un exutoire.

Remarque : Il peut y avoir plusieurs affluents exutoires. Ceci se produit quand il y a plusieurs systèmes indépendants

Remarque : S'il y a un seul affluent, il n'est pas nécessaire de définir un arbre de branchement

Ce fichier, d'extension [.arb_d] n'est pas une grille. Il peut être constitué *via* le module de « Gestion de données non maillées », accessible par le bouton

de la barre d'outils du bas du cadre de WinMarthe. On choisit alors la ligne « Arbre de branchement des affluents de drains », Figure 99.

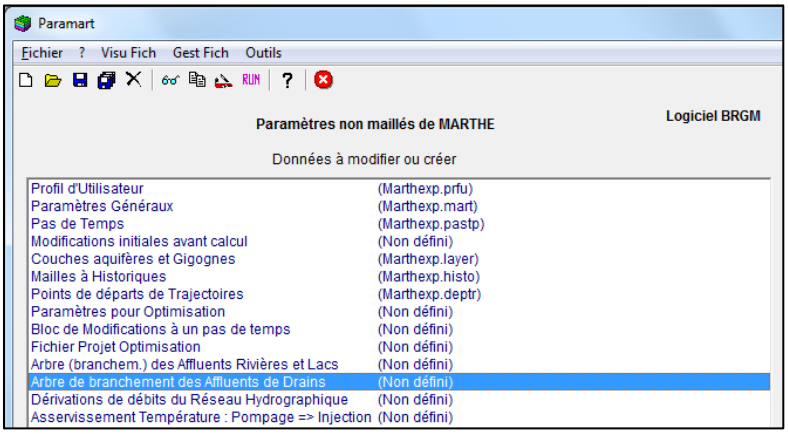


Figure 99 – Sélection du fichier de l'« Arbre de branchement des affluents de drains ».

On voit alors apparaître un tableur pour définir les affluents aval des affluents de drains. (Figure 100). Dans l'exemple présenté l'affluent n°11 a 5 affluents avals : les affluents n°1 à n°5. Ces 5 affluents (n°1 à n°5) n'ont pas d'aval : ce sont des affluents exutoires.

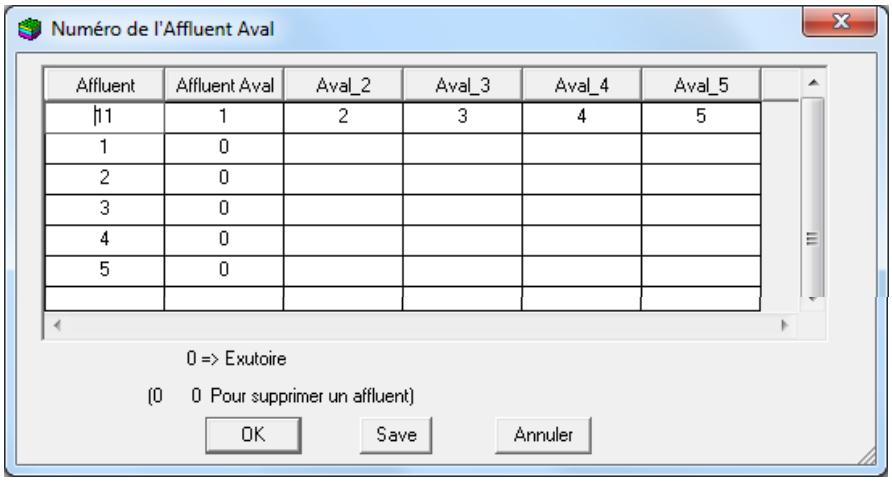


Figure 100 – Tableur pour la création de l'« Arbre de branchement des affluents de drains ».

Longueur du tronçon de Drain

La longueur est exprimée en unité utilisateur de coordonnées de maillage.

La longueur est automatiquement attribuée dans les cas suivants :

- Drain Vertical :
  - Longueur = 0 ou < 0 => Épaisseur verticale de la maille
- Drain Horizontal :
  - Longueur de tronçon = -1 => Dimension « dx » de la maille.
  - Longueur de tronçon = -2 => Dimension « dy » de la maille.

Largeur du tronçon de Drain-Conduit

La largeur du tronçon de drain est utilisée uniquement pour les Drains-Conduits (elle n'est pas prise en compte pour les drains classiques).

Attention : La largeur du tronçon de drain est exprimée en unité utilisateur de coordonnées de maillage, donc par exemple en km si l'unité utilisateur de coordonnées de maillage est le km.

Orientation du tronçon de Drain-Conduit (0=Horizontal ; 1=Vertical)

- 0 = Drain Horizontal (quelle que soit l'orientation dans le plan).
- 1 = Drain Vertical, c'est-à-dire dans la direction de la pesanteur.

Remarque : Ce champ s'applique uniquement aux drains-conduits. Il n'est pas pris en compte pour les drains classiques.

Altitude du fond du tronçon de Drain

L'altitude est exprimée en unité utilisateur de charge et d'altitude.

Quand la maille est aquifère : l'altitude du fond du drain doit être supérieure ou égale à l'altitude du substratum de la maille.

- Drain Classique : C'est l'altitude de référence
  ⇨ Pour comparaison avec la charge hydraulique de la Nappe.
- Drain Conduit :
  - Tronçon Horizontal : C'est l'altitude du fond du tronçon de drain.
    (+9999 => Mi-hauteur de la maille ; -9999 => Altitude du substratum de la maille).
  - Tronçon Vertical : C'est l'altitude du bas du tronçon de drain.
    (9999 => Altitude du substratum de la maille).

Hauteur du tronçon de Drain-Conduit (s'il est horizontal)

Elle est exprimée en unité utilisateur de charge et d'altitude

- Si on donne une valeur de hauteur non nulle :
  C'est la hauteur verticale, depuis le fond jusqu'au toit, du tronçon de drain-conduit.
- Si donne une hauteur égale à 0 :
  => Section carrée => La Hauteur du drain sera prise égale à la largeur du drain.

Remarque : La hauteur du tronçon de drain est utilisée uniquement pour les Drains-Conduits (elle n'est pas prise en compte pour les drains classiques).

Remarque : Cette hauteur n'est pas utilisée pour les Drains-Conduits verticaux pour lesquels :
Hauteur = Longueur_Drain et Section carrée = Largeur_Drain

Charge hydraulique dans le tronçon de Drain-Conduit

La charge hydraulique est utilisée uniquement pour les Drains-Conduits (elle n'est pas prise en compte pour les drains classiques).

La charge hydraulique est exprimée en unité utilisateur de charge et d'altitude.

Débit d'injection ou de pompage dans le tronçon de Drain-Conduit

Il est utilisé uniquement pour les Drains-Conduits.

C'est un débit injecté (quand il est positif) ou pompé (quand il est négatif) dans un tronçon de Drains-Conduit.

Un débit égal à la valeur code : 9999 impose localement la charge hydraulique dans le drain.

Coefficient de perméabilité d'échange dans le tronçon de Drain

Selon qu'il s'agit d'un « drain classique » ou d'un « drain conduit », ce champ correspond à un paramètre différent :

- Drain Classique :
  Ce champ contient la « Perméabilité d'échange » du drain « K_{Ech_D} » en unité utilisateur de perméabilité :

  Le débit d'échange « $Q_{Éch\ ND}$ » de la Nappe vers le Drain est alors :

  $\boxed{Q_{Éch\ ND} = K_{Ech_D} \cdot L \cdot (H_{Nap} - z_D)}$: si $H_{Nap} > z_D$

  $Q_{Éch_ND} = 0$: si $H_{Nap} < z_D$

Avec :
L = Longueur du tronçon de drain
z_D = Altitude du fond du drain
H_{Nap} = Charge hydraulique de la nappe dans la maille

- Drain conduit :
  Ce champ contient le « Coefficient de perméabilité d'échange » du drain« C_{Ech_D} » (sans dimension) : c'est un facteur multiplicatif sur la perméabilité de la nappe, utilisé pour calculer le débit d'échange« $Q_{Éch_ND}$ » de la Nappe vers le Drain

  Le débit d'échange « $Q_{Éch_ND}$ » de la Nappe vers le Drain est alors :

$$Q_{Éch_ND} = C_{Ech_D} \cdot K_{Nap} \cdot Sat_D \cdot L \cdot (H_{Nap} - H_D)$$

Avec :
K_{Nap} = Perméabilité de la nappe dans la maille
Sat_D = Coefficient de saturation dans le drain
H_D = Charge hydraulique dans le drain
H_{Nap} = Charge hydraulique dans la nappe

Conductivité (perméabilité) du tronçon de Drain-Conduit

La conductivité (perméabilité) du drain-conduit « **K_D** » sert à calculer l'écoulement « Q_D » dans le tronçon de drain. Elle est exprimée en unité utilisateur de perméabilité. Le débit échangé avec un tronçon de drain voisin « V » est :

$$Q_{DV} = A_V \cdot K_{DV} \cdot \frac{(H_{DV} - H_D)}{L_V}$$

Avec :
Q_{DV} = Débit dans le drain échangé avec tronçon de drain voisin
A_V = Aire de la section du drain en relation avec le drain voisin
L_V = Distance vers le drain voisin
H_{DV} = Charge hydraulique dans le drain voisin
H_D = Charge hydraulique dans le drain de calcul
K_{DV} = Moyenne pondérée de la conductivité avec celle du tronçon voisin

D'où l'interprétation de la conductivité du drain :

$$\frac{1}{K_D} = \frac{(H_{DV} - H_D)}{u_D \cdot L_V}$$

Avec :
u_D = Vitesse dans le drain

Index de suintement-débordement / Gradient-unitaire du tronçon de Drain-Conduit

- 0 = Possibilité de mise en charge.
- 1 = Possibilité de débordement ou de suintement.
- 9 = Gradient unitaire (en général sur une limite inférieure).

Porosité du tronçon de Drain-Conduit si les calculs sont réalisés en Zone Non Saturée

- Ce champ est pris en compte uniquement en cas de calculs en « Zone Non Saturée » C'est alors la teneur en eau à saturation dans les drains conduits.
  Par défaut, si on laisse la porosité à 0 => Porosité = 100 %.
  (La porosité est exprimée en « unité utilisateur de Porosité = Teneur en Eau »).

- Si les calculs ne sont pas réalisés en « Zone Non Saturée », ce champ n'est pas pris en compte (et la porosité du drain-conduit est donc égale à 100 %)

10.5.3. Les champs de données pour les lacs

Dans le code de calcul MARTHE, la définition d'un lac est la suivante :

- C'est un ensemble de mailles de surface caractérisées par un niveau uniforme.
- Un lac peut s'assécher localement ou totalement, et être en relation avec des rivières.
- Il a au maximum 1 affluent de rivières exutoire ou bien 1 lac exutoire
- Il peut y avoir jusqu'à 3 affluents de rivières amont.
- Les connexions entre Lacs et Affluents de rivières sont décrites dans le fichier « Arbre de branchement des rivières ».
- Les lacs doivent être situés dans la couche affleurante.

Les champs de données spatialisées pour les lacs sont les suivants :

- Numéro de Lac
- Lacs : Emplacement des contacts avec les voisins
- Épaisseur locale de colmatage de lit des Lacs
- Perméabilité locale de colmatage de lit des Lacs
- Niveau absolu de l'eau dans les Lacs
- Débit local d'injection (ou de pompage) dans le Lac
- Débit amont (source) pour les Lacs
- (Altitude topographique : c'est l'altitude du fond du Lac)
- Paramètres globaux des Lacs

Remarque : Dans cette version de MARTHE, la fonctionnalité de calcul des lacs est seulement partiellement opérationnelle.

Numéro de Lac

- Un lac est caractérisé par un Numéro de Lac (qui doit être supérieur à 1000 pour les distinguer des affluents de rivières).
  Il n'y a *pas* de « numéro de tronçon de Lac ».

Lacs : Emplacement des contacts avec les voisins

Ce champ indique :

- La position de l'exutoire du lac, donc son aval, où se connecte un autre Lac ou bien un affluent de Rivière
  - ⇨ Index < 0 (-Numéro du Lac ou -Numéro d'affluent de Rivière. Par ex: -1005, ou bien -12)
- La position des Lacs ou Rivières amont :
  - ⇨ Index > 0 (+Numéro du Lac ou d'Affluent. Par ex : 1004 ou 8)

Épaisseur locale de colmatage de lit des Lacs

Elle est exprimée en unité utilisateur de charge et d'altitude.

Perméabilité locale de colmatage de lit des Lacs

Elle est exprimée en unité utilisateur de perméabilité.

Niveau absolu de l'eau dans les Lacs

C'est le niveau absolu (altitude) de l'eau dans le repère des charges hydrauliques. Il est exprimé en « unité utilisateur de charge hydraulique et d'altitude » (unité de hauteur verticale)

Attention : Ce n'est pas une profondeur d'eau, mais une altitude absolue.

Débit local d'injection (ou de pompage) dans le Lac

C'est un débit injecté (quand il est positif) ou pompé (quand il est négatif) dans une maille de lac.

Un débit égal à la valeur code : 9999, introduit dans n'importe quelle maille d'un lac, impose le niveau absolu de l'eau dans le lac auquel appartient cette maille

Débit amont (source) pour les Lacs

C'est un débit qui peut être introduit en entrée dans un lac qui n'a pas d'amont

Il est exprimé en unité utilisateur de débit de rivière

Paramètres globaux des Lacs

C'est un fichier contenant les paramètres globaux relatifs à chaque Lac : Niveau absolu de l'eau, Superficie, Volume d'eau, etc. Ces paramètres globaux sont variables avec le temps.

10.6. Les champs de données pour les systèmes multicouches avec épontes

Dans les systèmes aquifères multicouches, les couches aquifères sont souvent séparées par des formations peu perméables, appelées « formations semi-perméables », épontes ou « aquitards ». On admet souvent que ces formations permettent des flux d'échanges quasi-verticaux, mais que les flux « horizontaux » à l'intérieur de ces semi-perméables sont négligeables parce qu'ils sont de plusieurs ordres de grandeur inférieurs à ceux qui circulent dans les aquifères.

Historiquement, pour limiter le nombre de couches de calcul, et ainsi diminuer les besoins et mémoire et en temps de calcul, le calcul de la charge hydraulique n'était pas effectué dans ces couches « semi-perméables ». Ces couches qui servaient uniquement d'isolant pour contrôler le débit d'échange entre les couches, sont caractérisées en toute maille par une épaisseur et une perméabilité verticale.

Cependant l'inconvénient de considérer une couche comme une éponte est qu'elle n'a ni emmagasinement, ni de porosité et n'induit donc ni stockage/déstockage ni de retard dans les transferts masse et de pression. En particulier les calculs de transport de masse et les calculs de trajectoires intra-couches sont donc incorrects.

En conséquence, la modélisation de couches en tant qu'épontes n'est plus guère employée (mais cependant encore opérationnelle dans cette version de MARTHE).

Dans le code MARTHE, certaines couches aquifères peuvent être séparées par des épontes. Une éponte est toujours associée à la couche aquifère sous-jacente. L'éponte, quand elle existe, est identifiée comme l'« éponte supérieure » de la couche.

Quand une couche aquifère a une éponte supérieure : l'épaisseur de la couche aquifère est la différence entre le substratum de cette éponte, et le substratum de la couche aquifère (Figure 101).

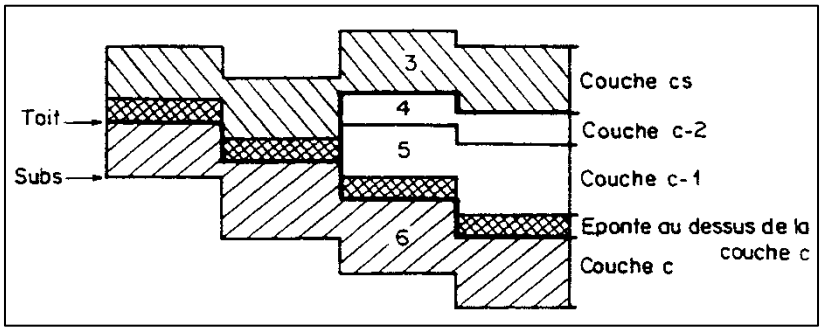


Figure 101 – Géométrie des couches en présence d'épontes semi-perméables. Vue en coupe verticale.

Les deux champs de données utilisés pour décrire les épontes semi-perméables sont les suivants :

- Altitude du substratum de l'éponte supérieure à la couche aquifère
- Perméabilité verticale de l'éponte supérieure à la couche aquifère

Altitude du substratum de l'éponte supérieure

C'est l'altitude du substratum de l'éventuelle éponte qui est superposée à une couche aquifère.

Perméabilité verticale de l'éponte supérieure

C'est la perméabilité (verticale) de l'éventuelle éponte qui est superposée à une couche aquifère.

Attention : Pour des raisons de compatibilité avec des versions antérieures de MARTHE, cette perméabilité n'est pas exprimée en unité utilisateur de perméabilité.

Par défaut : elle est exprimée en m/s. Mais il est possible de donner une unité de « perméabilité d'éponte » différente dans chaque couche, comme expliqué dans l'Annexe 3.

11. Les champs de donnés calculées qui peuvent être sauvegardés

11.1. Les champs quasiment toujours obtenus ou demandés

Après une simulation on obtient le plus souvent les fichiers suivants :

- Un fichier de nom « mart_ver.txt » :
  Ce fichier liste les éventuelles erreurs détectées ou les données à vérifier.
  Il indique également la durée des temps de calcul pour les différentes étapes de calcul.

- Un fichier de nom « bilandeb.txt » :
  Ce fichier texte détaille à chaque pas de temps les différents termes du bilan d'eau, ainsi que le suivi de la convergence des calculs.
  Exceptionnellement, il est possible de ne pas générer ce fichier (*déconseillé sauf pour les simulations de plusieurs centaines de milliers de pas de temps*).

- Des fichiers d'historiques des termes du bilan des débits. Par défaut, ces fichiers sont générés uniquement pour les calculs en régime transitoire, mais il est possible de les obtenir également pour les calculs en régime permanent. Ces fichiers sont les suivants :
  - « histobil_debit.prn » : ce fichier contient les termes du bilan des débits, exprimés en unité utilisateur de débit.
    S'il y a un réseau de rivières : ce fichier « histobil_debit.prn » contient également l'historique des termes du bilan des débits de toutes les rivières. Il contient également l'historique des termes du bilan des volumes cumulés dans les rivières depuis le début de la simulation.
  - « histobil_nap_pastp.prn » : ce fichier contient les termes des volumes échangés au cours de la durée totale de chaque pas de temps. (Dans les calculs avec un schéma en ZNS, non décrits ici, le fichier « histobil_debit.prn » donne les termes de débit au cours du dernier sous-pas de temps, alors que ce fichier « histobil_nap_pastp.prn » donne les volumes échangés en cumulant tous les sous-pas de temps).
  - « histobil_nap_cumu.prn » : ce fichier contient le cumul des termes de volumes du bilan depuis le début de la simulation. c'est le cumul du fichier « histobil_nap_pastp.prn ».

- Un fichier de nom « marthe.txt » :
  Ce fichier, si on a demandé sa création, liste toutes les données d'entrée. Il permet de vérifier qu'on n'a pas introduit de données erronées.

Champs calculés :

Le plus souvent, pour une simulation simple d'hydrodynamique, on demande au minimum la sauvegarde des champs suivants :

- Le champ de la charge hydraulique calculée dans tout le domaine. Code de champ : « CHARGE »

- Le champ du débit calculé aux limites du domaine, ou dans les mailles à charge hydraulique imposée. Code de champ : « DEBIT_LIMITES »

- Le champ du débit calculé dans tout le domaine. Code de champ : « DEBIT »

S'il y a des rivières on sauvegarde également :

- Le champ du débit de rivière calculé. Code de champ : « DEBIT_RIVI ».

Tous les champs calculés sont sauvegardés, les uns à la suite des autres, dans le fichier de nom « chasim.out » (« chasim » pour champs simulés). Les différents champs sont repérés par des en-têtes qui indiquent leur code de champ, la date et le numéro du pas de temps.

Cependant, les champs de débits : débit de nappe, débit de rivières et débit de drains sont sauvegardés dans le fichier de nom « debsim.out » (« debsim » pour debits simulés).

Ces fichiers « chasim.out » et « debsim.out » peuvent être importés directement dans le préprocesseur WinMarthe et visualisés directement. Il est également possible de voir l'évolution temporelle d'un champ dans une couche, ou une coupe verticale, sous forme d'une animation.

Historiques temporels :

En régime transitoire, mais aussi parfois en régime permanent, on demande également, les « historiques temporels » de l'évolution de certains champs dans des points particuliers.

Par exemple, on demande l'historique de la charge hydraulique dans des forages de pompage ou d'injection. Ces historiques sont écrits en fichier texte dans le fichier de nom « historiq.prn ».

Ce fichier, qui peut être importé directement dans Excel ®, ou dans un tableur équivalent, est organisé en colonnes.

Trajectoires :

On peut demander le calcul des trajectoires de l'écoulement à partir d'un certain nombre de points de départ.

Ces trajectoires sont sauvegardées dans les fichiers « trajmar.bln » et « trajmar.out ».

Vitesse d'écoulement :

On peut demander le calcul du champ des vecteurs de vitesse d'écoulement. Cette demande se fait, à n'importe quel pas de temps, en introduisant une « modification » sur l'« objet » « VITESSE » et en lui appliquant l'« action » de « sauvegarde ».

Les vitesses calculées sont sauvegardées dans le fichier « velocity.bln » (pour la visualisation) et dans le fichier « veloci.out », qui contient les champs de vitesse de toutes les couches du domaine, pour tous les pas de temps auxquels on a demandé la sauvegarde des vitesses.

11.2. Le fichier « bilandeb.txt » de suivi des calculs et de bilan des débits calculés

Le fichier « bilandeb.txt » permet, d'une part de suivre la convergence itérative des calculs, et d'autre part d'établir (et de contrôler) le bilan des débits dans l'aquifère. Un exemple de fichier « bilandeb.txt » est donné dans les Figure 102 à Figure 104.

La Figure 102 montre un exemple de suivi de la convergence itérative.

```
-----------------------------------------------------------------
  $ Pas de temps de modèle n° 15
-----------------------------------------------------------------

     Début:    108.000  (=  3.888E+05 secondes =      4.500 jour(s))
     Durée:     12.000  (=  4.320E+04 secondes =      0.500 jour(s))
     Fin  :    120.000  (=  4.320E+05 secondes =      5.000 jour(s))
=========================================================
 Récapitulation de la Convergence du calcul des Charges
 Sous  Itér   Var Moy   Var Maxi    Q_Résid  Nb_Itérat
  Pas                  Itérat 1   Itérat 1  internes
    1    1  2.288E-02 -5.051E-02  1.000E+02     6
    1    2  2.607E-05 -2.747E-03  2.149E-01     5
    1    3  2.067E-07 -7.508E-05  1.082E-02     3
=========================================================
```

Figure 102 – Fichier bilandeb.txt : Suivi du calcul de la charge hydraulique. Pas de temps n°15.

La Figure 103 montre un exemple de bilan des débits.

```
- Bilan en unités de débit : Pas de temps n° 15 - t= 120.000 -------------

 Débits Entrant /Charges Impos. =     0.000
 Débits Sortant /Charges Impos. =                 0.000
 Débits Entrant dans les Mailles= 4.028E-04
 Débits Sortant des Mailles     =              -100.000 (-100.000 Imposé)
 ------------------------------------------------------------------------
     Stockage                   =  -100.000  (    0.000    -100.000)
     Bilan de Contrôle          = 2.984E-13             (Somme de tous les débits)
 Débit Résiduel d'Erreur        = 9.986E-04             (Somme des valeurs absolues
                                                         des débits résiduels)
 Débits Internes significatifs  =     0.000    -100.000 (calculés dans les mailles
                                                         avec pompage ou injection)
                  Bilan Global = 9.652E-05


 Débit   Résiduel Maximal             =  9.655E-05 Col: 26 , Lig: 26
 soit un Écart de Charge de           :  1.434E-06
 Hauteur Résiduelle d'Erreur Maximale =  1.434E-06 Col: 26 , Lig: 26

 Somme abs (Débits résiduels)   = 9.986E-04 Flux Total maxi = 100.000
 d'où une convergence interne à : 9.986E-04 %   d'erreur
 Écart de bilan global          = 9.652E-05    (bouclage entrées/sorties avec les
                                                 débits de pompage/injection
                                                 calculés)
 d'où une convergence globale à : 9.652E-05 %   d'erreur
```

Figure 103 – Fichier bilandeb.txt : Bilan des débits. Pas de temps n°15.

Dans le cas d'un système multicouche, le fichier bilandeb.txt présente le bilan des débits par couche, et ensuite le bilan global de toutes les couches. On y trouve en particulier les termes suivants :

- Débits entrant dans les mailles ou sortant des mailles :
  C'est la somme des débits calculés dans les mailles internes du domaine (en dehors des mailles à charge hydraulique imposée). Si la convergence est atteinte, la somme de ces débits doit être très proche de la somme des débits imposés par l'utilisateur (sauf s'il n'est pas possible d'obtenir des débits de pompage souhaités).

- Débits de débordement :
  C'est la somme des débits qui sortent de l'aquifère par les mailles à débordement. Ces débits de débordement, qui sortent, sont donc négatifs.

- Débits de Stockage (en régime transitoire) :
  C'est la somme des débits moyens correspondant à la variation de stock pendant le pas de temps de calcul.

- Bilan de contrôle :
  C'est la somme algébrique de tous les débits. Ce bilan de contrôle est toujours faible, à la précision de l'ordinateur près, même si les calculs n'ont pas bien convergé. Ce n'est donc *pas* un indicateur de la convergence des calculs.

- Débit résiduel d'erreur :
  C'est la somme des valeurs absolues des débits résiduels calculés dans chacune des mailles. Le débit résiduel est la différence entre le débit éventuel imposé et le débit calculé d'après les mailles voisines. Les calculs sont d'autant mieux convergés que le débit résiduel est faible.

- Pourcentage de non-convergence interne (des débits) :
  C'est le rapport, exprimé en %, du débit résiduel d'erreur au « chiffre d'affaire » en débit de la nappe.

  Le chiffre d'affaire est par exemple la somme des débits entrants (positifs) ou la somme des débits sortants (négatifs). C'est le plus grand terme qui est retenu.

  On considère généralement que le bilan est équilibré de manière satisfaisante quand le « pourcentage de non-convergence interne » ne dépasse pas 1 % (ou quelques pourcents).

  ⇨ C'est le critère de convergence des débits le plus sévère.

- Hauteur résiduelle d'erreur :
  Dans chaque maille le débit résiduel est transformé en écart de charge hydraulique (ou « hauteur résiduelle »). C'est la correction de charge qu'il faudrait appliquer pour équilibrer les débits. C'est également un critère de convergence à examiner puisqu'il peut arriver qu'un très faible débit résiduel corresponde à une forte correction de charge (si les perméabilités sont très faibles) ; ou bien à l'opposé, un fort débit résiduel peut ne correspondre qu'à une correction de charge insignifiante (si les perméabilités sont très grandes).

- Écart de bilan global :
  C'est le terme : Q_entrant – Q_sortant – Q_stockage :
  Avec Q_entrant = Somme des débits entrants.
  Qsortant = Somme des valeurs absolues des débits sortants.
  Q_stockage = Somme algébrique des débits de stockage.

  Quand le bilan est globalement équilibré le débit global est très proche de 0

  Le « pourcentage de non-convergence globale » est l'écart de bilan global exprimé en pourcentage du « chiffre d'affaire ».

  Le « pourcentage de non-convergence globale » est un critère moins sévère que le

« pourcentage de non-convergence interne ». En effet si des débits résiduels se compensent, la somme des débits résiduels peut être négligeable (bonne convergence globale), alors que la somme des valeurs absolues des débits résiduels est grande (mauvaise convergence interne).

La Figure 104 montre un exemple de cumul des volumes d'eau dans le pas de temps de modèle et aussi de cumul depuis le début des calculs. Les volumes sont exprimés en « unité utilisateur de volume d'eau ».

```
========================================= Pas de temps n° 15 - t= 120.000

 -Aquifère--- Cumul des Volumes  Eau   --- Dans le pas    Depuis le début de
                                                            la simulation
        Volume Interne (Imposé) Sortant = -1200.             -1.2000E+04
              Volume Déstocké (Sortant) = -1200.             -1.2000E+04
            Écart de Bilan volume nappe =-3.5439E-07         -5.4207E-06
                                    (%) = 2.9532E-08          4.5172E-08
```

Figure 104 – Fichier bilandeb.txt : Volumes cumulés. Pas de temps n°15.

11.3. Le fichier des historiques temporels calculés

Les historiques calculés sont écrits en fichier texte dans le fichier de nom « historiq.prn ».

Ce fichier, qui peut être importé directement dans Excel ® ou son équivalent, est organisé en colonnes :

- La première colonne contient les dates des fins de pas de temps.
- Si les dates sont des dates calendaires, la deuxième colonne contient en plus les dates sous forme décimale.
- Les autres colonnes se rapportent chacune à un historique différent.

Les valeurs des différentes colonnes sont séparées par des « tabulations ».

La Figure 105 présente un exemple de fichier historique, de nom « historiq.prn », obtenu en fin de calcul.

Dans les libellés des colonnes du tableau :
- « X » représente le numéro de la colonne,
- « Y » le numéro de la ligne,
- « Z » le numéro de la couche (pour les modèles 3D).

Par exemple :
- « X27_Y26 » désigne l'historique dans la colonne n°27, ligne n°26 de la seule couche n°1.
- « X27_Y26_Z5 » désigne l'historique dans la colonne n°27, ligne n°26, couche n°5.

Exemple Maillage Monocouche Carré (Mono.rma) [V7.5]				
Date	Charge	Charge	Débit	Charge_Puits
Mono	X26_Y26	X27_Y26	X51_Y26	X26_Y26
<Date>				Puits
0	0	0	0	0
1	-1.367742	-0.3442849	-9.87E-10	-4.126174
2	-1.883774	-0.6074746	-1.23E-08	-4.67179
4	-2.283628	-0.9066517	-3.80E-06	-5.095006
6	-2.508086	-1.099663	-2.85E-05	-5.332752
12	-2.834465	-1.400018	-0.0041389	-5.678669
18	-3.0315	-1.585282	-0.0188202	-5.887639
24	-3.158109	-1.705239	-0.0508587	-6.021968
36	-3.240337	-1.782546	-0.2048752	-6.109239

Figure 105 – Exemple de fichier historique « historiq.prn » obtenu après calcul.

11.4. Les fichiers de trajectoires calculées

On obtient des trajectoires calculées si on a rempli les conditions suivantes :

- On a demandé le calcul de trajectoires (dans le fichier des « Paramètres Généraux », au paragraphe « Concentration et Trajectoires »).
- On a créé un fichier de départs de trajectoires, et donné son nom dans le fichier projet.

Les trajectoires calculées sont rassemblées dans deux fichiers de résultats :

- Le fichier « trajmar.out » qui contient 5 colonnes : X , Y, Z, Temps, n° de couche
  Ce fichier peut être utilisé pour voir les temps de parcours des trajectoires. Il pourrait aussi être utilisé pour déterminer des isochrones de faisceaux de trajectoires ayant une origine cohérente. (Figure 106).
  Ce fichier peut être exporté sous format « mif/mid » pour une importation sous Mapinfo ® ou QGIS ®.
- Le fichier de dessin « trajmar.bln » qui contient 2 colonnes : X, Y (ou X, Z : en cas de coupe verticale). (Figure 107).
  Ce fichier dessin peut être visualisé immédiatement avec WinMarthe, comme un fichier de « Polygones ». Cependant tous les points apparaissent, indépendamment de la couche affichée.

```
39 <Trajectoires> : (X,Y,Z,T,C) X=1,Y=1,Z=0,C=0 Ex : Permanent
! Nombre de Points = 9 ; Group = 5 ;
! Trajectoire n°  4 ============================== [V7.5]
    [X           Y          (Z)        Temps    Couche]
   550.0000   2350.000   0.000000   0.000000   1
   540.6271   2300.000   0.000000   149833.2   1
   535.0848   2200.000   0.000000   418701.3   1
   535.5301   2100.000   0.000000   685732.5   1
   565.3872   2000.000   0.000000   956699.3   1
   600.0000   1932.300   0.000000   1139096.   1
   620.7432   1900.000   0.000000   1225892.   1
   700.0000   1821.900   0.000000   1484441.   1
   798.0489   1828.934   0.000000  1.000E+12   1
! Nombre de Points = 7 ; Group = 6 ;
! Trajectoire n° 48 ============================
   1150.000   550.0000   0.000000   0.000000   1
   1100.000   528.3288   0.000000   389873.2   1
   1000.000   513.7328   0.000000   1054144.   1
   913.7368   600.0000   0.000000   2367443.   1
   900.0000   602.6251   0.000000   2384927.   1
   800.0000   601.7478   0.000000   2491841.   1
   700.0000   600.0000   0.000000  1.000E+12   1
```

Figure 106 – Exemple de fichier de trajectoires « trajmar.out » en monocouche, en régime permanent.

```
  9 0 Traj_0004 xy
 550.000   2350.000
 540.627   2300.000
 535.084   2200.000
 535.530   2100.000
 565.387   2000.000
 600.000   1932.299
 620.743   1900.000
 700.000   1821.899
 798.049   1828.933
  7 0 Traj_0048 xy
1150.000   550.0000
1100.000   528.3288
1000.000   513.7328
913.7367   600.0000
900.0000   602.6250
800.0000   601.7477
700.0000   600.0000
```

Figure 107 – Exemple de fichier pour dessins de trajectoires « trajmar.bln ».

11.5. Sauvegarde de champs relatifs à l'hydrodynamique classique

À n'importe quel pas de temps de modèle, on peut demander la sauvegarde du champ de la « Charge hydraulique calculée » et du champ du « Débit de fluide calculé »

On peut également demander la sauvegarde de nombreux autres champs.

Pour demander la sauvegarde d'un champ à un pas de temps donné, on utilise le module de « Gestion des données non maillées », accessible *via* le bouton de la barre d'outils du bas du cadre de WinMarthe, puis :

- On choisit alors la ligne « Pas de Temps »
- On sélectionne un numéro de pas de temps.
- On choisit « Nouvelle Action »
- On choisit l'« Objet » dont on veut sauvegarder le champ : par exemple « CHARGE », ou bien « CHARGE_PUITS », ou bien « DEBIT_LIMITES »
- Puis, s'il y a plusieurs actions possibles, l'action « sauvegarde ».

Les champs relatifs au calcul de la charge hydraulique et du débit d'eau sont décrits ci-dessous.

Charge hydraulique calculée

Comme la charge hydraulique initiale, elle est exprimée en unité utilisateur de charge et d'altitude. C'est la charge hydraulique moyenne de la nappe dans la maille.
En cas de calculs avec effets densitaires : il s'agit de la charge hydraulique réelle en eau salée.

Rabattement (différence de charge hydraulique)

C'est le champ de la différence « Charge hydraulique courante » - « Charge hydraulique initiale »

Remarque : dans langage courant on désigne souvent le rabattement comme la diminution de charge hydraulique résultant d'un pompage. C'est la charge hydraulique initiale – la charge hydraulique courante, donc l'opposé du « rabattement » calculé par MARTHE.

Charge au puits (prenant en compte le rayon du puits)

C'est une estimation de la charge hydraulique au puits. Elle est obtenue à partir de la charge hydraulique de la nappe « moyenne » dans la maille contenant le puits, à laquelle on applique une correction en fonction du rayon du puits, de la dimension de la maille et du débit.

- Si le rayon du puits, ou le débit est nul, c'est la charge hydraulique dans la nappe.

- Pour le calcul, on suppose un puits (vertical) avec localement un écoulement radial vers le puits (débit négatif) ou depuis le puits (débit positif).

- La correction de charge hydraulique « dH » est donnée par l'expression suivante :

$$dH = \frac{Q}{2\pi T} \cdot \left[Ln\left(\frac{a}{r_p}\right) - \frac{\pi}{2} \right]$$

Avec : a = Dimension du côté de la maille (supposée carrée) en mètres
r_p = Rayon du puits (m)
(Attention : c'est le *rayon* du puits, *pas* son diamètre)
T = Transmissivité (m^2/s)
Q = Débit injecté (positif) ou pompé (négatif) (m^3/s)
dH = Différence de charge hydraulique Puits – Nappe (m)

Ln() = Logarithme Népérien

Réciproquement, on déduit de cette formule que le rabattement (moyen) calculé par le code de calcul dans la maille de côté « a » - donc avant correction - est celui qui serait obtenu dans un puits de rayon fictif r_F :

$$r_F = a \cdot \exp(-\pi/2) = 0.2079 \cdot a$$

Remarque : Les pertes de charges singulières (quadratiques) au puits ne sont pas prises en compte. Il faut les rajouter si on les connaît.

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

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

Débit d'eau (débit de fluide)

C'est le débit volumique calculé par le code de calcul. Comme pour le débit initial :

- Le débit de fluide est exprimé en unité utilisateur de débit.
- Un débit entrant ou injecté est **> 0** ; un débit sortant ou pompé est **< 0**.

Ce débit peut représenter plusieurs grandeurs selon le cas :

- Pour une maille « normale », c'est-à-dire qui n'est pas à « charge hydraulique imposée », et dans laquelle il n'a pas été introduit de « débit pompé ou injecté » : le débit calculé est un débit résiduel, qui doit être très faible si les calculs ont bien convergé.
  Cependant si c'est une maille à débordement, on obtient l'éventuel débit de débordement (ou de suintement).

- Pour une maille à « charge imposée » (débit initial = 9999) : c'est le débit qu'il faudrait injecter (valeur > 0) ou pomper (valeur < 0) pour obtenir la charge hydraulique à la valeur imposée.

- Pour une maille dans laquelle on a introduit un « débit pompé » ou « un débit injecté » : c'est le débit calculé, qui doit être très proche du débit introduit si les calculs ont bien convergé. (sauf si l'aquifère est dénoyé à cause d'un prélèvement de débit trop important).

Une maille dans laquelle on introduit un flux de recharge ou un flux de reprise à la nappe n'est pas considérée comme une maille avec un débit d'injection ou de pompage. Ce débit est pris en compte dans les calculs, mais n'apparaît pas dans ce champ de débit calculé.

Débit de débordement et de suintement

Ce champ contient le débit de débordement ou de suintement calculé.

Dans les mailles dans lesquelles l'index de débordement et l'index de suintement est égal à 0, ce champ a la valeur 0.

Débit aux limites

Ce champ contient le débit calculé aux limites (maille à charge hydraulique imposée, maille à pression hydraulique imposée, etc.). C'est le débit calculé dans une maille ayant un débit fixé à 9999.

C'est le débit qu'il faut injecter (valeur > 0) ou pomper (valeur < 0) pour obtenir la charge hydraulique, (ou la pression) à la valeur imposée.

Dans une maille qui n'a pas un débit fixé à 9999, ce champ a la valeur 0

Débit résiduel

Ce champ contient le « débit résiduel calculé ». Il peut être utilisé pour contrôler la convergence des calculs hydrodynamiques. Un débit résiduel > 0 indique une charge hydraulique calculée trop haute par rapport à ses voisines, une valeur < 0 indique une charge hydraulique trop basse.

Ce champ à la valeur 0 dans les mailles à charge hydraulique imposée. Dans les mailles avec débit injecté ou pompé, ce champ indique le débit résiduel, c'est la différence « débit calculé » - « débit introduit ».

Débit manquant

Ce champ contient le « débit manquant calculé » : Un débit manquant est calculé quand le débit pompé a dû être diminué quand la nappe est quasiment dénoyée. La diminution se produit quand le débit pompé est trop élevé pour conserver une saturation en eau minimale de la nappe dans la maille du pompage.

Débit latéral : bilan entrée-sortie

Le débit latéral calculé est le bilan, entrée-sortie, des débits échangés avec la maille, dans la même couche, donc par les faces Nord, Sud, Est et Ouest.

Dans un système monocouche en régime permanent, dans les mailles sans pompage ni injection, le débit latéral doit être proche de 0, puisque la somme des débits entrants est égale à l'opposé de la somme des débits sortants.

Débit latéral entrant

Le débit latéral entrant calculé est calculé de la manière suivante : c'est la somme des débits entrant dans la maille, par les échanges dans la même couche, donc par les faces Nord, Sud, Est et Ouest.

Ce débit permet d'évaluer le débit transitant latéralement dans chaque maille.

Débits échangés par le haut et par le bas

Ces débits sont les débits échangés par les faces du haut et du bas de la maille. Comme toujours ce débit est > 0 quand il rentre dans la maille.

En pseudo-coupe verticale (en calcul avec schéma de Zone Non Saturée) : => C'est alors le débit par les faces Nord et Sud car ces faces Nord et Sud correspondent alors respectivement aux faces Haut et Bas.

Débit de stockage

Ce débit est calculé uniquement en régime hydraulique transitoire.

Ce débit de stockage calculé permet de constater les zones du domaine qui sont proche d'un régime permanent (débit de stockage proche de 0) et les zones qui sont encore loin de l'équilibre (débit de stockage très positif ou très négatif).

Vitesse (centrée) ou Débits d'échange

En demandant la sauvegarde de ce champ, l'utilisateur pourra choisir de sauvegarder :

- Les composantes de la vitesse au centre des mailles (en m/s)
- Les débits d'échange aux 6 faces des mailles (en unité utilisateur de débit).

Les composantes de vitesse ou les débits d'échange sont sauvegardés dans le fichier de nom « veloci.out »

Amplitude de la Vitesse dans la nappe

C'est le champ de l'amplitude de la vitesse réelle. Il est exprimé en m/s.

Taux de saturation calculé en %

C'est un champ qui permet de localiser immédiatement les mailles dénoyées, ou quasi dénoyées, ainsi que les mailles totalement saturées (mailles en charge).

- En schéma de calcul classique en « Pseudo-ZNS » ou bien en schéma de calcul en « nappe libre » : c'est le pourcentage de hauteur mouillée dans la maille.
- En schéma de calcul en « Zone Non Saturée » (ZNS) : c'est le rapport θ / θ_s de la « teneur en eau » divisée par la « teneur en eau à saturation ».

Profondeur de la Nappe (différence cote du Toit - Charge hydraulique)

- En schéma de calcul classique en « Pseudo-ZNS » ou bien en schéma de calcul en « nappe libre » : dans chaque maille : c'est la profondeur de la nappe libre en dessous de son toit.
  Si la nappe est en charge => La profondeur est notée = 0

- Pour les systèmes multicouches c'est la profondeur par rapport au toit de la couche de la maille considérée.

Épaisseur d'eau dans la couche

- En schéma de calcul classique en « Pseudo-ZNS » ou bien en schéma de calcul en « nappe libre » : dans chaque maille : c'est l'épaisseur de l'eau, au-dessus du substratum de la maille, calculée dans la couche.

  Si la maille n'est ni saturée ni dénoyée : c'est la charge hydraulique - substratum.

- Avec le schéma de calcul en Zone Non Saturé (ZNS) : cette épaisseur n'aurait pas de sens précis puisque le substratum n'a pas de rôle particulier.

  ⇨ Dans ce cas la valeur calculée est : (θ / θ_s) x Épaisseur de la couche.

11.6. Sauvegarde de données hydroclimatiques calculées (flux, états)

Si on réalise un bilan hydroclimatique, on peut demander à n'importe quel pas de temps la sauvegarde des champs suivants :

- Flux d'Évapotranspiration réelle calculé
- Flux d'Évapotranspiration réelle du sol calculé
- États hydroclimatiques complets
- Flux de fonte de neige calculé
- Déficit du réservoir sol (« réserve utile »)
- Déficit du réservoir sol progressif
- Hauteur d'eau dans le réservoir « H »
- Stock de Neige (exprimé en équivalent en eau)
- Flux de ruissellement superficiel
- Flux de recharge de la nappe
- Transpiration des cultures (transpiration des végétaux)
- Reprise à la nappe par évaporation
- Flux de Précipitations (Pluie + Neige)
- Flux d'Évapotranspiration Potentielle (ETP)
- Température de l'air
- Cumuls de champs entre deux dates

Flux d'Évapotranspiration réelle calculé

C'est le flux d'ETR Total intégrant :

- L'ETR dans la pluie et dans le réservoir sol, etc. (appelée « ETR_Sol »).
- L'Évaporation reprise à la nappe.
- La Transpiration des cultures par les racines, dans les couches plus profondes.

Ce flux intègre les effets de désaturation, de stress hydrique, etc.

Mot clé : FLUX_ETR

(« ETR » est l'abréviation de **É**vapo**T**ranspiration **R**éelle)

Flux d'Évapotranspiration réelle du sol calculé

Attention : c'est le flux d'ETR dans la pluie et dans le réservoir sol, etc.
Avant la reprise à la nappe

Ce flux, appelé « ETR_sol » dans les termes du bilan, intervient avant la reprise à la nappe.
(donc si Flux_Pluie = 0, et RU = 0 => Flux_ETR_Sol = 0)

Mot clé : FL_ETR_SOL

États hydro-climatiques complets

Ce sont les États hydroclimatiques complets (Zone_Sol, Zone_Météo, Zone_Culture

[*Ce fichier est uniquement récupéré en écriture, ou bien utilisé en lecture : pour un redémarrage (« Restart »)*]

Mot clé : ETAT_HYD_CLIM

Flux de fonte de neige calculé

C'est le flux de fonte de neige calculé, exprimé en unité utilisateur de « flux hydroclimatique ».

Mot clé : FONTE_NEIGE

Déficit du réservoir sol (« réserve utile »)

C'est le déficit courant dans le réservoir sol utilisé pour les bilans hydroclimatiques.

Remarque : Un déficit nul, valeur par défaut, correspond donc à un réservoir sol saturé.

Le déficit est exprimé en unité utilisateur de « hauteur hydroclimatique », par défaut en mm.

Mot clé : DEFIC_SOL

Déficit du réservoir sol progressif

C'est le déficit courant dans le réservoir sol « progressif » utilisé pour les bilans hydroclimatiques GARDÉNIA.

Il est exprimé en unité utilisateur de « hauteur hydroclimatique », par défaut en mm.

Mot clé : DEF_SOL_PROGR

Hauteur d'eau dans le réservoir « H »

C'est le niveau courant dans le réservoir intermédiaire « H » du module GARDÉNIA.

Il est exprimé en unité utilisateur de « hauteur hydroclimatique », par défaut en mm.

Mot clé : NIV_RESERV_H

Stock de Neige (équivalent en eau)

C'est le stock courant de neige. C'est l'équivalent en eau de la neige.

Il est exprimé en unité utilisateur de « hauteur hydroclimatique », par défaut en mm.

Mot clé : STOCK_NEIGE

Flux de ruissellement superficiel

C'est le flux de ruissellement dans les affleurements.
Il est exprimé unité de Flux hydroclimatique

Mot clé : RUISSEL

Flux de recharge de la nappe

C'est le flux de recharge dans les affleurements.
Il est exprimé en unité de Flux hydroclimatique.
C'est le flux de Recharge à la Nappe (après le bilan sol).

Remarque : Si le flux est négatif : c'est alors de la reprise à la nappe par ETR.

Mot clé : RECHARGE

Transpiration des cultures (transpiration des végétaux)

Mot clé : TRANSPI_CULT

Reprise à la nappe par évaporation

Ce sont les valeurs calculées de la reprise à la nappe par évaporation.

Mot clé : REPRISE_NAP

Flux de Précipitations (Pluie + Neige)

Utilité : Pour contrôler les précipitations introduites par zone.

Mot clé : FL_PLUV

Flux d'Évapotranspiration Potentielle (ETP)

Utilité : Pour contrôler les évapotranspirations potentielles introduites par zone.

Mot clé : FL_ETP

Température de l'air

Utilité : Pour contrôler les valeurs de température introduites par zone. (Unité = degrés C).

Mot clé : TEMPER_AIR

Cumuls de champs entre deux dates

Les cumuls peuvent être relatifs aux champs suivants :

- Flux de Précipitations
- Flux d'ETP
- Flux d'Évapotranspiration Réelle
- Flux d'Évapotranspiration Réelle Sol
- Flux de Recharge de Nappe
- Flux de Ruissellement superficiel
- Flux de Fonte de Neige
- Transpiration des Cultures
- Reprise à la nappe par évaporation

11.7. Sauvegarde de champs relatifs au réseau hydrographique, au réseau des drains et aux lacs

11.7.1. Sauvegarde de champs relatifs aux rivières

Les champs calculés pouvant être sauvegardés pour le réseau de rivières sont les suivants :

- Niveau absolu de l'eau dans les tronçons de rivière : HAUTEU_RIVI
- Profondeur de l'eau dans le tronçon de rivière : (HAUTEU_RIVI)
- Débit d'injection (ou de pompage) dans le tronçon de rivière : Q_EXTER_RIVI
- Débit (écoulement) dans le tronçon de rivière : DEBIT_RIVI
- Débit d'échange : Rivière => Nappe : QECH_RIV_NAPP
- Superficie de bassin versant en amont des mailles contenant une rivière.

Niveau absolu de l'eau dans les tronçons de rivière

C'est l'altitude (absolue) de l'eau dans le repère des charges hydrauliques.
Elle est exprimée en unité utilisateur de charge et d'altitude.

Attention : Ce n'est pas une profondeur d'eau, mais une altitude absolue.
Cette valeur est calculée par MARTHE uniquement si on a défini une relation de Manning-Strickler, ou bien une loi de seuil.

Profondeur de l'eau dans le tronçon de rivière

La profondeur de l'eau dans le tronçon de rivière est la différence entre le niveau absolu de l'eau dans le tronçon et la cote du fond du lit. En hydraulique de surface elle est appelée « Tirant d'eau ».
Elle est exprimée en unité utilisateur de charge et d'altitude.

Cette valeur est calculée par MARTHE uniquement si on a défini une relation de Manning-Strickler, ou bien une loi de seuil.

Débit d'injection (ou de pompage) dans le tronçon de rivière

Le débit est calculé uniquement dans les tronçons ayant un débit d'injection imposé et, s'il y a une relation « Hauteur – Débit », dans les tronçons ayant un niveau d'eau localement imposé.

Débit (écoulement) dans le tronçon de rivière.

C'est le débit à l'aval du tronçon de rivière.

Débit d'échange : Rivière => Nappe

Ce débit d'échange est exprimé dans l'optique de la nappe.

Comme son nom l'indique, le débit « Rivière => Nappe » est > 0 quand il va de la Rivière vers la Nappe.

Ce champ est exprimé en « unité générale de débit » car ce champ est dans l'optique de la nappe. Il n'est donc pas exprimé en unité utilisateur de « Débit de rivière ».

Superficie de bassin versant en amont des mailles contenant une rivière

Ce champ est sauvegardé dans le fichier « surf_drainee_riv.out ».

Il est sauvegardé uniquement si, dans le paragraphe « Sauvegardes et Contrôles » du fichier des « Paramètres Généraux », a choisi l'option :

« **1** = Listage des données des réseaux de rivière, drains, lacs »

11.7.2. Sauvegarde de champs relatifs au réseau de drains

Les champs calculés pouvant être sauvegardés pour le réseau de drains sont les suivants :

- Charge hydraulique de l'eau dans le tronçon de drain-conduit
- Profondeur d'eau dans le tronçon de drain-conduit
- Taux de saturation dans le tronçon de drain-conduit
- Débit d'injection (ou de pompage) dans le drain-conduit
- Débit (écoulement) à l'aval du tronçon de drain
- Valeur absolue du débit à l'aval du tronçon de drains-conduit
- Valeur absolue du débit au milieu du tronçon de drain-conduit
- Débit à l'amont du tronçon de drain-conduit
- Débit d'échange : Drain => Nappe

Charge hydraulique de l'eau dans le tronçon de drain-conduit

Ce champ s'applique uniquement aux drains-conduits.
La charge hydraulique est exprimée en unité utilisateur de charge et d'altitude.

Profondeur d'eau dans le tronçon de drain-conduit

Ce champ s'applique uniquement aux drains-conduits.

C'est la différence entre la charge hydraulique dans le drain-conduit, et la cote du fond du drain-conduit.

La profondeur d'eau est exprimée en unité de charge et d'altitude.

Taux de saturation dans le tronçon de drain-conduit

Ce champ s'applique uniquement aux drains-conduits.

Le taux de saturation est le rapport, exprimé en %, de la hauteur d'eau dans le drain, divisé par la hauteur du drain.

Débit d'injection (ou de pompage) dans le drain-conduit

Ce champ s'applique uniquement aux drains-conduits.

Débit (écoulement) à l'aval du tronçon de drain

Le débit est > 0 quand il sort par l'aval du tronçon de drain.

Pour les drains conduits, il est < 0 quand il rentre par l'aval.

Valeur absolue du débit à l'aval du tronçon de drains-conduit

C'est la valeur de débit toujours positive indépendamment du sens d'écoulement.

Valeur absolue du débit au milieu du tronçon de drain-conduit

C'est le débit au milieu du tronçon, c'est-à-dire à égale distance de l'amont et de l'aval.
La valeur de ce débit est toujours positive, indépendamment du sens d'écoulement.

Débit à l'amont du tronçon de drain-conduit

C'est le débit à la limite amont du tronçon.

Débit d'échange : Drain => Nappe

Ce débit d'échange est exprimé dans l'optique de la nappe.

Comme son nom l'indique, le débit « Drain => Nappe » est > 0 quand il est dirigé du Drain vers la Nappe.

11.7.3. Sauvegarde de champs relatifs aux lacs

Les champs calculés pouvant être sauvegardés pour les lacs sont les suivants :

- Altitude absolue de l'eau dans le lac
- Débit d'injection (ou de pompage) obtenus dans le lac (*Versions futures*)
- Débit d'échange : Lac => Nappe
- Débit (Entrée/Sortie/Extérieur) dans les Lac (*Versions futures*)

Altitude absolue de l'eau dans le lac

C'est l'altitude (absolue) calculée de l'eau dans le repère des charges hydrauliques.
Elle est exprimée en unité utilisateur de charge et d'altitude.

Attention : Ce n'est pas une profondeur d'eau, mais une altitude absolue.

Profondeur de l'eau dans le lac

C'est la profondeur de l'eau au-dessus du fond du lac dans la maille. Elle est exprimée en unité utilisateur de charge et d'altitude.

La sauvegarde de ce champ de profondeur d'eau est accessible par un sous-menu, en sélectionnant le champ d'« Altitude de l'eau dans le lac »

Débit d'injection (ou de pompage) dans le lac

C'est le débit imposé, éventuellement diminué si c'est un prélèvement qui ne peut pas être obtenu : par exemple, si le lac s'assèche ou bien si l'infiltration du lac vers la nappe est trop forte.

Débit d'échange : Lac => Nappe

Ce débit d'échange est exprimé dans l'optique de la nappe.

Comme son nom l'indique, le débit « Lac => Nappe » est > 0 quand il va du Lac vers la Nappe.

Débit (Entrée/Sortie/Extérieur) dans les Lac

Remarque : Ce débit est > 0 quand il rentre dans le Lac.

Superficie de bassin versant en amont des mailles contenant une rivière ou un lac

Ce champ est sauvegardé dans le fichier « surf_drainee_riv.out ».

Il est sauvegardé uniquement si, dans le paragraphe « Sauvegardes et Contrôles » du fichier des « Paramètres Généraux », a choisi l'option :

« **1** = Listage des données des réseaux de rivière, drains, lacs »

12. Sauvegarde d'historiques temporels

Avant le début du calcul, il est possible de demander l'évolution temporelle de certains champs calculés dans des mailles particulières. La sélection des mailles et des champs est réalisée *via* le module de « Gestion des données non maillées », accessible par le bouton PAR de la barre d'outils du bas du cadre de WinMarthe, en choisissant la ligne « Mailles à Historiques » (Figure 108), puis le type d'historique.

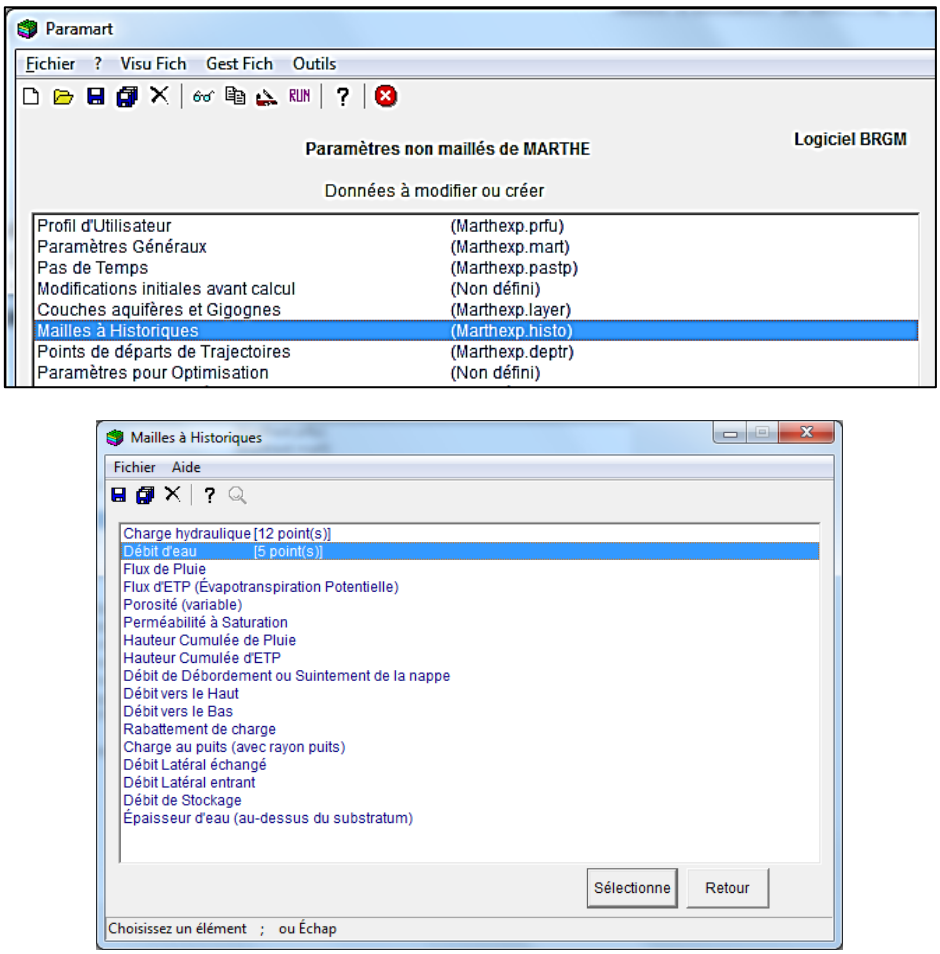


Figure 108 - Sélection du fichier des historiques, puis du type d'historique.

Dans cette version le nombre total d'historiques qui peuvent être sauvegardés est limité à 4000.

Les historiques calculés sont sauvegardés dans le fichier texte de nom « historiq.prn » (et éventuellement dans le fichier « historiq.out », par compatibilité avec des versions antérieures de MARTHE, ou bien pour des usages particuliers). Les données du fichier « historiq.prn » peuvent être directement importés sous Excel ®, ou son équivalent. Les valeurs de ce fichier sont séparées par des « tabulations », jamais par des « virgules ». Par ailleurs, comme pour tous les fichiers en entrée ou en sortie de MARTHE, les nombres décimaux sont représentés avec des « points décimaux », jamais avec des virgules.

Si on utilise Excel, il faudra donc définir une fois pour toute que le « séparateur décimal » est le « point décimal ». Ce choix est vivement conseillé, plutôt que de remplacer, pour chaque fichier, les « **.** » par des « **,** » avec un éditeur de texte.

Le nom du fichier des historiques est toujours « historiq.prn ». Il faut donc renommer ce fichier, si on veut le conserver, avant de réaliser une autre simulation dans le même dossier.

Les champs dont on peut demander la sauvegarde des historiques dans des mailles particulières sont les suivants :

12.1. Historiques d'hydrodynamique classique

- Charge hydraulique (dans les aquifères)
- Charge hydraulique au puits (compte tenu du rayon du puits)
- Épaisseur de l'eau (au-dessus du substratum)
- Pourcentage de saturation dans l'aquifère
- Rabattement de charge hydraulique (charge - charge en début de calcul)
- Pression de l'eau
- Teneur en eau
- Débit d'eau (dans les aquifères)
- Débit de Débordement ou Suintement de la nappe
- Débit vers le Haut
- Débit vers le Bas
- Débit Latéral échangé
- Débit Latéral entrant
- Débit de stockage
- Perméabilité à l'eau (lors des calculs en Zone Non-Saturée)

12.2. Historiques relatifs au bilan hydroclimatique

Ces historiques sont sauvegardés dans le fichier de nom « histoclim.prn ». Ils sont sauvegardés uniquement si on a choisi l'option « Sauvegarde des historiques du bilan hydroclimatique »

- Stock de Neige
- Déficit en eau du Sol
- Déficit dans le réservoir sol 'progressif'
- Niveau dans le réservoir hydrologique intermédiaire H
- Flux de Pluie
- Flux d'ETP (Évapotranspiration Potentielle)
- Température de l'air
- Flux d'Évapotranspiration Réelle totale
- Flux de Ruissellement
- Flux d'Infiltration
- Flux de Fonte de Neige
- Flux de Transpiration
- Flux potentiel d'Évaporation nappe
- Hauteur cumulée de Pluie
- Hauteur cumulée d'ETP
- Hauteur cumulée d'ETR totale
- Hauteur cumulée de Ruissellement
- Hauteur cumulée d'Infiltration
- Fonte de Neige cumulée
- Cumul de la Transpiration des cultures

- Cumul d'Évaporation potentielle à la Nappe
- Flux d'Évapotranspiration Réelle Sol
- Hauteur cumulée d'ETR Sol

12.3. Historiques relatifs au réseau hydrographique (rivières)

- Débit dans un tronçon de Rivière
- Débit d'Échange Rivière-Nappe
- Débit Extérieur calculé dans un tronçon de Rivière
- Niveau absolu de l'eau dans un tronçon de Rivière
- Profondeur de l'eau dans la Rivière (tirant d'eau)
- Concentration dans un tronçon de Rivière
- Température dans un tronçon de Rivière
- Salinité dans un tronçon de Rivière
- Débit Massique sortant d'un tronçon de Rivière
- Débit Massique : Nappe => Rivière
- Débit de Chaleur sortant d'un tronçon de Rivière
- Débit de Chaleur : Nappe => Rivière
- Débit de Salinité sortant du tronçon de Rivière
- Débit de Salinité : Nappe => Rivière

12.4. Historiques relatifs au réseau de drains et de drains-conduits

- Charge d'eau dans un tronçon de Drain-Conduit
- Débit dans un tronçon de Drain
- Débit d'Échange Drain-Nappe
- Débit Extérieur dans un tronçon de Drain-Conduit (injecté ou pompé)
- Débit de Débordement ou de Suintement du Drain
- Concentration dans un tronçon de Drain ou de Conduit
- Température dans un tronçon de Drain ou de Conduit
- Salinité dans un tronçon de Drain ou de Conduit
- Teneur en eau dans un tronçon de Drain-Conduit
  Si on utilise un schéma en Zone Non Saturée
- Pression dans un tronçon de Drain-Conduit
  Si on utilise un schéma en Zone Non Saturée
- Débordement de Nappe => Drain-Conduit
- Cumul du Débit dans un tronçon de Drain
- Cumul du Débordement ou Suintement dans un tronçon de Drain
- Cumul du débit d'Échange Drain-Nappe
- Cumul du débit Extérieur dans un tronçon de Drain
- Cumul du débit Débordement de Nappe => Drain
- Profondeur de l'eau dans un tronçon de Drain
- Pourcentage de saturation dans un tronçon de Drain
- Débit au milieu d'un tronçon de Drain (valeur absolue du débit)
- Débit à l'amont d'un tronçon de Drain
- Débit Massique sortant d'un tronçon de Drain

12.5. Historiques relatifs aux Lacs

- Niveau absolu de l'eau dans le Lac
- Profondeur (locale) du Lac
- Superficie du Lac (en unité de longueur de maille au carré)
- Volume du Lac (en unité de volume d'eau)

- Débit à l'exutoire du Lac
- Débit d'échange global Lac -> Nappe (relatif à la totalité du lac concerné)
- Débit d'échange *local* Lac -> Nappe (relatif à la maille)
- Débit extérieur du Lac (injecté ou pompé) calculé
- Évaporation (réelle) du Lac (en unité de débit)
- Pluie sur le Lac (en unité de débit)
- Ruissellement total aboutissant au Lac (en unité de débit)

Tous ces historiques, excepté la profondeur locale et le débit d'échange local, ont une valeur globale unique pour chaque lac. Pour obtenir un historique global relatif à un lac, il suffit de sélectionner une maille quelconque de ce lac.

12.6. Historiques des termes du bilan des débits de la nappe

Ces historiques sont les évolutions au cours du temps des termes du bilan des débits sur le domaine. Ils apparaissent dans le fichier de nom « histobil_debit.prn ».

Tous les débits sont exprimés en unité utilisateur de débit, y compris les termes de recharge, d'évaporation, d'irrigation, et de transpiration.

Dans les libellés des termes du bilan on a les composantes suivantes :
« Entr » = Entrant (positif)
« Sort » = Sortant (négatif)
« Glob » = Global (positif + négatif)

Les termes du bilan sont les suivants, avec les libellés qui apparaissent dans les fichiers :

- Débits entrant par les limites extérieures du domaine modélisé : « Entr_Limit »
- Débits sortant par les limites extérieures du domaine modélisé : « Sort Limit »
- Débits d'injection fixés : « Entr_Intern_fix »
- Débits de pompage fixés : « Sort_Intern_fix »
- Diminution de débit pompé résultant d'un dénoyage : « Dénoy_Pompage »
- Débit de débordement ou de suintement : « Débordement »
- Débit d'excès d'irrigation : « Exces_Irrigat »

- Débit de Recharge à la nappe, (toujours > 0) : « Recharge_Nappe »
- Débit d'Évapotranspiration restante, appliqué à la nappe : « Évaporat_Nappe »
- Débit de Transpiration par les racines des cultures : « Transpir_Racin »
  (*Peut être réduit en cas de « désaturation »*).
- Débit de Réduction de l'Évaporation et/ou de la Transpiration : « Désaturation »
  (*Réduction si la saturation est trop faible*)

- Débit d'échange : Rivière->Nappe : « Rivière->Nappe »
- Débit d'échange : Nappe->Rivière : « Nappe->Rivière »

- Débit d'échange : Drains->Nappe : « Drains->Nappe »
- Débit d'échange : Nappe->Drains : « Nappe->Drains »

- Débit d'échange : Lacs->Nappe : « Lacs->Nappe »
- Débit d'échange : Nappe->Lacs : « Nappe->Lacs »
-
- Débit de stockage positif : « Stockage_Posit »
- Débit de stockage négatif : « Stockage_Négat »

Contrôle des débits résiduels et de la convergence :

- Débit résiduel maximal (de toutes les mailles) : « Déb_Résid_Maxi »
  Si les calculs ont convergé : ce terme doit être petit.
- Somme des valeurs absolues de tous les débits résiduels : « Abs_Déb_Résid »
  Si les calculs ont convergé : ce terme doit être petit.
- Pourcentage de non-convergence : « %_Non_Converg »
  = Ratio en % de « Abs_déb_Résid » divisé par le plus grand terme du bilan.
  C'est le critère le plus sévère.

Contrôle du bilan global :

- Débit d'écart de bilan global = Bouclage entrées/sorties : « d_BilQ_Global »
  Ce bilan est établi avec les débits de pompage ou d'injection calculés.
- Débit d'écart de bilan global en utilisant les débits fixés : « d_BilQ<=>QFixé »
  Ce bilan est établi avec les débits de pompage ou d'injection fixés.
- Écart de bilan global en volume pendant le pas de temps : « d_BilanVol_Pas »
  L'écart est calculé à partir des débits fixés.
- Pourcentage d'Écart de bilan global, en volume, dans le pas de temps :
  « %_Non_CV_Gl_Pas »

Statistiques :

- Nombre de mailles désaturées : « Nombre_Désatur »
- Nombre de mailles avec suintement ou débordement : « Nombre_Suintem »
- Nombre d'itérations externes utilisées pour ce pas de temps : « Nombre_Itérat »

- Explications :

- Débit de Recharge à la nappe : « Recharge_Nappe »
  Il est toujours supérieur à 0.
  Il survient uniquement quand la pluie est excédentaire par rapport à l'ETR_Sol
  S'il n'y a pas de « réservoir sol », alors : Recharge = Max(Pluie - ETR_Sol , 0).
- Débit d'Évapotranspiration restante, appliqué à la nappe : « Évaporat_Nappe »
  Il est toujours inférieur à 0
  (C'est une évaporation complémentaire en plus de l'ETR_Sol du bilan hydroclimatique).
  => On a : soit « Recharge_Nappe » ; soit « Évaporat_Nappe ».

Pour information :
ETR totale : Elle est disponible dans le fichier « histoclim.prn » :
= abs(Etr_Sol) + abs(Évaporation) + abs(Transpiration) - Désaturation.
= Pluie - Infiltration - abs(Etr_Sol) + abs(Évaporation) + abs(Transpiration)
- Désaturation.

- Débit résiduel = C'est, dans chaque maille, l'écart entre le débit fixé (qui peut être 0), et le débit calculé.
- Débit de transit vertical à travers une maille dénoyée : Débit_de_Transit
  (*Uniquement avec le schéma de calcul « nappe libre »*).

- Nombre de mailles désaturées : « Nombre_Désatur »
  Selon le cas :
  - Calcul en Pseudo-ZNS : Ce sont les mailles ayant une épaisseur en eau inférieure à

l'épaisseur de la nappe multipliée par la « saturation en eau minimale pour le dénoyage ».
- Calcul en ZNS : Ce sont les mailles avec uns succion supérieure à la succion maximale.
- Calcul en « Nappe Libre » (*obsolète*) : Ce sont les mailles avec une charge hydraulique inférieure à l'altitude du substratum.

Dans les « bilans par zone », on a en outre les termes suivants :

- Entrant par les limites de zone (échange avec zone voisine) : « Entr_Limit_Zon »
- Sortant par les limites de zone (échange avec zone voisine) : « Sort_Limit_Zon »

Et pour information, hors bilan global :
- Débit par les limites de la Zone par le Haut : « Lim_Z_Hau »
  (*Déjà compté dans Limit_Zon*).
- Débit par les limites de la Zone par le Bas : « Lim_Z_Bas »
  (*Déjà compté dans Limit_Zon*).

- Somme des termes Entrants + termes Sortants - Stockage : « Somme=Bil_Glob. »
  C'est le bilan global Il est calculé avec les débits fixés.
  Pour obtenir ce bilan : il faut ignorer les termes « Résiduel », ainsi que les termes « Lim_Z_Hau » et « Lim_Z_bas ».

En régime transitoire, si on a choisi l'option « Sauvegarde des historiques de variations par rapport au début de la simulation », on obtiendra également le fichier « histobil_dif_debit.prn » qui contient la *variation* des termes du bilan par rapport au début de la simulation.

Ces termes du bilan apparaissent également, en unité utilisateur de volume :
- En volume cumulé dans le pas de temps :
  Fichier « histobil_nap_pastp.prn ».
- En volume cumulé depuis le début de la simulation :
  Fichier « histobil_nap_cumu.prn ».

12.7. Historiques des termes du bilan des débits des Rivières

Ces historiques sont les évolutions au cours du temps des termes du bilan des débits des rivières. Ils apparaissent dans le fichier de nom « histobil_debit.prn ».

Tous les débits sont exprimés en unité utilisateur de débit, y compris les termes de ruissellement.

Les termes du bilan sont les suivants, avec les libellés qui apparaissent dans les fichiers :

- Par Sources = Débits amonts (sources) entrant dans les rivières.
- Ruissel_Sup = Débit de ruissellement aboutissant aux tronçons de rivières.
- Entr_Intern = Débit entrant (injecté) calculé.
- Sort_Intern = Débit sortant (pompé) calculé.
- Entr_Intern_fix = Débit entrant (injecté) imposé dans les rivières.
- Sort_Intern_fix = Débit sortant (pompé) imposé dans des rivières.
- Dérivat_Entr = Débit entrant par les dérivations de rivières.
- Dérivat_Sort = Débit sortant par les dérivations vers les rivières.
- Entr_Niv_Impos = Débit entrant par imposition du niveau dans des rivières.

- Sort_Niv_Impos = Débit sortant par imposition du niveau dans des rivières.
- Nappe->Rivi. = Débit d'échange entrant de la nappe vers les rivières.
- Rivières_Napp = Débit de rivières sortant des rivières vers la nappe.
- Exutoires = Débit sortant des rivières vers l'extérieur (exutoires).
- Stockage = Débit de stockage dans les rivières.
- DéStockage = Débit de déstockage des rivières.
- Écart_Bilan = Écart de bilan global de débit dans les rivières (doit être proche de 0).

À la suite de l'historique des termes du bilan des débits de rivières, apparaît, dans ce même fichier « histobil_debit.prn », l'historique des termes du bilan des rivières en volume cumulé depuis le début de la simulation.

Les termes de ce dernier bilan sont exprimés en unité de volume d'eau.

12.8. Historiques des termes du bilan des débits des Lacs

Ces historiques sont les évolutions au cours du temps des termes du bilan des débits des lacs. Ils apparaissent dans le fichier de nom « histobil_debit.prn ».

Tous les débits sont exprimés en unité utilisateur de débit, y compris les termes de pluie et d'évaporation.

Les termes du bilan sont les suivants, avec les libellés qui apparaissent dans les fichiers :

- Par Sources = Débits amonts (sources) entrant dans les lacs.
- Ruissel_Sup = Débit de ruissellement aboutissant aux lacs.
- Pluie_sur_Lacs = Débit résultant de la pluie sur les lacs.
- Évap_Lacs = Débit d'évaporation des lacs.
- Entr_Intern = Débit entrant (injecté) calculé.
- Sort_Intern = Débit sortant (pompé) calculé.
- Entr_Intern_fix = Débit entrant (injecté) imposé dans les lacs.
- Sort_Intern_fix = Débit sortant (pompé) imposé dans des lacs.
- Dérivat_Entr = Débit entrant par les dérivations de rivières.
- Dérivat_Sort = Débit sortant par les dérivations vers les rivières.
- Entr_Niv_Impos = Débit entrant par imposition du niveau dans des lacs.
- Sort_Niv_Impos = Débit sortant par imposition du niveau dans des lacs.
- Nappe->Lacs = Débit d'échange de la nappe vers les lacs.
- Lacs->Nappe = Débit d'échange des lacs vers la nappe.
- Rivières_Lacs = Débit de rivières entrant dans les lacs.
- Lacs_Rivières = Débit sortant des lacs vers les rivières (*futur*).
- Exutoires = Débit sortant des lacs vers l'extérieur (exutoires) (*futur*).
- Stockage = Débit de stockage dans les lacs.
- DéStockage = Débit de déstockage des lacs.
- Écart_Bilan = Écart de bilan global de débit dans les lacs (doit être proche de 0).
- Volume_Lacs = Volume total (en unité de volumes d'eau)
- Superficie _Lacs = Superficie totale des lacs (en carré de l'unité de maillage)
- Niveau_Lacs = Somme des niveaux des lacs (*pour info*).

Dans ce même fichier « histobil_debit.prn » : À la suite de l'historique des termes du bilan des débits des lacs, apparaît l'historique des termes du bilan des lacs en volume cumulé depuis le début de la simulation.

Les termes de ce bilan de cumuls sont exprimés en « unité de volume d'eau » (seuls

les 3 derniers termes : « Volume_Lacs », « Surperficie_Lacs » et « Niveau_Lacs » restent inchangés).

13. Exemples de vérification

On présente ici quelques exemples de simulations effectuées avec MARTHE ® et on compare leurs résultats aux références publiées dans la littérature scientifique.

13.1. Modélisation en régime transitoire d'un pompage dans une nappe captive homogène d'extension infinie

La solution analytique de ce problème est la formule de Theis (1935).

Les caractéristiques de la simulation sont les suivantes :

Paramètres hydrodynamiques :

- Épaisseur de l'aquifère : 1 mètre
- Perméabilité de l'aquifère : $K = 2.3\ 10^{-3}$ m/s
- Coefficient d'emmagasinement captif : $S_c = 7.5\ 10^{-4}$ ($S_s = 7.5\ 10^{-4}\ m^{-1}$)
- Débit de pompage : $Q = 4\ 10^{-3}\ m^3/s$

Conditions aux limites et état initial :

- Domaine infini
- Charge hydraulique initialement égale à 0

Maillage :

On adopte un maillage radial formé de 201 rayons. Le rayon extérieur de la première maille a une dimension de 1 mètre, et les rayons extérieurs des mailles suivantes croissent géométriquement selon un facteur de 1.059254. Le dernier rayon extérieur a une dimension de 100 000 mètres (100 km).

On considère un point d'observation situé dans la maille n°71, à une distance de 55 mètres du pompage.

Discrétisation du temps :

Le calcul est réalisé pendant 201 pas de temps. La date de fin du premier pas de temps est égale à 10 secondes et les dates suivantes croissent géométriquement selon un facteur de 1.08393. La $201^{ème}$ date est égale à 10^8 secondes (3.17 ans).

Résultats :

On compare :

- L'évolution du rabattement au point d'observation au cours du temps, de 10 secondes à 10^8 secondes.
- Le profil de rabattement après 10^8 secondes, de 1 mètre à 10^5 mètres.

Les calculs se terminent en une fraction de seconde. La Figure 109 et la Figure 110 montrent que les résultats obtenus sont très précis sur une amplitude de plus de 5 puissances de 10 pour le rabattement, 6 puissances de 10 pour les distances, et 8 puissances de 10 pour le temps

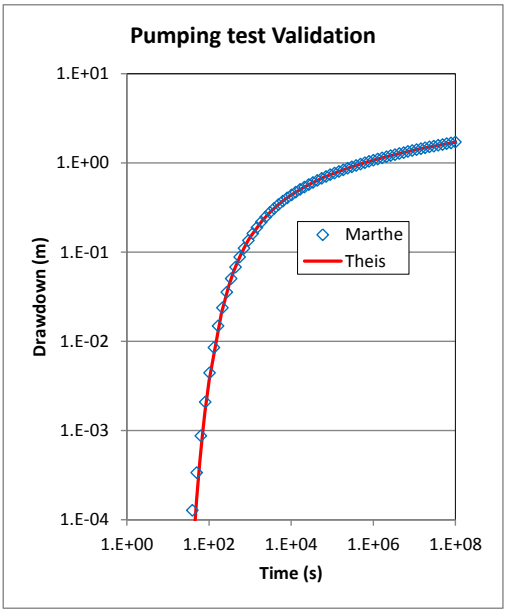


Figure 109 – Évolution du rabattement à 55 mètres : comparaison avec la solution de Theis.

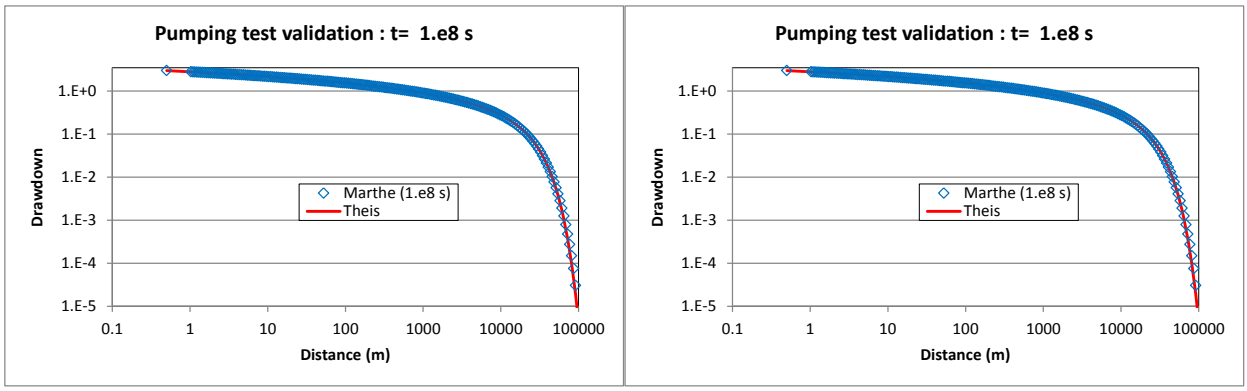


Figure 110 – Profil du après 10^8 secondes : comparaison avec la solution de Theis.

13.2. Effet de la pénétration partielle d'un pompage en nappe libre.

Cette application simule un pompage dans une nappe libre anisotrope, avec un forage crépiné uniquement sur une partie du forage.

La solution analytique de ce problème est la solution approchée de Neuman (1974).

Les caractéristiques de la simulation sont suivantes. Elles sont données dans le système anglais à base de pieds (1 ft = 1 pied = 0.3048 m).

Paramètres hydrodynamiques :

- Épaisseur de l'aquifère : b = 100 ft
- Perméabilité de l'aquifère :
  K_{Horiz} = 100 ft/day (100 x 3.5278 10^{-6} m/s)
  K_{Vertic} = 10 ft/day (10 x 3.5278 10^{-6} m/s)
  D'où une anisotropie verticale : K_{Vertic} / K_{Horiz} = 0.1
- Coefficient d'emmagasinement captif spécifique : S_s = 5 10^{-6} ft^{-1} (5 10^{-6} x 3.2808 m^{-1})
- Coefficient d'emmagasinement libre : 20 %
- Débit de pompage : Q = 1.2567 10^5 ft^3/Jour (3558.58 m^3/jour)
  Zone de pompage (crépines) : au centre du maillage, de la profondeur 75 ft au fond (à 100 ft
- Point d'observation : distant de 16 ft, à la profondeur 50 ft.

Conditions aux limites et état initial :

- Domaine infini
- Charge hydraulique initialement égale à 0
- Charge hydraulique imposée sur la limite latérale (située à l'infini).

Maillage :

On adopte un maillage radial en coupe verticale formé de 47 rayons et de 52 couches. Le premier rayon a une dimension de 1.17 ft. Les 46 rayons suivants croissent géométriquement selon un un facteur 1.5, avec cependant un raffinement du maillage au niveau du point d'observation, situé à 16 ft. Le centre de la dernière colonne (c'est-à-dire du dernier rayon) est situé à 8.62 10^6 ft (2630 km) du pompage. Les 52 couches (52 lignes) ont toutes une épaisseur de 2 m avec un raffinement près de la surface, près du fond et au niveau du point d'observation.

On considère un point d'observation situé dans la maille colonne n°10, couche n°26, c'est-à-dire à une distance de 16 ft du pompage, et à une profondeur de 50 ft, c'est-à-dire à dire à mi-hauteur de l'aquifère.

Discrétisation du temps :

Le calcul est réalisé pendant 39 pas de temps. La date de fin du premier pas de temps est égale à 1 seconde et les dates suivantes croissent avec un facteur d'environ 1.5. Les derniers pas de temps ont une durée de 5000 secondes. Le dernier pas de temps, le $39^{ème}$, se termine à 120 000 secondes (1.389 jour) après le début du pompage.

Résultats :

On calcule l'évolution du rabattement au point d'observation au cours du temps, de 1 seconde à 10^5 secondes.

Les calculs se terminent en quelques secondes. Les résultats sont comparés à la solution analytique approchée de Neuman (1974). La solution analytique y est exprimée en temps adimensionnels t_d et en rabattement adimensionnels s_d.

On en déduit les rabattements en fonction du temps :

$$s = s_d \cdot \frac{Q}{4\pi T}$$

$$t = t_d \cdot \frac{r^2 \cdot S_s \cdot b}{T}$$

Avec : $T = K_x \cdot b$

Avec les unités utilisées (ft, ft^{-1}, ft/day, ft^3/day) on obtient, pour le rabattement « s » en ft et « t » en secondes :

$$s = s_d \cdot 1$$

$$t = t_d \cdot 1.10592$$

La Figure 111 montre l'évolution du rabattement au cours du temps. Cette figure montre que les résultats obtenus sont très précis, sur une amplitude de 5 puissances de 10 pour le temps

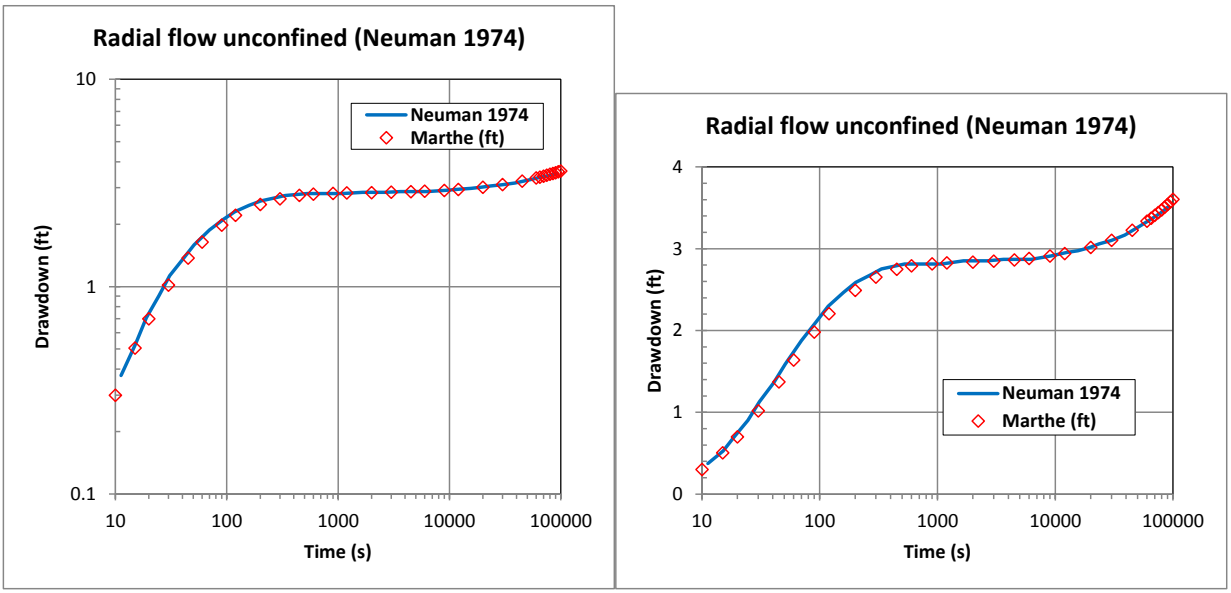


Figure 111 – Évolution du rabattement au point d'observation : comparaison avec la solution de Neuman.

13.3. Calcul d'une nappe libre soumise à une infiltration constante (Boussinesq).

Cette application simule en 3D une nappe libre soumise à une infiltration constante et uniforme. Les calculs sont réalisés en coupe verticale en régime permanent. Il y a de très nombreuses mailles dénoyées au-dessus de la surface libre. Le but de l'exemple est de montrer que la prise en compte de l'infiltration à travers ces mailles dénoyées ne pose pas de problème.

Un deuxième calcul, en admettant l'approximation de Dupuit, de vitesses horizontales, est comparé avec la solution analytique de la surface libre.

Géométrie du système :

Tranche d'aquifère de 1 mètre d'épaisseur

Longueur : = 1000 mètres.

Épaisseur de l'aquifère : 440 mètres (Substratum = 0 m ; Topographie = 440 m).

Premier calcul en conditions réelles

Paramètres hydrodynamiques :

Perméabilité : $K = 10^{-7}$ m/s

Infiltration : $P = 0.5$ mm/j $= 5.787\ 10^{-6}$ m/s

Calcul en régime permanent.

Maillage :

On adopte un maillage formé de 106 colonnes de 10 mètres de large et de 44 couches de 10 mètres d'épaisseur.

Conditions aux limites et état initial :

- Charge hydraulique imposée à 10 mètres dans le coin inférieur gauche (colonne n°1, ligne n°44). En pratique on impose la charge hydraulique sur les colonnes n°1 à n°7 (jusqu'à l'abscisse 70 m) de la ligne n°44, pour ne pas avoir de surface de suintement (Figure 112).

- Charge hydraulique initiale égale à 50 m, uniformément affectée à toutes les mailles (sauf aux 7 mailles à charge hydraulique imposé) pour initialiser les calculs

Paramètres numériques :

Coefficient de sous-relaxation = 0.7

Comme le flux d'infiltration est beaucoup plus élevé que la perméabilité (verticale), pour une meilleure efficacité on a choisi l'option de calcul : « Perméabilité verticale nominale », c'est-à-dire indépendante de la saturation.

Résultats :

Les calculs se terminent en quelques secondes et convergent parfaitement.

La Figure 112 montre la zone qui est saturée (en couleur orange). Toutes les mailles en bleu foncé sont dénoyées. La surface libre est la limite de saturation, donc l'interface entre la couleur orange et la couleur bleue.

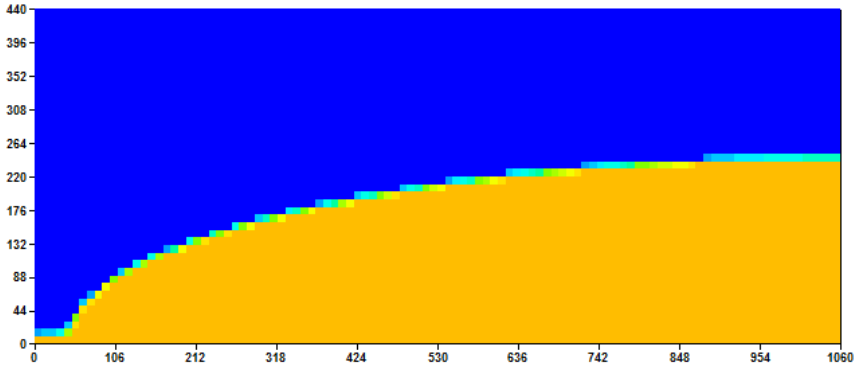


Figure 112 – Nappe libre 3D avec infiltration : vue en coupe verticale.
La zone en orange est totalement saturée.
Les mailles en bleu foncé sont dénoyées.

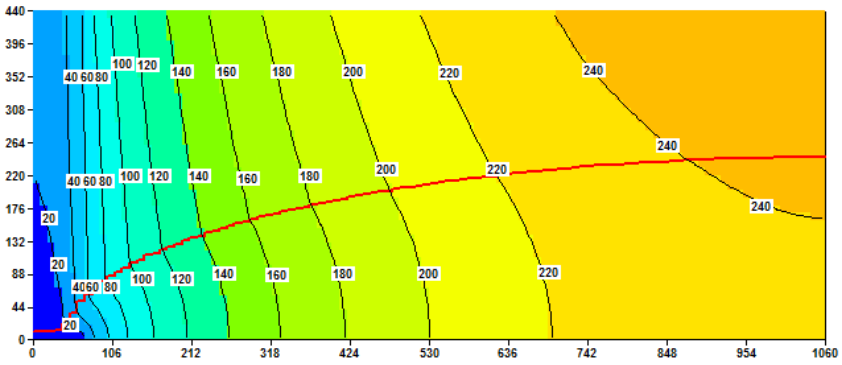


Figure 113 – Nappe libre 3D avec infiltration : vue en coupe verticale.
Isovaleurs de charge hydraulique. En rouge : la surface libre.

La Figure 113 montre le champ de charge calculée. La charge hydraulique des mailles dans la zone située au-dessus de la « surface libre » dessinée en rouge, a une valeur inférieure à leur altitude, conformément au schéma de calcul en « Pseudo-ZNS ».

Deuxième calcul avec l'approximation de Dupuit (vitesses horizontales)

Paramètres hydrodynamiques :

Identiques au premier calcul, cependant pour avoir des vitesses horizontales, donc une charge hydraulique uniforme sur chaque verticale : on introduit un coefficient d'anisotropie verticale de perméabilité : Kv / Kh = 10^4.

La perméabilité verticale est donc : Kv = 10^{-3} m/s

Maillage :

On utilise le même maillage, mais pour augmenter la précision, on raffine le maillage à proximité de la limite de gauche (colonnes de 0.5 m, 1 m, 2 m, etc.). Le découpage vertical est inchangé. Le maillage a une extension latérale de 1000 m.

Conditions aux limites et état initial :

- Charge hydraulique imposée à 10 mètres dans une seule maille : la maille en bas à gauche (maille : colonne n°1, Couche n°44).
- Charge initiale uniformément égale à 50 m, pour initialiser les calculs

Paramètres numériques :

Coefficient de sous-relaxation = 0.7

Comme la perméabilité verticale est beaucoup plus élevée que le flux d'infiltration, il n'est pas nécessaire de choisir l'option de calcul : « Perméabilité verticale nominale » (indépendante de la saturation). Cependant, si on choisit cette option, les résultats sont quasi-identiques.

Résultats :

Les calculs se terminent en quelques secondes et convergent parfaitement.

La solution analytique correspondant à cet écoulement est très facile à établir. Il suffit de noter qu'à l'abscisse ***x***, le débit ***q***, par unité de largeur de tranche, qui s'écoule vers la gauche résulte du cumul de la recharge ***P*** sur la zone (L – x) située à droite de ***x***. Le débit ***q*** est donc égal à :

$$q = -P \cdot (L - x)$$

D'après la loi de Darcy :

$$q = -K \cdot \frac{dH}{dx}$$

D'où :

$$K \cdot \frac{dH}{dx} = P \cdot (L - x)$$

On en déduit la solution analytique de la charge hydraulique H en fonction de l'abscisse :

$$H = \sqrt{H_0^2 + \frac{P}{K} x \cdot (2L - x)}$$

Avec H_0 = Charge hydraulique imposée à l'extrémité gauche.

On applique la formule avec : L=1000 m, H_0=10 m, K=10^{-7} m/s, P=5.787 10^{-6} m/s

La Figure 114 montre que la simulation est très précise.

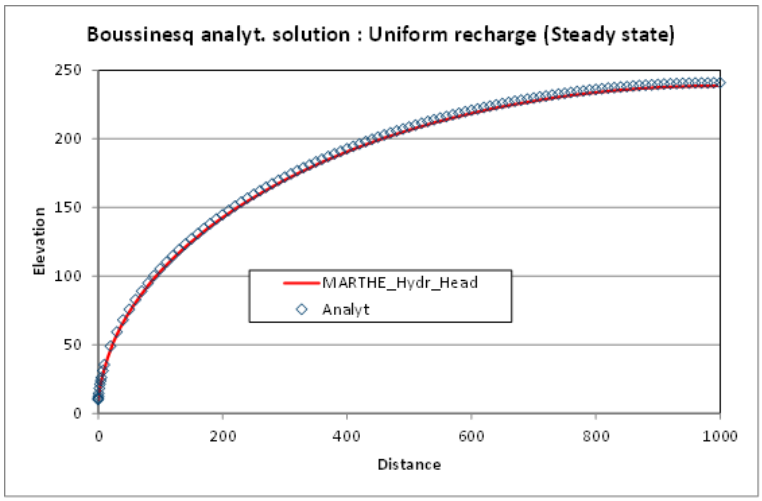


Figure 114 – Nappe libre avec infiltration : vue en coupe verticale Comparaison avec la solution analytique (symboles).

13.4. Calcul en régime transitoire d'une nappe libre soumise à des dénoyages et re-saturations (Painter et al. 2008).

Cet exemple est un test réputé difficile relatif à un aquifère soumis à des dénoyages et des remises en eau par la recharge. Il est décrit par Painter et al. (2008).

Il s'agit d'un aquifère monocouche formant une bande de 1950 mètres de gauche à droite avec un substratum de forme complexe qui remonte fortement. Le but de la modélisation de cet exemple est de montrer la capacité à modéliser un système de géométrie complexe avec des dénoyages et des remises en eau.

On calcule d'abord un régime permanent à partir d'une situation éloignée de la solution. On simule ensuite un abaissement marqué du niveau de la nappe en un point, provoquant des dénoyages, puis on laisse remonter la nappe sous l'influence de la recharge.

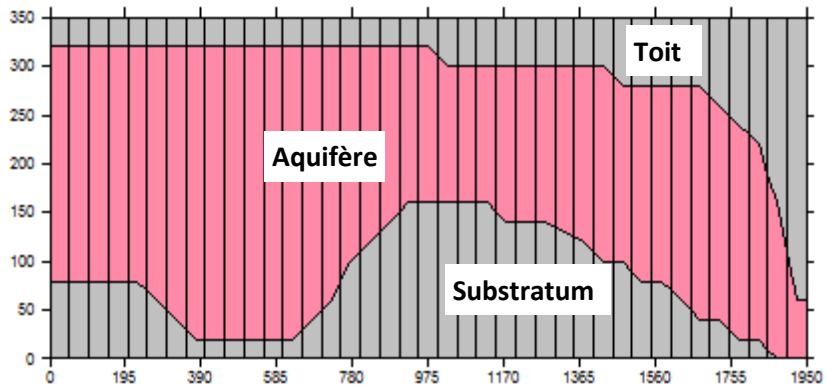


Figure 115 – Géométrie du test de Painter et al. : vue en coupe verticale.

Géométrie du système :

La Figure 115 présente la géométrie de l'aquifère vue en coupe verticale. C'est une bande d'aquifère, dont les caractéristiques de géométrie sont les suivantes :

- Épaisseur latérale = 1 mètre
- Longueur (axe Ox) = 1950 mètres.
- Hauteur verticale = 440 mètres (Substratum = 0 m ; Topographie = 440 m).

Maillage :

On adopte un maillage formé de 39 colonnes de 50 mètres de large et une seule couche.

Paramètres hydrodynamiques :

- Perméabilité : $K = 2\ 10^{-5}$ m/s
- Coefficient d'emmagasinement libre : $S_L = 10$ % (pour le régime transitoire).
- Coefficient d'emmagasinement captif spécifique : $S_S = 10^{-5}\ m^{-1}$ (pour le régime transitoire).

Conditions aux limites et état initial :

- Charge hydraulique imposée à 60 mètres sur la limite de droite (maille de colonne n°39).

- Charge initiale uniforme égale à 160 m pour initialiser les calculs

Premier calcul en régime permanent

Infiltration : P = 310 mm/an = 9.823 10^{-9} m/s

Paramètres numériques :

Coefficient de sous-relaxation = 0.3

Résultats :

Les calculs se terminent en une fraction de seconde et convergent parfaitement.

Un deuxième calcul en régime permanent, en partant d'une charge hydraulique égale à 60 m dans tout le domaine, donc avec la majorité des mailles initialement dénoyées converge également parfaitement vers la même solution (Figure 116).

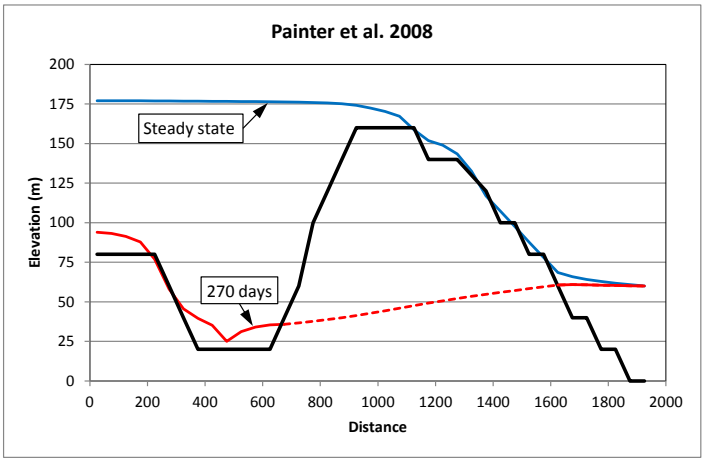


Figure 116 – Test de Painter et al. : profils de charge en régime permanent (courbe bleue) et 270 jours après l'abaissement du niveau à l'abscisse 500 mètres (courbe rouge).

Deuxième calcul : simulation en régime transitoire

Première phase : abaissement progressif de la charge hydraulique dans la maille située à l'abscisse 500 m (maille n°10).

Au cours de cette phase :

- La recharge est égale à 0.
- La charge hydraulique dans la maille située à l'abscisse 500 m est abaissée progressivement :
  - à la valeur 75 m : de 0 à 15 jours
  - à la valeur 50 m : de 15 jours à 30 jours
  - à la valeur 25 m (proche du substratum) : de 30 jours à 270 jours.
    Les calculs sont réalisés avec un pas de temps de 30 jours.

Les calculs convergent sans difficulté. La Figure 116 montre le profil de charge obtenu après 270 jours. La nappe est dénoyée sur une grande partie du domaine.

Deuxième phase : remontée de la nappe en libérant la charge hydraulique imposée à l'abscisse 500 m et en introduisant de la recharge.

Au cours de cette phase :

- La recharge est égale à 1300 mm/an.
- La charge hydraulique dans la maille située à l'abscisse 500 m est libérée.

Le calcul est réalisé de la date 270 jours à la date 3600 jours (10 ans), avec des pas de temps égaux de 30 jours.

Au moment de la libération de la charge hydraulique et de l'introduction de la recharge il y a un choc avec une remontée très rapide dans la zone dénoyée contrôlée par le coefficient d'emmagasinement captif. On a donc découpé le premier pas de temps de 30 jours en 4 pas de temps (respectivement de 5, 5, 10 et 10 jours). Pour avoir une convergence plus régulière sur ce premier pas de temps de 5 jours subissant le choc, on a diminué fortement le coefficient de sous-relaxation (à 0.015) de ce pas de temps, et on l'a remonté à 0.5 au pas de temps suivant.

Les calculs se terminent en une fraction de seconde et la convergence est excellente : en cumulé sur la période, l'écart de bilan est de 1/1000 de pourcent (c'est-à-dire 10^{-5}). La Figure 117 présente l'évolution du profil de charge hydraulique au cours de la remontée. On remarque que quand la nappe est localement dénoyée, la charge hydraulique a une valeur inférieure à l'altitude du substratum, ce qui correspondrait à une succion dans les calculs en « zone non saturée ».

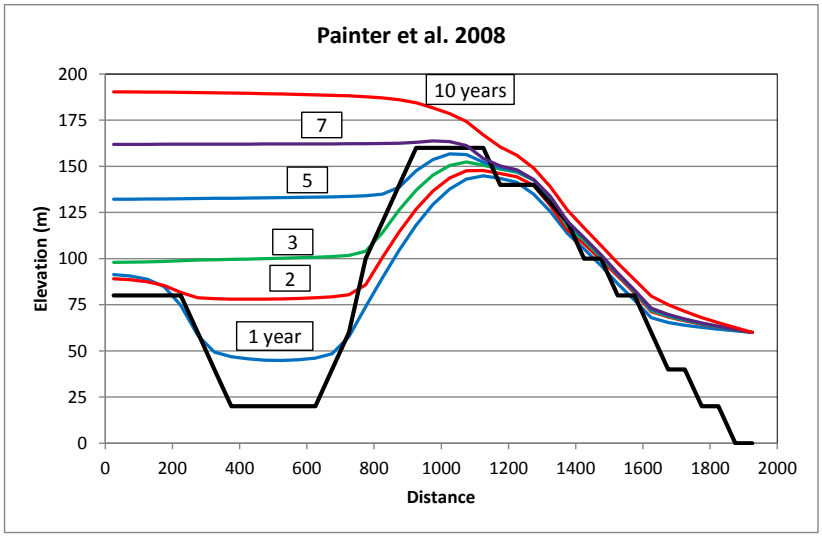


Figure 117 – Test de Painter et al. : remontée et remise en eau de la nappe pendant 20 ans.

13.5. Calcul en régime transitoire d'une nappe libre soumise à des dénoyages et re-saturations (Doherty 2001).

Cette application est la simulation en 3D d'un aquifère soumis à des dénoyages par un ensemble de drains puis à une remise en eau par la recharge. Il est décrit par Doherty (2001).

Il s'agit d'un aquifère 3D formé de 3 couches, désaturé par un ensemble de drains dans la couche inférieure, puis laissé retourner à l'équilibre par suppression des drains. De très nombreuses mailles sont dénoyées puis remises en eau.

Géométrie du système :

Le système aquifère est constitué de 3 couches de 25 mètres d'épaisseur. Chaque couche est un carré de 5000 mètres de côté découpé en 50 colonnes et 50 lignes de 100 mètres de côté.

Un ensemble de drains est implanté dans la couche la plus basse (la 3ème couche) dans les 42 mailles comprises entre les colonnes n°21 et n°26, et les lignes n°19 et n°26. La charge hydraulique est fixée à 10 mètres dans ces drains (Figure 118).

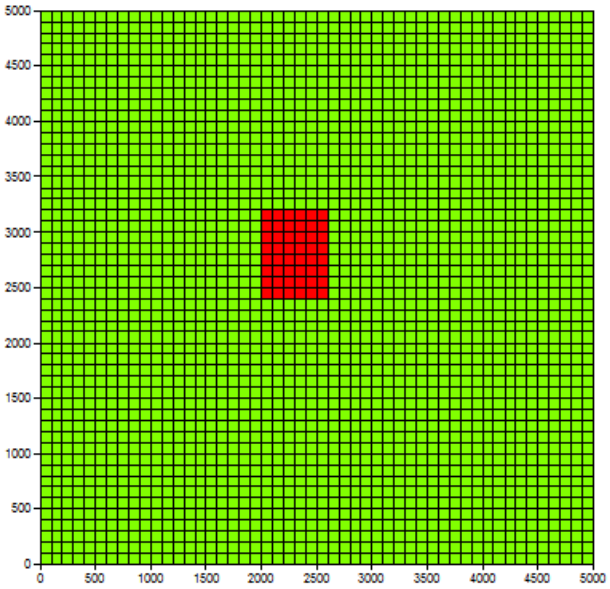


Figure 118 – Géométrie de l'aquifère décrite par Doherty (2001) avec la position des drains.

Maillage :

Le maillage est formé de 3 couches de 25 mètres d'épaisseur, chacune étant constituée de 50 colonnes de 100 mètres de large sur 50 lignes de 100 mètres de large.

Le substratum de la couche n°3 (la plus basse) est à l'altitude 0 m.

Paramètres hydrodynamiques :

Perméabilité : K = 1 m/jour

Coefficient d'emmagasinement libre : S_L = 10 %.
Coefficient d'emmagasinement captif spécifique $S_S = 10^{-5}$ m^{-1} (pour le régime transitoire).

Les drains ont les propriétés suivantes :

- Longueur = 100 m
- Altitude = 10 m
- Coefficient d'échange = 10 m/j (d'où une « conductance » de 10x100 = 1000 m^2/j)

Conditions aux limites et état initial :

- Charge hydraulique imposée à 70 mètres sur la limite de droite du maillage, dans les 3 couches.
- Charge hydraulique imposée à 5 mètres sur la limite de gauche, uniquement dans la $3^{ème}$ couche.
- Charge initiale à 70 m partout, y compris dans les couches n°1 et n°2 de la limite de gauche. (Seule la limite de gauche dans la $3^{ème}$ couche a une charge égale à 5 mètres).

Paramètres numériques :

Coefficient de sous-relaxation = 0.3

- ***Simulation en régime transitoire***

Première période de 1000 jours :

- Présence des drains
- Recharge = 0.1 mm/j
- Cette période est découpée en 14 pas de temps dont la durée augmente d'un facteur 1.2 à chaque pas de temps. Le premier pas de temps, de durée 38.523 jours, est découpé en 5 pas égaux de durée 7.704 jours chacun.

Deuxième période de durée 2000 jours (de la date 1000 jours à la date 3000 jours) :

- Suppression des drains.
- Recharge = 0.
- Cette période est découpée en 20 pas de temps dont la durée augmente d'un facteur 1.2 à chaque pas de temps. Le premier pas de temps a une durée de 10.71 jours et le dernier a une durée de 342.26 jours.

Les calculs convergent très précisément (avec une erreur de convergence interne de l'ordre de 1/1000 de % (c'est-à-dire 10^{-5}).

Les résultats (Figure 119) sont identiques à ceux de Doherty (2001), sans problème de nappe perchée ou autre difficulté.

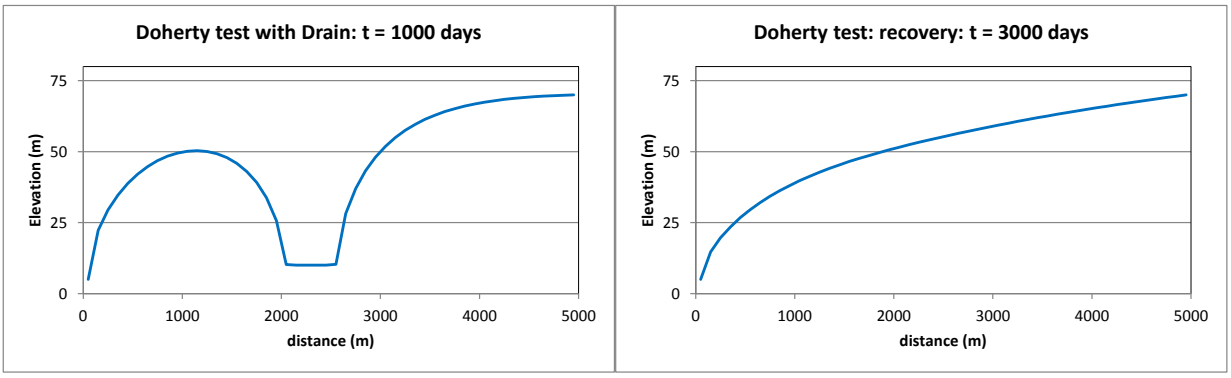


Figure 119 – Simulation de l'exemple de Doherty avec MARTHE.
Profils de charge hydraulique dans la ligne n°22 passant par les drains.
À gauche profil après 1000 jours ; à droite profil après 2000 jours de remontée.
Les charges hydrauliques des 3 couches sont quasi-identiques.

14. Exemple détaillé d'application

14.1. Description du domaine et de la modélisation à réaliser

On considère une nappe libre d'extension infinie dans laquelle on veut simuler l'influence d'un pompage pendant 120 heures.

Les caractéristiques de l'aquifère sont les suivantes :

- Perméabilité = 1 10^{-4} m/s sur la majeure partie (0.1 10^{-4} m/s dans une zone au Nord-Est)
- Coefficient d'emmagasinement en nappe libre = 5 %
- Coefficient d'emmagasinement en captive = 5 10^{-4} (sans dimension).
- Altitude de la surface topographique = 10 m
- Altitude du substratum = -50 m (soit une épaisseur de 60 mètres)
- Charge hydraulique initiale +0 m (donc à 50 m au-dessus du substratum).

Les caractéristiques du pompage sont les suivantes :

- Débit = 100 m^3/h
- Durée du pompage = 120 heures

Choix du domaine à modéliser et des conditions aux limites :

La nappe est d'extension infinie, mais on choisit de modéliser un domaine carré dans lequel on souhaite que les limites ne soient pas significativement atteintes par le rabattement.

Le rayon d'action théorique d'un pompage en milieu infini est supérieur à la valeur R_a suivante :

$$R_a \geq 1.5 \sqrt{t \cdot \frac{T}{S}}$$

Avec :
t = 120 h = 4.32 10^5 s
T = 50 m x 1 10^{-4} m/s
S = 0.05

Soit : $R_a \geq 312.8$ m

Comme il s'agit d'une valeur théorique minimale, on majore cette valeur et on choisit un rayon d'action égal à 510 mètres, d'où un carré à modéliser de 1020 mètres de côté, au milieu duquel on place le pompage.

On choisit un maillage de 51 colonnes x 51 lignes de mailles carrées de 20 mètres de côté.

Les limites du domaine ne seront en principe pas atteintes après 120 heures, donc n'importe quel type de limite peut être choisi. À titre de démonstration, on fixe des limites à charge imposée sur les côtés de gauche et du bas (ouest et sud), et des limites étanches sur les côtés de droite et du haut (est et nord).

14.2. Création du projet

On double-clique sur l'icône pour lancer WinMarthe, puis on clique 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, l'icône permet de sélectionner le dossier où sera enregistré le modèle.

L'icône permet ensuite de créer un dossier particulier. On choisit, par exemple, le dossier « Didactic » dans lequel seront rangés tous les fichiers du modèle.

On donne un nom de fichier pour le modèle à créer (extension automatique .rma) : on choisit par exemple le nom **Didact_Monocar** (dans le dossier **Didactic)**, et on voit s'ouvrir une boîte de dialogue pour la définition du maillage à créer (Figure 120) :

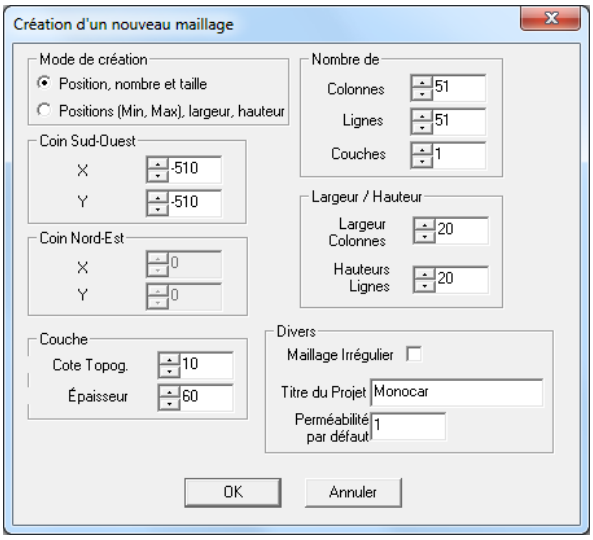


Figure 120 – Création du maillage.

On définit les coordonnées du coin inférieur gauche (-510 m, -510 m), les nombres de colonnes et de lignes (51 et 51), avec une seule couche et les dimensions des mailles (20 m, 20 m). On définit l'altitude de la topographie à +10 m, et l'épaisseur de 60 m (d'où un substratum à l'altitude -50 m)

On donne comme titre de projet : ***Monocar*** (dans le cadre « Divers », en bas à droite).

On conserve : Perméabilité par défaut = **1** (c'est-à-dire **perméabilité** uniforme = 1) car on choisira une unité de perméabilité égale à 10^{-4} (1e-4) dans le fichier des « Paramètres Généraux ».

On clique sur **OK** : le maillage régulier est généré et se dessine à l'écran : Figure 121, partie gauche. Le champ affiché est le champ de perméabilité.

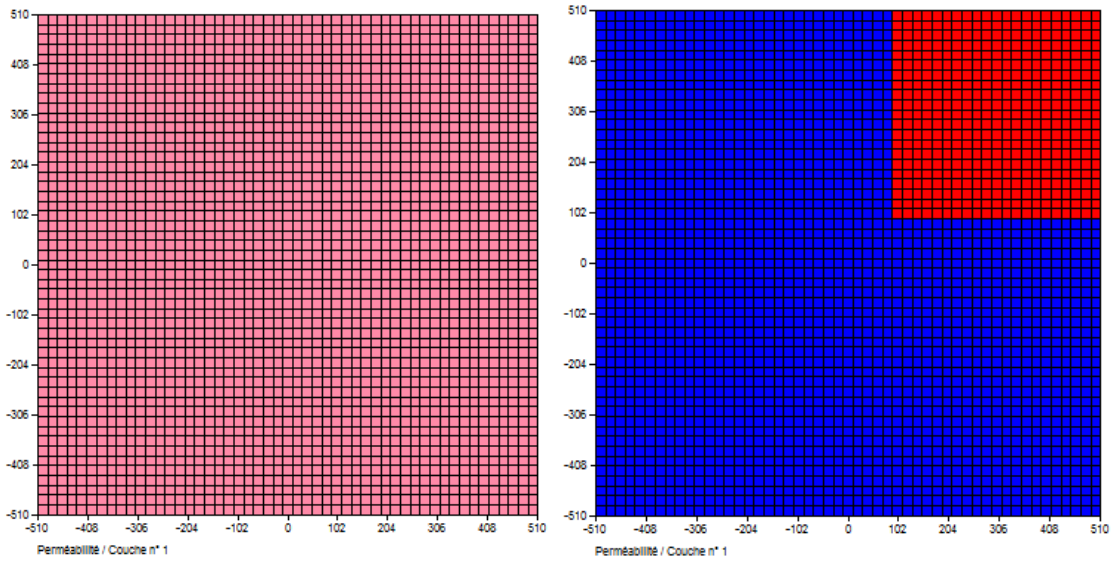


Figure 121 – À gauche : maillage. À droite sélection d'une zone dans le fichier de perméabilité.

Dans ce champ de perméabilité, on sélectionne les colonnes n°30 à n°51 des lignes n°1 à n°22.

On utilise pour cela le « rectangle extensible » ; on peut éventuellement faire cette sélection en plusieurs fois, et la corriger. Les mailles sélectionnées apparaissent en rouge : Figure 121, partie droite.

On utilise alors l'icône « Affecte une valeur aux mailles sélectionnées » pour attribuer la valeur **0.1** (10^{-4} m/s) aux mailles sélectionnées : Figure 122.

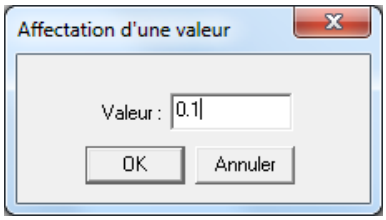


Figure 122 – Affectation d'une valeur aux mailles sélectionnées.

14.3. Définition des limites du domaine

Pour définir une limite étanche en bordure du domaine, il n'y a rien à faire car c'est l'option par défaut.

Pour fixer une limite à charge hydraulique imposée (dite limite « 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 « Charge hydraulique », à moins qu'elle soit modifiée par la suite.

Pour définir des limites à charge hydraulique imposée, on procède donc comme suit :

On sélectionne le champ du « Débit d'eau » (« Choix champ F3 » sur la barre d'outils du haut du cadre), puis on clique sur le bouton « Charger un nouveau champ » : on désigne « Débit 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 d'outils du bas du cadre). 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 ».

Pour affecter la valeur 9999 dans la dernière ligne (la ligne n°51), on utilise le bouton , on double-clique sur la dernière ligne (en bas), et on utilise l'icône pour lui affecter la valeur 9999.

Le champ du débit obtenu est visualisé sur la Figure 123.

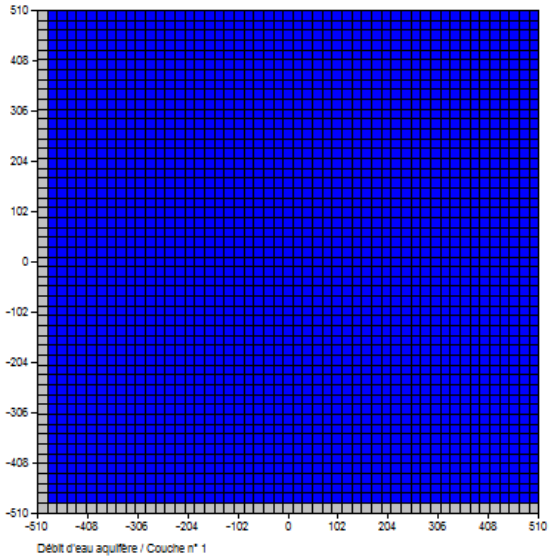


Figure 123 – Champ du débit.
Imposition des charges hydrauliques sur les limites de gauche et du bas.

14.4. Définition des champs maillés

Il faut définir la valeur :

- Du coefficient d'emmagasinement libre (égal à 5 % dans tout le domaine). On choisira dans le fichier des « Paramètres Généraux » une unité utilisateur en « % ».
- Du coefficient d'emmagasinement captif (égal à $5\ 10^{-4}$ dans tout le domaine). On choisira dans le fichier des « Paramètres Généraux » une unité utilisateur en « 10^{-4} ».
- De la charge hydraulique initiale. La valeur initiale est égale à 0 m. Comme c'est la valeur par défaut pour tous les champs, dans ce cas particulier il n'y a rien à faire.

Coefficient d'emmagasinement libre :

On sélectionne le champ du « Coefficient d'emmagasinement libre » (« Choix champ F3 » sur la barre d'outils du haut du cadre), puis on clique sur le bouton « Charger un nouveau champ » et on choisit « Coefficient d'emmagasinement libre ».

On sélectionne alors toutes les mailles du domaine. Pour cela on peut utiliser :

- L'icône : sélection de tout le domaine.
- Ou bien l'icône : sélection de toute la couche courante
- Ou bien le raccourcis « Control-A » (pour : control-All)

Toutes les mailles sont alors sélectionnées et apparaissent en rouge : Figure 124.

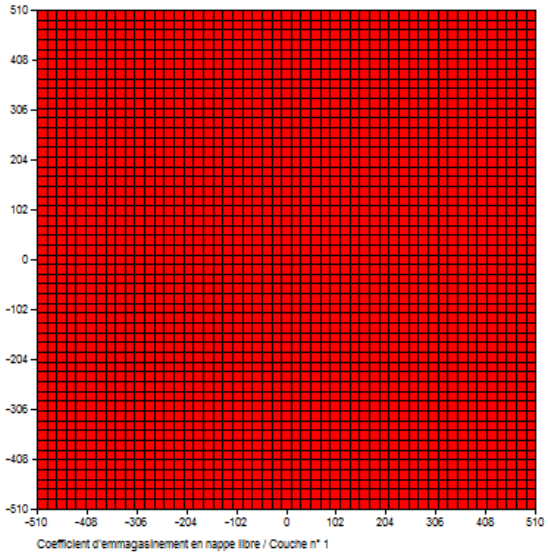


Figure 124 – Sélection de toutes les mailles du champ « Coefficient d'emmagasinement libre ».

En utilisant la méthode précédente, on affecte alors la valeur 5 (« % »).

Coefficient d'emmagasinement captif.

On procède de la même manière pour le coefficient d'emmagasinement captif : on affecte la valeur 5 (« 10^{-4} ») à toutes les mailles du domaine.

À ce stade, il est conseillé de sauvegarder les données introduites dans le modèle, en cliquant sur l'icône de la barre d'outils du haut du cadre.

14.5. Définition des paramètres non maillés

On accède aux paramètres de modélisation non maillés *via* le module de « Gestion des données non maillées » accessible par l'icône située sur la première barre d'outils inférieure. On voit alors apparaître le menu général représenté sur la Figure 125.

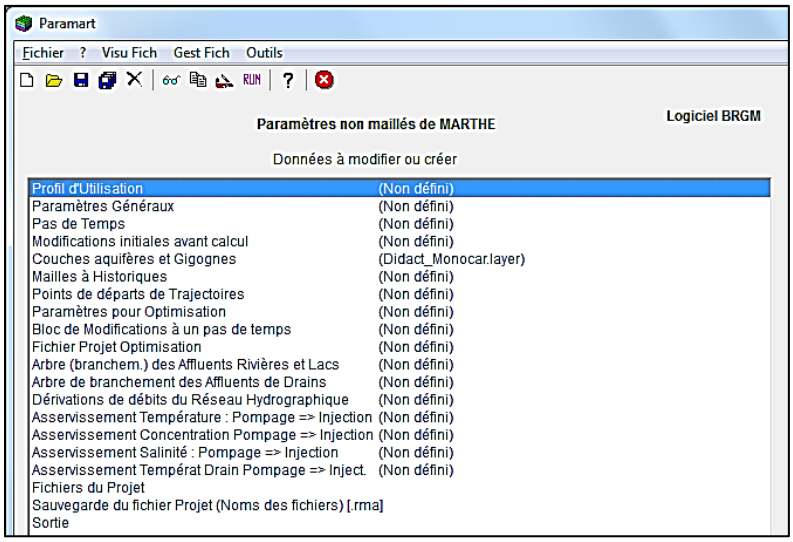


Figure 125 – Menu général de définition des paramètres non maillés.

14.5.1. Profil d'utilisation

On double-clique sur la première ligne : « Profil d'utilisation ». On choisit d'éditer ce fichier avec le préprocesseur, et on crée un nouveau fichier d'utilisation, car aucun profil n'a été défini auparavant : Figure 126.

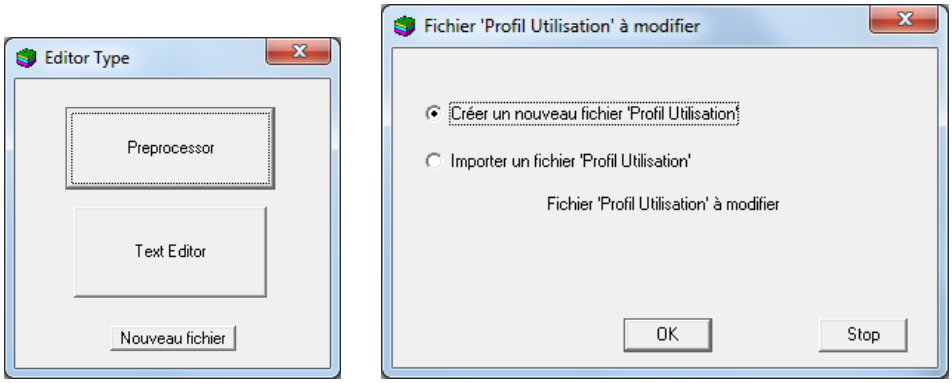


Figure 126 – Création du « Profil d'utilisation ».

Dans la fenêtre de définition qui apparaît, on sélectionne uniquement (en donnant la valeur 1) : « Régime transitoire » : Figure 127.

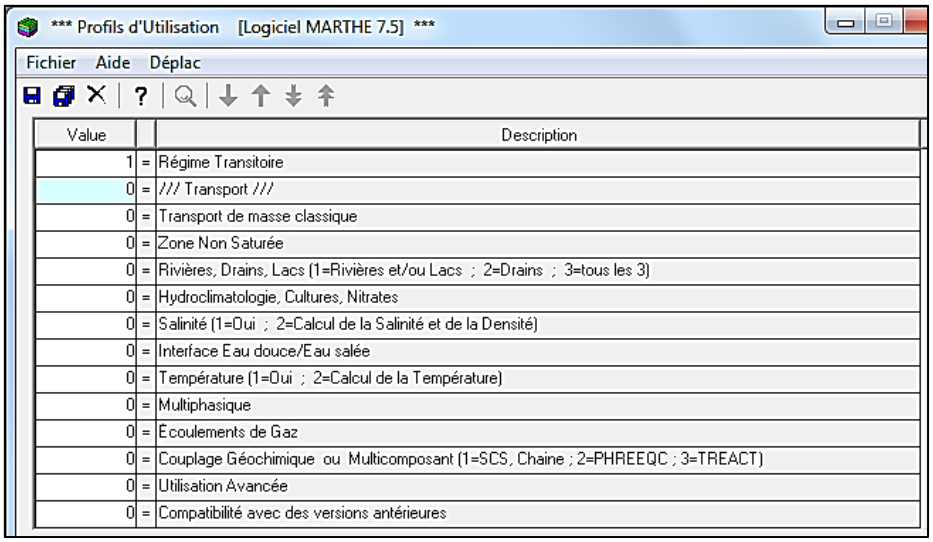


Figure 127 – Sélection des options du « Profil d'utilisation ».

14.5.2. Fichier des « Paramètres généraux »

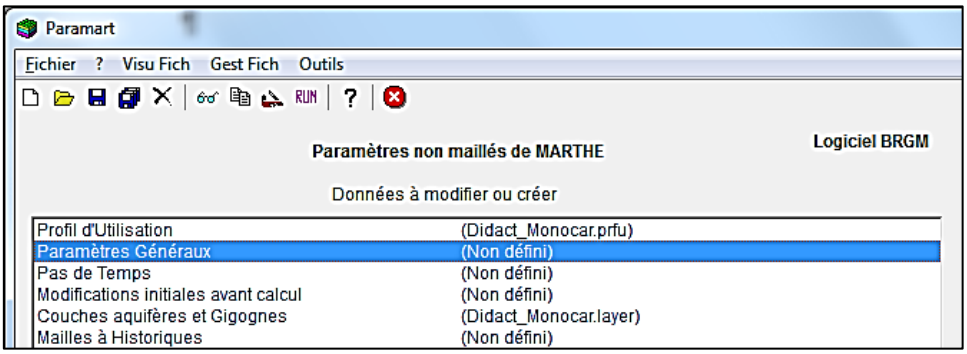


Figure 128 – Sélection du fichier des « Paramètres Généraux ».

Dans le menu général de définition des « Paramètres non maillés » de MARTHE, on sélectionne l'option « Paramètres Généraux » : Figure 128. Comme précédemment, on crée un nouveau fichier. On définit uniquement quelques options dans les paragraphes « Sauvegarde et contrôles », « Contrôle de la résolution hydrodynamique » (seulement 3 paramètres à définir), « Unités des données » et « Initialisation avant calcul. ».

La Figure 129 présente un extrait du fichier des « Paramètres Généraux » résultant de la définition des paramètres avec le préprocesseur.

Pour effectuer une « Modification de données avant calcul », dans le fichier des paramètres généraux, par exemple pour définir une valeur ponctuelle de « Rayon de puits » égale à 0.2 mètre dans la maille contenant le pompage (la maille de colonne n°26, ligne n°26), on procède comme illustré sur les Figure 130 à Figure 132.

Remarque : On aurait pu simplement, dans le préprocesseur de données maillées, créer le champ « Rayon du puits » et introduire la valeur 0.2 dans la maille appropriée, mais on a utilisé ici une autre méthode pour montrer comment introduire des « modifications ponctuelles ».

```
Monocar
 #<V7.5># --- Fin du texte libre --- ; Ne pas modifier/retirer cette ligne
 *** Sauvegardes et contrôles    [Param MARTHE 7.5]  ***
       1 = Fichier Liste détaillé (1=Oui ; 0=Non)
       1 = Écriture sur listing de toutes les données de mailles lues (et déduites)
 *** Contrôle de la Résolution Hydrodynamique        ***
      20 = Nombre maximal d'itérations pour les pas de temps suivant le pas n°0
           [Régime Transitoire]
    5e-6 = Variation moy. de charge entre 2 itérat pour convergence [Déf=0 => 1e-8]
       0 = Coeffic. de sous-relaxation des calculs [Déf=0 => Pas de sous-relaxation]
 Transit = Régime de l'Hydrodynamique [0=Transitoire ; 1=Permanent]
 *** Unités des données                              ***
    1e-4 = Unité de Perméabilité des aquifères en m/s (ou m2)
    m3/h = Unité de Débit                    en m3/s (ou kg/s si Gaz)
    1e-4 = Unité de coefficient d'Emmagasinement Captif en [-] ou [m-1]
       % = Unité de coefficient d'Emmagasinements Libre  en [-] ['%' si en %]
   heure = Unité de Temps (des Pas de temps de modèle)
       % = Unité de Porosité = Teneur en eau en [-] ['%' si en %]
 *** Initialisation avant calculs                    ***
  /RAYON_PUITS/MAILLE      C=     26L=     26P=      1V=       0.2;
  /*****/***** Fin d'Initialisation
 *** Fin du fichier des Paramètres Généraux          ***
```

Figure 129 – Fichier des « Paramètres Généraux » de l'exemple détaillé d'application.

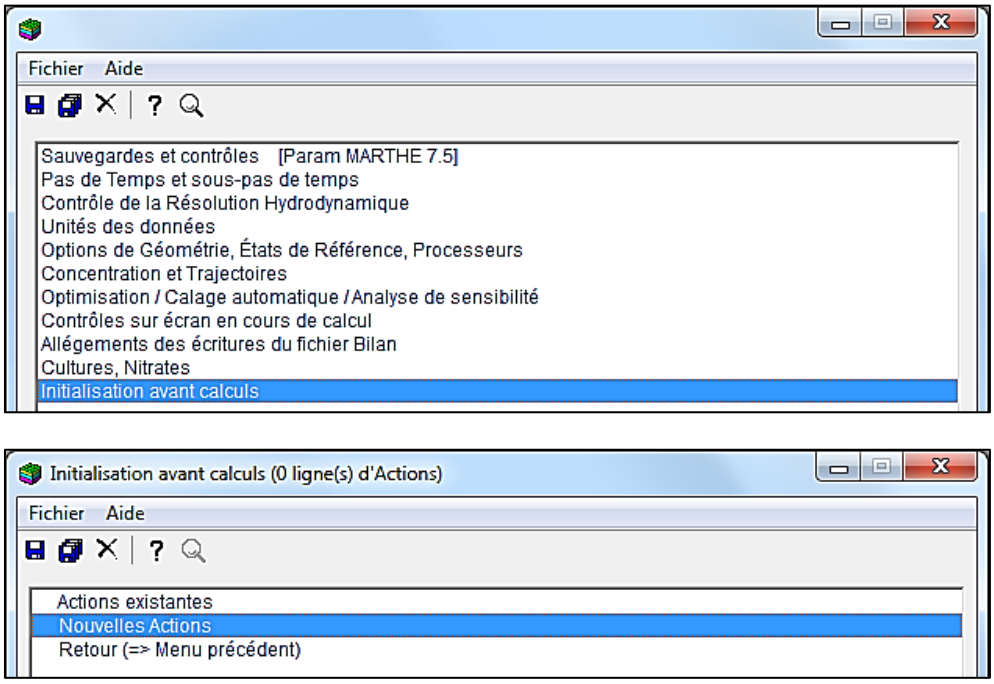


Figure 130 – Choix du paragraphe « Initialisation avant calculs », puis choix de réaliser une « Nouvelle action ».

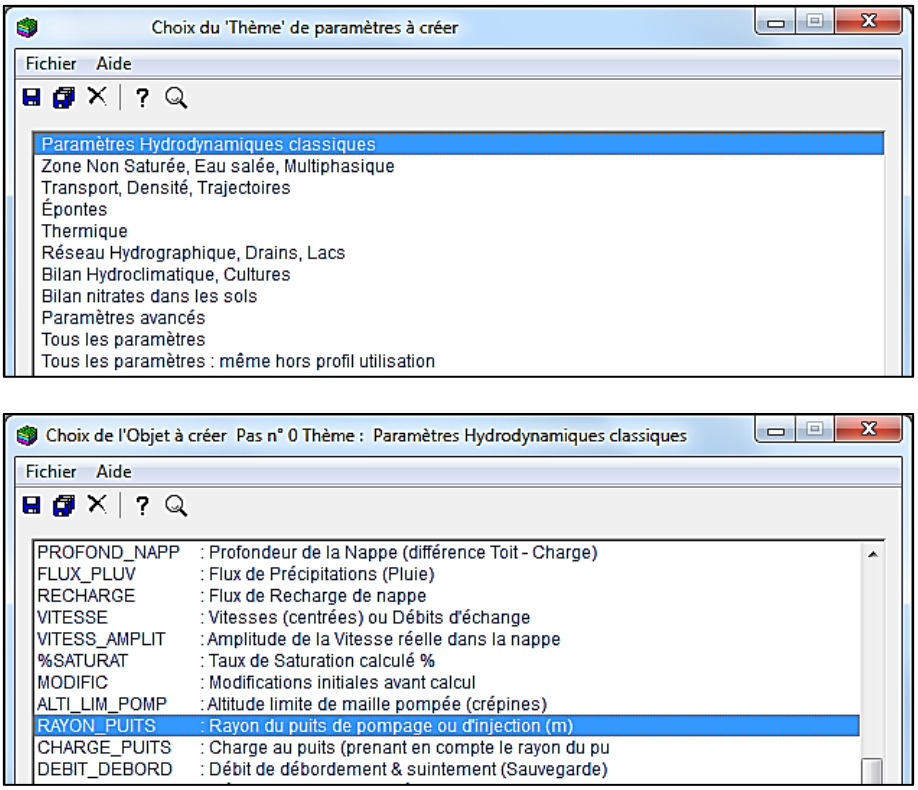


Figure 131 – Sélection du thème « Hydrodynamique classique », puis sélection du champ « Rayon du puits ».

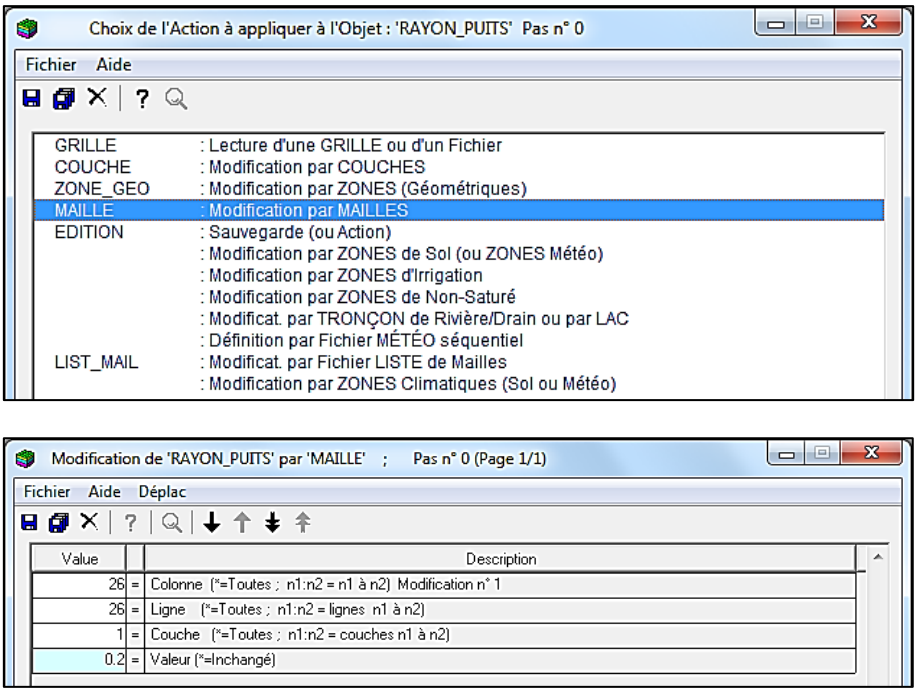


Figure 132 – Choix d'une « Modification par Mailles » et introduction de la valeur 0.2 m dans la maille de colonne n°26, ligne n°26, couche n°1.

14.5.3. Fichier des « Pas de temps »

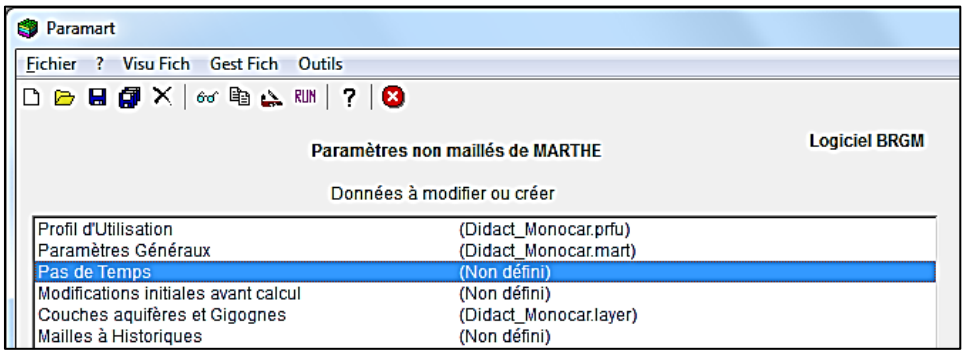


Figure 133 – Sélection du fichier des « Pas de temps ».

Dans le menu général de définition des « Paramètres non maillés », on sélectionne l'option « Pas de temps » : Figure 133.

Comme précédemment, on crée un nouveau fichier. On accepte la valeur par défaut de 0 comme date de début de la simulation. On demande alors la création automatique de 15 pas de temps de modèle : Figure 134. On indique que les pas de temps auront des durées non uniformes et on choisit de définir les dates de fin de pas de temps avec le tableur intégré : Figure 135 et Figure 136.

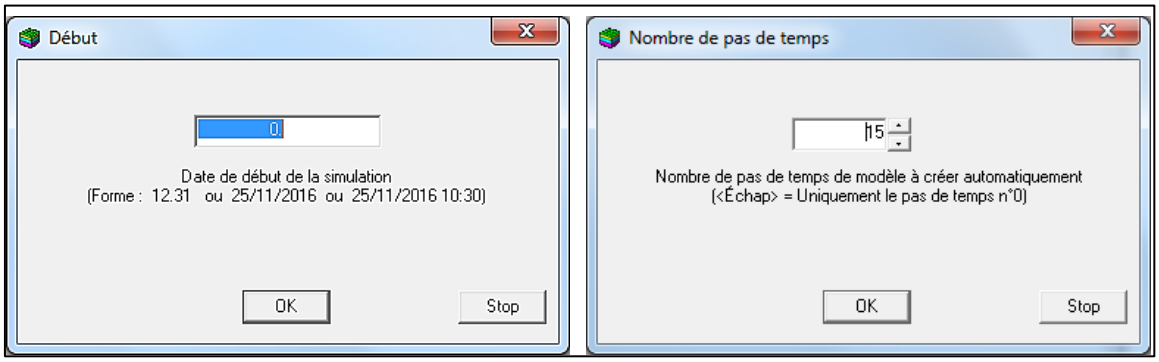


Figure 134 – Définition de la date de début de la simulation et création automatique de 15 pas de temps.

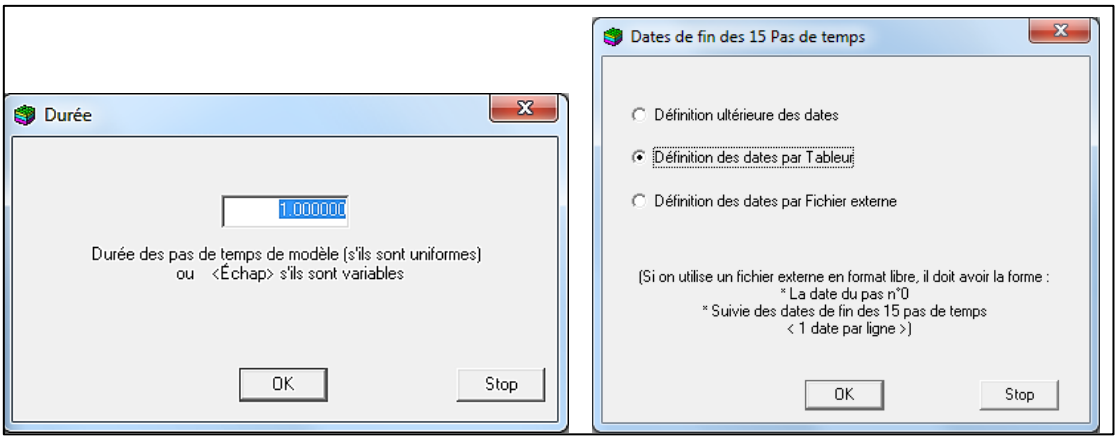


Figure 135 – Définition de la durée des pas de temps
(« Échap. » car la durée n'est pas uniforme)
Choix de définir par le tableur intégré les dates de fin de pas de temps.

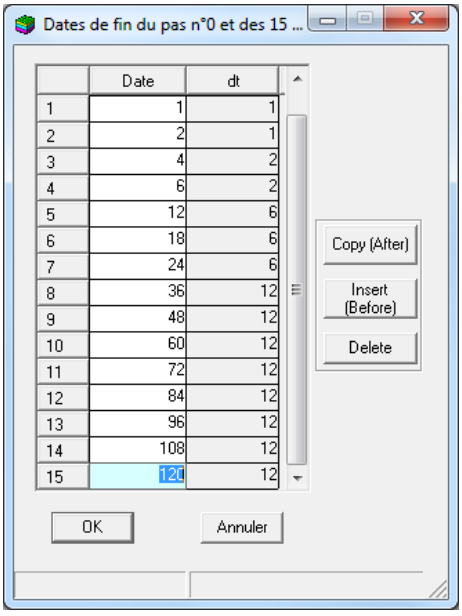


Figure 136 – Avec le tableur intégré : Définition des dates de fin des 15 pas de temps.

Introduction du débit de pompage :

Pour introduire le débit de pompage dans la maille de colonne n°26, ligne n°26, couche n°1, à partir du pas de temps n°1, on procède de la manière suivante :

On sélectionne le pas de temps n°1 : Figure 137, puis « Nouvelles actions ».

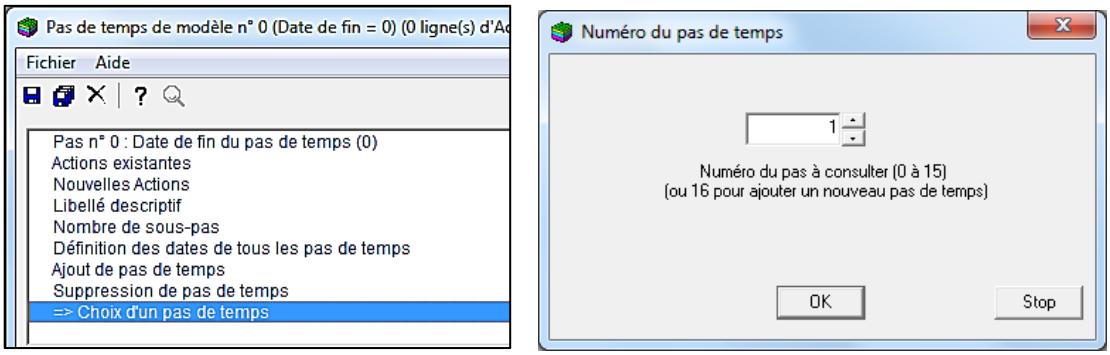


Figure 137 – Sélection du pas de temps n°1.

On sélectionne alors le thème « Hydrodynamique classique », puis le champ « DÉBIT », puis on choisit de le modifier par « Maille ». On introduit alors la valeur -100 dans la maille appropriée : Figure 138.

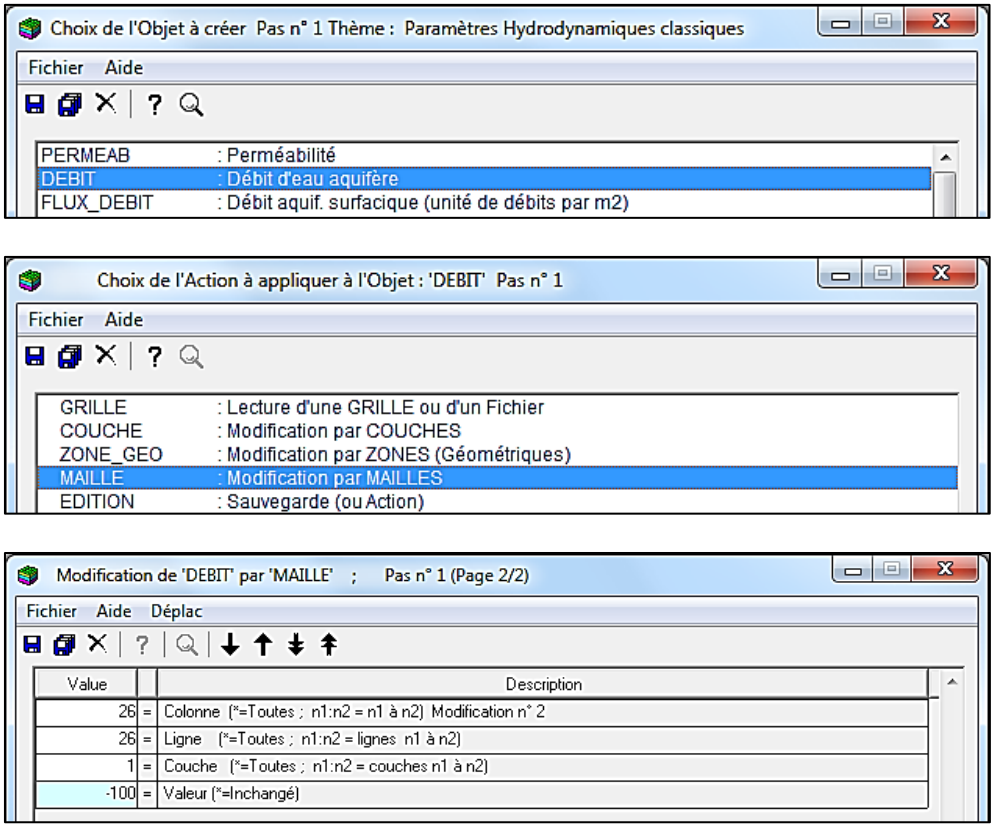


Figure 138 – Sélection du champ « débit », choix de le modifier par « Maille » et introduction de la valeur -100 dans la maille appropriée.

On choisit alors de demander, au pas de temps n°15, la sauvegarde du champ de la « Charge calculée ».

Comme précédemment, on sélectionne le pas de temps n°15, puis « Nouvelles actions ». On sélectionne alors le thème « Hydrodynamique classique », puis le champ « CHARGE », puis l'action « EDITION », c'est-à-dire « Sauvegarde », puis l'index de sauvegarde 1 (c'est-à-dire sauvegarde classique ») : Figure 139.

De de la même manière, il est possible de demander, la sauvegarde d'autres champs : le champ du débit calculés, le champ du débit aux limites, etc.

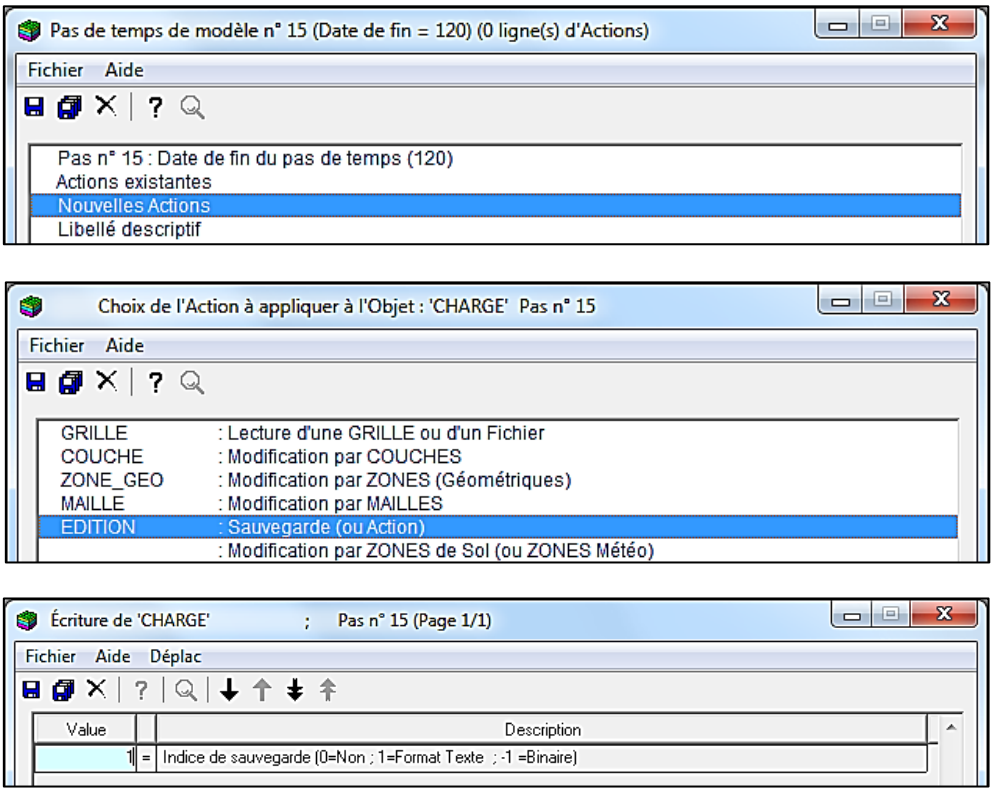


Figure 139 – Choix d'introduire une « Nouvelle action », pour le champ « CHARGE ». Choix de l'action « EDITION », puis de l'index de sauvegarde de valeur 1.

14.5.4. Fichier des « mailles à historiques »

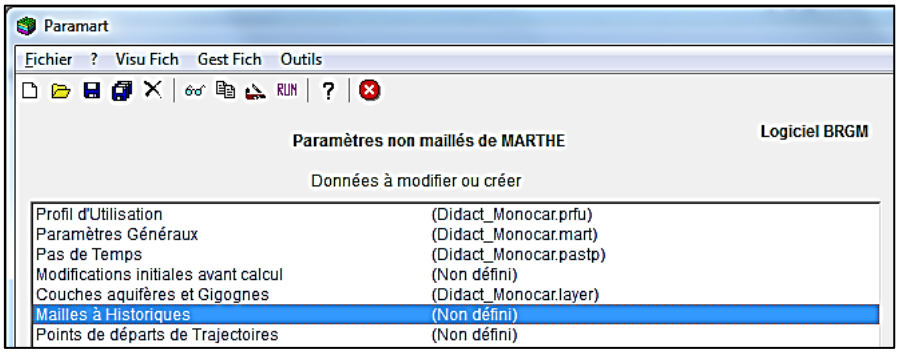


Figure 140 – Sélection du fichier des « Mailles à historiques ».

Dans le menu général de définition des « Paramètres non maillés », on sélectionne l'option « Mailles à historiques » : Figure 140.

Comme précédemment, on crée un nouveau fichier. On sélectionne alors le type d'historique souhaité : des historiques de « charge hydraulique ». On choisit d'ajouter une nouvelle maille à historique. On choisit de définir cette maille par son numéro de colonne, ligne, couche. On

introduit alors le numéro de la maille pompée (colonne n°26, ligne n°26, couche n°1) : Figure 141.

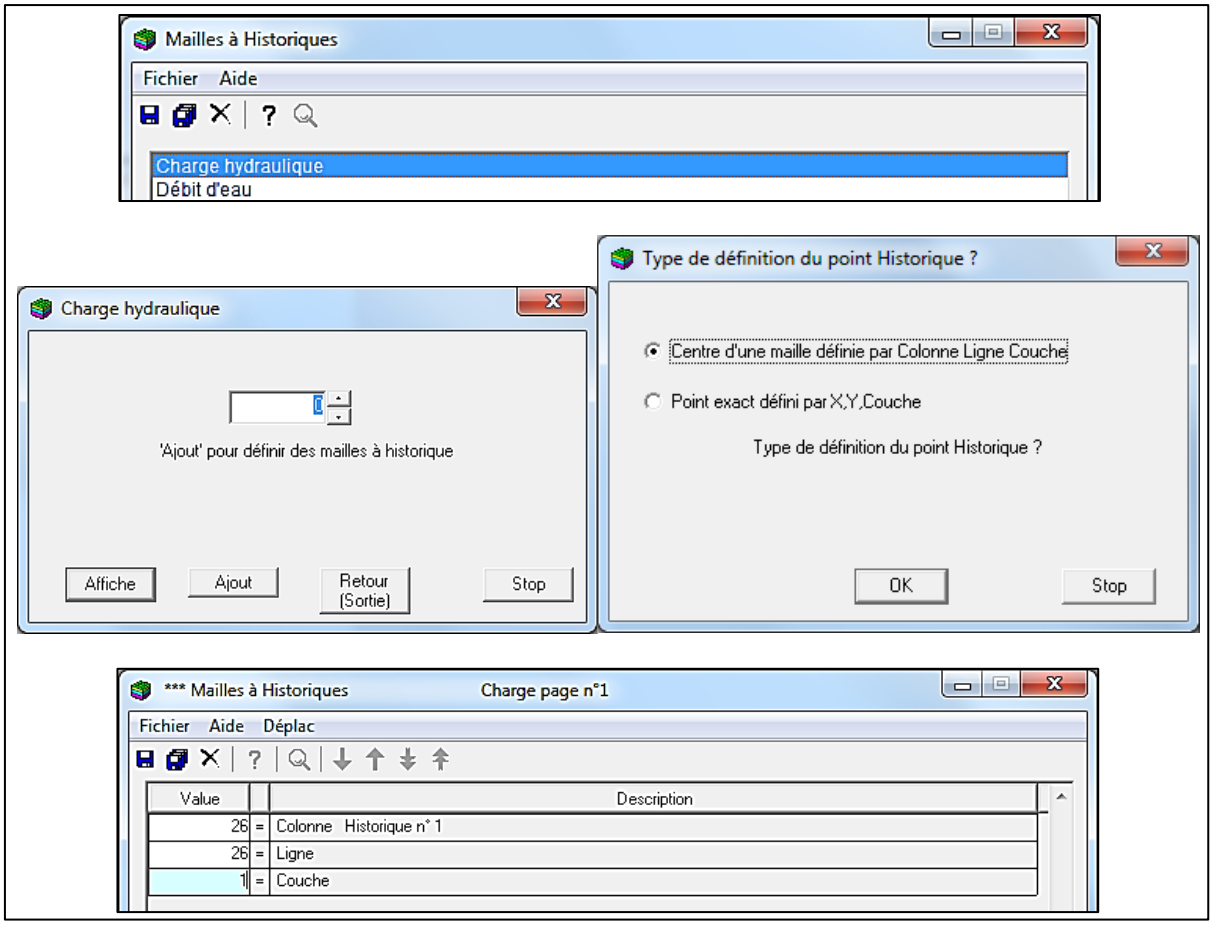


Figure 141 – Sélection du type d'historique, de la méthode de définition de la maille, et définition d'une maille dont on souhaite sauvegarder l'historique de variation temporelle.

On choisit également d'autres mailles dont on veut sauvegarder les historiques. On obtient alors le fichier des mailles à historique de la Figure 142.

```
Monocar
 #<V7.5># --- Fin du texte libre --- ; Ne pas modifier/retirer cette ligne
  /Charge       /HISTO/    =    /MAIL:C=     26L=     26P=      1;
  /Charge       /HISTO/    =    /MAIL:C=     27L=     26P=      1;
  /Charge       /HISTO/    =    /MAIL:C=     51L=     26P=      1;
  /Débit        /HISTO/    =    /MAIL:C=      1L=     26P=      1;
  /Charge_Puits /HISTO/    =    /MAIL:C=     26L=     26P=      1;Puits
 *** Fin du fichier des 'Mailles à Historique'       ***
```

Figure 142 – Fichier des mailles à historiques obtenu.

14.5.5. Lancement des calculs et visualisation 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 projet *Didact_Monocar.rma* : Figure 143. Le calcul s'effectue en une fraction de seconde.

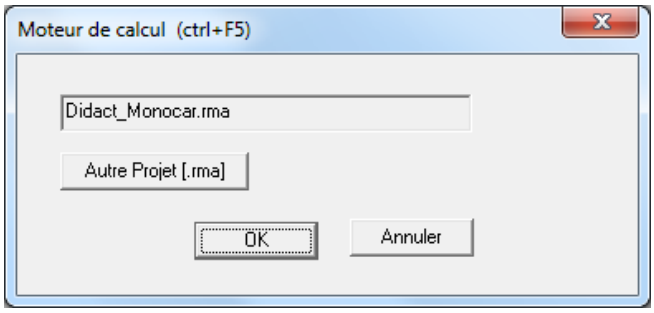


Figure 143 – Lancement des calculs.

Examen du bilan des débits :

On commence par examiner le fichier « bilandeb.txt », « bilandeb » pour **bilan** (des) **déb**(its). Pour cela on utilise l'icône en forme de lunettes, située sur la barre d'outils du bas du cadre, et on sélectionne le fichier de nom *bilandeb.txt*.

La Figure 144 montre le déroulement du calcul du pas de temps n°1. On y voit que la variation moyenne de charge hydraulique devient inférieure à 10^{-6} mètre en 3 itérations externes. Le débit pompé de 100 m^3/h provient à 100 % du déstockage de la nappe, ce qui indique que les limites à charge hydraulique imposée ne sont pas atteintes. La convergence interne est obtenue avec un écart de 3.3 10^{-4} %, ce qui est excellent. La convergence globale (entre les entrées et les sorties) est obtenue avec un écart de 6.4 10^{-5} % ce qui est insignifiant.

La Figure 145 montre le déroulement du calcul du pas de temps n°15. La variation moyenne de charge hydraulique devient inférieure à 10^{-6} mètre en 3 itérations externes. Le bilan des débits montre que 16.85 m^3/h proviennent des limites à charge imposée, qui sont donc atteintes à ce pas de temps, et 83.2 m^3/h proviennent du déstockage de la nappe. La convergence est également excellente (10^{-3} % d'écart sur la convergence interne, et 10^{-4} % d'écart sur la convergence globale).

Visualisation de l'évolution temporelle du bilan des débits :

On utilise le fichier « histobil_debit.prn », histo(rique) du bil(an des) debit(s), qui est généré automatiquement. Ce fichier s'importe immédiatement dans Excel ®, ou un tableur équivalent. On peut ainsi visualiser facilement l'évolution temporelle des termes du bilan des débits et de la convergence : (Figure 146). On voit que la limite commence à être atteinte à partir d'environ 50 heures. On vérifie également que les calculs ont parfaitement convergés à tous les pas de temps.

Examen du champ de la charge calculée :

On importe dans WinMarthe le fichier résultat « chasim.out ». Pour cette importation, on utilise le menu « Fichier » ➔ « Fichier de champs simulés (ouvrir) », ou bien, plus rapidement, on

utilise le raccourcis « Contrôl-R » (« R » comme « Résultats »). Le champ de la charge hydraulique calculée s'affiche immédiatement. On peut lui superposer le dessin des isovaleurs de charge en utilisant le menu « Outils » ➔ « Isovaleurs » ➔ « Simples » (ou bien le raccourcis « Contrôl-I », avec « I » comme « Isovaleurs ») : Figure 147. On voit que, logiquement, le rabattement se propage moins dans la zone nord-est à perméabilité réduite.

```
 ---------------------------------------------------------------
  $ Pas de temps de modèle n° 1
 ---------------------------------------------------------------

     Début:      0.000  (=   0.00     secondes =      0.000 jour(s))
     Durée:      1.000  (=  3.600E+03 secondes =      0.042 jour(s))
     Fin  :      1.000  (=  3.600E+03 secondes =      0.042 jour(s))
=========================================================
 Récapitulation de la Convergence du calcul des Charges
 Sous  Itér   Var Moy   Var Maxi    Q_Résid  Nb_Itérat
  Pas                  Itérat 1   Itérat 1  internes
    1    1  1.983E-03 -1.354E+00  1.000E+02     6
    1    2  1.044E-05 -1.326E-02  2.482E+00     4
    1    3  7.636E-08 -9.647E-05  2.013E-02     2
=========================================================

- Bilan en unités de débit : Pas de temps n° 1 - t= 1.000 -----------

 Débits Entrant /Charges Impos. =  1.925E-09
 Débits Sortant /Charges Impos. =                  0.000
 Débits Entrant dans les Mailles=  1.009E-04
 Débits Sortant des Mailles     =               -100.000 (-100.000 Imposé)
 ------------------------------------------------------------------------------
     Stockage                   =   -100.000  ( 3.287E-15  -100.000)
     Bilan de Contrôle          = -1.137E-13              (Somme de tous les débits)
 Débit Résiduel d'Erreur        =  3.317E-04              (Somme des valeurs absolues
                                                           des débits résiduels)
 Débits Internes significatifs  =      0.000     -100.000 (calculés dans les mailles
                                                           avec pompage ou injection)
                   Bilan Global =  6.457E-05


 Débit   Résiduel Maximal             =  6.527E-05 Col: 26 , Lig: 26
 soit un Écart de Charge de           :  9.223E-07
 Hauteur Résiduelle d'Erreur Maximale =  9.223E-07 Col: 26 , Lig: 26

 Somme abs (Débits résiduels)   =  3.317E-04 Flux Total maxi = 100.000
 d'où une convergence interne à :  3.317E-04 %   d'erreur
 Écart de bilan global          =  6.457E-05    (bouclage entrées/sorties
                                                 avec les débits de pompage/injection
                                                 calculés)
 d'où une convergence globale à :  6.457E-05 %   d'erreur

 ========================================== Pas de temps n° 1 - t= 1.000

 -Aquifère--- Cumul des Volumes  Eau   --- Dans le pas    Depuis le début de
                                                          la simulation
    Volume / Potentiels Imposés Entrants = 1.9251E-09       1.9251E-09
         Volume Interne (Imposé) Sortant = -100.0           -100.0
                 Volume Stocké (Entrant) = 3.2870E-15        3.2870E-15
               Volume Déstocké (Sortant) = -100.0           -100.0
              Écart de Bilan volume nappe =-7.0189E-07      -7.0189E-07
                                      (%) = 7.0189E-07       7.0189E-07
```

Figure 144 – Bilan des débits au pas de temps n°1.

```
 ------------------------------------------------------------------
  $ Pas de temps de modèle n° 15
 ------------------------------------------------------------------

     Début:    108.000  (=  3.888E+05 secondes =      4.500 jour(s))
     Durée:     12.000  (=  4.320E+04 secondes =      0.500 jour(s))
     Fin  :    120.000  (=  4.320E+05 secondes =      5.000 jour(s))
==========================================================
 Récapitulation de la Convergence du calcul des Charges
 Sous  Itér   Var Moy   Var Maxi    Q_Résid  Nb_Itérat
  Pas                  Itérat 1   Itérat 1  internes
    1    1  1.979E-02 -5.576E-02  8.594E+01     7
    1    2  2.842E-05 -3.006E-03  2.350E-01     5
    1    3  2.142E-07 -8.223E-05  1.167E-02     3
==========================================================

- Bilan en unités de débit : Pas de temps n° 15 - t= 120.000 -------------

 Débits Entrant /Charges Impos. =     16.848
 Débits Sortant /Charges Impos. =                  0.000
 Débits Entrant dans les Mailles=  4.288E-04
 Débits Sortant des Mailles     =               -100.000 (-100.000 Imposé)
 ------------------------------------------------------------------------
     Stockage                   =    -83.152  (     0.000   -83.152)
     Bilan de Contrôle          = -2.700E-13             (Somme de tous les débits)
 Débit Résiduel d'Erreur        =  1.069E-03             (Somme des valeurs absolues
                                                          des débits résiduels)
 Débits Internes significatifs  =      0.000     -100.000 (calculés dans les mailles
                                                          avec pompage ou injection)
                   Bilan Global =  1.058E-04


 Débit   Résiduel Maximal             =  1.060E-04 Col: 26 , Lig: 26
 soit un Écart de Charge de           :  1.576E-06
 Hauteur Résiduelle d'Erreur Maximale =  1.576E-06 Col: 26 , Lig: 26

 Somme abs (Débits résiduels)   =  1.069E-03 Flux Total maxi = 100.000
 d'où une convergence interne à :  1.069E-03 %   d'erreur
 Écart de bilan global          =  1.058E-04    (bouclage entrées/sorties
                                                 avec les débits de pompage/injection
                                                 calculés)
 d'où une convergence globale à :  1.058E-04 %   d'erreur

 ========================================= Pas de temps n° 15 - t= 120.000

 -Aquifère--- Cumul des Volumes  Eau   --- Dans le pas    Depuis le début de
                                                          la simulation
    Volume / Potentiels Imposés Entrants =  202.2           773.0
         Volume Interne (Imposé) Sortant = -1200.          -1.2000E+04
                 Volume Stocké (Entrant) =  0.000           1.3767E-14
               Volume Déstocké (Sortant) = -997.8          -1.1227E+04
            Écart de Bilan volume nappe =-2.1161E-06      -1.1887E-05
                                    (%) = 1.7634E-07       9.9060E-08
```

Figure 145 – Bilan des débits au pas de temps n°15.

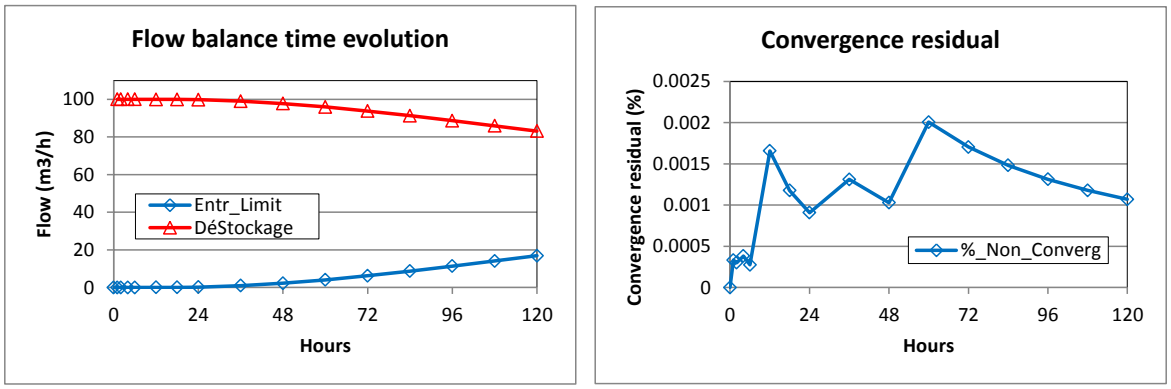


Figure 146 – Évolution temporelle des termes du bilan des débits et du pourcentage de non-convergence.

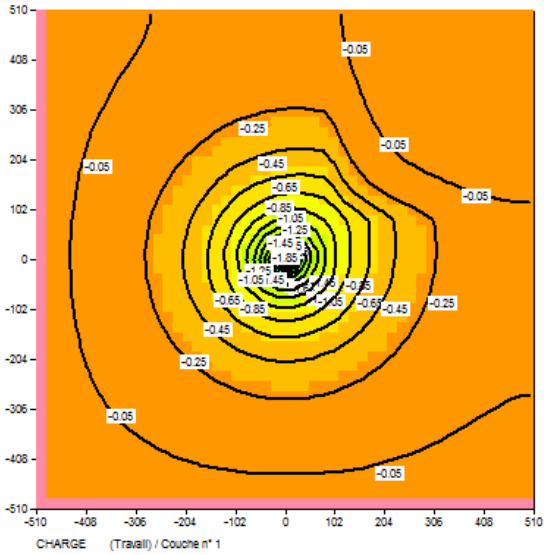


Figure 147 – Champ de la charge calculée. Isovaleurs tous les 0.2 mètre.

Visualisation de l'évolution temporelle de la charge hydraulique dans les mailles à historiques :

On utilise le fichier « historiq.prn », qui est généré automatiquement. Ce fichier s'importe immédiatement dans Excel ® ou un tableur équivalent. On peut ainsi visualiser facilement l'évolution temporelle de la charge hydraulique dans la nappe en 2 points et au puits de pompage. Compte tenu de la taille de la maille et du rayon du puits, on voit que la charge au puits est 4.4 m plus basse que la charge moyenne de la maille de 20 x 20 m dans laquelle il est implanté : (Figure 148).

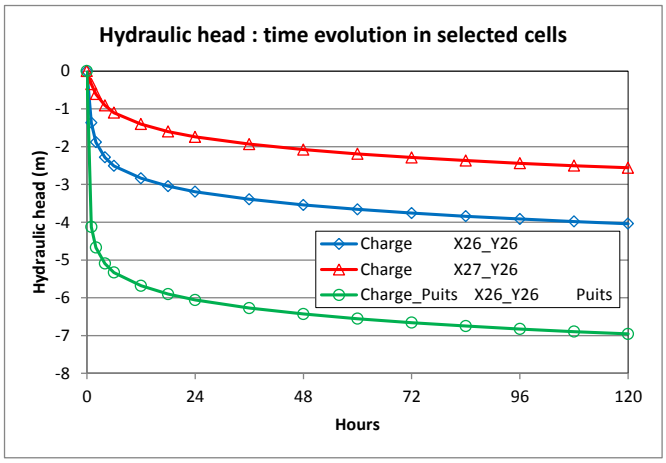


Figure 148 – Évolution de la charge hydraulique calculée en 3 points.

15. Fonctionnalités ou paramètres déconseillés car obsolescents

Ce chapitre présente une liste de fonctionnalités ou de paramètres considérés comme obsolescents. Ces fonctionnalités et paramètres sont encore opérationnels dans cette version, cependant ils sont déconseillés. Ils pourraient en effet ne pas être conservés dans des versions futures du code de calcul MARTHE.

- Fichier de modifications initiales, d'extension par défaut [.modin].
  Si on souhaite introduire des modifications ponctuelles avant calcul : il est conseillé de les introduire dans le fichier des « Paramètres Généraux » au paragraphe « Initialisations avant calculs ».
  Cependant, un tel fichier peut être utile si on souhaite simuler des scénarios multiples.

- Zones équipotentielles.
  Il est plutôt conseillé d'introduire dans cette zone une perméabilité significativement plus grande que dans les zones voisines.
  Il sera ainsi possible de faire des calculs de trajectoires ou de transport de masse à travers ces zones.

- Épontes comme inter-couches semi-perméables.
  Il est plutôt conseillé de modéliser explicitement ces couches, en leur donnant une perméabilité appropriée et une anisotropie verticale de perméabilité appropriée si on veut limiter les écoulements latéraux.
  Il sera ainsi possible de faire des calculs de trajectoires ou de transport de masse à travers ces zones.

- Coefficient d'emmagasinement captif défini « Globalement pour toutes les couches ».
  Fonctionnalité obsolète : Dans les nouveaux projets, il est conseillé de toujours introduire, dans chaque couche, le coefficient d'emmagasinement captif qui s'y rapporte.

- Coefficient d'emmagasinement captif « des hydrogéologues », sans dimension.
  Il est conseillé d'utiliser le coefficient d'emmagasinement captif spécifique, (unité par défaut : m^{-1}), qui est intrinsèque et ne dépend *pas* de l'épaisseur locale de la formation. Ceci est particulièrement important pour les systèmes 3D ou multicouches.

- Schéma de calcul « En nappe libre » (par opposition au schéma « En Pseudo-Non-Saturé »).
  Dans tous les nouveaux projets, il est conseillé d'utiliser le schéma de calcul « En Pseudo-Non-Saturé » qui est plus performant en cas de dénoyages.
  Ceci ne s'applique pas dans les cas particuliers où les calculs sont effectués avec un schéma « en Zone Non Saturée »

- Anisotropie verticale de perméabilité définie par couche dans le fichier des « Couches aquifères et Gigognes » [.layer].
  Si l'anisotropie verticale de perméabilité n'est pas confiance, il est conseillé d'utiliser le champ maillé d'anisotropie verticale.

- Calcul à symétrie « Cylindrique » par opposition au schéma conseillé à symétrie « Radiale ».
  Des meilleurs résultats, plus facile à interpréter sont obtenus en choisissant l'option de « Géométrie Radiale » dans le fichier des « Couches aquifères et Gigognes ».

16. Incompatibilités

Un certain nombre d'options ou d'actions sont incompatibles, impossibles ou fortement déconseillées. La liste de ces incompatibilités ou impossibilités est la suivante :

- Maillage gigogne uniquement dans certaines couches : impossible.
- Maillage gigogne : inclus dans un maillage gigogne : impossible.
- Maillage gigogne : dans un vrai maillage en coupe : impossible.
- Introduire un débit dans une maille à charge hydraulique imposée : contradiction.
- Imposer une charge hydraulique au-dessus de l'altitude topographique dans une maille ayant un index de débordement ou un index de suintement : contradiction.
- Fixer une altitude de lit de rivière en dessous de l'altitude du substratum de la maille : déconseillé.
- Faire un calcul d'hydraulique en régime permanent, sans aucune maille à charge hydraulique imposée, ni aucune maille à index de débordement ou de suintement : indéfini.
- Faire un calcul d'hydraulique en régime permanent, avec des mailles isolées. Ces mailles sont isolées des mailles à charge hydraulique imposée : Leurs charges sont indéfinies.
- Utiliser en entrée, sans le renommer, un fichier de résultat de nom fixe. Par exemple, utiliser comme fichier de « charge hydraulique initiale » un fichier de nom « chasim.out » : très dangereux car le fichier « chasim.out » est « écrasé » à chaque simulation.
- Utiliser le solveur « Cholesky » pour calculer l'hydraulique dans un maillage comportant des sous-maillages gigognes ou bien un réseau de drains : impossible car ce solveur est opérationnel uniquement avec les maillages réguliers et structurés => Le solveur Eisenstat est alors utilisé automatiquement.
- Utiliser des « Zones équipotentielles » (obsolescentes) dans un maillage radial.
- Faire des calculs de transport dans un maillage contenant des « Zones équipotentielles ».
- Utiliser la méthode de transport TVD dans un maillage contenant des sous-maillages gigognes : => Utiliser la méthode des « Différences Finies » ou bien la méthode MOC.
- Faire des calculs diphasiques, ou bien avec interface « eau douce – eau salée » dans un maillage contenant des sous-maillages gigognes.
- Utiliser un coefficient de retard dans un calcul de transport avec un schéma de calcul en « Zone Non Saturée ». => Il faut alors utiliser un coefficient « Rho · kd ».

17. Glossaire appliqué au code MARTHE ®

Champ : C'est l'ensemble des valeurs d'une grandeur spatialisée dans toutes les mailles du domaine. On distingue un « champ », par exemple le champ de la perméabilité, d'un « paramètre », par exemple le nombre de pas de temps, ou bien l'unité de temps.

Charge hydraulique : Pour l'eau douce, à densité constante, c'est la somme de la pression hydraulique et de l'altitude. Elle a pour notation classique « H » (pour Head). H = h + z (en notant « h » la pression hydraulique et « z » l'altitude). On omet parfois le qualitatif « hydraulique » et on parle simplement de « charge ». On veillera cependant à ne pas faire de confusion avec la « charge électrique » lors des calculs de transferts réactifs couplés avec de la géochimie.

Coefficient d'emmagasinement : capacité de l'aquifère à stocker/déstocker de l'eau quand la charge hydraulique augmente/diminue. Le coefficient d'emmagasinement intervient uniquement en régime hydraulique transitoire. Dans une maille dans laquelle la nappe est « libre », c'est essentiellement le coefficient d'emmagasinement libre qui intervient. Dans une maille dans laquelle la nappe est « captive », c'est uniquement le coefficient d'emmagasinement captif qui intervient. Ce coefficient d'emmagasinement captif peut être donné sous forme spécifique (en m^{-1}), ou bien sous forme intégrant l'épaisseur locale de la nappe (sans dimension). La forme « spécifique » est *conseillée*.

Convergence : Ce terme désigne deux notions différentes : le « bouclage des calculs » et la « convergence spatio-temporelle ».
Bouclage des calculs : Les calculs itératifs ont convergé quand l'équation de conservation de la masse (ou du débit) est vérifiée dans chaque maille du domaine.
Convergence spatio-temporelle : On a obtenu une convergence spatio-temporelle quand les résultats obtenus sont (quasiment) inchangés si on utilise une discrétisation spatiale ou temporelle plus fine (des mailles plus petites, ou des pas de temps plus petits).

Convergence globale : Elle caractérise la convergence du bilan, globalement pour le domaine. Globalement : la somme des débits sortants doit être égale à la somme des débits entrants moins la somme des débits de stockage. La convergence globale ne garantit pas forcément la convergence interne (cf. ci-dessous), puisque des écarts locaux de convergence peuvent se compenser.

Convergence interne : Elle caractérise la convergence du bilan dans chaque maille du domaine. Pour chaque maille : la somme des débits sortants doit être égale à la somme des débits entrants diminuée du débit de stockage. L'obtention de la convergence « interne » est plus difficile à obtenir que la convergence globale.

Débordement : Quand la charge hydraulique d'un aquifère localement libre tend à dépasser l'altitude de son toit, un débit de débordement vers l'extérieur survient. Le débit de débordement est le débit qu'il faudrait prélever pour empêcher maintenir la charge hydraulique à l'altitude du toit. En un endroit donné, une nappe libre est une nappe qui n'est pas recouverte par une formation imperméable.

Dénoyage : Dans une nappe libre, c'est l'état d'une maille dans laquelle le niveau de l'eau, donc la charge hydraulique, est inférieure à l'altitude de son substratum.

Différences Finies : C'est une méthode de discrétisation des équations, notée « D.F. ». C'est un cas particulier de la méthode des « Volumes Finis » dans laquelle les volumes sont des parallélépipèdes qui ont chacun le même nombre de voisins (4 voisins en 2D, 6 voisins en 3D).

Éponte : Formation, généralement peu perméable, dont on admet que les écoulements la traversent uniquement dans la direction verticale. Les « épontes thermiques » désignent en revanche des formations imperméables, mais qui permettent les échanges thermiques par conduction.

ETP : Évapotranspiration Potentielle. C'est l'évaporation + la transpiration d'un gazon de référence (ray-grass) de hauteur uniforme, sans stress hydrique.

ETR : Évapotranspiration réelle. C'est l'évapotranspiration qui tient compte de la disponibilité en eau et du type de couvert végétal. Par exemple, en l'absence de pluie et dans un sol totalement sec l'évapotranspiration (réelle) est nulle.

GARDÉNIA : C'est un module de bilan hydroclimatique couplé à MARTHE dans chaque « zone » du domaine (« zones climatiques » et « zones de sol »). Le bilan hydroclimatique permet de calculer le flux de ruissellement et le flux de recharge à partir : des précipitations atmosphériques (pluie + neige), de la température de l'air, de l'évapotranspiration potentielle et de l'état de saturation du sol.
La température de l'air est utilisée uniquement pour calculer la fonte de la neige.
Le code de calcul GARDÉNIA est décrit dans le rapport BRGM/RP-62797-FR.
La validation de GARDÉNIA est décrite dans le rapport BRGM/RP-64500-FR.

Gigogne : Un maillage gigogne (ou sous-maillage gigogne) est un maillage emboîté dans le maillage principal pour obtenir localement une discrétisation affinée Dans MARTHE, un maillage principal peut contenir jusqu'à 99 maillages gigognes. Il n'est pas possible d'introduire un maillage gigogne dans un maillage gigogne.

Gradients conjugués : C'est une méthode itérative efficace pour la résolution des systèmes matriciels d'équations nécessaires aux calculs d'hydraulique et de transport.

Grille MARTHE : C'est un format de grilles de données maillées auto-référencé. Ce format est utilisé en entrée et, le plus souvent, en sortie de MARTHE.

Historique : C'est la succession au cours du temps des valeurs d'un champ (par exemple, la charge hydraulique) en un point donné. Les « mailles à historiques » sont les mailles du domaine pour lesquelles les historiques sont sauvegardés.

Hydrodynamique : (ou « hydraulique ») c'est la phase de calcul des charges hydrauliques et des vitesses.

Infiltration : Dans MARTHE, le « Flux d'Infiltration » (*obsolescent*) désigne la différence « Pluie – ETP ».

Itérations : Pour la résolution des calculs par approximations successives. Dans MARTHE, on distingue des « itérations internes » et des itérations « externes ».
Les « itérations internes » sont utilisées pour la résolution matricielle d'un système d'équations linéaires, par exemple par la méthode des gradients conjugués.

Les « itérations externes » sont utilisées pour prendre en compte les phénomènes non linéaires ; par exemple, en nappe libre la transmissivité dépend de l'épaisseur mouillée, donc de la charge hydraulique (qui elle-même dépend de la transmissivité).

Maillage gigogne : voir « Gigogne ».

Manning-Strickler : Formule permettant de calculer le débit dans un cours d'eau en fonction de sa géométrie (largeur, rayon hydraulique, pente du lit) et de la rugosité du lit et des berges.

Mot clé : Dans MARTHE Un « mot clé » correspond à un Champ, une Variable ou à une Action Ces mots clés sont utilisés dans le module de « Gestion des données non maillées » et ils apparaissent dans les fichiers mis en forme par ce module : fichier des « Pas de Temps » et paragraphe « Initialisation avant calcul » du fichier des « Paramètres Généraux ».

Neige : Toutes les valeurs relatives à la neige : le stock de neige, la fonte de la neige, etc. sont données en équivalent en eau. Donc « 100 mm de neige » correspondent à une lame d'eau de 100 mm.

Nappe libre : Dans un endroit donné une nappe est libre si elle n'est pas recouverte par une formation imperméable. En cet endroit la nappe est en particulier caractérisée par un coefficient d'emmagasinement libre, mais aussi, dans une moindre mesure, par un coefficient d'emmagasinement captif.

Nappe captive : Dans un endroit donné, une nappe est captive si elle est recouverte par une formation imperméable.
En cet endroit la nappe peut être dans un « état libre », si sa charge hydraulique est inférieure à l'altitude de son toit, ou dans un « état captif » dans le cas contraire.
Dans MARTHE, il faut définir en chaque maille un coefficient d'emmagasinement libre et un coefficient d'emmagasinement captif, qui seront utilisés en fonction de l'état de la nappe.

Pas de temps de modèle : les pas de temps « de modèle » sont des pas de temps définis par l'utilisateur, auxquels il peut introduire des modifications de champs, ou bien demander des sauvegardes. Pour des raisons numériques, ces pas de temps peuvent être automatiquement subdivisés en pas de temps de calcul (par exemple lors des calculs avec un schéma de « Zone Non Saturée », en diphasique, ou pour le transport avec le schéma TVD.

Perméabilité : Il faut distinguer :

- La « perméabilité à l'eau », généralement employée par les hydrogéologues sous le nom de « perméabilité ». C'est la « conductivité hydraulique » (« hydraulic conductivity » en anglais). Elle a la dimension d'une vitesse et est donc exprimée en m/s dans le système international.
- La « perméabilité intrinsèque », utilisée classiquement pour les écoulements multiphasiques ou dans le domaine pétrolier, souvent sous le nom de « perméabilité » (« permeability » en anglais) est indépendante de fluide (eau, gaz, huile). Elle dépend (en principe) uniquement du matériau. Elle est exprimée en m^2 dans le système international, mais souvent aussi en Darcy. (1 Darcy = 0.9869233 10^{-12} m^2).

Pour l'eau pure à 20°C : 1 m/s => (environ) 10^{-7} m^2.soit (environ) 1.01 10^5 Darcy.

Pluie efficace : Voir « Pluie nette ». Le terme « Pluie efficace » peut être avoir une signification différente s'il est employé par un agronome, un hydrologue, un hydrogéologue. Il est donc déconseillé d'utiliser ce terme.

Pluie nette : C'est la part des précipitations atmosphériques en excédent, après action de l'évapotranspiration. Synonyme de « Pluie efficace ».

Potentiel : Dans les calculs classiques, sans prise en compte d'effets densitaires, le « potentiel » désigne la charge hydraulique. Une maille « à potentiel imposé » est alors une maille « à charge (hydraulique) imposée ». Une courbe équipotentielle est une courbe « isocharge ».

Précipitations atmosphériques : C'est, pour une période donnée, la somme de la pluie et de l'équivalent en eau de la neige.

Pression hydraulique : C'est la pression exprimée en hauteur d'eau douce, à la température de référence (généralement 20°C). On a la relation : $h = p / (\rho_0.g)$. En notant : « h » la pression hydraulique, « p » la pression, en Pascals, « ρ_0 » la masse volumique de l'eau douce à 20°C (approximativement égale à 1000 kg/m^3), et « g » l'accélération de la pesanteur (approximativement 9.81 m/s^2 à Paris).

Pseudo-ZNS : C'est un schéma de calcul les nappes libres, un peu analogue au schéma de calcul en « ZNS », qui permet de prendre en compte les dénoyages et remises en eau de nappe. C'est le schéma par défaut dans MARTHE.

Routage des débits : Propagation des débits de rivières vers l'aval, avec prise en compte du stockage/déstockage dans le cours d'eau.

Seuil en rivière : C'est un petit barrage situé à l'aval d'un tronçon de rivière. Le débit à l'aval du seuil, donc à l'aval du tronçon, dépend de la hauteur d'eau au-dessus du seuil. La hauteur d'eau (tirant d'eau) dans le tronçon de rivière peut être inférieure à la hauteur du seuil. Le débit à l'aval du tronçon est alors égal à 0.

Solveur : Méthode de résolution des calculs. Dans MARTHE, plusieurs solveurs sont disponibles pour les calculs d'hydraulique.

Suintement : C'est le même phénomène que le « débordement », mais il peut s'appliquer à une maille qui n'est pas située dans la couche qui affleure.

Trajectoire : C'est le trajet suivi par une molécule d'eau à partir d'un point donné. On dit aussi que c'est la trace du déplacement d'une « particule » non réactive.

Vitesse de Darcy : C'est une vitesse fictive qui serait obtenue si la porosité était égale à 100 %. En fait c'est le débit par unité de surface de section d'aquifère. Cette vitesse est celle qui correspond à la loi de Darcy. $V_{Darcy} = V_{Réelle} \times$ Porosité. La vitesse de Darcy est donc toujours inférieure à la vitesse de réelle, puisque la porosité est inférieure à 1.

Vitesse réelle : C'est la vitesse d'écoulement de l'eau dans les pores du milieu poreux. C'est la vitesse de déplacement des molécules d'eau, ou d'un traceur parfait le long des trajectoires. On utilise parfois aussi les termes : « vitesse de pore » ou « vitesse de filtration ».

Volumes Finis : C'est une méthode de discrétisation des équations, notée « V.F. », dans laquelle le domaine est découpé en volumes unitaires, appelés mailles, de volumes variables. Chaque maille est caractérisée par : le nombre de mailles voisines, la surface d'échange avec chaque voisine, la distance de son centre au centre de chaque voisine.

WinMarthe : Préprocesseur graphique pour la préparation et la visualisation des données avant et après une modélisation avec MARTHE. Après avoir préparé les données, on peut cependant choisir d'utiliser le moteur de calcul MARTHE sans passer par WinMarthe. Cette utilisation concerne surtout les gros domaines, dont les temps de calcul sont longs, et qui demandent beaucoup de mémoire.

Zones climatiques : Les données climatiques (Flux de Pluie, Flux d'ETP, etc.) peuvent être définies par « Zones Climatiques ». Selon le choix fait par un paramètre du paragraphe « Hydroclimatologie » du fichier des « Paramètres Généraux », ces zones désignent les « Zones Météo » (*conseillé*) ou bien les « Zones de Sol » (*pour les simulations simples*). Les « Zones Climatiques » caractérisent les mailles des affleurements.

Zone Non Saturée : La Zone Non Saturée (ZNS) est la région du sol, ou d'un aquifère libre, située au-dessus de la surface libre. Dans MARTHE on peut choisir un schéma de calcul « classique » dans lequel l'épaisseur située en dessous de la surface libre a la perméabilité nominale de l'aquifère, et la partie située au-dessus de la surface libre a une perméabilité nulle. Il est également possible de choisir un « schéma de calcul en ZNS » dans lequel la perméabilité en tout point dépend de l'état de la saturation en eau : les calculs sont alors décrits par l'équation de Richards. (Rapport BRGM/RP-64495-FR, Thiéry, 2015b).

ZNS : voir « Zone Non Saturée ».

18. FAQ

Calibration automatique : MARTHE permet de réaliser une calibration automatique de champs par zone, ou de paramètres constants, ainsi qu'une analyse de sensibilité associée. Un exemple d'application est présenté dans le « Didacticiel de MARTHE ».

Importation de données de logiciel externes : Il est possible d'importer dans WinMarthe des données provenant en particulier des logiciels suivants :

- Multilayer ® du BRGM,
- GDM ® du BRGM
- EarthVision ®
- Petrel ®
- Surfer ®

Infiltration ou Recharge quelle différence ? : L'infiltration des précipitations atmosphériques en excédent par rapport à l'ETP se transforme, après percolation, en recharge de la nappe. Dans MARTHE le « Flux d'Infiltration » (*obsolescent*) désigne la différence « Pluie – ETP ».

Majuscules ou minuscules ? : Dans MARTHE les possibilités sont les suivantes :

- Unités ou paramètres dans le fichier des « Paramètres généraux » :
  Aucune contrainte : « Année » = « ANNEE » = « AnNÉe »,
  « Spécif » = Specif » ; « M3/J » = « m3/j ».
- Mots clés : Il faut respecter la casse « EDITION », « DEBIT ».
- Noms de fichier : Pas de contrainte sous Windows ® :
  Valeurs_Interpolées.charg = VALEURS_INTERPOLÉES.CHARG
  Il est cependant *déconseillé* d'utiliser des accents ou des espaces dans les noms de fichier ou les noms de dossier. En particulier les accents pourront poser des problèmes sous Linux ®

Multicouche ou 3D quelle différence ? : Les maillages de MARTHE sont organisés en couches, souvent « géologiques » qui peuvent se biseauter, et présenter des courts-circuits. Ils donnent lieu à des systèmes « Multicouches ». Il est également possible de découper un domaine en plans plus ou moins horizontaux qui donnent lieu à des « écoulements 3D ». Comme il n'y a pas de différence fondamentale, on utilisera souvent, pour simplifier, le terme général d'« écoulements 3D » ou de « Visualisation 3D ».

Version Anglaise : Il existe une version anglaise de MARTHE et de WinMarthe : tous les dialogues sont en anglais. Cependant il n'y a *pas* de documentation anglaise de la version courante.

Version Espagnole : Il n'existe *pas* de version de MARTHE en espagnol.

Version Linux : MARTHE est distribué uniquement pour les systèmes d'exploitation Windows ®. Pour information : le moteur de calcul MARTHE peut fonctionner Linux ®. Cependant WinMarthe et les divers préprocesseurs ne sont pas portés sous Linux.

Visualisation avec PARAVIEW ® : Les maillages et les champs simulés par MARTHE peuvent être exportés au format VTK pour une visualisation 3D avec PARAVIEW. Dans WinMarthe il suffit d'utiliser l'icône « Visualisation Cube 3D ».

Visualisation avec Tecplot ® : Les maillages et les champs simulés par MARTHE peuvent être exportés vers le logiciel de visualisation 3D Tecplot ®. Dans WinMarthe il suffit d'utiliser l'icône « Visualisation Cube 3D ».

Visualisation en relief VRML 3D : Les maillages et les champs simulés par MARTHE peuvent être exportés au format VRML 3D et visualisés avec le logiciel GLVIEW ® inclus dans la distribution, ou bien avec d'autres visualiseurs VRML. Dans WinMarthe il suffit d'utiliser l'icône

« Visualisation VRML 3D ».

19. Conclusions

Ce rapport a présenté la manière d'utiliser le code de calcul MARTHE du BRGM pour les applications générales de calcul de charge hydraulique et de débit en 3D, avec prise en compte :

- De réseaux rivières
- De réseaux de drains
- De calculs recharge de nappe et de ruissellement

D'autres fonctionnalités du code de calcul MARTHE sont disponibles dans la version 7.5, en particulier :

- Le transport de masse en milieu poreux saturé ou non saturé, en régime permanent ou transitoire (rapport BRGM/RP-64765-FR) ;
- Le transport de salinité avec interaction couplée de la densité du fluide sur le calcul de la charge hydraulique (rapport BRGM/RP-64765-FR) ;
- Le transfert thermique (transfert de chaleur ou d'énergie thermique) avec le calcul couplé de la densité et de la viscosité (rapport BRGM/RP-64765-FR) ;
- Les écoulements en Zone Non Saturée (ZNS) (rapport BRGM/RP-64495-FR) ;
- La calibration automatique des paramètres avec analyse de sensibilité ;
- Les écoulements de fluide gazeux ;
- Les écoulements avec prise en compte de la densité en fonction de la salinité (rapport BRGM/RP-64765-FR) ;
- Couplage géochimique (dans certaines versions) (rapport BRGM/RP-65010-FR).

Les fonctionnalités suivantes sont également disponibles :

- Écoulements diphasiques Eau - Gaz ;
- Écoulements diphasiques Eau - Hydrocarbure ;

Pour mettre en œuvre ces fonctionnalités, il est conseillé de lire les rapports descriptifs associés, le « Didacticiel du code de calcul MARTHE v7.5 », rapport BRGM/RP-64997-FR (Thiéry, 2015d) ainsi que la notice d'utilisation de WinMarthe v4.0, rapport BRGM/RP-54652-FR (Thiéry, 2006).

20. Références bibliographiques

Doherty, J. (2001), Improved Calculations for Dewatered Cells in MODFLOW. *Groundwater, 39: 863–869*. doi: 10.1111/j.1745-6584.2001.tb02474.x.

Freeze, R. A. et Cherry, J. C. (1979) – "Groundwater". Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

de Marsily G. (1981) - Quantitative Hydrogeology – Groundwater Hydrology for Engineers.

Neuman, S.P. (1974) - Effect of partial penetration on flow in unconfined aquifers considering delayed gravity response. *Water Resources Research, v.10, no. 2, p. 303-312*.

Painter, S.L., Basagaoglu, H., and Liu, A.G. (2008) - Robust Representation of Dry Cells in Single-Layer MODFLOW Models. *Ground Water, Vol. 46, No. 6, pp. 873-881*. doi: 10.1111/j.1745-6584.2008.00483.x

Parkhurst, D.L. and Appelo C.A.J. (2013) - Description of Input and Examples for PHREEQC Version 3 - A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations. *U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6–A43*.

Parkhurst, D.L. and Wissmeier, L. (2015) - PhreeqcRM: A reaction module for transport simulators based on the geochemical model PHREEQC. Advances in Water Resources 83(2015) 176-189. http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.06.001

Theis, C.V. (1935) - The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, Amer. Geophys, Union Transactions, 16th Annual Meeting, V. 16, pt. 2, P 519-524.

Thiéry, D. (2006) – Didacticiel du préprocesseur WinMarthe v4.0. Rapport final. BRGM/RP-54652-FR, 83 p., 48 fig. http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-54652-FR.pdf. (*Accès Décembre 2015*).

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

Thiéry, D. (2009a) – 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. (2009b) – Modèles à réservoirs en hydrogéologie. *in Traité d'hydraulique environnementale – Volume 4 - Modèles mathématiques en hydraulique maritime et modèles de transport*. Tanguy J.M. (Ed.) - Éditions Hermès - Lavoisier. Chapitre 7 pp. 239-249. ISBN 978-2-7462-2006-5.

Thiéry, D. (2010a) – Reservoir Models in Hydrogeology. *in "Mathematical Models Volume 2, chapter 13, pp. 409-418 • Environmental Hydraulics Series". Tanguy J.M. (Ed.) – Éditions Wiley/ISTE London. ISBN: 978-1-84821-154-4*.

Thiéry, D. (2010b) – 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. (2010c) – 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. (2010d) – 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. (2014b) - 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 Décembre 2015*).

Thiéry, D. (2015a) - Validation du code de calcul GARDÉNIA par modélisations physiques comparatives. BRGM/RP-64500-FR, 48 p., 28 fig. http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-64500-FR.pdf. (*Accès Décembre 2015*).

Thiéry, D. (2015b) – Modélisation 3D des écoulements en Zone Non Saturée avec le code de calcul MARTHE – version 7.5. BRGM/RP-64495-FR. 87 p., 32 fig.

Thiéry D. (2015c) – Modélisation 3D du transport de masse et du transfert thermique avec le code de calcul MARTHE – version 7.5. BRGM/RP-64765-FR, 324 p., 158 fig.

Thiéry, D. (2015d) – Didacticiel du code de calcul MARTHE v7.5. Exploration des fonctionnalités de modélisation des hydrosystèmes. Rapport BRGM/RP-64997-FR. 277 p., 170 fig.

Thiéry, D. (2015e) – Modélisation 3D du Transport Réactif avec le code de calcul MARTHE v7.5 couplé aux modules géochimiques de PHREEQC. Rapport BRGM/RP-65010-FR, 164 p., 88 fig.

Xu, T., Sonnenthal E., Spycher N., Pruess K., 2004 - TOUGHREACT User's Guide: A Simulation Program for Non-isothermal Multiphase Reactive Geochemical Transport in Variably Saturated Geologic Media, *Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-55460*.

Annexe 1
Description des « Grilles Marthe »

Qu'est-ce qu'une « Grille Marthe » ?

C'est un fichier auto-documenté pour décrire un champ de valeurs aux centres d'un maillage rectangulaire régulier ou irrégulier.

Les rectangles sont définis par des lignes et des colonnes de largeurs variables. Les fichiers sont auto-documentés puisque les abscisses absolues des colonnes et les ordonnées absolues des centres des lignes apparaissent en clair sur le fichier. Ces coordonnées peuvent, en particulier, être des coordonnées Lambert (généralisées) en France, (ou des coordonnées UTM par exemple) ou tout autre système orthonormé non terrestre.

Les fichiers sont « en format texte » et peuvent être utilisés facilement.

Ce système est compact puisque seules les abscisses des colonnes, et les ordonnées des lignes apparaissent. Par exemple, une grille de 200 lignes x 300 colonnes contient uniquement 200 ordonnées et 300 abscisses, soit 500 valeurs (au lieu de 60 000 abscisses et 60 000 ordonnées, soit 120 000 valeurs si les données étaient listées en format séquentiel, donc 240 fois moins).

Intérêt d'une « Grille Marthe »

Les valeurs d'un champ sont auto-documentées (géo-référencées) et peuvent être réutilisées sans aucun problème de localisation.

Les « Grilles Marthe » peuvent être constitués :

- Soit directement : par WinMarthe,
- Soit avec les logiciels Surfer ®, QGIS ®, ou ArcGIS ®,
- Soit par importations de fichiers des logiciels Multilayer ® (BRGM), GDM ® (BRGM), EarthVision ®, ou Petrel ®.

Les « Grilles Marthe » sont acceptées en entrée, et générées en sortie, en particulier par les logiciels du BRGM suivants : WinMarthe, MARTHE, Operasem.

Description d'une « Grille Marthe »

La Figure 149 montre un exemple de grille MARTHE version 9.0.

Cet exemple a les caractéristiques suivantes :

- Point origine, en bas et à gauche : x0=50 ; y0 = 110
  (*X_Left_Corner=**50** ; Y_Lower_Corner=**110***)

- Nombre de colonnes = 5 ; Nombre de lignes = 4
  (*Ncolumn=**5** ; Nrows=**4***)

- Abscisses des centres des 5 colonnes = **55 62.5 66.5 69 75**
- Ordonnées des 4 lignes (de haut en bas) = **165 155 140 120**
- Largeurs (dx) des 5 colonnes = **10 5 3 2 10**
- Hauteurs (dy) des 4 lignes (de haut en bas) = **10 10 20 20**
- Valeurs dans la grille :

4	**4.5**	**7.2**	**8.1**	**9.6**
3.3	**3.2**	**3.6**	**6**	**5**
1.5	**2.2**	**4.3**	**5.5**	**6.6**
-7	**-6.5**	**-5.5**	**-4.5**	**-3.5**

Les nombres des différentes colonnes sont séparés par des tabulations, ce qui permet une importation facile sous Excel ® ou tout autre tableur. Il est ainsi possible d'extraire une ligne ou une colonne pour une représentation graphique. Les nombres peuvent aussi être séparés par un ou plusieurs espaces à la place d'une (seule) tabulation.

```
Marthe_Grid Version=9.0
Title=Exemple de Grille Marthe                    PERMEAB  1
[Infos]
Field=
Type=
Elem_Number=0
Name=
Time_Step=-9999
Time=0
Layer=0
Max_Layer=0
Nest_grid=0
Max_NestG=0
[Structure]
X_Left_Corner=50
Y_Lower_Corner=110
Ncolumn=5
Nrows=4
[Data_Descript]
! Line 1      :  0  ,    0        , <  1 , 2 , 3 , Ncolumn  >
! Line 2      :  0  ,    0        , < X_Center_of_all_Columns >
! Line 2+1    :  1  , Y_of_Row_1    , < Field_Values_of_all_Columns > , Dy_of_Row_1
! Line 2+2    :  2  , Y_of_Row_2    , < Field_Values_of_all_Columns > , Dy_of_Row_2
! Line 2+Nrows : Nrows , Y_of_Row_Nrows , < Field_Values_of_all_Columns > , Dy_of_Row_2
! Line 3+Nrows :  0  ,    0        , <    Dx_of_all_Columns  >
[Data]
  0     0     1     2     3     4     5
  0     0    55  62.5  66.5    69    75
  1   165     4   4.5   7.2   8.1   9.6  10
  2   155   3.3   3.2   3.6     6     5  10
  3   140   1.5   2.2   4.3   5.5   6.6  20
  4   120    -7  -6.5  -5.5  -4.5  -3.5  20
  0     0    10     5     3     2    10
[End_Grid]
```

Figure 149 – Exemple de grille MARTHE de 5 colonnes de 4 lignes.

Dans le cas de la grille d'un champ uniforme (toutes les valeurs du champ identiques), la forme est simplifiée. (Figure 150).

En sortie de calcul, des paramètres supplémentaires sont indiqués (Code du champ, numéro d'élément chimique, numéro du pas de temps, date du pas de temps, etc.). Ces informations sont utilisées par le préprocesseur WinMarthe pour trier les résultats de calcul par type de donnée et selon les différents pas de temps. Il est ainsi possible d'exporter les valeurs de certains champs, à certains pas de temps, ou de réaliser des animations. Sur la Figure 150, ces champs sont renseignés (Concentration en Minéral n°2, qui est la Calcite, au pas de temps n°15, à la date 120, dans la couche n°1, d'un ensemble de 1 couche).

```
Marthe_Grid Version=9.0
Title=Exemple de Grille Marthe Uniforme                    CONCENTR  1
[Infos]
Field=CONCENTR
Type=Miner
Elem_Number=2
Name=Calcite
Time_Step=15
Time=120
Layer=1
Max_Layer=1
Nest_grid=0
Max_NestG=0
[Structure]
X_Left_Corner=50
Y_Lower_Corner=110
Ncolumn=5
Nrows=4
[Constant_Data]
Uniform_Value=7
[Num_Columns_/_x_/_dx]
1       2       3       4       5       Numéro des 5 colonnes
55      62.5    66.5    69      75      Abscisses des centres des 5 colonnes
10      5       3       2       10      Largeurs des 5 colonnes
[Num_Rows_/_y_/_dy]
1       2       3       4       Numéro des 4 lignes
165     155     140     120     Ordonnées des centres des 4 lignes (haut en bas)
10      10      20      20      Hauteurs des 4 lignes (haut en bas)
[End_Grid]
```

Figure 150 – Exemple de grille MARTHE relative à un champ uniforme.

Annexe 2
Coefficients d'échange entre mailles

Échanges latéraux

Le coefficient d'échange « T » entre 2 mailles adjacentes ayant une différence de charge « dH » permet de calculer le débit d'échange « Q » :

$$Q = T.dH$$

Dans le cas classique d'une moyenne harmonique, les coefficients d'échanges latéraux (T_N, T_S, T_E, T_O), respectivement dans les directions Nord, Sud, Est, Ouest, sont donnés par la relation suivante, écrite ici pour les échanges avec le Nord) :

$$T_N = 1/\left(\frac{1}{\frac{K \cdot dZ \cdot dX}{dY/2} / \sqrt{A_{Kx/Ky}}} + \frac{1}{\frac{K_N \cdot dZ_N \cdot dX}{dY_N/2} / \sqrt{A_{Kx/Ky}}} \right)$$

Soit en développant :

$$T_N = \frac{2 \cdot dX \cdot K \cdot dZ \cdot K_N \cdot dZ_N}{K \cdot dZ \cdot dY_N + K_N \cdot dZ_N \cdot dY} / \sqrt{A_{Kx/Ky}}$$

Avec :

K, K_N = Perméabilités horizontales

DX = Longueur de la maille (direction ox)

DY, DY_N = Largeurs des mailles (direction oy)

DZ, DZ_N = Épaisseur en eau des mailles (direction oz)

$A_{Kx/Ky}$ = Coefficient d'anisotropie plane de la perméabilité = K_{Ouest_Est} / K_{Nord_Sud}

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

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

Pour les échanges avec l'Est, on obtient :

$$T_E = \frac{2 \cdot dY \cdot K \cdot dZ \cdot K_E \cdot dZ_E}{K \cdot dZ \cdot dX_E + K_E \cdot dZ_E \cdot dX} \cdot \sqrt{A_{Kx/Ky}}$$

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

Échanges avec le haut et le bas

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

$$T_H = 1/\left(\frac{1}{\frac{K_V \cdot dX \cdot dY}{dZ/2}} + \frac{1}{\frac{K_{VH} \cdot dX \cdot dY}{dZ_H/2}} \right)$$

Soit en développant :

$$T_H = \frac{2 \cdot dX \cdot dY \cdot K_V \cdot K_{VH}}{K_V \cdot dZ_H + K_{VH} \cdot dZ}$$

Pour les échanges avec le bas, on obtient, en remplaçant l'indice « H » par l'indice « B » :

$$T_B = \frac{2 \cdot dX \cdot dY \cdot K_V \cdot K_{VB}}{K_V \cdot dZ_B + K_{VB} \cdot dZ}$$

Avec :

K_V, K_{VH} et K_{VB} = Perméabilités <u>verticales</u> du centre, du haut et du bas.

Annexe 3
Description des couches aquifères

On décrit ici en particulier les paramètres obsolètes du fichier des « couches aquifères », d'extension [.layer], conservés uniquement par compatibilité avec des modèles de systèmes aquifères de versions antérieures de MARTHE.

Pour chaque couche du domaine modélisé, on définit les 4 paramètres suivants :

Épaisseur moyenne approximative de la couche (en unité verticale).

C'est un ordre de grandeur, très sommaire, de l'épaisseur de la couche. Cette épaisseur est utilisée dans les calculs comme critère de précision pour tester les dénoyages ou les débordements de nappe. L'épaisseur est donnée en unité utilisateur de charge et d'altitude.

Présence d'une éponte au-dessus de la couche aquifère considérée

Valeur par défaut : 0 => Pas d'éponte au-dessus de la couche considérée.

- 0 = Non : Pas d'éponte au-dessus de la couche considérée. C'est le cas général dans un système monocouche ou tridimensionnel pur.
- 1 = Oui : Cas particulier considéré comme obsolète.

Unité de perméabilité verticale de l'éventuelle éponte supérieure

Valeur par défaut : 0 => Unité = 1.

Cette unité concerne uniquement les épontes, et non pas la perméabilité verticale des aquifères.

Il faut être vigilant car, par défaut, l'unité de perméabilité des épontes est différente de l'unité utilisateur de perméabilité.

Par exemple : Si on définit pour la couche n°2 une unité de perméabilité verticale de l'éponte égale à 10^{-4}, la perméabilité verticale qui sera lue pour l'éponte située au-dessus de la couche n°2, sera multipliée par 10^{-4}. En revanche, la perméabilité verticale de l'aquifère de la couche n°2 sera en unité utilisateur de perméabilité.

Coefficient d'anisotropie verticale dans l'aquifère de la couche considérée

Valeur par défaut : 0 => Coefficient d'anisotropie général défini dans le fichier des « Paramètres Généraux » dans le paragraphe des « unités utilisateur ».

Si on redéfinit dans ce fichier un coefficient d'anisotropie, pour une couche donnée, c'est ce coefficient qui sera alors utilisé uniquement pour cette couche.

Ce paramètre est considéré comme obsolète puisque il est possible de spatialiser le coefficient d'anisotropie verticale en utilisant le champ de coefficient d'anisotropie verticale. Il est alors possible de définir l'anisotropie verticale : par bloc de maille, par couche ou par zone.

Remarque : Si on donne une valeur négative, le code de calcul simule cette couche aquifère comme une éponte, c'est-à-dire avec un écoulement uniquement vertical. Dans ce cas, c'est alors la valeur absolue de l'anisotropie verticale qui est prise en compte. Par exemple, si on donne un coefficient d'anisotropie égal à -0.1, et si la perméabilité horizontale à la valeur 5 (unités de perméabilité), on aura dans cette couche :

- Une perméabilité verticale égale à 0.5 (unité de perméabilité)
- Une perméabilité horizontale égale à 0.

C'est une manière efficace de simuler une couche comme un formation ayant une très faible perméabilité horizontale, un peu comme une « éponte », tout en prenant en compte ses paramètres, en particulier sa porosité et son coefficient d'emmagasinement.

Il est ainsi possible de prendre en compte le transport de masse à travers ces couches.

Remarque au sujet des « épontes semi-perméables » :

Dans les domaines multicouches, les couches aquifères sont souvent séparées par des formations peu perméables, appelées parfois « formations semi-perméables » ou « aquitards ». On admet souvent que ces formations permettent des flux d'échanges quasi-verticaux.

Historiquement, pour limiter le nombre de couches de calcul, et ainsi diminuer les besoins en mémoire et en temps de calcul, le calcul de la charge hydraulique n'était pas effectué dans ces couches. Ces couches, qui servaient uniquement d'isolant pour contrôler les débits d'échange entre couches, sont appelées « épontes ». Elles sont caractérisées en toute maille par une épaisseur et une perméabilité verticale.

Cependant, l'inconvénient de considérer une couche comme une éponte est qu'elle n'a pas d'emmagasinement, ni de porosité et n'induit donc ni stockage/déstockage ni retard. En particulier, les calculs de transport de masse, de transfert thermique et trajectoires intra-couches sont donc incorrects.

En conséquence, la modélisation de couches comme des épontes n'est plus guère employée (mais cependant encore opérationnelle dans cette version de MARTHE).

Centre scientifique et technique
Direction Eau, Environnement et Écotechnologies
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr