

Synthèse

Cette note présente les fonctionnalités suivantes du code de calcul MARTHE v. 7.4 :

- Réseau hydrographique avec couplage avec les calculs hydrodynamiques et les calculs de transferts de masse.
- Réseau de drains ou de conduits (pouvant être mis en charge) avec transferts de masse et/ou d'énergie.
- Bilan Pluie - ETP - Ruissellement.

1 Introduction

Le code de calcul MARTHE (**M**odélisation d'**A**quifère par un maillage **R**ectangulaire en régime **T**ransitoire pour le calcul **H**ydrodynamique des **É**coulements) peut être couplé avec un réseau hydrographique (réseau de rivières) et avec un réseau de drains. D'autre part un bilan hydroclimatique (Pluie, ETP, Ruissellement, Infiltration) peut être réalisé sur les affleurements du système aquifère. Cette note présente les caractéristiques des réseaux hydrographiques et de drains ainsi que la mise en œuvre du bilan hydroclimatique.

2 Réseau Hydrographique

2.1 Organisation du réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est organisé en **affluents** eux même découpés en **tronçons**.

- Un affluent est un ensemble linéaire de tronçons (sans confluences).
- Chaque affluent peut avoir jusqu'à 3 affluents amont et 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.
- Chaque maille du modèle peut contenir au maximum un tronçon du réseau hydrographique.
- Le modèle hydrodynamique peut être monocouche ou multicouche.
- Dans le plan, les tronçons ou affluents voisins peuvent se situer dans les **8** directions voisines (N, S, E, O, NE, NO, SE, SO) donc incluant les obliques. Les voisins peuvent être dans les couches voisines à condition d'être sur la couche affleurante. Les voisins possibles dans des différentes couches sont donc dans les directions suivantes : H, HN, HS, HE, HO pour le haut et B, 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 18 directions possibles.

2.2 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 les tronçons ont des numéros de tronçon **croissants** de l'amont à l'aval. Ces numéros n'ont pas besoin d'être continus. Ils doivent être croissants dans un même affluent. Des affluents différents peuvent avoir le même numéro de tronçon. Le nombre d'affluents est limité à 999 ; le nombre de tronçons dans un même affluent est limité à 999. Le nombre total de tronçons n'est pas limité. Pour la commodité on peut découper un affluent (réel) en plusieurs affluents modèle en série

2.3 Cas particulier des « étangs » ou « estuaires »

Il est possible de simuler simplement des étangs (ou estuaires) comme des « Rivières », c'est à dire avec la même loi d'échange Nappe-Rivière. La cote de l'étang (ou 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 (inférieur à -3 puisque les n° -1, -2 et -3 ont un sens particulier). Leur « numéro de Tronçon », qui est inutilisé 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 ». Si on utilise des numéros d'Affluent différents pour chaque étang ou groupe d'étangs, on pourra obtenir un bilan séparé des échanges (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. On évite alors de devoir en numérotter les tronçons.

2.4 Données nécessaires : dans chaque maille

- Longueur du tronçon de cours d'eau (en unité de longueur du modèle)
- Largeur du tronçon de cours d'eau (en unité de longueur du modèle)
- Cote (absolue) du fond de la rivière (fond de l'eau) (en unité de charge)
- Épaisseur du lit de la rivière (en dessous du fond de l'eau) (en unité de charge)
- Perméabilité du lit de la rivière (en unité de perméabilité)
- Cote (absolue) de l'eau dans la rivière (en unité de charge)
- Débit injecté (ou pompé) dans la rivière (en unité de débit ; > 0 si injecté)
- Débit amont (sources) dans la rivière (dans les tronçons sources)
Si les calculs sont en régime transitoire :
- Débit (écoulement) initial dans la Rivière
Si on connaît une relation Hauteur-Débit Manning :
- Rugosité du lit de la rivière (adimensionnel ; de l'ordre de 0.02)
- Pente du lit de la rivière (adimensionnel ; de l'ordre de 1/100 à 1/1000).
- Si on prend en compte les transferts de masse :
- Débit massique éventuellement injecté (ou pompé) dans la rivière.

2.5 Données nécessaires : une seule fois :

- Arbre de branchement des affluents :
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 donne 0 comme numéro d'affluent aval.
- Si on prend en compte les transferts de masse :
Coefficient de diffusion de la concentration dans le réseau hydrographique.

2.6 Affectation ou modification des données :

Toutes les données de rivières (hauteurs, longueurs etc.) peuvent, comme les autres paramètres de MARTHE, être définies par Grille, par Zone, par Couche ou par Maille. Les données rivières peuvent en outre être définies par **tronçon** c'est à dire par couple « affluent-tronçon ».

2.7 Options de calcul

- Si on le souhaite on peut calculer des **hauteurs d'eau** dans les tronçons de la rivière : on admet une **loi de Manning** simplifiée ou complète.
- Si on a une relation hauteur débit (et si on est en transitoire) : on peut faire un **routing** (prenant en compte le stockage dans la rivière).
- Si on a une relation hauteur débit : on peut **imposer** en certaines mailles la **hauteur dans la rivière** : on fixe un débit injecté égal à 9999 ; le modèle calcule alors le débit à injecter (ou à prélever) pour maintenir cette hauteur.
- Schéma d'échange : plusieurs schémas d'échange sont possibles.
- Il est possible de prendre en compte les transferts de masse dans le réseau hydrographique et les échanges de masse avec la nappe.

2.8 Initialisation

- Si on ne donne pas de loi hauteur-débit (cas le plus simple) : on donne des hauteurs dans les tronçons de la rivière (ces hauteurs resteront inchangées).
- Si on donne une loi hauteur-débit : on peut donner des hauteurs initiales dans la rivière ou bien donner des débits dans les tronçons de la rivière, le modèle recalcule alors les hauteurs correspondantes. A chaque pas de temps le modèle calcule les débits et les hauteurs.
Si on prend en compte les transferts de masse :
- Concentrations initiales dans le réseau hydrographique.

2.9 Schémas numériques pour la résolution

Il faut définir les paramètres suivants :

- Nombre maximal d'itérations de calcul (pour la rivière)
- Variation maximum de débit entre 2 itérations pour convergence
- Coefficient de relaxation (éventuel)

Si on a une relation Hauteur-Débit + si en prend en compte le « routing », c'est-à-dire l'emmagasinement dans les tronçons de rivière :

- Schéma de résolution : résolution en **débit** ou résolution en **hauteur**

S'il n'y a pas de relation Hauteur-Débit : la résolution se fera toujours en débits

2.10 Résultats du calcul

2.10.1 Historiques disponibles dans des mailles sélectionnées

- Débit dans la rivière
- Débit échangé avec la nappe (> 0 si le débit alimente la nappe)
- Débit prélevé simulé (différent du débit souhaité si le débit du cours d'eau est insuffisant ou si la convergence est insuffisante)
- Hauteur dans la rivière (si on a donné une loi Hauteur-Débit)
Si on prend en compte les transferts de masse :
- Concentrations dans le réseau hydrographique.

2.10.2 Grilles

- Débit dans la rivière
- Débit échangé avec la nappe (> 0 si le débit alimente la nappe)
- Débit prélevé calculé (différent du débit souhaité si le débit du cours d'eau est insuffisant ou si la convergence est insuffisante)
- Hauteur dans la rivière (si on a donné une loi Hauteur-Débit)
Si on prend en compte les transferts de masse :
- Concentrations dans le réseau hydrographique.

2.11 Couplage avec le calcul Hydrodynamique de la nappe

Dans le cas général les calculs des débits des cours d'eau sont réalisés à chaque pas de temps. En revanche il est 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'eaux et les calculs de nappe aux mêmes pas de temps. C'est l'option par défaut.

```
*** Réseau Hydrographique, Drains, Lacs ***  
0=Calcul Rivière à tous pas de temps de modèle [0=idem calcul nappe ; 1=Tous]
```

Si on prend en compte les transferts de masse :

Le calcul du transfert de masse est calculé globalement dans l'aquifère est dans le réseau hydrographique.

3 Réseau de Drains ou de « Conduits »

Un ensemble de drains peut être introduit dans le modèle MARTHE. Ces drains peuvent (au choix) être :

- Hiérarchisés en réseau palmé exactement identique à un réseau hydrographique.
- Ou bien être des points indépendants sans relations amont-aval.

Possibilité aussi, dans le cas d'un réseau hiérarchisé, d'avoir un réseau de drains appelés « **conduits** » pouvant se mettre en charge (comme des conduits karstiques).

Le débit interne dans un tronçon de « conduits » ne dépend pas de relations amont-aval, comme dans le cas de drains classiques, mais de la différence de charge entre les tronçons voisins. A la différence d'un réseau de drains classiques, un réseau de conduits présente les fonctionnalités suivantes :

- Prise en compte de la hauteur d'eau dans le drain
- Possibilité de mises en charge
- possibilités de dénoyages
- Prise en compte du stockage dans les drains.
- Possibilité de prélèvements ou injections dans les drains.
- Possibilité d'imposer la charge localement dans le drain.
- Un affluent de « conduits » peut avoir plusieurs affluents avals.

Le réseau n'est alors plus « palmé »

3.1 Organisation du réseau de drains

Si les drains sont hiérarchisés en réseau, le réseau de drains est organisé en **affluents** eux même découpés en **tronçons** exactement comme un réseau hydrographique. Il est possible d'avoir simultanément un réseau de drain et un réseau hydrographique, ces 2 réseaux étant totalement indépendants. Une maille du modèle 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 se situer dans les **8** directions voisines (N , S , E , O , NE , NO , SE , SO) donc incluant les obliques. Les tronçons ou affluents voisins peuvent être dans les couches voisines dans les directions suivantes : H , HN , HS , HE , HO pour le haut et B , BN , BS , BE , BO pour le bas. (Donc au total il y a 18 directions possibles). Un drain peut être situé dans une couche qui n'affleure pas (conduit karstique par exemple). L'altitude du fond du drain doit être au moins égale à la cote au substratum de la maille correspondante

3.2 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 modèle où il y a un drain et les relations amont-aval. Pour les drains conduits le numéro de tronçon sert uniquement à décrire l'arborescence, et n'impose pas la direction amont-aval.

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

3.3 Données nécessaires : dans chaque maille contenant un drain

Drain classique :

- Longueur du tronçon de drain : en unité de longueur du modèle.
- Altitude du drain. C'est par exemple l'altitude du fond du drain : en unité de charge et d'altitude.

- Coefficient de Perméabilité du drain : en unité de perméabilité.
 $Q_{\text{échang}} = \text{Coef_Perm} * \text{Long_dra} * (H_{\text{nappe}} - H_{\text{drain}})$ [si $H_{\text{nappe}} > H_{\text{drain}}$]

Drain « Conduit » :

- Longueur du tronçon de drain : en unité de longueur du modèle.
- Largeur du tronçon de drain (section rectangulaire équiv.) : en unité de longueur.
- Hauteur (verticale) du tronçon de drain (section rectangulaire équivalente) : en unité de charge et d'altitude. Par défaut cette Hauteur verticale est égale à la largeur.
- Altitude du fond du drain : en unité de charge et d'altitude.
- Coefficient de Perméabilité du drain (sans dimension) : c'est un facteur multiplicatif sur la perméabilité de nappe pour calculer le débit d'échange nappe_drain :
 $Q_{\text{échang}} = \text{Coef_Perm} * \text{Perm_nap} * \text{'Satur_dra'} * \text{Long_dra} * (H_{\text{nappe}} - H_{\text{drain}})$
- Cote initiale de l'eau (charge initiale) dans le drain.
- Conductivité (perméabilité) du drain pour l'écoulement dans le drain : en unité de perméabilité.
 $\text{Débit_dans_drain} = \text{Section} * \text{Conductiv} * \text{Diff_Charge_drain_vois} / \text{Long}$
 $\Rightarrow 1 / \text{Conductiv.} = \text{Diff_Charge} / (\text{Longueur} * \text{Vitesse})$
- Débit extérieur injecté ou prélevé dans le drain.

3.4 Données nécessaires : une seule fois :

- 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 avals. 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 donne 0 comme numéro d'affluent aval.
Si on prend en compte les transferts de masse :
- Coefficient de diffusion de la concentration dans le réseau de drains « conduits ».

3.5 Affectation ou modification des données :

Toutes les données de drains (Numéros, altitudes, longueurs, perméabilités etc.) peuvent, comme les autres paramètres de MARTHE, être définies 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 ».

3.6 Options de calcul

On peut choisir entre :

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

3.7 Initialisation

Drain classique : Pas d'initialisation.

Drain « Conduit » : Charges initiales dans les tronçons de drain, Concentrations initiales dans les tronçons de drain.

3.8 Conditions aux limites

Drain classique : Pas de conditions aux limites.

Drain « Conduit » : Imposition de charges possible (par exemple en un exutoire, ou bien à l'amont) en fixant classiquement un débit_extérieur_drain égal à la valeur code 9999.

Concentrations à l'amont des affluents, imposition possibles de concentrations.

3.9 Schémas numériques pour la résolution

On peut définir les paramètres suivants (**uniquement pour un système hiérarchisé**) :

- Nombre maximal d'itérations de calcul (pour cumuler les débits des drains). Facultatif : par défaut ce nombre d'itérations est pris égal au nombre d'affluents.
- Variation maximum de débit entre 2 itérations pour convergence (des cumuls de débits).

3.10 Résultats du calcul

3.10.1 Historiques dans des mailles sélectionnées

- Débit dans les drains
- Débit échangé avec la nappe (> 0 si alimente la nappe)
- **Drain « Conduit »** : Également charges dans les tronçons de drain, Concentrations et/ou Températures dans les tronçons de drain.

3.10.2 Grilles

- Débit dans les drains
- Débit échangé avec la nappe (> 0 si alimente la nappe)
- **Drain « Conduit »** : Également charges dans les tronçons de drain, Concentrations et/ou Températures dans les tronçons de drain.

3.11 Schémas d'échange Drain-Nappe ou Conduit-Nappe

Drain classique :

Un drain classique ne peut que **drainer** une nappe ; il ne peut pas l'alimenter. Si la charge de la nappe est inférieure à l'altitude du drain, il n'y a pas de débit échangé.

Un tronçon de drain n'a pas de capacité (comme un tuyau de drainage) : il n'y a pas de hauteur d'eau dans le drain mais seulement une altitude. Cette altitude correspond par exemple au fond du drain. Le débit échangé $Q_{\text{échang}}$ - de la nappe vers le drain - est calculé comme suit :

$$Q_{\text{échang}} = K * L * (H_{\text{Nappe}} - \text{Alti}_{\text{Drain}})$$

Drain « Conduit » :

Un drain « conduit » peut **drainer** ou **alimenter** une nappe. Il peut même s'assécher et avoir une « charge équivalente » inférieure à son altitude. Un tronçon de conduit est caractérisé par une charge qui peut varier en régime transitoire, par un débit circulant dans le drain et par un débit d'échange positif ou négatif avec la nappe. Il a une capacité égale à son volume (égal à Largeur . Hauteur . Longueur puisqu'on le suppose rectangulaire pour simplifier). Le débit échangé $Q_{\text{échang}}$ est calculé comme suit :

$$Q_{\text{échang}} = \text{Coef_K_drain} * K_{\text{nappe}} * 'Satur_{\text{drain}}' * L * (H_{\text{nappe}} - H_{\text{drain}})$$

- 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 non perforée)

- Satur_drain = fonction du périmètre mouillé calculée automatiquement par le code de calcul

3.12 Débit dans un tronçon de drain

Drain classique :

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

Drain « Conduit » :

Le débit à l'intérieur d'un tronçon de drain_conduit dépend des différences de charge avec les 1 à 4 tronçons voisins (3 « amonts » au maximum et 1 aval au maximum), et de la charge en début de pas de temps. En fait la relation amont aval n'a aucune importance et sert uniquement à définir les branchements entre les tronçons (dans le futur on pourrait même considérer un réseau maillé et non pas palmé) : le débit échangé entre 2 tronçons adjacents dépend linéairement de la différence de charge entre ces 2 tronçons (ce qui suppose un débit laminaire) :

$$Q_{1_2} = \text{Section} * \text{Conductiv} * (H1 - H2) / \text{Long}$$

La conductivité est directement liée à la perte de charge linéaire du conduit. En effet :

$$(H1 - H2) = \text{PdC_U} * \text{Long} * \text{Vitesse}$$

avec PdC_U = Perte de Charge Unitaire [1/ (m/s)]

=> D'où Conductiv = 1 / PdC_U

4 Bilan Pluie - ETP - Ruissellement

A chaque pas de temps un bilan entre la pluie et l'Évapotranspiration Potentielle (ETP) peut être réalisé dans chaque « zone de pluie » du modèle. Ces zones sont donc en fait des « zones de bilan hydroclimatique » ou « zones de sol ». On peut ainsi calculer :

- Un excédent de pluie par bilan hydrologique Pluie / ETP faisant intervenir un « déficit maximal du sol » (Réserve Utile des agronomes), ou une « réserve progressive du sol ».
- L'excédent de pluie peut alors (si on le souhaite) être décomposé entre une **infiltration** (dans les mailles de la zone hydroclimatique) et un **ruissellement** qui est introduit au cours du pas de temps (sans propagation à la surface du sol) dans la maille rivière la plus proche s'il y a un réseau hydrographique. (Le ruissellement n'est pas introduit dans un réseau de drains). S'il n'y a pas de réseau hydrographique le ruissellement est infiltré dans la nappe comme l'infiltration.
- A noter que, 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 introduit dans le tronçon de rivière le plus proche. Le débordement suit donc un schéma analogue à celui du ruissellement. S'il n'y a pas de réseau hydrographique, le débordement quitte l'hydrosystème.
- Noter que si le bilan hydroclimatique produit de l'**infiltration** dans une maille qui n'est **pas aquifère** (perméabilité nulle) => cette infiltration se transforme en ruissellement qui rejoindra le réseau hydrographique.
- Il est également possible de définir les données hydroclimatiques (flux de pluie, flux d'ETP, Température de l'air) par zones Météo plutôt que de les définir par « zones de bilan hydroclimatique »

```
*** Hydroclimatologie ***
1=Type de Zones pour les Pluie, ETP, Recharge, [0=Zones de Sol ; 1=Zones Météo]
```

Attention : 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)

Exemple

- Une « Zone de Sol »
- Deux « Zones Météo » de Pluie et d'ETP
- PLUIE : constante donnée par Zones Météo
- ETP : constante donnée par Zones Météo

Dans le fichier des paramètres généraux

```
*** Hydroclimatologie ***
0=Type de Bilan Hydroclimatique [0=GARDÉNIA ; 1=Modsur ; 2=Ruissel,Recharge]
1=Type de Zones pour les Pluie, ETP,, [0=Zones de Sol ; 1=Zones Météo]
0=Nombre de Zones Climatiques dans les fichiers Météo Séquentiels [Déf=0]
```

Dans le fichier des pas de temps

```
*** Début de la simulation à la date : 0; ***
/ZONE_SOL /GRILLE N: =1 [définition d'une zone de sol sur tout le domaine]
/ZONE_METEO/MAILLE N: Mes_Zones_Meteo.meteo [définition des z. météo 50 et 80]
/FLUX_PLUV /ZONE_CLIM Z= 50V= 22;
/FLUX_PLUV /ZONE_CLIM Z= 80V= 35;
/FLUX_ETP /ZONE_CLIM Z= 50V= 15;
/FLUX_ETP /ZONE_CLIM Z= 80V= 12;
/*****/*****/ Fin de ce pas
```

On remarque la syntaxe : « /FLUX_PLUV / ZONE_CLIM » (ZONE_CLIM est interprété dans ce contexte comme une définition par « zone météo »)

- Par une option sélectionnée dans le paragraphe « Hydroclimatologie » du fichier des paramètres généraux, on peut obtenir la description du bilan hydrologique de chaque zone hydroclimatique (c'est à dire « zone de sol ») à chaque pas de temps.

```
*** Hydroclimatologie ***  
1=Sauvegarde des Bilans Hydroclimatiques par Zones
```

- Une **reprise à la nappe** est calculée par défaut quand le déficit maximal du sol est atteint et quand l'ETP est supérieure à la pluie. Cette reprise à la nappe peut être limitée ou supprimée par un paramètre du paragraphe « Hydroclimatologie » du fichier des paramètres généraux. Quand on modélise une nappe classique avec un bilan hydroclimatique (schéma GARDENIA par exemple), il est généralement conseillé de **supprimer cette reprise à la nappe**.

```
*** Hydroclimatologie ***  
1=Limitation de la Reprise à la Nappe par ETR [0=Non ; 1=Limitée ; 2=Supprimée]
```

Avec l'option 1, si on laisse les paramètres LIM_ETR_NAPP et ZERO_ETR_NAPP (voir ci-dessous) à zéro, la reprise à la nappe sera supprimée.

4.1 Bilan Pluie ETP

4.1.1 Paramètres physiques

Dans chaque zone hydroclimatique (« zone de sol ») on peut réaliser un bilan pluie / ETP suivant la méthode de Thornthwaite. Il faut alors définir dans chaque zone les paramètres suivants :

- Déficit en eau maximal du sol (exprimé en « unité des hauteurs d'infiltration et d'ETP » c'est à dire par défaut en mm) : Objet = RUMAX
- Coefficient correcteur global d'ETP exprimé en % : Objet = CORR_ETP

À la place d'un « Déficit en eau maximal du sol », on peut utiliser une « Capacité du sol progressive », également exprimée en « unité des hauteurs d'infiltration et d'ETP » :

- Capacité du sol progressive : Objet = CAP_SOL_PROGR

4.1.2 Variables

Dans chaque zone hydroclimatique (c'est-à-dire « zone de sol ») on a un état du déficit en eau dans le sol :

- Déficit du sol : Objet = DEFIC_SOL

Ce déficit en eau est exprimé dans la même unité que la valeur maximale RUMAX. Il évolue au cours du temps en fonction des précipitations et évaporations. Comme toutes les variables on peut lui donner une valeur initiale. Par exemple si on a un déficit maximal RUMAX = 80 mm et un sol initialement complètement saturé (par exemple au milieu de la saison humide) on fixe DEFIC_SOL = 0 : c'est la valeur par défaut. A l'opposé, pour la même valeur de RUMAX, si on démarre une simulation à la fin de la saison sèche, avec un sol complètement sec, donc avec un déficit maximal, on fixera DEFIC_SOL = 80 mm (ou même DEFIC_SOL = 999).

Si on utilise une « Capacité du sol progressive », l'état de son déficit est la variable :

- Déficit du Réservoir Sol progressif : Objet = DEF_SOL_PROGR, qu'il est possible d'initialiser.

À chaque pas de temps (ou en régime permanent) on peut introduire ou modifier 2 flux d'entrée :

- Le flux de pluie. Il est exprimé en « unité des Hauteurs Hydroclimatiques » par « unité des Durée hydroclimatiques » c'est à dire par exemple en mm/mois ou en mm/an :
Objet = FLUX_PLUV
- Le flux d'ETP (dans la même unité que les flux de pluie) : Objet = FLUX_ETP
Remarque : Il est généralement préférable d'utiliser ces nouvelles variables FLUX_PLUV et FLUX_ETP (toutes positives ou nulles) plutôt que la variable utilisée dans les versions précédentes : FLUX_INFILTR (positive = excédent de pluie ; négative = reprise à la nappe).

Par défaut si on ne définit pas les paramètres RUMAX, ou CAP_SOL_PROGR et CORR_ETP l'excédent de pluie est égal à la différence : FLUX_PLUV - FLUX_ETP.

4.2 Décomposition de l'excédent en infiltration et ruissellement

Cette décomposition est simulée par un réservoir appelé **H** (pour Hypodermique) caractérisé par 2 paramètres (le schéma est semblable à celui du modèle global **Gardénia** mais le schéma de Marthe est **continu** et donc indépendant de la durée du pas de temps).

4.2.1 Paramètres physiques

Dans chaque zone de bilan hydroclimatique (« zone de sol »), on peut définir les paramètres suivants :

- Durée de demi-percolation du réservoir H (exprimé en « Durée de référence des Hauteurs d'infiltration » c'est à dire en fait en « unité de temps des bilans hydroclimatiques » c'est à dire par exemple en mois) : Objet = T_DEMI_PERCOL
N.B. Attention : en **unité des Durées hydroclimatiques** et non pas en unité de temps des pas de modèle.
- Niveau du réservoir H correspondant à 50% d'infiltration et 50% de ruissellement - donc EQUiRUIssellement - (exprimé en « unité de Hauteurs hydroclimatiques » donc par défaut en mm) : Objet = EQU_RUIS_PERC.

4.2.2 Variables

Dans chaque zone hydroclimatique (« zone de sol ») on a un état du réservoir H :

- État initial : Objet = NIV_RESERV_H.
Cet état NIV_RESERV_H est exprimé dans la même unité que le niveau EQU_RUIS_PERC. Il évolue au cours du temps en fonction des précipitations, évaporations et percolations. Comme pour toutes les variables on peut lui donner une valeur initiale. Par défaut la valeur initiale est 0, c'est à dire un réservoir vide. Compte tenu que le niveau NIV_RESERV_H ne peut être mesuré ni rattaché simplement à des mesures, on donne en pratique une valeur initiale différente de 0 uniquement quand on veut enchaîner une simulation à la suite d'une simulation précédente.

4.3 Reprise par évapotranspiration à la nappe

Par compatibilité avec les schémas antérieurs, **par défaut** il peut y avoir une reprise par évapotranspiration à la nappe. Cette reprise peut cependant être limitée ou supprimée par une option sélectionnée dans le paragraphe « Hydroclimatologie » du fichier des paramètres généraux. Quand on modélise une nappe classique avec un bilan hydroclimatique (schéma GARDENIA par exemple), il est généralement 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 à des sur-concentrations.

*** Hydroclimatologie

1=Limitation de la Reprise par ETR à la Nappe [0=Non ; 1=Limitée ; 2=Supprimée]

Quand elle est autorisée la reprise à la nappe se produit uniquement quand le déficit maximal du sol est atteint sans que l'ETP ait pu être satisfaite. La limitation de la reprise à la nappe, quand elle est demandée dans le paragraphe « Hydroclimatologie », dépend de la profondeur de la nappe (et non pas de la zone hydroclimatiques). Elle est donc contrôlée par 2 paramètres qui peuvent être définis par Grille, par Couche, par Zone géométrique ou par Maille. Les 2 paramètres spatialisés qui contrôlent cette reprise à la nappe par évapotranspiration dont les suivants :

- Épaisseur désaturée pour laquelle la reprise par évapotranspiration n'est pas diminuée et se produit au taux de l'Évapotranspiration Potentielle. En nappe libre, tant que la charge est supérieure à la cote du toit de la nappe diminuée de cette épaisseur : la reprise par évapotranspiration à la nappe se produit au taux nominal. Cette épaisseur est en unité de charge. Objet = LIM_ETR_NAPP.
- Épaisseur, en dessous de la limite précédente, pour laquelle la reprise devient nulle. (Même unité). Objet = ZERO_ETR_NAPP.

Donc en résumé :

- si $HNAP > TOIT - LIM_ETR_NAPP$:
=> Reprise à la nappe au taux nominal de l'évapotranspiration résiduelle
- si $HNAP < TOIT - LIM_ETR_NAPP - ZERO_ETR_NAPP$:

- => Pas de reprise
- si $TOIT - LIM_ETR_NAPP < HNAP < TOIT - LIM_ETR_NAPP - ZERO_ETR_NAPP$:
=> Reprise diminuée par le rapport :
 $[HNAP - (TOIT - LIM_ETR_NAPP - ZERO_ETR_NAPP)] / ZERO_ETR_NAPP$

HNAP étant la charge de la nappe dans la couche affleurante.

N.B. Ces 2 épaisseurs spatialisées sont prises en compte **uniquement quand on a sélectionné, dans le paragraphe « Hydroclimatologie », une limitation de la reprise à la nappe.**

N.B. Donc si on choisit l'option « Limitation de la reprise » et qu'on laisse ces 2 paramètres (LIM_ETR_NAPP et ZERO_ETR_NAPP) égaux à zéro : Il n'y aura pas de reprise à la nappe.

4.4 Couplage avec le calcul Hydrodynamique de la nappe

Les calculs de bilan hydroclimatiques sont réalisés à chaque pas de temps. En revanche, il est 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.

Pendant les pas de temps intermédiaires, sans calculs hydrodynamiques de nappe, on considère que les niveaux de nappe ne changent pas et que les éventuels débits de débordement de la nappe vers les rivières restent constants. Si les niveaux des rivières ne changent pas les échanges nappe-rivière sont eux aussi constants. La somme de ces échanges sera donc appliquée à la nappe lors du prochain pas de calcul hydrodynamique (qui aura une durée égale au temps écoulé depuis le dernier calcul hydrodynamique).

Pour cela il y a 2 possibilités :

- Calculs hydrodynamiques périodiques. On définit dans le fichier des paramètres généraux une périodicité à laquelle sont réalisés les calculs hydrodynamiques de nappe :

```
*** Contrôle de la Résolution Hydrodynamique          ***
5=Périodicité des Calculs Hydrodynamiques [Déf=Tous les pas]
```

Dans cet exemple les calculs de nappe seront réalisés tous les 5 pas de temps. Pendant les 4 pas de temps intermédiaires on considère que les niveaux de nappe ne changent pas mais les flux de ruissellements et de débordement sont dirigés vers les rivières. La somme des flux de recharge sera appliquée à la nappe lors du 5^{ème} pas de temps en considérant une durée égale à la durée totale des 5 pas de temps.

- Calculs hydrodynamiques à certaines dates choisies.
Avec cette deuxième possibilité, les calculs hydrodynamiques sont activés, à certaines dates dans le fichier des pas de temps par l'objet « **CALCUL_HDYNAM / ACTIO** » :
- ACTIO : 1 = Active les calculs d'hydrodynamique à partir de cette date
- -1 = Désactive les calculs hydrodynamiques
- 2 = Active les calculs hydrodynamiques uniquement pour la date courante (puis désactivation automatique)

```
*** Le pas : 3: se termine à la date : 45; ***
/CALCUL_HDYNAM/ACTIO I= 1
/FLUX_INFILTR /ZONE_CLIM Z= 1V= 7;
/*****/*****/ Fin de ce pas
*** Le pas : 4: se termine à la date : 60; ***
/FLUX_INFILTR /ZONE_CLIM Z= 1V= 12;
/*****/*****/ Fin de ce pas
*** Le pas : 5: se termine à la date : 75; ***
/CALCUL_HDYNAM/ACTIO I= -1
/FLUX_INFILTR /ZONE_CLIM Z= 1V= 15;
```

```

/***** /***** Fin de ce pas
*** Le pas : 6: se termine à la date : 90; ***
/CALCUL_HDYNAM/ACTIO I= 2
/FLUX_INFILTR /ZONE_CLIM= 1V= 16;
/***** /***** Fin de ce pas
*** Le pas : 7: se termine à la date : 105; ***
/FLUX_INFILTR /ZONE_CLIM= 1V= 18;
/***** /***** Fin de ce pas

```

Dans l'exemple ci-dessus, l'hydrodynamique est activée au pas de temps n°3, se poursuit au pas de temps n°4. L'hydrodynamique est désactivée au pas de temps n°5 (CALCUL_HDYNAM = -1). Puis l'hydrodynamique est activée au pas n°6 (CALCUL_HDYNAM = 2) uniquement pour ce pas de temps n°6. Au total les calculs hydrodynamiques de la nappe sont réalisés aux pas de temps n°3, 4 et 6. Il n'y a pas de calculs hydrodynamiques de nappe aux pas de temps n°5 et n°7.

4.5 Utilisation de fichiers séquentiels de données climatiques

Les Flux de pluie, Flux d'ETP, Flux de Pluie nette (Pluie - ETP), Flux de ruissellement, Flux d'infiltration peuvent être donnés sous forme séquentielle dans des fichiers séparés. L'intérêt est une plus grande facilité d'introduction des données.

Les différentes possibilités sont les suivantes :

- Les Flux de pluie, Flux d'ETP, Flux de Pluie nette (Pluie - ETP), Flux de ruissellement, Flux d'infiltration peuvent être donnés :
 - Par « zones de sol » (99 zones au maximum)
 - Par « zones météo » (nombre de zones non limité)
- Dans le cas général, les données météo sont données par zones météo, différentes des zones de sol. Dans les cas simples les données météo peuvent être données par « zones de sol ». Il peut même n'y avoir qu'une seule zone.
- Introduction de la différence Pluie – ETP (pour mémoire) :
 - Le plus logique est d'avoir un fichier de flux de Pluie et un fichier de flux d'ETP (valeurs positives)
 - Il est cependant possible de mettre directement dans le fichier « pluie » la différence Pluie - ETP (pluie nette)
- Introduction des flux de ruissellement et des flux d'infiltration (calculés auparavant par un autre logiciel)

Attention : Si on utilise des « zones météo », les données météo seront prises en compte uniquement là où une zone de sol est définie (différente de 0)

Remarque : Comme on l'a vu plus haut, il est possible d'utiliser des « zones météo » pour définir classiquement des données météo, en dehors de fichiers météo séquentiels.

Exemple n°1

- 1 zone de sol
- PLUIE - ETP donné par « zones de sol » mais dans le fichier météo de nom « test1.m_plu »

Dans le fichier des paramètres généraux

```

*** Hydroclimatologie ***
0=Type de Bilan Hydroclimatique [0=GARDÉNIA ; 1=Modsur ; 2=Ruissel,Recharge]
0=Type de Zones pour les Pluie, ETP,, [0=Zones de Sol ; 1=Zones Météo]
1=Nombre de Zones Climatiques dans les fichiers Météo Séquentiels [Déf=0]

```

Dans le fichier des pas de temps

```

*** Début de la simulation à la date : 0; ***
/ZONE_SOL /GRILLE N: =1

```



```
/*****/*****/ Fin de ce pas
*** Le pas : 1: se termine à la date : 1; ***
/METEO_PLUIE/GRILLE N: test1.m_plu
/FLUX_PLUV /FICH_METE N= *
/*****/*****/ Fin de ce pas
```

Fichier test1.m_plu

Pluie moins Etp [*Titre descriptif*]

10.
10.
10.
-10.
5.
-8.

Exemple n°2 (conseillé)

- 1 zone de sol
- PLUIE donnée par « zones de sol » mais dans le fichier météo de nom « test2.m_plu »
- ETP donnée par « zones de sol » mais dans le fichier météo de nom « test2.m_etp »

Dans le fichier des paramètres généraux

idem

Dans le fichier des pas de temps

```
*** Début de la simulation à la date : 0; ***
 /ZONE_SOL /GRILLE N: =1
/*****/*****/ Fin de ce pas
*** Le pas : 1: se termine à la date : 1; ***
/METEO_PLUIE/GRILLE N: test2.m_plu
/METEO_ETP /GRILLE N: test2.m_etp
/FLUX_PLUV /FICH_METE N= *
/FLUX_ETP /FICH_METE N= *
/*****/*****/ Fin de ce pas
```

Fichier test2.m_plu

Pluie [*Titre descriptif*]

10.
10.
10.
0.
5.
0.

Fichier test2.m_etp

Etp [*Titre descriptif*]

0.
0.
0.
10.
0.
8.

Exemple n°3

- 1 zone de sol (Il est obligatoire d'avoir des « zone de sol » car le bilan Pluie – ETP s'effectue uniquement dans les mailles qui ont un numéro de « zone de sol » défini c'est-à-dire supérieur à 0)
- 2 Zones Météo pour les Pluie et d'ETP
- PLUIE : donnée par Zones Météo dans le fichier météo « test3.m_plu »
- ETP : donnée par Zones Météo dans le fichier météo « test3.m_etp »

Dans le fichier des paramètres généraux

```
*** Hydroclimatologie ***
0=Type de Bilan Hydroclimatique [0=GARDÉNIA ; 1=Modsur ; 2=Ruissel,Recharge]
1=Type de Zones pour les Pluie, ETP,, [0=Zones de Sol ; 1=Zones Météo]
2= Nombre de Zones Climatiques dans les fichiers Météo Séquentiels [Déf=0]
```

Dans le fichier des pas de temps

```
*** Début de la simulation à la date : 0; ***
 /ZONE_SOL /GRILLE N: =1 [Att Il est obligatoire d'avoir des zones de sol]
 /ZONE_METEO/GRILLE N: Mes_Zones_Meteo.meteo [définition des zones météo]
 /ZONE_METEO/MAILLE C= 1:20 L= *P= 1V= 1; [re-définition de zones météo]
/*****/*****/ Fin de ce pas
*** Le pas : 1: se termine à la date : 1; ***
 /METEO_PLUIE/GRILLE N: test3.m_plu
 /METEO_ETP /GRILLE N: test3.m_etp
 /FLUX_PLUV /FICH_METE N= * [Flux de pluie à tous les pas]
 /FLUX_ETP /FICH_METE N= * [Flux d'ETP à tous les pas]
/*****/*****/ Fin de ce pas
```

Fichier test3.m_plu

Pluie : 2 « Zones Météo » [*Titre descriptif*]

```
10. 20.
10. 20.
10. 20.
0. 0.
5. 10.
0. 0.
```

Fichier test3.m_etp

Etp : 2 « Zones Météo » [*Titre descriptif*]

```
0. 0.
0. 0.
0. 0.
10. 20.
0. 0.
8. 16.
```

Exemple n°4

- 1 « Zone de sol »
- 2 « Zones Météo » pour introduire du Ruissellement et de l'Infiltration
- Ruissellement : donné par Zones Météo dans le fichier météo « test4.m_ruis »
- Infiltration : donnée par Zones Météo dans le fichier météo « test4.m_rech »

Dans le fichier des paramètres généraux

```
*** Hydroclimatologie ***
2=Type de Bilan Hydroclimatique [0=GARDÉNIA ; 1=Modsur ; 2=Ruissel,Recharge]
1=Type de Zones pour les Pluie, ETP,, [0=Zones de Sol ; 1=Zones Météo]
2=Nombre de Zones Climatiques dans les fichiers Météo Séquentiels [Déf=0]
```

Dans le fichier des pas de temps

```
*** Début de la simulation à la date : 0; ***
```

```

/ZONE_SOL /GRILLE N: =1 [Att Il est obligatoire d'avoir des zones de sol]
/ZONE_METEO/GRILLE N: Mes_Zones_Meteo.meteo [définition des zones météo]
/ZONE_METEO/MAILLE C= 1:20 L= *P= 1V= 1; [re-définition de zones météo]
/*****/*****/ Fin de ce pas
*** Le pas : 1: se termine à la date : 1; ***
/METE_FL_RUIS/GRILLE N: test4.m_ruis
/METE_FL_RECH/GRILLE N: test4.m_rech
/RUISSEL /FICH_METE N= *
/RECHARGE /FICH_METE N= *
/*****/*****/ Fin de ce pas

```

Fichier test4.m_ruis

Ruissellement : 2 « Zones Météo » [*Titre descriptif*]

```

10. 20.
10. 20.
10. 20.
0. 0.
5. 10.
2. 4.

```

Fichier test4.m_rech

Infiltration : 2 « Zones Météo » [*Titre descriptif*]

```

20. 40.
20. 40.
20. 40.
0. 0.
10. 20.
4. 8.

```

Exemple n°5

- 2 « Zones de sol »
- Ruissellement et Infiltration donnés par « Zones de Sol ».

Dans le fichier des paramètres généraux

```

*** Hydroclimatologie ***
0= Type de Bilan Hydroclimatique [0=GARDÉNIA ; 1=Modsur ; 2=Ruissel., Recharge]
0= Type de Zones pour les Pluie, ETP,, [0=Zones de Sol ; 1=Zones Météo]
0= Nombre de Zones Climatiques dans les fichiers Météo Séquentiels [Déf=0]

```

Dans le fichier des pas de temps

```

*** Début de la simulation à la date : 0; ***
/ZONE_SOL/MAILLE C= 1:20 L= 1P= 1V= 1;
/ZONE_SOL/MAILLE C= 21:40 L= 1P= 1V= 2;
/*****/*****/ Fin de ce pas
*** Le pas : 1: se termine à la date : 1; ***
/RUISSEL /ZONE_CLIM Z= 1:2 V= 100;
/RECHARGE/ZONE_CLIM Z= 1:2 V= 80;
/*****/*****/ Fin de ce pas

```