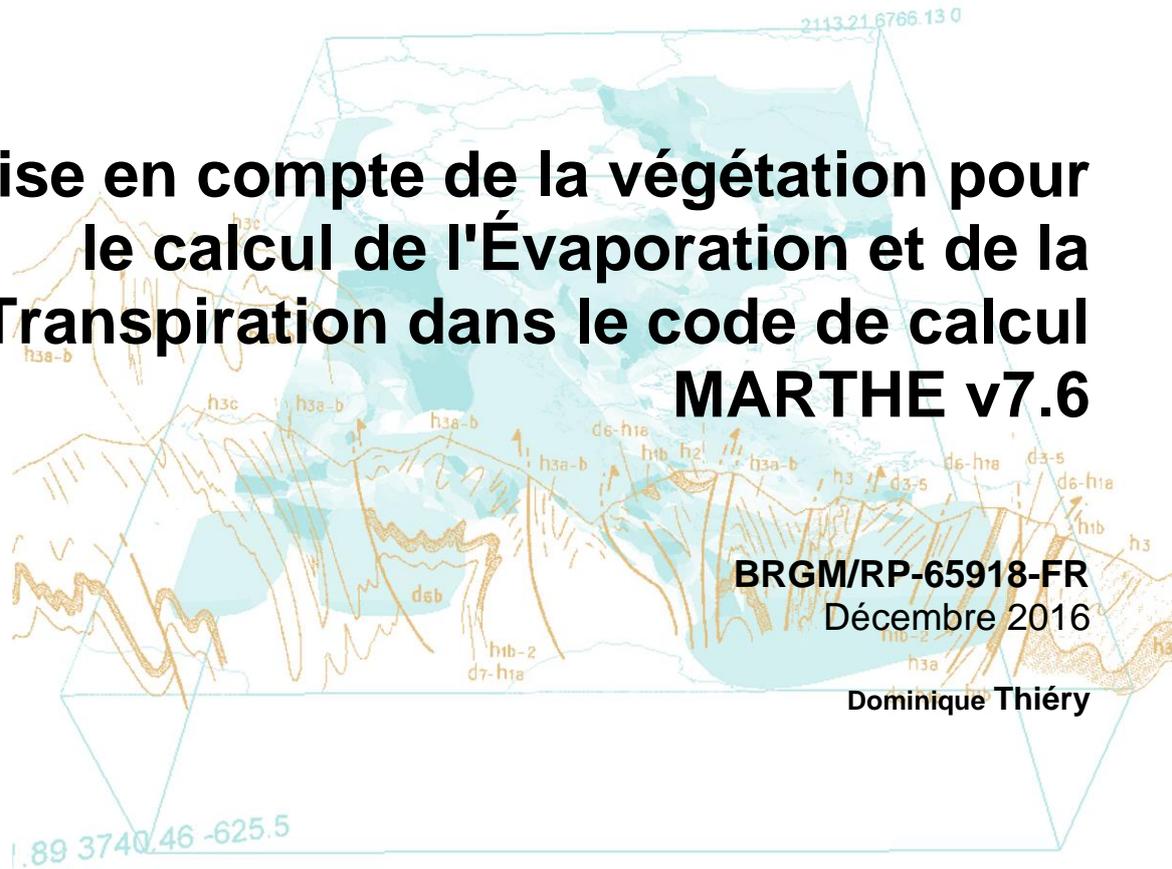




Prise en compte de la végétation pour le calcul de l'Évaporation et de la Transpiration dans le code de calcul **MARTHE v7.6**



BRGM/RP-65918-FR
Décembre 2016

Dominique Thiéry



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Prise en compte de la végétation pour le calcul de l'Évaporation et de la Transpiration dans le code de calcul MARTHE v7.6

BRGM/RP-65918-FR
Décembre 2016

Travail réalisée dans le cadre des projets
de Développement du BRGM 2015-2016

Dominique Thiéry

Vérificateur :

Nom : G. Colbeaux-Picot

Date : 06/10/2016

Signature : _____



Approbateur :

Nom : P. Audigane

Date : 20/01/2017

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 : Code de calcul MARTHE, Végétation, Couvert végétal, Évapotranspiration, Modélisation.

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

Thiéry D. (2016) – Prise en compte de la végétation pour le calcul de l'Évaporation et de la Transpiration dans le code de calcul MARTHE v7.6. Rapport BRGM/RP-65918-FR, 78 p., 47 fig.

© BRGM, 2016, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Pour mieux prendre en compte les effets de la végétation, les fonctionnalités suivantes ont été intégrées dans le code de calcul MARTHE :

- Séparation de l'évapotranspiration en une évaporation sur le sol et une transpiration par la végétation. Cette séparation dépend en particulier de l'état de développement des parties aériennes de la végétation (feuilles).
- Prélèvement d'eau par la végétation sur une profondeur variable qui dépend de l'état de développement des racines, et de leur répartition sur la verticale
- Limitation des prélèvements d'eau par la végétation selon l'éventuel état de stress de la végétation.

Par ailleurs, pour les transferts de masse (fertilisant, phytosanitaires), les fonctionnalités suivantes sont disponibles :

- Pas de prélèvement de masse par l'évaporation à la surface du sol.
- Prélèvement de masse par la transpiration des racines selon le produit (fertilisant etc.)

Ce rapport présente l'utilisation du code de calcul MARTHE® du BRGM, version 7.6 de Décembre 2016, pour réaliser des calculs d'écoulement d'eau dans les hydrosystèmes en prenant en compte l'influence du couvert végétal pour le calcul de l'Évaporation et de la Transpiration.

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

Sommaire

1. Introduction	11
2. Spatialisation et affectation des cultures	13
2.1. SPATIALISATION HORIZONTALE DES CULTURES.....	13
2.2. AFFECTATION DES CULTURES.....	14
3. Détermination de la transpiration (potentielle) de la végétation et de l'évaporation	17
3.1. TRANSPIRATION SELON LE SCHÉMA DE LEACHP.....	18
3.2. TRANSPIRATION SELON LE SCHÉMA DE MACRO 3.2.....	19
3.3. TRANSPIRATION SELON LE SCHÉMA AGRIFLUX	20
3.4. RÉSUMÉ DU CALCUL DE L'ÉVAPORATION AU SOL	22
4. Développement racinaire	23
4.1. PROFONDEUR D'ENRACINEMENT	23
4.2. DENSITÉ RACINAIRE	23
4.2.1. Densité racinaire constante (ou cylindrique).....	24
4.2.2. Densité racinaire conique.....	24
4.2.3. Densité racinaire hémisphérique.....	24
4.2.4. Densité racinaire à décroissance exponentielle	25
5. Prise en compte du stress hydrique	27
5.1. SCHÉMA MACRO	28
5.2. SCHÉMA SWAP	28
6. Prélèvement de masse par la végétation.....	29
7. Modélisation avec le code de calcul MARTHE	31
7.1. FICHER « PROFIL D'UTILISATION » DE MARTHE	31
7.2. FICHER « PARAMÈTRES GÉNÉRAUX » DE MARTHE.....	32
7.2.1. Cultures ⇔ Prise en compte explicite des Cultures.....	32
7.2.2. Type de Zones pour les Cultures et Nitrates	32
7.2.3. Schéma de transpiration et de développement de la végétation	32
7.2.4. Schéma de développement des racines et des prélèvements.....	32
7.2.5. Schéma de Stress Hydrique	32

7.2.6. Méthode de bilan de nitrates	33
7.2.7. Nombre de couches pour le bilan de nitrates.....	33
7.2.8. Les racines des cultures ne prélèvent pas de masse => Masse déjà prélevée 33	
7.2.9. Unité des données pour les apports / besoins en nitrates.....	33
7.2.10. Limitation de l'évaporation appliquée au domaine maillé [0=Non ; 1=Limitation ; 2=Suppression]	34
7.2.11. Type de Zones pour les Pluie, ETP, Recharge etc. [0=Zones de Sol ; 1=Zones Météo]	34
7.3. FICHIERS OU VARIABLES NÉCESSAIRES POUR LA PRISE EN COMPTE DES CULTURES	34
7.3.1. Fichier grille de : Numéro de Zone de Culture	34
7.3.2. Fichier : « Paramètres cultureux des cultures »	35
7.3.3. Numéro de la culture courante affectée à une zone.....	35
7.3.4. Paramètres relatifs au bilan hydroclimatique à réservoirs	40
7.3.5. Facteur sur la Concentration racinaire multi-composant	40
7.4. FICHER DES « PARAMÈTRES CULTURAUX DES CULTURES »	41
7.4.1. Description détaillée du fichier des « paramètres cultureux des cultures »41	
7.4.2. Récapitulation des paramètres utilisés par chaque schéma	44
7.4.3. Vérification des paramètres lus dans le fichier des « paramètres cultureux des cultures »	45
7.4.4. Valeurs de références pour des cultures classiques	45
8. Résultats de calcul relatifs aux cultures	47
8.1. ÉTAT DES CULTURES.....	47
8.2. BILAN HYDROCLIMATIQUE PAR ZONE.....	48
8.3. CHAMPS DE FLUX D'ETR ET DE TRANSPIRATION (POTENTIELLE).....	48
8.4. CHAMP DES NUMÉROS DE CULTURE COURANTS.....	48
8.5. HISTORIQUES.....	48
9. Exemples d'application	49
9.1. PARCELLE CULTIVÉE AVEC DU MAÏS SUR LE SITE DE LA CÔTE ST-ANDRÉ 49	
9.1.1. Définition du système modélisé	49
9.1.2. Modélisation avec MARTHE	51
9.1.3. Résultats obtenus pour la parcelle de maïs	53
9.1.4. Comparaison avec une parcelle de sol nu (sans culture).....	56
9.2. LYSIMÈTRE AVEC ROTATION DE CULTURES DE BLÉ, D'ORGE ET D'AVOINE SUR LE SITE DE JÜLICH.....	60
9.2.1. Définition du système modélisé	61

9.2.2. Modélisation avec MARTHE	63
9.2.3. Résultats obtenus pour le lysimètre de Jülich	64
10. Conclusions.....	69
11. Valeurs de référence pour les paramètres de culture.....	71
12. Références bibliographiques.....	77

Liste des figures

Figure 1 – Schéma LEACHP : Évolution au cours du temps de l'index CC.....	18
Figure 2 – Schéma MACRO : Évolution au cours du temps de l'index CC.....	19
Figure 3 – Schéma MACRO : Évolution au cours du temps du rapport Transpiration potentielle / Évapotranspiration potentielle..	20
Figure 4 – Schéma AGRIFLUX : Évolution au cours du temps du flux de transpiration (normé).21	
Figure 5 – Schéma AGRIFLUX : Évolution au cours du temps du cumul de la transpiration.....	21
Figure 6 – Densité racinaire selon 3 différents schémas. (La densité à décroissance exponentielle est calculée avec un facteur de forme égal à 3.67).....	25
Figure 7 – Définition du facteur de stress : Dans cet exemple : succ_fletr = 5000 cm, succ_max = 1000 cm, succ_min = 100 cm. Le seuil de facteur de stress est égal à 0.10....	28
Figure 8 – Sélection du fichier « Profil d'utilisation ».....	31
Figure 9 – Sélection de l'option « Cultures » dans le fichier « Profil d'utilisation ».....	31
Figure 10 – Introduction d'une « Nouvelle action » au pas de temps n°91.....	36
Figure 11 – « Nouvelle action » dans le thème « Bilan Hydroclimatique et Cultures ».....	36
Figure 12 – Choix de l'Objet « NUM_CULTUR ».....	37
Figure 13 – Affectation de la culture n°20 dans la zone de culture n°8.	37
Figure 14 – Affectation de la colonne n°2 du fichier « Bare3_Evol_Cultur_Rapport.prn » pour les « Numéros de culture » de la « Zone de culture » n°31.....	39
Figure 15 – Extraits du fichier « Bare3_Evol_Cultur_Rapport.prn ». « Numéros de culture » dans les « Zones de culture » n°21, n°31 et n°41, respectivement dans les colonne n°1 à n°3	39
Figure 16 – Fichier des « Pas de temps » au pas de temps n°0 après affectation du fichier « Bare3_Evol_Cultur_Rapport.prn » pour les « numéros de culture » des « zone de culture » n°21, n°31 et n°41.....	40
Figure 17 – Exemple de fichier de paramètres cultureux (1 ligne par culture).	41
Figure 18 – Exemple de fichier de paramètres cultureux : Partie gauche du fichier : paramètres n°1 à n°12. (Valeurs fictives : uniquement pour montrer la forme du fichier).	41
Figure 19 – Exemple de fichier de paramètres cultureux : Partie droite du fichier : paramètres n°13 à n°19 (Valeurs fictives : uniquement pour montrer la forme du fichier).	41
Figure 20 – Paramètres cultureux de 5 cultures (1 ^{ère} partie). Attention : les durées sont indiquées à partir de la date de germination et non à la date de semis comme défini dans MARTHE.....	45

Figure 21 – Paramètres culturaux de 5 cultures (2 ^{ème} partie).....	45
Figure 22 – Durées de développement de 8 cultures de référence en Picardie « T_Germi » = Durée du semis à la germination, « T_Maturité » = Durée du semis à la Maturité, « T_Récolte » = Durée du semis à la récolte. « dt_Matu_Germi » = Durée de Germination à Maturité ; « dt_Récolt_Germi » = Durée de Germination à Récolte.	46
Figure 23 – Choix de l'Objet « PARAM_CULTUR ».	47
Figure 24 – Site de la Côte St-André : Paramètres d'écoulement en Zone Non Saturée.....	50
Figure 25 – Site de la Côte St-André : Fichier des paramètres culturaux. Ce fichier comporte 6 lignes. Sur la figure la 6 ^{ème} ligne, qui comporte 19 colonnes, a été découpée en 2 une meilleure lisibilité. Seuls les paramètres en caractères gras sont utilisés pour ce calcul.	52
Figure 26 – Site de la Côte St-André : Débit de drainage calculé (en bas de la colonne).....	53
Figure 27 – Site de la Côte St-André : Flux d'ETP, d'ETR et de transpiration.....	54
Figure 28 – Site de la Côte St-André : Réduction de l'évapotranspiration Par le stress des racines (à gauche) ; Par la limitation de l'évaporation par la succion maximale (à droite).....	54
Figure 29 – Site de la Côte St-André : Évolution du couvert végétal et de la profondeur des racines	54
Figure 30 – Site de la Côte St-André parcelle de maïs période 1991-1993 : Observations et simulations. En haut : Pression à 15 cm ; en bas : Teneur en eau à 80 cm	55
Figure 31 – Site de la Côte St-André : saisons 1991, 1992 et 1993. Parcelle de maïs : Observations et simulations des composantes du bilan : ETP, ETR et Drainage Cumuls à partir de la date de semis.	56
Figure 32 – Site de la Côte St-André : saison 1991. Parcelle de maïs et parcelle de sol nu : Observations et simulations de la pression à 15 cm. En haut parcelle de maïs ; en bas : sol nu.....	57
Figure 33 – Site de la Côte St-André : saison 1992. Parcelle de maïs et parcelle de sol nu : Observations et simulations de la teneur en eau à 80 cm. En haut parcelle de maïs ; en bas : sol nu.....	58
Figure 34 – Site de la Côte St-André : saison 1992. Parcelle de maïs et parcelle de sol nu : Comparaison des débits de drainage calculés. En haut pour toute la période ; En bas à gauche en 1991, En bas à droite en 1992	59
Figure 35 – Site de la Côte St-André : saison 1991. Parcelle de maïs et parcelle de sol nu : Comparaison du drainage et de l'évapotranspiration réelle (ETP). En sol nu, le drainage total est doublé suite à une diminution de l'ETR	60
Figure 36 – Lysimètre de Jülich : Paramètres d'écoulement en Zone Non Saturée.....	62
Figure 37 – Site de Jülich : Fichier des paramètres culturaux. Sur la figure les 3 lignes des cultures n°1 à n°3, qui comportent chacune 19 colonnes, ont été découpées en 2 une meilleure lisibilité. Seuls les paramètres en caractères gras sont utilisés pour ce calcul.	64
Figure 38 – Site de Jülich : Simulation de l'ETR (en haut) et du cumul de l'ETR (en bas).....	65
Figure 39 – Site de Jülich : Simulation du cumul du débit de drainage en bas du lysimètre.	65
Figure 40 – Site de Jülich : Simulation de la teneur en eau à 25 cm et à 85 cm de profondeur.	66
Figure 41 – Site de Jülich : Évolution du couvert végétal et de la profondeur des racines. La profondeur maximale des racines est différente pour chaque culture.	67
Figure 42 – Récapitulatif des schémas et des paramètres culturaux dans le logiciel MARTHE.	72

Figure 43 – Paramètres culturaux de 5 cultures de référence (1 ^{ère} partie).....	73
Figure 44 – Paramètres culturaux de 5 cultures de référence (2 ^{ème} partie).....	73
Figure 45 – Durées de développement de 8 cultures de référence en Picardie « T_Germi » = Durée du semis à la germination, « T_Maturité » = Durée du semis à la Maturité, « T_Récolte » = Durée du semis à la récolte. « dt_Matu_Germi » = Durée de Germination à Maturité ; « dt_Récolt_Germi » = Durée de Germination à Récolte.	73
Figure 46 – Exemples de facteurs de coefficients culturaux KC reliant l'évapotranspiration d'une culture à une évapotranspiration de référence. D'après : « Generic guidance for FOCUS groundwater scenarios Version: 1.1 April 2002 »	74
Figure 47 – Paramètres culturaux pour la ville de Châteaudun (France). D'après : « Generic guidance for FOCUS groundwater scenarios Version: 1.1 April 2002 »	75

1. Introduction

Les interactions de l'atmosphère avec les couches superficielles du sol dépendent de la végétation (ou culture) qui le recouvre. La végétation induit deux effets principaux :

- Une transpiration qui dépend de l'état de la végétation,
- Un prélèvement de masse (fertilisant, phytosanitaires).

Classiquement dans le code MARTHE (Thiéry, 1993, 2015a, 2015b, 2015c, 2015d, 2015e) il est possible d'utiliser la notion d'« Évapotranspiration Potentielle » ETP et :

- Soit d'en déduire l'Évapotranspiration Réelle ETR, par un algorithme représentant globalement la végétation, par exemple l'algorithme de Thornthwaite qui fait intervenir la notion de « Réserve Utile » ou de « réservoir sol progressif » (module GARDÉNIA) (Thiéry, 2014, 2015f),
- Soit de limiter l'ETP par une succion maximale pour obtenir l'ETR,
- Soit d'introduire directement en entrée une ETR pré calculée.

Dans cette approche classique, les prélèvements par la végétation sont appliqués à la couche superficielle, ce qui est réaliste dans les cas classiques d'aquifères monocouche ou multicouches d'épaisseur au moins métrique. Cependant dans les cas de calculs en Zone Non Saturée avec une représentation fine du sol, c'est-à-dire avec une couche superficielle de quelques centimètres, ce schéma n'est pas bien adapté. Il conduit en effet à essayer de prélever par « évapotranspiration » un fort débit dans une couche mince ce qui tend à la désaturer fortement générant de très faibles perméabilités et de très fortes succions. Ces fortes succions peuvent alors dépasser la « succion maximale » fixée par un paramètre du code MARTHE. Le débit prélevé par évaporation est alors diminué.

Dans la réalité les phénomènes sont beaucoup complexes que ceux simulés par la prise en compte d'une simple « réserve utile ».

Pour mieux prendre en compte les effets de la végétation les fonctionnalités suivantes sont disponibles dans le code de calcul MARTHE :

- Répartition de l'évapotranspiration en une évaporation appliquée au sol et une transpiration provoquée par la végétation. Cette répartition dépend en particulier de l'état de développement des parties aériennes de la végétation (feuilles),
- Prélèvement d'eau par la végétation sur une profondeur variable, qui dépend de l'état de développement des racines, et de leur répartition sur la verticale,
- Limitation des prélèvements selon l'éventuel état de stress de la végétation.

Par ailleurs, pour les transferts de masse (fertilisant, phytosanitaires), les fonctionnalités suivantes sont disponibles :

- Pas de prélèvement de masse par l'évaporation à la surface du sol,
- Prélèvement de masse par la transpiration des racines selon le produit (fertilisant etc.).

Quand les données sont disponibles, il est ainsi possible de prendre en compte ces fonctionnalités **en remplacement** d'un bilan avec des réservoirs sol de type GARDÉNIA.

Remarques :

- Il existe un grand nombre de lois macroscopiques pour décrire les effets de la végétation. Ces « lois » apparaissent le plus souvent dans la littérature avec assez peu de justifications de la part des auteurs, et leur domaine d'application est en général peu décrit. Dans le code MARTHE, seules les formulations classiques utilisées dans un certain nombre de codes de calcul de référence des écoulements en Zone Non Saturée ont été implémentées : les formulations de LEACHP, MACRO, AGRIFLUX. Les formulations implémentées ont été choisies en fonction de leur simplicité et de leur possibilité d'introduction dans le code MARTHE sans en restreindre la généralité.
- Ces fonctionnalités permettent de mieux se rapprocher des phénomènes réels mais ce ne sont cependant que de grandes simplifications par rapport à la réalité qui est beaucoup complexe.
- Le but de ces fonctionnalités est de mieux prendre en compte l'effet de la végétation sur les écoulements et transferts de masse dans les sols et l'alimentation des nappes souterraines. Le modèle MARTHE n'est donc en aucune manière un code de calcul agronomique et son objectif n'est pas la simulation du développement de la végétation en tant que tel ou du rendement des cultures.
- Dans ce rapport les termes « culture » ou « végétation » sont employés avec la même signification.

Ce rapport présente l'utilisation du code de calcul MARTHE® du BRGM, version 7.6 de Décembre 2016, pour réaliser des calculs d'écoulement d'eau dans les hydrosystèmes en prenant en compte l'influence du couvert végétal pour le calcul de l'Évaporation et de la Transpiration.

Pour réaliser efficacement des calculs avec prise en compte des effets de la végétation, il est nécessaire de lire les notices d'utilisation suivantes :

- Code de calcul MARTHE - [Modélisation 3D des écoulements dans les hydrosystèmes](#) - Notice d'utilisation de la version 7.5. [BRGM/RP-64554-FR](#) (Thiéry 2015a).
- [Modélisation 3D des écoulements en Zone Non Saturée](#) avec le code de calcul MARTHE – version 7.5. [BRGM/RP-64495](#) (Thiéry 2015b) : pour les calculs avec schéma ZNS
- Modélisation 3D du [transport de masse et du transfert thermique](#) avec le code de calcul MARTHE – version 7.5. [BRGM/RP-64765-FR](#) (Thiéry 2015c) : pour le transfert de masse. (*Uniquement pour des transferts de masse et d'énergie*).

Il est également fortement conseillé de lire le « didacticiel de modélisation » :

- « [Didacticiel du code de calcul MARTHE v7.5](#). Exploration des fonctionnalités de modélisation des hydrosystèmes. Rapport [BRGM/RP-64997-FR](#) » (Thiéry 2015d).

Il est également conseillé de lire le didacticiel d'utilisation du préprocesseur graphique WinMarthe :

- « Didacticiel du préprocesseur [WinMarthe v4.0](#). [BRGM/RP-54652-FR](#) » (Thiéry, 2006).

Des informations détaillées sur le code de calcul MARTHE® du BRGM sont disponibles sur le site : <http://marthe.brgm.fr/>

2. Spatialisation et affectation des cultures

2.1. Spatialisation horizontale des cultures

Le code MARTHE (Thiéry 1993, 2006, 2007, 2015a, 2015b, 2015c, et 2015d) fait intervenir, en chaque maille affleurante du domaine modélisé, trois indices de zone :

- Un numéro de zone météorologique : fichier « **Numéro de Zone Météo (pour Pluies ...)** » (objet = **ZONE_METEO**, Extension [**.meteo**]).

À une date donnée toutes les mailles ayant un même numéro de zone météorologique reçoivent les mêmes flux de précipitation, d'ETP et la même température de l'air (pour l'éventuelle fonte de la neige). Ces trois flux peuvent bien entendu varier à chaque date, donc à chaque pas de temps.

Un numéro de zone météorologique doit être supérieur à 0, mais il n'y a pas de nombre maximal de zones météorologiques (seule la zone n°9999 est ignorée).

- Un numéro de zone de sol : fichier « **Zones de Sol** » (objet = **ZONE_SOL**, d'extension de fichier [**.zonep**]).

Toutes les mailles ayant un même numéro de zone de sol ont des paramètres de bilan « hydroclimatique » identiques. Ces paramètres de bilan hydroclimatique contrôlent en particulier la fonte de la neige (degré-jour ...), la répartition entre recharge et ruissellement (« hauteur d'équi-ruissellement ... »). D'autres paramètres sont des paramètres globaux contrôlant le bilan du sol (correction d'ETP, capacité de la réserve utile ...). Les paramètres globaux réglant le bilan du sol ne devraient a priori pas être utilisés, quand on prend en compte de manière détaillée les effets de la végétation.

Un numéro de « zone de sol » doit être compris entre 1 et 500.

Attention : Le bilan hydroclimatique et la prise en compte des cultures sont réalisés uniquement dans les mailles ayant un « Numéro de zone de Sol » défini, c'est-à-dire non nul.

- Un numéro de zone de culture : fichier « **Numéro de Zone de Culture** » (objet = **ZONE_CULTUR**, d'extension de fichier [**.zcult**]).

À une date donnée toutes les mailles ayant un même numéro de « zone de culture » sont occupées par la même culture, identifiée par un « Numéro de Culture ». À n'importe quelle date, la culture affectée à cette zone peut changer pour prendre en compte un changement d'occupation du sol (nouvelle culture, moisson ...). En revanche, l'extension spatiale de chaque zone de culture ne peut pas varier au cours du temps : il est donc nécessaire d'utiliser le plus petit parcellaire commun aux différentes rotations culturales.

Le terme « zone de culture » désigne en pratique une zone de « végétation ». La végétation peut par exemple être de la prairie, de la forêt, ou même du sol nu, qui sont des cas particuliers de « culture ».

Un numéro de « zone de culture » doit être compris entre 1 et 99. Un numéro de zone de culture égal à « 0 » correspond à un sol nu (sans culture).

En revanche, on verra qu'un « Numéro de Culture » doit être compris entre 1 et 999.

Remarque : Il est possible de définir des « zones météorologiques » et des « zones de sol » se rapportant à n'importe quelle maille de la couche affleurante du domaine, même s'il n'y a aucune couche aquifère dans les horizons sous-jacents. Les éventuels écoulements produits seront alors transformés en ruissellement qui sera transféré vers les éventuels cours d'eau.

Remarque : Les numéros de « zone météorologique », les numéros de « zone de sol », et les numéros de « zone de culture » se rapportent aux mailles de la couche affleurante du domaine, mais elles sont définies dans la « Couche n°0 ». En pratique dans les fichiers de MARTHE elles sont écrites dans la couche n°1.

En résumé :

Un numéro de « Zone de Culture », affecté à chaque maille affleurante du domaine, est utilisé pour la prise en compte des cultures. (n°1 à n°99).

Dans une « Zone de Culture » se succéderont des cultures identifiées par leur « Numéro de Culture ».

Ce numéro de Zone de Culture sera utilisé uniquement :

- Si, dans le [paragraphe « Cultures, Nitrates »](#) du fichier des « Paramètres généraux », on a choisi l'option « Cultures et Nitrates : par zones de Cultures ».
- Sinon : les cultures seront définies par « Zone de Sol ».

*** Cultures, Nitrates ***
 1 = Type de Zones pour les Cultures et Nitrates [0=Zones de Sol ; 1=Zones de Cultures]

2.2. Affectation des cultures

À n'importe quelle date, c'est-à-dire à n'importe quel pas de temps de modèle, on peut affecter une culture dans une « zone de culture ». Pour cela on utilise l'objet « NUM_CULTUR » (Numéro de culture) qui affecte à partir de cette date un numéro de culture dans une zone de (culture) donnée. C'est dans le « fichier des pas de temps » de MARTHE, d'extension de fichier [.pastp], que sont affectées les cultures.

Les paramètres relatifs à chaque culture sont définis dans un fichier spécifique appelé [fichier des « Paramètres cultureux des cultures »](#) (objet = **PARAM_CULTUR**, d'extension de fichier [.fcult]) qui sera décrit plus bas et dont les paramètres utilisés dépendent des schémas de cultures choisis.

Ce fichier définit en particulier pour chaque culture :

- Une durée de germination : **Durée_Germin** qui est la durée de la période qui s'étend depuis le semis jusqu'à la germination,
- Une durée de maturité : **Durée_Matur** qui est la durée de la période qui s'étend depuis le semis jusqu'à la maturation,
- Une durée de récolte : **Durée_Récolte** qui s'étend depuis le semis jusqu'à la récolte.

- Des paramètres dépendant des schémas utilisés (LEACHP, MACRO, AGRIFLUX, SWAP) contrôlant le développement du couvert végétal, le développement des racines et le stress de la végétation.

L'affectation d'une culture à une zone au cours d'un pas de temps fait démarrer la végétation dans cette zone. La date de semis dans cette zone est alors égale à la date du début du pas de temps de modèle auquel un numéro de culture est indiqué.

L'affectation d'un numéro de culture égal à 9999 dans une zone arrête la culture dans cette zone (récolte ou moisson anticipée). Il n'y a alors plus de transpiration dans cette zone.

Attention : Ne pas confondre « Numéro de Culture » et « Numéro de Zone de Culture ».

3. Détermination de la transpiration (potentielle) de la végétation et de l'évaporation

Dans le code de calcul MARTHE il y a trois schémas de transpiration possibles :

- Le schéma de LEACHP,
- Le schéma de MACRO 3.2,
- Le schéma d'AGRIFLUX.

Le schéma de transpiration est choisi par un paramètre du [paragraphe « Cultures, Nitrates »](#) du fichier des « paramètres généraux » [.mart] :

```
*** Cultures, Nitrates          ***
  1 = Schéma de Transpiration et Dévelop. de la Végétation [1=Leachp ; 2=Macro ; 3=Agriflux]
```

Le schéma de transpiration choisi s'applique à toutes les cultures.

Comme pour les bilans hydroclimatiques, dans le modèle MARTHE le calcul de la transpiration potentielle et de l'évaporation est réalisé à chaque « pas de temps de modèle », pour toute la durée du pas de temps de modèle (indépendamment des éventuels sous-pas de temps de calcul).

Quel que soit le schéma de transpiration choisi, MARTHE commence par appliquer au flux d'évapotranspiration potentielle un coefficient cultural **KC**, qui dépend de la culture mais, reste constant pendant toute la période de la culture. Ce coefficient **KC**, adimensionnel, est généralement proche de 1. (Sa valeur est fixée dans le fichier des « [Paramètres cultureux des Cultures](#) »).

$$ETP_Cor = ETP \cdot KC$$

Remarque : **KC** est appliqué au flux d'évapotranspiration potentielle, et non pas uniquement au flux de transpiration potentielle par la végétation.

MARTHE calcule alors le flux de transpiration potentielle **Transpi_Potent** de la végétation. Ce flux de transpiration dépend du développement foliaire de la culture. C'est un flux de transpiration « potentiel » parce qu'il pourra être réduit en cas de stress hydrique des plantes.

Le développement foliaire est caractérisé par :

- Un indice de couverture végétal (**Crop Cover**) : dans le schéma LEACHP,
- Un indice foliaire (**Leaf Area Index**) : dans le schéma MACRO,
- Un besoin global pour toute la saison : dans le schéma AGRIFLUX.

Remarque : Pour toutes les illustrations qui suivent, en temps adimensionnel, on a affecté le temps adimensionnel 100 % à la maturité et 150 % à la récolte.

3.1. Transpiration selon le schéma de LEACHP

Selon le schéma LEACHP (Hutson 2000), on calcule un index de couverture végétale **CC** (Crop Cover) adimensionnel, qui varie entre 0 et **CCmax**. **CCmax** est un paramètre qui dépend de la culture, dont la valeur inférieure à 1 est définie dans le fichier des « [Paramètres cultureux des Cultures](#) ».

Cet index **CC** est calculé de la manière suivante :

- Avant la germination : $CC = 0$
- À partir de la maturité (et avant la récolte) : $CC = CC_{max}$
- Après la récolte : $CC = 0$
- De la période s'étendant de la germination à la maturité **CC** varie de 0 à **CCmax** selon une courbe sigmoïde :

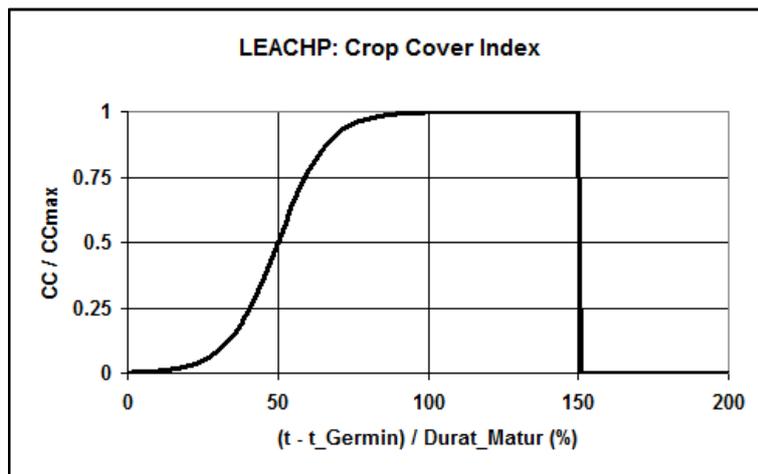
$$CC / CC_{max} = \frac{1}{1 + \exp\left[6 - 12\left(\frac{t - t_{Germin}}{Durée_Matur}\right)\right]}$$

On remarque qu'en fait :

- Pour $t = t_{Germin}$: $CC / CC_{max} = CC_{début} = \frac{1}{1 + \exp(+6)} = 0.00247$
- Pour $t = t_{Maturité}$: $CC / CC_{max} = CC_{fin} = \frac{1}{1 + \exp(-6)} = 0.99753$

On a donc choisi de corriger de la manière suivante la valeur de CC/CC_{max} calculée :

$CC/CC_{max_corrig} = (CC / CC_{max} - CC_{début}) / (CC_{fin} - CC_{début})$ qui varie alors exactement de 0 à 1 (au lieu de 0.00247 à 0.99753).



Ayant calculé la valeur de **CC**, le flux de transpiration potentielle **Transpi_Potent** est donné par :

$$\text{Transpi_Potent} = \text{ETP_Corr} \cdot \text{CC}$$

$$\text{Évaporation} = \text{ETP_Corr} \cdot (1 - \text{CC})$$

3.2. Transpiration selon le schéma de MACRO 3.2

Le schéma MACRO (Jarvis 1994, 2002) fait intervenir un index foliaire **LAI** (Leaf Area Index) adimensionnel, qui varie entre 0 et environ 5. Les paramètres permettant de calculer l'index LAI dépendent de la culture et sont définis dans le fichier des « [Paramètres cultureux des Cultures](#) ». Ces paramètres, au nombre de 5 sont les suivants :

- **LAImin** (généralement 0) avant la germination,
- **LAImax** (de l'ordre de 3 à 5) à la date de la maturité,
- **LAIrécolte** (de l'ordre de 1) à la date de la récolte,
- **x1** exposant (de l'ordre de 2),
- **x2** exposant (de l'ordre de 0.7).

L'index **LAI** est calculé de la manière suivante :

- Avant la germination : $\text{LAI} = \text{LAImin}$
- À la date de maturité : $\text{LAI} = \text{LAImax}$
- À la récolte : $\text{LAI} = \text{LAIrécolte}$
- Après la récolte : $\text{LAI} = 0$
- De la germination à la maturité :

$$\text{LAI} = \text{LAImin} + (\text{LAImax} - \text{LAImin}) \cdot [(t - t_{\text{Germin}}) / \text{Durat_Matur}]^{\text{x1}}$$
- De la maturité à la récolte :

$$\text{LAI} = \text{LAIrécolte} + (\text{LAImax} - \text{LAIrécolte}) \cdot [(t_{\text{Récolte}} - t) / (t_{\text{Récolte}} - t_{\text{Matur}})]^{\text{x2}}$$

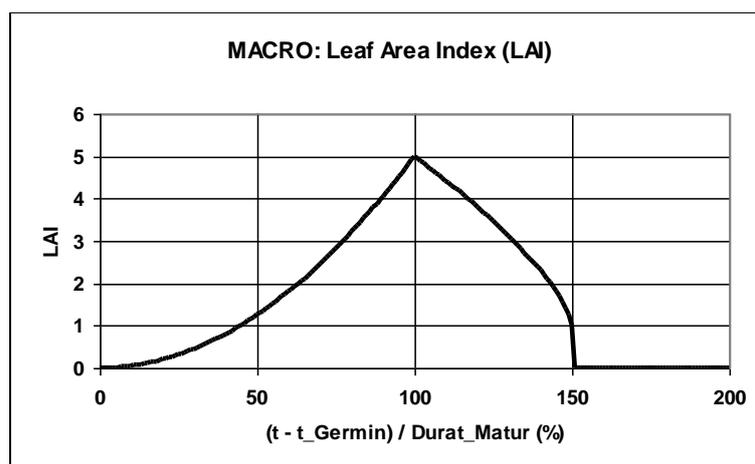


Figure 2 – Schéma MACRO : Évolution au cours du temps de l'index CC.

Ayant calculé la valeur de **LAI**, le flux de transpiration potentielle **Transpi_Potent** est donné par :

$$\text{Transpi_Potent} = \text{ETP_Corr} \cdot [1 - \exp(-0.6 \cdot \text{LAI})]$$

$$\text{Évaporation} = \text{ETP_Corr} \cdot \exp(-0.6 \cdot \text{LAI})$$

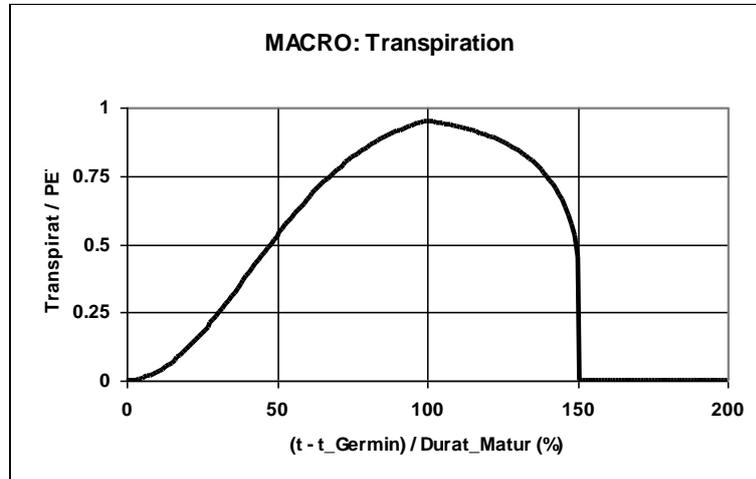


Figure 3 – Schéma MACRO :
Évolution au cours du temps du rapport Transpiration potentielle / Évapotranspiration potentielle..

3.3. Transpiration selon le schéma AGRIFLUX

Le schéma AGRIFLUX (Banton et al. 1997) fait intervenir, pour chaque culture, un besoin total **Transpir_Tot**, pour toute la période de développement de cette culture. Ce besoin total **Transpir_Tot** est défini dans le fichier des « [Paramètres cultureux des Cultures](#) ». Il est exprimé en unité de hauteur hydroclimatique, par exemple en mm. La répartition au cours du temps du flux de transpiration suit alors une courbe de Gauss (loi Normale), centrée sur le milieu de la période de croissance (de la germination à la maturité) et dont la durée de maturation correspond à 6 écart-types. La date de germination correspond alors à -3 écart-types, et la date de maturité correspond à +3 écart-types.

Le flux de transpiration (potentielle) entre 2 dates t_1 et t_2 pendant la période de croissance est donc obtenu par intégration :

- Avant la germination ou après la maturité : $\text{Transpir} = 0$
- Pendant la période de croissance on obtient par intégration :

$$\text{Transpir} = \text{Transpir_Tot} \cdot [\text{Gauss}(u_2) - \text{Gauss}(u_1)] / (t_2 - t_1)$$

avec :

$$t_{\text{moy}} = (t_{\text{Germin}} + t_{\text{Maturité}}) / 2$$

$$\text{sigm} = (t_{\text{Maturité}} - t_{\text{Germin}}) / 6$$

$$u_1 = (t_1 - t_{\text{moy}}) / \text{sigm}$$

$$u_2 = (t_2 - t_{\text{moy}}) / \text{sigm}$$

Gauss = fonction Gauss (loi Normale centrée réduite cumulée).

En fait, pour tenir compte que « Gauss(+3) – Gauss(-3) » est légèrement inférieur à 1 (contrairement à « Gauss(+∞) – Gauss(-∞) ») la valeur obtenue de « Transpir » est multipliée par 1.0027069

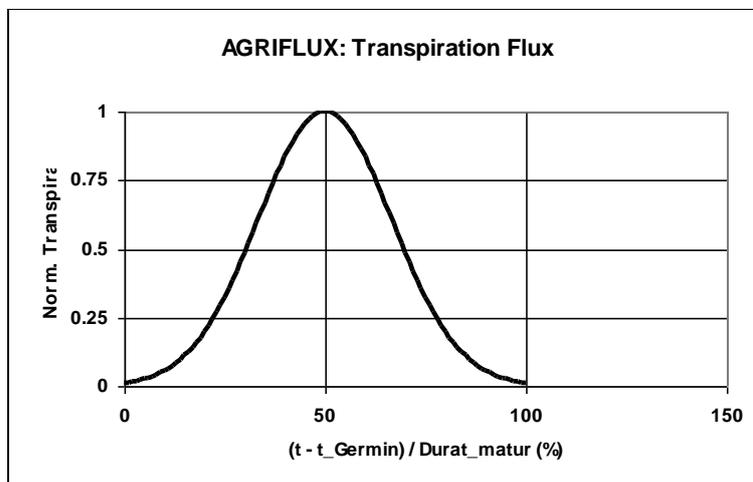


Figure 4 – Schéma AGRIFLUX : Évolution au cours du temps du flux de transpiration (normé).

Il apparaît que la formulation de ce schéma AGRIFLUX est assez différente de celles des schémas LEACHP et MACRO 3.2. En effet dans le schéma AGRIFLUX la transpiration (potentielle) ne dépend pas d'une évapotranspiration potentielle, calculée à partir des caractéristiques climatiques du pas de temps (température, insolation, rayonnement), mais d'un besoin total de la végétation, indépendant de la variabilité du climat.

Dans ce schéma AGRIFLUX, après avoir calculé le flux de transpiration, le flux d'évaporation en est déduit par la relation :

$$\text{Évaporation} = \max(\text{ETP_Corr} - \text{Transpir}, 0)$$

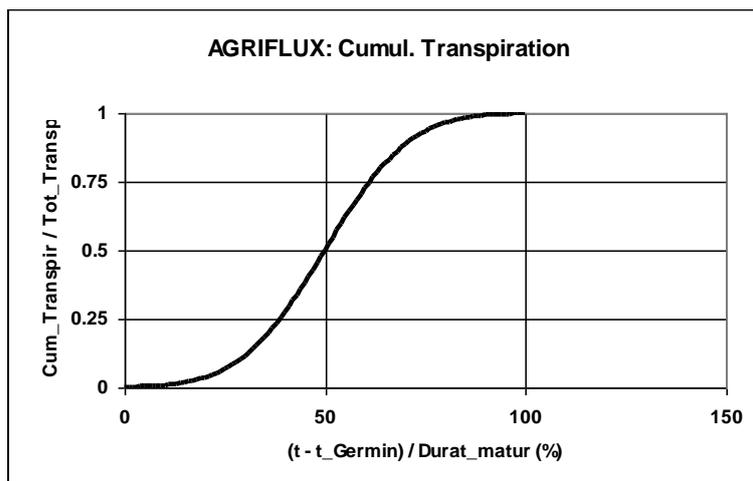


Figure 5 – Schéma AGRIFLUX : Évolution au cours du temps du cumul de la transpiration.

3.4. Résumé du calcul de l'Évaporation au sol

On a vu dans les paragraphes précédents que, selon le schéma choisi la transpiration est calculée :

- À partir du coefficient CC (Crop Cover) et de l'ETP corrigée (schéma LEACHP)
- À partir du coefficient LAI (Leaf Area Index) et de l'ETP corrigée (schéma MACRO 3.2)
- À partir d'une courbe de besoin total (schéma AGRIFLUX)

L'évaporation est alors calculée par la relation :

$$\text{Évaporation} = \text{ETP corrigée} - \text{Transpiration}$$

S'il y a un flux de pluie au cours du pas de temps :

- L'évaporation prélève en premier de l'eau dans ce flux de pluie. Cette quantité est appelée « ETR-Sol » dans le code de calcul MARTHE. Ce terme est inférieur à l'« ETP corrigée » même si le flux de pluie est supérieur à l'ETP corrigée. En effet c'est la seule Évaporation qui prélève de l'eau dans de flux de pluie et non pas l'« ETP corrigée ».
- Si l'évapotranspiration potentielle (ETP corrigée) n'est pas satisfaite : le complément est appliqué au domaine modélisé sous forme :
 - d'Évaporation dans la couche affleurante
 - et de Transpiration par les racines.

S'il n'y a pas de flux de pluie au cours du pas de temps :

- L'évapotranspiration potentielle (ETP corrigée) est appliquée au domaine modélisé sous forme :
 - d'Évaporation dans la couche affleurante
 - et de Transpiration par les racines.

L'évaporation est appliquée uniquement dans une maille affleurante. Le débit prélevé (négatif) dans une maille est donc égal :

- À la somme « Évaporation + Transpiration » dans une maille affleurante tandis que la transpiration peut être appliquée aux autres mailles en profondeur (selon le développement des racines vis à vis des épaisseurs des mailles).
- À la Transpiration dans une maille non-affleurante.

Quand dans une maille la succion devient supérieure à la succion maximale fixée, le débit prélevé est réduit pour ne pas dépasser cette succion maximale. Dans le code MARTHE, cette réduction correspond à l'ajout d'un débit positif appelé « Débit de désaturation ». La somme « Évaporation + Transpiration » est donc diminuée de ce « Débit de désaturation ». C'est la somme qui est diminuée sans possibilité de répartition de cette diminution entre l'« Évaporation » et la « Transpiration ».

Remarque : Si le calcul n'est pas réalisé avec un schéma en « Zone Non Saturée », mais avec un schéma en « Pseudo-Non-Saturé » la succion de la maille est remplacée par la différence entre l'altitude du haut de la maille et sa charge.

4. Développement racinaire

Les racines de la végétation se développent au cours du temps et on peut les décrire par deux caractéristiques géométriques :

- La profondeur d'enracinement (profondeur maximale à une date donnée),
- La répartition des racines le long de cette profondeur, sous forme d'une densité racinaire.

4.1. Profondeur d'enracinement

Parmi les schémas de profondeur d'enracinement disponibles et implémentés dans MARTHE, les schémas de MACRO (Jarvis 1994, 2002) et d'AGRIFLUX (Banton et al. 1997), sont identiques. Ils postulent une croissance linéaire depuis la germination jusqu'à la maturité. La profondeur **Prof_Rac** reste alors constante jusqu'à la récolte : elle devient alors instantanément nulle. La croissance des racines est donc contrôlée par un seul paramètre **Prof_Racin_max**, qui dépend du type de culture, dont la valeur est donnée dans le fichier des « [Paramètres cultureux des Cultures](#) ».

Dans le fichier des « [Paramètres cultureux des Cultures](#) » de MARTHE la valeur de la profondeur maximale d'enracinement **Prof_Racin_max**, est exprimée en **centimètres**.

En résumé on obtient donc :

- Avant la germination ou après la récolte : $\text{Prof_Rac} = 0$
- De la germination à la maturité :

$$\text{Prof_Rac} / \text{Prof_Racin_max} = (t - t_{\text{Germin}}) / \text{Durée_Matur}$$
- De la maturité à la récolte :

$$\text{Prof_Rac} / \text{Prof_Racin_max} = 1$$

Le code LEACHP (Hutson, 2000) utilise une autre formulation non linéaire, assez complexe, faisant intervenir des lois empiriques inspirées de la croissance racinaire du maïs. Cette formulation n'a pas été intégrée dans MARTHE.

Dans tous les cas, comme pour le développement du couvert végétal, le calcul de la profondeur d'enracinement est réalisé à chaque « pas de temps de modèle », pour toute la durée du pas de temps de modèle, indépendamment des éventuels sous-pas de temps de calcul.

4.2. Densité racinaire

Quatre formulations ont été implémentées. Chacune d'elle considère que la répartition des racines suit un « patron racinaire » constant, c'est-à-dire dépendant uniquement de la profondeur d'enracinement **Prof_Racin**, mais ne dépendant pas du temps. Le patron racinaire de chaque culture, qui dépend de la culture, est choisi dans le fichier des « [Paramètres cultureux des Cultures](#) ».

Les formulations disponibles de densité racinaire (« patron racinaire ») sont les suivantes :

- Densité racinaire constante (dite « cylindrique »),
- Densité racinaire conique (AGRIFLUX),
- Densité racinaire « hémisphérique » ou « cono-sphérique » (AGRIFLUX),
- Densité racinaire à décroissance exponentielle (MACRO).

Les trois premiers schémas font intervenir uniquement la profondeur d'enracinement **Prof_Racin**.

Le quatrième schéma, à décroissance exponentielle, fait en outre intervenir un facteur de forme **Form_Racin**, adimensionnel, qui règle la décroissance de la densité racinaire avec la profondeur.

Après calcul de la densité racinaire, de dimension $[L^{-1}]$, qui dépend de la profondeur **P**, le **ratio** de débit prélevé dans chaque maille traversée par les racines est déduit par intégration sur sa hauteur verticale. C'est un ratio, adimensionnel.

On pose les notations suivantes :

- P = profondeur (positive vers le bas); $p = P / \text{Prof_Racin}$
- P_1 = profondeur du haut de la maille; $p_1 = P_1 / \text{Prof_Racin}$
- P_2 = profondeur du bas de la maille; $p_2 = P_2 / \text{Prof_Racin}$
- densité = densité racinaire $[L^{-1}]$ en fonction de la profondeur
- ratio = intégration de la densité entre les profondeurs P_1 et P_2
- F = Form_Racin (pour alléger les formulations)
- P_{\max} = Prof_Racin (pour alléger les formulations)

On obtient alors pour les différents schémas les formulations décrites ci-dessous.

4.2.1. Densité racinaire constante (ou cylindrique)

On a : densité racinaire = $1 / P_{\max}$; ratio = $p_2 - p_1$

4.2.2. Densité racinaire conique

On suppose que les racines occupent un cône dont le sommet est situé à la profondeur P_{\max} . Par intégration simple on déduit :

- densité racinaire = $(3 / P_{\max}) \cdot (1 - p)^2$
- ratio = $(1 - p_1)^3 - (1 - p_2)^3$

4.2.3. Densité racinaire hémisphérique

Ce schéma correspond à une espèce de cône dont la surface (et non le rayon) diminue linéairement avec la profondeur. La densité racinaire diminue donc linéairement avec la profondeur.

On obtient ainsi :

- densité racinaire = $(2 / P_{\max}) \cdot (1 - p)$
- ratio = $(p_2 - p_1) \cdot (2 - p_1 - p_2)$

4.2.4. Densité racinaire à décroissance exponentielle

Dans ce schéma, utilisé par MACRO 3.2, la densité racinaire décroît exponentiellement avec la profondeur suivant une loi de type « $\exp(-F \cdot p)$ », p étant la profondeur moyenne, et « F » le « facteur de forme ».

MACRO 3.2 utilise la formulation :

$$\text{ratio_MACRO} = F \cdot (p_2 - p_1) \cdot \exp(-F \cdot p).$$

En fait cette expression n'est pas tout à fait correcte, en particulier pour $p = 1$ (à la limite inférieure) puisqu'on n'obtient pas zéro. Par ailleurs l'intégrale de 0 à 1 n'est pas exactement égale à 1.

Après reformulation nous avons utilisé les expressions suivantes, qui respectent bien ces deux conditions :

- densité = $[\exp(-F \cdot p) - \exp(-F)] \cdot \frac{F}{P_{\max}} \cdot \frac{1}{[1 - (F + 1) \cdot \exp(-F)]}$
- ratio = $[\exp(-F \cdot p_1) - \exp(-F \cdot p_2) - (p_2 - p_1) \cdot F \cdot \exp(-F)] \cdot \frac{1}{[1 - (F + 1) \cdot \exp(-F)]}$

La Figure 6 présente différents schémas de densité racinaire (avec un facteur de forme « F » égal à 3.67 pour le schéma exponentiel). Il apparaît sur la figure que la densité racinaire conique est relativement proche de la densité racinaire à décroissance exponentielle, tout en ayant une formulation plus simple.

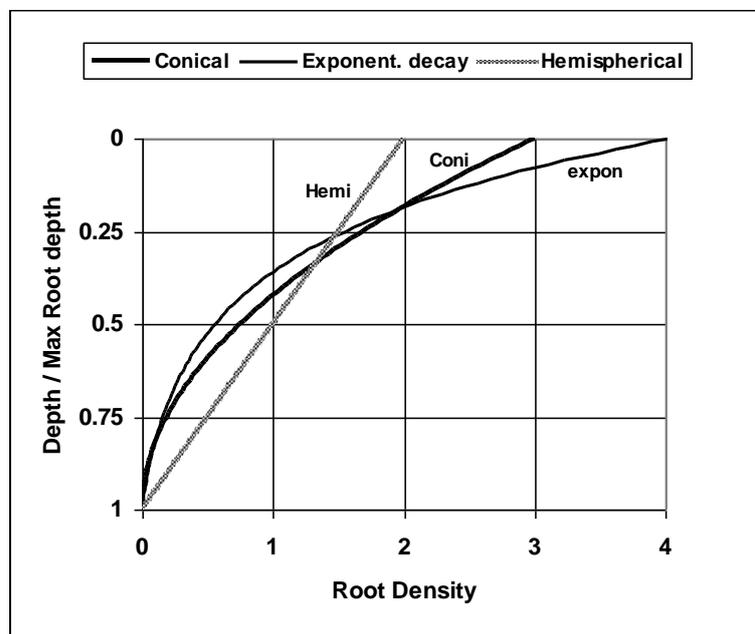


Figure 6 – Densité racinaire selon 3 différents schémas.
(La densité à décroissance exponentielle est calculée avec un facteur de forme égal à 3.67).

- o De la succion succ_min à la saturation : fact_stress décroît de 1 à 0

Dans le code MARTHE, pour éviter un couplage trop complexe, la saturation utilisée pour le calcul du facteur de stress est la saturation en début du pas de temps de calcul.

5.1. Schéma MACRO

Ayant calculé le facteur de stress de toutes les mailles d'une verticale, le logiciel calcule le facteur de stress moyen, pondéré sur la verticale : « fact_stress_moy » :

$$\text{fact_stress_moy} = \sum_z (\text{ratio}_z \cdot \text{fact_stress}_z)$$

ratio_z étant le ratio à la profondeur z, calculé à partir de la densité racinaire.

Ce facteur de stress moyen « fact_stress_moy » est alors comparé au seuil de facteur de stress « seuil_stress » :

- Si fact stress_moy > seuil_stress : pas de limitation des prélèvements **Prélèvements_z** :

$$\text{Prélèvements}_z = \text{Transpiration} \cdot \text{Ratio}_z$$

- Si fact_stress_moy < seuil_stress : diminution des prélèvements de toutes les mailles de la verticale dans le rapport fact_stress_moy / seuil_stress. Le prélèvement dans la maille z de cette verticale est donc obtenu par la relation :

$$\text{Prélèvements}_z = \text{Transpiration} \cdot \text{Ratio}_z \cdot (\text{fact_stress_moy} / \text{seuil_stress})$$

5.2. Schéma SWAP

Dans le schéma SWAP (Feddes *et al.* 1978, Van Dam *et al.* 1997), qui a également été implémenté dans MARTHE, il n'y a pas de calcul de « facteur de stress moyen », ni d'utilisation de « seuil de facteur stress ». On utilise directement le facteur de stress à la profondeur z, avec la relation :

$$\text{Prélèvements}_z = \text{Transpiration} \cdot \text{Ratio}_z \cdot \text{fact_stress}_z$$

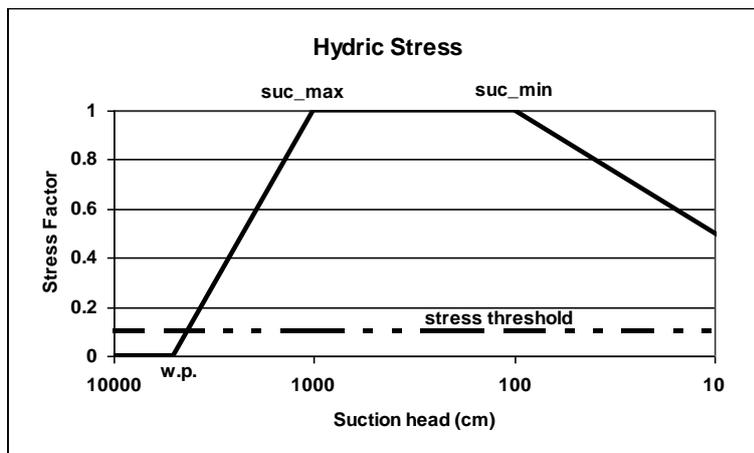


Figure 7 – Définition du facteur de stress :
 Dans cet exemple : succ_fletr = 5000 cm, succ_max = 1000 cm, succ_min = 100 cm.
 Le seuil de facteur de stress est égal à 0.10.

6. Prélèvement de masse par la végétation

Dans le cas d'un traceur parfait le prélèvement de masse dans une maille serait :

$$Q_{\text{mass}} = \text{Prélèvement} \cdot \text{Concentr}$$

avec : Q_{mass} = débit massique prélevé dans la maille
 Concentr = concentration dans la maille à la fin du pas de temps

En fait le prélèvement de masse par la végétation dépend du produit concerné. On admet :

$$Q_{\text{mass}} = fc \cdot \text{Prélèvement} \cdot \text{Conc}$$

avec : fc = coefficient compris entre 0 et 1

Pour les pesticides : le coefficient **fc** est généralement de l'ordre de 0.5 ou 0.6. Pour les fertilisants : il n'y a pas de valeurs de référence pour la valeur de **fc**.

L'utilisation d'un coefficient **fc** < 1 conduit à une sur-concentration dans le sol, puisqu'on prélève davantage d'eau que de masse. (Au contraire l'utilisation d'un coefficient **fc** > 1, si elle se justifiait dans certains contextes, conduirait à une sous-concentration).

Dans le code de calcul MARTHE, le coefficient **fc** dépend de chaque produit transporté. Ce coefficient est donc défini dans un fichier de nom « **Fact. Concentration racinaire** » (objet = **F_CONC_RACIN**, d'extension de fichier **[.conra]**).

Dans le cas le plus classique d'un calcul de transport mono-composant, il n'est pas nécessaire de créer un fichier : dans le fichier projet **[.rma]**, il suffit de donner comme nom de fichier la valeur souhaitée sous la forme « =valeur », c'est à dire par exemple « = 0.6 » pour fixer **fc** = 0.6. (*Attention : Ne pas oublier le « = » avant la valeur*).

=0.6 = Facteur sur Concentrat. Racinaire Multicompos.

Remarque : pour la généralité du code, la valeur par défaut de **fc** est égale à 1 (prélèvement passif), c'est à dire que si on ne donne pas de nom de fichier, comme dans l'exemple suivant, par défaut **fc** sera pris égal à 1 :

= Facteur sur Concentrat. Racinaire Multicompos.

Dans le cas de transport multi-composant, le fichier « Fact. Concentration racinaire » est de la forme suivante (exemple fictif avec 7 produits) :

Facteur de prélèvement sur les solutés	
Atrazine	: 0.63
Bentazone	: 0.55
Isoproturon	= 0.73
Acétochlore	= 0.41
Bromure	= 1e-8
DééthylAtrazine	= 0.49
Chlortoluron	= 0.81

Ce fichier, comme tous les fichiers multi-composants de MARTHE, comporte un titre suivi d'une ligne par composant (le descriptif de chaque ligne étant terminé par « : » ou « = »).

Il est possible de désactiver le prélèvement de masse par la végétation, par un paramètre du paragraphe « **Cultures, Nitrates** » du fichier des « paramètres généraux » de MARTHE :

*** Cultures, Nitrates

...

1 = Les racines des cultures ne prélèvent pas de masse => Masse déjà prélevée
(0=Non ; 1=Oui)

7. Modélisation avec le code de calcul MARTHE

Dans le texte qui suit, on utilise indifféremment le terme « végétation » ou le terme « culture ».

Pour réaliser une modélisation avec MARTHE en prenant en compte des cultures, il faut :

- Définir l'option « Cultures » dans le fichier « Profil d'utilisation » [.prfu]
- Définir les paramètres du paragraphe de nom « Cultures, Nitrates » du fichier des « paramètres généraux » [.mart] de MARTHE.
- Définir deux fichiers spécifiques :
 - Un fichier grille de : Numéro de Zone de Culture.
 - Un fichier de : Paramètres cultureux des Cultures.
- Définir l'évolution des numéros de cultures affectés aux « Zones de Culture ».

7.1. Fichier « Profil d'utilisation » de MARTHE

La définition du profil d'utilisation, d'extension [.prfu], 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. On choisit alors la ligne « Profil d'utilisation ». Figure 8 et Figure 9.

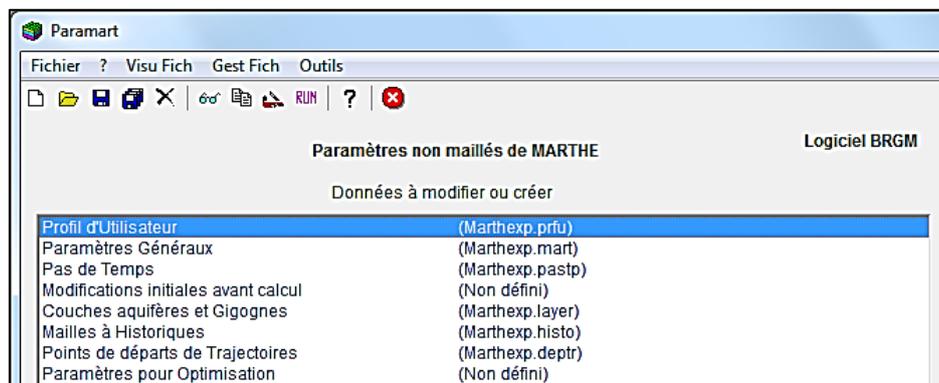


Figure 8 – Sélection du fichier « Profil d'utilisation ».

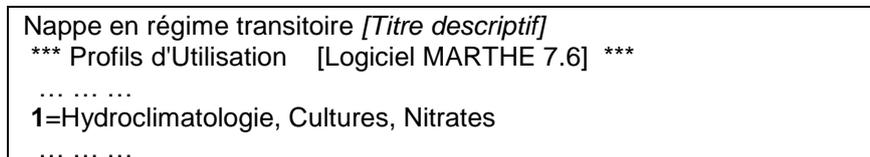


Figure 9 – Sélection de l'option « Cultures » dans le fichier « Profil d'utilisation ».

7.2. Fichier « Paramètres généraux » de MARTHE

Dans le fichier des « paramètres généraux » de MARTHE, un paragraphe de nom « **Cultures, Nitrates** » définit cinq paramètres généraux relatifs à la végétation, c'est à dire cinq paramètres communs pour tous les types de végétation (c'est-à-dire les types de « cultures »).

*** Cultures, Nitrates ***

1 = Cultures [0=Non ; 1=Cultures ; 2 = Nitrates ; 3 = Cultures + Nitrates]

1 = Type de Zones pour les Cultures et Nitrates [0=Zones de Sol ; 1=Zones de Cultures]

1 = Schéma de Transpiration et Dévelop. de la Végétation [1=Leachp ; 2=Macro ; 3=Agriflux]

2 = Schéma de développement des Racines et des Prélèvements [2=Macro ; 3=Agriflux]

4 = Schéma de Stress Hydrique [0=Aucun ; 2=schéma Macro ; 4=schéma Swap]

0 = Méthode de bilan de nitrates [0=Biche ; 1=Monica]

0 = Nombre de couches pour bilan de nitrates

1 = Les racines des cultures ne prélèvent pas de masse => Masse déjà prélevée
(0=Prélèvent ; 1=Pas de prélèvement)

7.2.1. Cultures ⇔ Prise en compte explicite des Cultures

0 = Pas de prise en compte de la végétation
1 = Prise en compte de la végétation

7.2.2. Type de Zones pour les Cultures et Nitrates

0 = Utilisation des « zones de sol » pour définir les cultures
1 = Utilisation des « zones de cultures » pour définir les cultures

7.2.3. Schéma de transpiration et de développement de la végétation

1 = Schéma LEACHP
2 = Schéma MACRO 3.2
3 = Schéma AGRIFLUX
0 = *Pas de développement de la végétation*

7.2.4. Schéma de développement des racines et des prélèvements

Valeur par défaut : 0 => Schéma linéaire
2 = Schéma MACRO ⇔ Linéaire
3 = Schéma AGRIFLUX ⇔ Linéaire
Les deux schémas : MACRO et AGRIFLUX sont identiques. Ce sont des schémas de développement linéaires depuis la germination jusqu'à la maturité.

7.2.5. Schéma de Stress Hydrique

0 = Pas de prise en compte de stress hydrique
2 = schéma de stress hydrique de MACRO
4 = schéma de stress hydrique de SWAP

7.2.6. Méthode de bilan de nitrates

Deux méthodes de calcul de bilans de nitrates sont disponibles

0 = Méthode BICHE (**B**ilan **CH**imique des **E**aux)

1 = Méthode MONICA (**MO**délisation des **NI**trates prenant en compte les **C**ultures et les pratiques **A**gricoles).

7.2.7. Nombre de couches pour le bilan de nitrates

Ce paramètre précise le nombre de couches du modèle dans lesquelles est effectué le bilan des nitrates.

0 = Bilan de nitrates dans la « réserve superficielle » (« Réserve Utile ») du sol utilisée dans le schéma GARDÉNIA.

n = Bilan de nitrates dans les « n » premières couches du maillage.

7.2.8. Les racines des cultures ne prélèvent pas de masse => Masse déjà prélevée

[Paramètre utilisé uniquement en cas de transport de masse]

Ce paramètre est nécessaire uniquement s'il y a prise en compte de cultures et aussi calcul de transport de masse.

0 = Cas général : les racines des cultures prélèvent de la masse lors de la transpiration. La concentration de l'eau prélevée par transpiration est par défaut la concentration de l'eau dans la maille concernée, cependant un facteur correctif peut être appliqué à cette concentration prélevée

1 = Les racines des cultures ne prélèvent pas de masse lors de la transpiration. Cette option peut être utile si les consommations de masse (de nitrates par exemple) ont déjà été calculées et prélevées par ailleurs, par le module BICHE ou le module MONICA par exemple. La masse ne doit alors pas être prélevée une deuxième fois.

7.2.9. Unité des données pour les apports / besoins en nitrates

N = Données en kg/ha d'azote (N)

NO₃ = Données en kg/ha de nitrates (NO₃⁻)

rien = Automatique : « NO₃ » avec le schéma BICHE
: « N » avec le schéma MONICA

Dans tous les cas les concentrations calculées sont exprimées en Nitrates. (mg/L de NO₃⁻ par exemple)

Par ailleurs, dans le paragraphe de nom « **Hydroclimatologie** » du fichier des « Paramètres généraux », Il faut également renseigner en particulier les paramètres suivants :

*** Hydroclimatologie

0 = Limitation de l'évaporation appliquée au domaine maillé [0=Non ; 1=Limitation ;
2=Suppression]

0 = Type de Zones pour les Pluie, ETP, Recharge etc. [0=Zones de Sol ; 1=Zones Météo]

7.2.10. Limitation de l'évaporation appliquée au domaine maillé [0=Non ; 1=Limitation ; 2=Suppression]

Quand on prend en compte des cultures, il faut laisser ce paramètre à sa valeur **0** par défaut.

En effet il n'y a pas lieu de supprimer (ou de limiter) l'évaporation appliquée à la surface du sol. C'est le calcul du développement de la végétation qui prend en charge le calcul de cette évaporation appliquée au sol.

Si cependant on utilisait ce paramètre (*déconseillé*), la limitation ou suppression s'appliquerait uniquement à l'évaporation dans la couche affleurante, mais pas à la transpiration par les racines.

7.2.11. Type de Zones pour les Pluie, ETP, Recharge etc. [0=Zones de Sol ; 1=Zones Météo]

Ce paramètre est utilisé normalement pour définir si les données hydroclimatiques sont définies « Par zones de sol » ou bien « Par zones météo ».

7.3. Fichiers ou variables nécessaires pour la prise en compte des cultures

Les deux fichiers spécifiques suivants sont utilisés pour la prise en compte des cultures :

- Fichier grille de : [Numéro de Zone de Culture](#).
- Fichier des : [Paramètres cultureux des Cultures](#).

Il est également nécessaire de définir dans chaque zone de culture :

- Le Numéro de la Culture courante affectée à une Zone de culture.
Ce n'est pas un fichier. Ces numéros peuvent uniquement être affectés par « Zone de culture »

Et éventuellement, uniquement pour les calculs de transport de masse :

- Le « Facteur sur la Concentration racinaire multi-composant ».

7.3.1. Fichier grille de : 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).

Un numéro de Zone de Culture égal à « 0 » correspond à un sol nu (sans culture).

Dans une Zone de Culture donnée se succéderont des cultures identifiées par leur numéro de culture.

Par exemple dans la Zone de Culture n°1, il y aura la culture n°13 (blé), puis, plus tard, la culture n°7 (betterave).

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 ».

*** Cultures, Nitrates ***
 1 = Type de Zones pour les Cultures et Nitrates [0=Zones de Sol ; 1=Zones de Cultures]

Les apports de NO₃, par application et par minéralisation, ainsi que les besoins en NO₃, peuvent aussi être définis par Zone de Culture. Ils ne sont pas décrits dans ce rapport.

Mot clé : ZONE_CULTUR

7.3.2. Fichier : « Paramètres cultureux des cultures »

Ce fichier contient les paramètres relatifs à chaque culture : « Numéro de la culture », « Durée de Germination », « Durée de Maturation », « Durée de Récolte », « Facteur cultural », « Crop facteur », « LAI », « paramètres des Racines », etc.

Mot clé : PARAM_CULTUR

Ce fichier est décrit dans le paragraphe « Description détaillée du fichier des [paramètres cultureux des cultures](#) »

7.3.3. Numéro de la culture courante affectée à une zone

Attention : Ne pas confondre « Numéro de Culture » et « Numéro de Zone de Culture ».

Cette variable est le « Numéro de la Culture » qui est affectée à une « Zone de Culture » donnée, à partir de la date courante.

Ce n'est pas un fichier : c'est le numéro d'identification d'une culture.

Ce « Numéro de culture » est affecté dans le fichier des « Pas de temps » [.pastp]

La date à laquelle on affecte cette culture devient la date de semis de cette culture dans la zone de culture concernée.

Les paramètres relatifs à cette culture (n° de culture, durée de germination, durée de maturation, etc.) sont décrits dans le [fichier des « Paramètres Cultureux des Cultures »](#).

Lors d'un changement de culture : un numéro de culture égal à 0 est ignoré => pas de changement.

Mot clé : NUM_CULTUR

Par exemple pour affecter la culture n°20 dans la zone de culture n°8 au pas de temps n°91 on procède de la manière suivante :

On utilise le module de « Gestion des données non maillées », accessible par le bouton  de la barre d'outils du bas du cadre de WinMarthe. On choisit alors la ligne « Pas de temps ».

Par la ligne « Choix d'un pas de temps » on sélectionne le pas de temps de modèle n°91, puis on choisit « Nouvelles Actions » (Figure 10), puis le thème « Bilan Hydroclimatique et Cultures » (Figure 11), puis l'objet « NUM_CULTUR » (Figure 12), puis modification par « ZONE de SOL », puis affectation de la culture n°20 dans la zone n°8. (Figure 13)

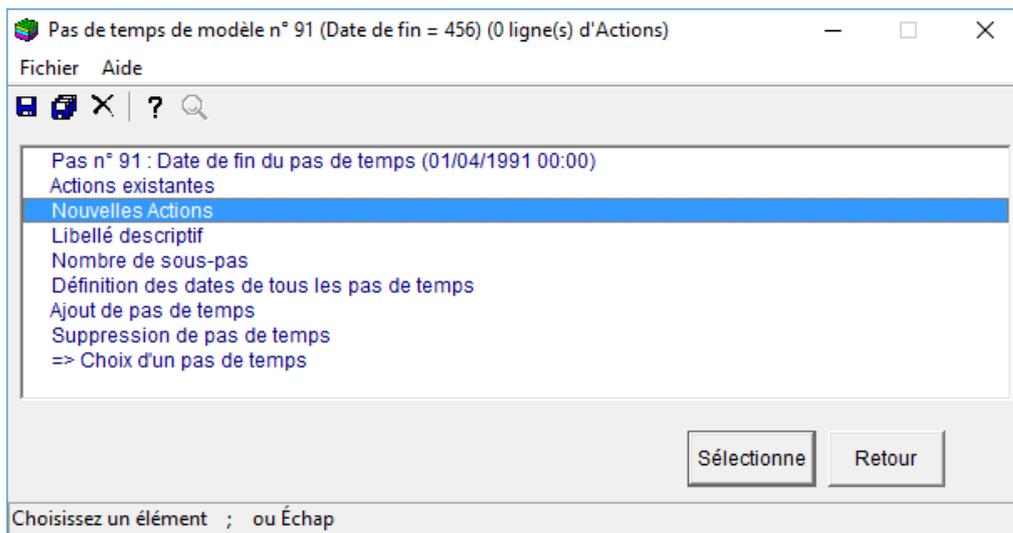


Figure 10 – Introduction d'une « Nouvelle action » au pas de temps n°91.

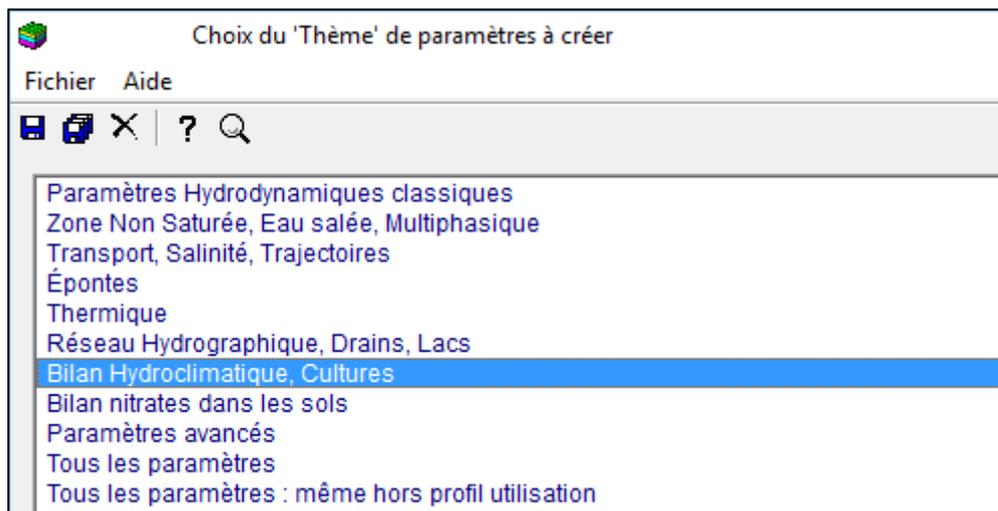


Figure 11 – « Nouvelle action » dans le thème « Bilan Hydroclimatique et Cultures ».

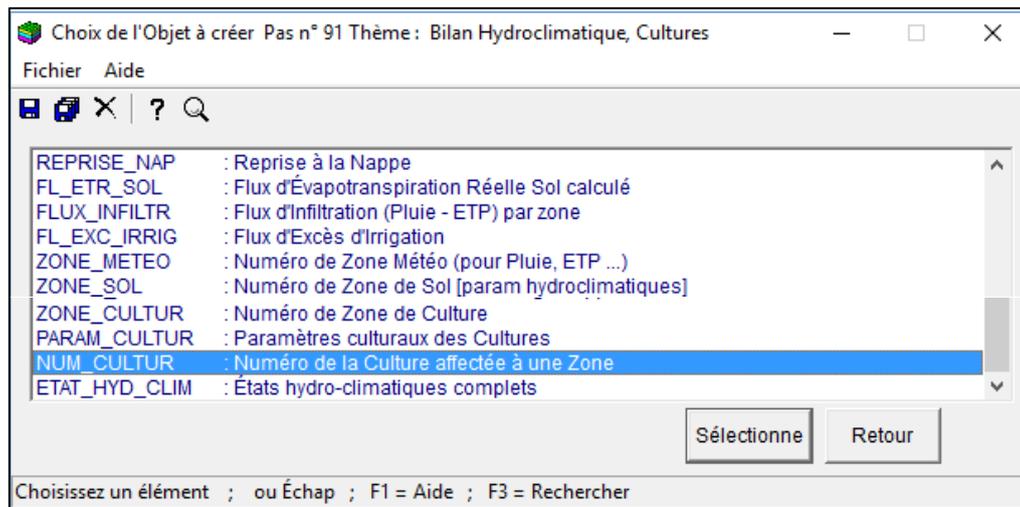


Figure 12 – Choix de l'Objet « NUM_CULTUR ».

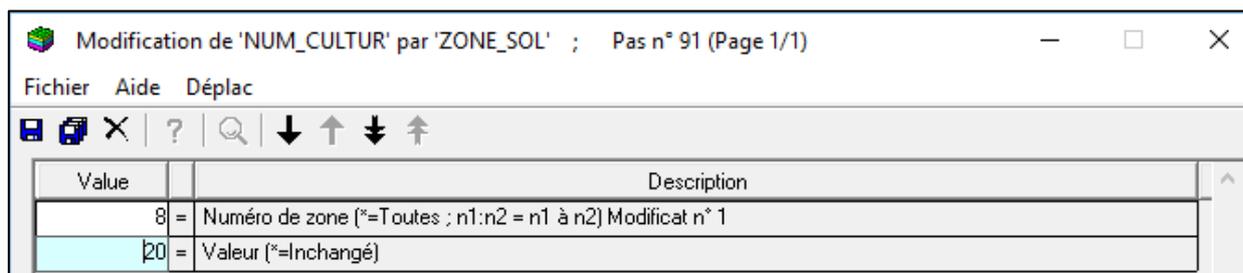


Figure 13 – Affectation de la culture n°20 dans la zone de culture n°8.

La ligne suivante apparaîtra alors au pas de temps n°91 du fichier des « Pas de temps » :

```
/NUM_CULTUR/ZONE_SOL Z=      8V=  20;
```

Remarque : Le préprocesseur fait toujours apparaître le mot-clé « **ZONE_SOL** », qui apparaît aussi dans la ligne écrite dans le « fichier des pas de temps ».

Mais selon l'option choisie dans le [paragraphe « Cultures, Nitrates »](#) du fichier des « paramètres généraux », le mot-clé « **ZONE_SOL** » désigne soit une « zone de sol » soit une « zone de cultures ».

Il est également possible d'affecter une culture dans toutes les zones de culture, ou bien dans un ensemble de zones de culture comme le montrent les exemples suivants.

- Affectation de la culture n°45 dans toutes (*) les zones de culture :

```
/NUM_CULTUR/ZONE_SOL Z=      *V=  45;
```

- Affectation de la culture n°115 dans toutes les zones de culture n°25 à n°35

```
/NUM_CULTUR/ZONE_SOL Z= 25:35 V= 115;
```

- Affectation de la culture n°0 (ou 9999), c'est à dire un sol nu, dans la zone de culture n°40 :

```

/NUM_CULTUR/ZONE_SOL Z=      40V=    0 ;
    ou bien :
/NUM_CULTUR/ZONE_SOL Z=      40V= 9999 ;
    
```

L'affectation d'un numéro de culture égal à 9999 dans une zone arrête la culture dans cette zone (récolte ou moisson), même si la durée de récolte n'est pas atteinte pour cette culture. Il n'y a alors plus de transpiration dans cette zone. Il peut cependant y avoir de l'évaporation.

Quand on a un grand nombre de rotations de cultures, il est plus efficace d'utiliser une autre méthode : l'utilisation de fichiers d'« évolution temporelle », comme décrit dans la [notice d'utilisation générale de MARTHE v.7.5](#) (Thiéry 2015a).

Un tel fichier contient, en format libre, les valeurs successives à affecter à une zone ou bien à un groupe de zones 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). Chaque ligne du fichier correspond, dans l'ordre, à un 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. Ce fichier peut également contenir plusieurs colonnes de valeurs, chaque colonne correspondant à un groupe de zones. Il est également possible, mais facultatif, de mettre en plus, dans la colonne la plus à droite, un indicateur mnémotechnique correspondant à la date.

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 zones individuelles ou des groupes de zones.

Au pas de temps n°0, quand on affecte une valeur à une zone, ou à un groupe de zones, 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).

(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 relative au pas de temps n°0).

La Figure 14 montre comment affecter la colonne n°2 du fichier « Bare3_Evol_Cultur_Rapport.prn » pour les numéros de culture de la zone de culture n°31. Cette affectation est faite au pas de temps n°0.

La Figure 15 montre des extraits de ce fichier « Bare3_Evol_Cultur_Rapport.prn » dont les colonnes 1 à 3 contiennent les « Numéros culture » respectivement dans les « Zone de culture » n°21, n°31 et n°41.

La Figure 16 montre le pas de temps n°0 du fichier des « Pas de temps » après affectation des 3 colonnes du « fichier d'évolution temporelle » aux numéros de culture des zone de culture n°21, n°31 et n°41.

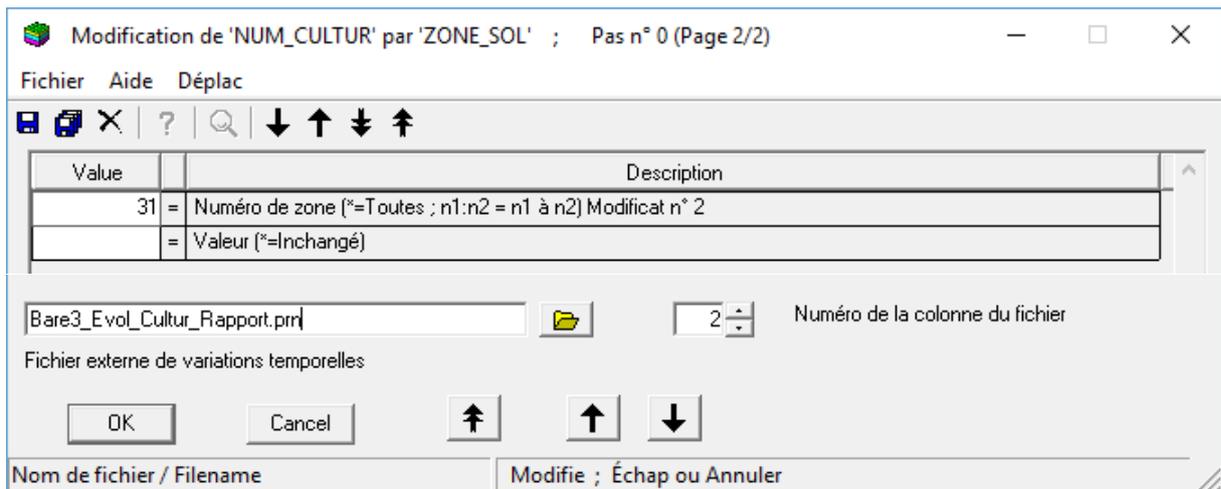


Figure 14 – Affectation de la colonne n°2 du fichier « Bare3_Evol_Cultur_Rapport.prn » pour les « Numéros de culture » de la « Zone de culture » n°31.

! Cult_Zon21	Cult_Zon31	Cult_Zon41	Num_Pas	Date
0	0	0	1	01/01/2015
0	0	0	2	02/01/2015
...
0	20	0	102	12/04/2015
...
10	0	0	112	22/04/2015
...
0	0	30	118	28/04/2015
...
9999	9999	9999	278	05/10/2015
...
20	30	0	479	23/04/2016
...
0	0	10	490	04/05/2016
...
0	0	9999	641	02/10/2016
0	9999	0	642	03/10/2016
...
9999	0	0	647	08/10/2016
...
30	0	0	841	20/04/2017
...
0	0	20	846	25/04/2017

Figure 15 – Extraits du fichier « Bare3_Evol_Cultur_Rapport.prn ». « Numéros de culture » dans les « Zones de culture » n°21, n°31 et n°41, respectivement dans les colonne n°1 à n°3

```

*** Début de la simulation      à la date : 31/12/2014 ; ***
/NUM_CULTUR/ZONE_SOL  Z=  21V=      ; File= Bare3_Evol_Cultur_Rapport.prn
/NUM_CULTUR/ZONE_SOL  Z=  31V=      ; File= Bare3_Evol_Cultur_Rapport.prn; Col=2
/NUM_CULTUR/ZONE_SOL  Z=  41V=      ; File= Bare3_Evol_Cultur_Rapport.prn; Col=3

```

Figure 16 – Fichier des « Pas de temps » au pas de temps n°0 après affectation du fichier « Bare3_Evol_Cultur_Rapport.prn » pour les « numéros de culture » des « zone de culture » n°21, n°31 et n°41.

7.3.4. Paramètres relatifs au bilan hydroclimatique à réservoirs

Quand on réalise une modélisation avec prise en compte des cultures il ne faut (généralement) **pas** effectuer simultanément un bilan hydroclimatique avec des « réservoirs sol », par exemple avec le schéma GARDÉNIA (Thiéry, 2014, 2015f). En effet on choisit généralement de réaliser :

- **Soit** un bilan hydroclimatique à réservoirs, avec par exemple le schéma GARDÉNIA. C'est une approche globale de l'influence de l'évaporation et de la transpiration,
- **Soit** un calcul plus fin, possible uniquement quand les données sont disponibles, prenant en compte le développement foliaire et le développement racinaire de chaque culture

Ça n'aurait donc, le plus souvent, **pas** de sens d'utiliser simultanément ces deux approches (paramètres des cultures + capacités de « réserves utiles »).

7.3.5. Facteur sur la Concentration racinaire multi-composant

[Paramètre utilisé uniquement en cas de transport de masse].

C'est un facteur facultatif 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. (Ce paramètre est défini dans le paragraphe « **Cultures, Nitrates** » du fichier des « paramètres généraux » de MARTHE). Le flux prélevé est donné par la relation :

$$\Rightarrow \text{Flux prélevé par les racines} = Q_{\text{prélè}} \times \text{Facteur} \times \text{Concentrat_Locale}$$

Par défaut : si on ne donne pas de nom pour ce fichier, ce facteur est égal à 1.

La transpiration des racines prélève alors classiquement de l'eau avec la concentration de la maille concernée.

\Rightarrow Il faut donner le nom « =0 » pour avoir réellement un facteur égal à 0. (Ne pas oublier le « = » avant le 0)

Remarque : La valeur courante du facteur sur la concentration est de l'ordre de 0.6.

Mot clé : F_CONC_RACIN

Remarque : Si on a donné la valeur « 1 » au paramètre « **Les racines des cultures ne prélèvent pas de masse** » aucune masse ne sera prélevée explicitement par transpiration dans les mailles.

7.4. Fichier des « paramètres cultureux des cultures »

7.4.1. Description détaillée du fichier des « paramètres cultureux des cultures »

Ce fichier, d'extension [.cult], décrit les paramètres relatifs à chaque culture. Son nom est mémorisé dans le « fichier projet de MARTHE », d'extension de fichier [.rma].

Deux exemples (fictifs) de fichiers de « paramètres cultureux des cultures » sont présentés ci-dessous pour décrire la structure du fichier et les paramètres utilisés.

```

Exemple n°1 de fichier de cultures (1 ligne par culture)
Fichier décrivant les paramètres de chaque culture
< Les lignes placées ici avant la ligne « #<V7.6># » sont des commentaires >
#<V7.6># --- Fin du texte libre --- ; Ne pas modifier/retirer cette ligne
N° TGerm TMatu TReco CCMAX KC X1 X2 LAIMN LAIMX LAIRC Besoi D_RAC P_RAC RACIN FLETR STRS- STRS+ S_STR
20 30 130 160 0.8 0.75 2.0 0.7 0.0 3.5 2.5 250 2 60 4 16000 500 100 0.1
10 40 140 180 0.8 0.85 2.0 0.7 0.0 3.5 2.5 300 0 70 3.67 16000 500 100 0.1
30 45 150 170 0.9 0.95 2.0 0.7 0.0 3.5 2.5 400 1 110 3.5 16000 500 100 0.1
# La culture 25 est occultée (car la ligne commence par « # »)
# 25 30 120 140 0.8 0.70 2.0 0.7 0.0 3.5 2.5 250 2 60 3.2 16000 500 100 0.1
# Duplication de la culture n°30 => c'est la 2ème qui est conservée
30 35 155 175 0.9 0.90 2.0 0.7 0.0 3.5 2.5 400 1 110 3.8 16000 500 100 0.1

```

Figure 17 – Exemple de fichier de paramètres cultureux (1 ligne par culture).

```

Exemple n°2 de fichier décrivant chaque Culture (2 lignes par culture)
#<V7.6># --- Fin du texte libre --- ; Ne pas modifier/retirer cette ligne
Num TGermi TMatu TReco CCMax KC X1 X2 LAIMn LAIMx LAIRec Besoin
20 30 130 160 0.8 0.75 2.0 0.7 0.0 3.5 2.5 250
10 40 140 180 0.8 0.85 2.0 0.7 0.0 3.5 2.5 300
30 45 150 170 0.9 0.95 2.0 0.7 0.0 3.5 2.5 400
# La culture n°25 est occultée (car la ligne commence par « # »)
# 25 30 120 140 0.8 0.70 2.0 0.7 0.0 3.5 2.5 250
# 2ème définition de la culture n°30
# => c'est cette 2ème définition qui est prise en compte.
30 30 155 175 0.9 0.90 2.0 0.7 0.0 3.5 2.5 400

```

Figure 18 – Exemple de fichier de paramètres cultureux :
Partie gauche du fichier : paramètres n°1 à n°12.
(Valeurs fictives : uniquement pour montrer la forme du fichier).

Den_Racin	Prof_Racin	Form_Racin	Fletri	Strs-	Strs+	Seuil_Strs	#	Nom
2	60	4	16000	500	100	0.1	#	Céré_5
0	70	3.67	16000	500	100	0.1	#	Légu_8
1	110	3.5	16000	500	100	0.1	#	Céré_25
2	60	3.2	16000	500	100	0.1	#	Végét_4
1	110	3.8	16000	500	100	0.1	#	No_Name

Figure 19 – Exemple de fichier de paramètres cultureux :
Partie droite du fichier : paramètres n°13 à n°19
(Valeurs fictives : uniquement pour montrer la forme du fichier).

Le fichier de « paramètres culturels des cultures » a une structure libre :

- Des lignes de commentaires, sous forme de texte libre peuvent être placées en début du fichier, avant la ligne séparateur « #<V7.6># --- Fin du texte libre » qui marque la fin du texte libre,
- La ligne séparateur « #<V7.6># --- Fin du texte libre » est obligatoire. C'est le mot-clé « #<V7.6># » qui permet au code de connaître la version de ce fichier et de l'interpréter correctement,
- La première ligne située après la ligne séparateur « #<V7.6># --- Fin du texte libre » est une ligne obligatoire contenant les libellés des paramètres. Ces libellés servent uniquement à la lisibilité. Seul l'ordre des paramètres dans les lignes est significatif,
- Chaque culture est décrite sur une ligne du fichier. Les paramètres d'une même ligne sont séparés (de préférence) par une tabulation,
- Des lignes de commentaires, commençant par le caractère « # » ou « ! » peuvent être insérées n'importe où dans le fichier,
- Si un caractère « # » ou « ! » apparaît après le début d'une ligne, les caractères qui suivent sont considérés comme un commentaire (ici pour donner le nom de la culture : blé, orge ...)

La version v7.6 de ce fichier contient **19 colonnes** (sans compter l'éventuel nom de la culture).

Les paramètres de chaque culture sont les suivants :

- 1 : Num = Numéro de la culture (numéro compris entre 1 et 999)
- 2 : t_Germi = Durée **en jours** : depuis la date du semis jusqu'à la date de germination
- 3 : t_Matur = Durée **en jours** : depuis la date du semis jusqu'à la date de maturité
- 4 : t_Recolt = Durée **en jours** : depuis la date du semis jusqu'à la date de récolte
- 5 : CCmax = Valeur maximale du couvert végétal [0 à 1] (pour le schéma LEACHP)
- 6 : KC = Coefficient cultural appliqué au flux d'ETP
- 7, 8 : x_1, x_2 = Exposants pour le calcul du LAI (pour le schéma de transpiration de MACRO)
- 9 – 11 : = LAI
 - (9) LAI Minimum,
 - (10) LAI Maximum [0 à 5]
 - (11) LAI récolte [généralement 0]
- 12 : Besoin_Tot = Besoin hydrique total de la culture (pour le schéma AGRIFLUX)
(Besoin : en unité de hauteur hydroclimatique, par exemple en mm)
- 13 : N_Densi = Numéro du « patron racinaire » pour la densité racinaire :
 - 0 = Cylindrique
 - 1 = Conique
 - 2 = Hémisphérique
 - 3 = Décroissance exponentielle

14 : Prof_Racin = Profondeur maximale des racines : (en centimètres)
(Jusqu'à la version v7.4, les profondeurs des racines étaient données en « unité de charge et de verticale »)

15 : Form_Racin = Facteur de forme pour un « patron racinaire » exponentiel
(Nombre sans unité de valeur environ 3.7)
(Utilisé uniquement pour un « patron racinaire » exponentiel)

Paramètres n°16 à n°18 :

Trois suctions caractéristiques, exprimées en « unité de charge hydraulique » :

16 : Succ_Fletr = Suction de flétrissement pour le calcul du facteur de stress

17 : Succ_max = Suction maximale pour le calcul du facteur de stress

18 : Succ_min = Suction minimale pour le calcul du facteur de stress

[Pas de stress pour une suction comprise entre Succion_min et Succion_max]

19 : Seuil_strs = Seuil de facteur stress (sans unité, de l'ordre de 0.1)

(Paramètre utilisé uniquement pour le schéma de stress MACRO)

La culture est en état de stress quand le « facteur de stress » est en dessous de ce seuil de stress.

Remarque : Les trois succions (paramètres n°16 à n°18) utilisées pour le calcul du facteur de stress sont exprimées en « unité de charge hydraulique » ⇔ « unité de pression hydraulique » ⇔ « unité de hauteur verticale ».

Elles sont données dans l'ordre des succions décroissantes, c'est-à-dire du flétrissement à la saturation.

Remarque :

- Le « facteur de stress » a la valeur « 1 » ⇔ 100 % de la transpiration, quand il n'y a pas de stress.
- Le « facteur de stress » a la valeur « 0 » ⇔ 0 % de la transpiration, quand le stress est maximal.

Remarque : Les 19 colonnes (19 paramètres) doivent toujours apparaître dans le fichier, même si elles ne sont pas utilisées par le schéma de développement de la végétation ou le schéma de développement des cultures choisi. Par exemple les trois paramètres de LAI, qui sont utilisés uniquement par le schéma de développement de la végétation de MACRO, doivent être présents même si on utilise un schéma de développement de LEACHP. De même le paramètre CCmax (Crop Cover maximal) qui est utilisé par le schéma LEACHP doit être présent même si on utilise le schéma de développement de MACRO.

On pourra donner alors une valeur arbitraire, par exemple 0, aux paramètres non utilisés.

7.4.2. Récapitulation des paramètres utilisés par chaque schéma

On récapitule ci-dessous les paramètres utilisés par chaque schéma de transpiration, chaque schéma de développement racinaire, chaque schéma de stress hydrique. (Voir paragraphe précédent pour davantage de détails sur ces paramètres).

- Paramètres utilisés par **tous les schémas** :
 - t_Germi = Durée du semis jusqu'à la germination
 - t_Matur = Durée du semis jusqu'à la maturité
 - t_Recolt = Durée du semis jusqu'à la récolte
 - KC = Coefficient cultural appliqué au flux d'ETP
 - N_Densi = Numéro du « patron racinaire » pour la densité racinaire (0 à 3)
 - Prof_Racin = Profondeur maximale des racines
 - Form_Racin = Facteur de forme pour un « patron racinaire » exponentiel (environ 3.7)
(Utilisé uniquement pour un « patron racinaire » exponentiel)

Schémas de transpiration et de développement de la végétation :

- Schéma de transpiration LEACHP :
 - CCmax = Valeur maximale du couvert végétal (« Crop Cover » maximal)
- Schéma de transpiration MACRO 3.2 :
Paramètres pour le calcul du LAI (« Leaf Area Index ») :
 - x_1, x_2 = Exposants pour le calcul du LAI
 - LAI Minimum
 - LAI Maximum [0 à 5]
 - LAI récolte [généralement 0]
- Schéma de transpiration AGRIFLUX :
 - Besoin_Tot = Besoin hydrique total de la culture

Schémas de stress hydrique

- Schémas de stress hydrique MACRO et SWAP :
 - Succ_Fletr = Succion de flétrissement pour le calcul du facteur de stress
 - Succ_max = Succion maximale pour le calcul du facteur de stress
 - Succ_min = Succion minimale pour le calcul du facteur de stress
 - Seuil_strs = Seuil de facteur stress (sans unité, de l'ordre de 0.1)
(Paramètre « Seuil » utilisé uniquement pour le schéma de stress MACRO)
- Pas de schémas de stress hydrique :
 - Pas besoin des paramètres : Succ_Max, Succ_Min, Seuil_strs.

7.4.3. Vérification des paramètres lus dans le fichier des « paramètres cultureaux des cultures »

Pour vérifier les paramètres qui ont été effectivement lus dans le fichier des « paramètres cultureaux des cultures » il faut procéder de la manière suivante.

Dans le fichier des « Paramètres généraux », dans le paragraphe « Sauvegardes et contrôles » (le 1^{er} paragraphe) sélectionner :

1 = Fichier Liste détaillé (1=Oui ; 0=Non)

On obtiendra alors, dans le fichier « marthe.txt » un tableau récapitulatif des paramètres effectivement lus, avec des warnings si les valeurs des paramètres ont des valeurs trop improbables. Cette vérification est **fortement conseillée**.

7.4.4. Valeurs de références pour des cultures classiques

Les Figure 20 et Figure 21 présentent des paramètres pour cinq cultures classiques. Elles correspondent au site de Zwischensholle situé en Rhénanie du Nord-Westphalie (Allemagne). Les paramètres correspondent au schéma de développement de MACRO et au schéma de stress également de MACRO. La Figure 22 présente les durées de développement de huit cultures de référence en Picardie.

Jours Maturité (après germin.)	Jours Récolte (après germin.)	KC	X1	X2	LAI mini	LAI maxi	LAI Récolte	Nom
99	149	0.94	2	0.7	0	4.2	1	Maïs
87	130	0.94	2	0.7	0	3	1	Pommes de terre
194	291	0.84	2	0.7	0	3.8	1	Blé d'hiver
109	163	0.93	2	0.7	0	4.2	1	Betteraves à sucre
92	185	1	2	0.7	0	2	1	Herbe Prairie

Figure 20 – Paramètres cultureaux de 5 cultures (1^{ère} partie).
Attention : les durées sont indiquées à partir de la date de germination et non à la date de semis comme défini dans MARTHE.

Répartiton racines	Profond racines	Succion Flétriss.	Succion Stress min..	Succion Stress. max.	Seuil Stress	Nom
[-]	(cm)	(m)	(m)	(m)	[-]	
Conique	120	80	3.25	0.3	0.1	Maïs
Conique	70	160	3.2	0.25	0.1	Pommes de terre
Conique	110	160	5	0.01	0.1	Blé d'hiver
Conique	120	160	3.2	0.25	0.1	Betteraves à sucre
Conique	60	80	2	0.25	0.1	Herbe Prairie

Figure 21 – Paramètres cultureaux de 5 cultures (2^{ème} partie).

T_Germin	T_Maturité	T_Récolte	dt_Matu-Germi	dt_Récolt-Germi	Nom
(Jours)	(Jours)	(Jours)	(Jours)	(Jours)	
154	215	294	61	140	Blé
23	110	188	87	166	Betterave
171	246	321	75	150	Colza
54	90	161	36	107	Féverolles
11	116	181	105	170	Maïs
3	63	141	60	138	Orge de Printemps
3	64	125	61	122	Pois de Printemps
1	29	63	28	62	Interculture

Figure 22 – Durées de développement de 8 cultures de référence en Picardie
« T_Germi » = Durée du semis à la germination, « T_Maturité » = Durée du semis à la Maturité,
« T_Récolte » = Durée du semis à la récolte.
« dt_Matu_Germi » = Durée de Germination à Maturité ; « dt_Récolt_Germi » = Durée de Germination à Récolte.

8. Résultats de calcul relatifs aux cultures

En début de calcul, ou bien au cours du calcul, il est possible de sauvegarder des informations résultant de la prise en compte de la végétation ou des cultures.

8.1. État des cultures

On peut obtenir, dans le fichier « *bilandeb.txt* », l'état des cultures au moyen de l'objet « PARAM_CULTUR ». Par exemple pour obtenir l'état des cultures au pas de temps n°91 :

On utilise le module de « Gestion des données non maillées », accessible par le bouton  de la barre d'outils du bas du cadre de WinMarthe. On choisit alors la ligne « Pas de temps ».

Par la ligne « Choix d'un pas de temps » on sélectionne le pas de temps de modèle n°91, puis on choisit « Nouvelles Actions », puis le thème « Bilan Hydroclimatique et Cultures », puis l'objet « PARAM_CULTUR » (Figure 23).

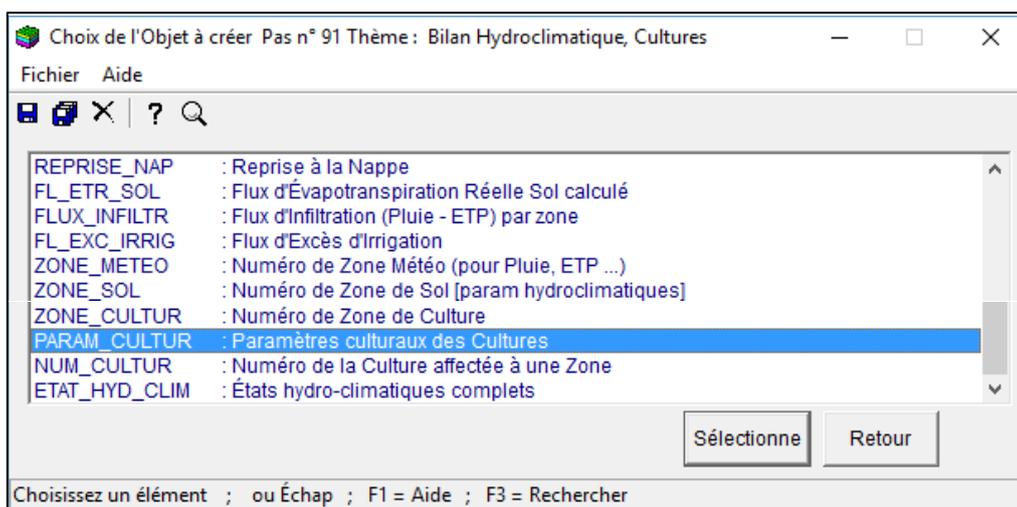


Figure 23 – Choix de l'Objet « PARAM_CULTUR ».

Le fichier des pas de temps fera alors apparaître au pas de temps n°91 :

```
*** Le pas : 91: se termine à la date : 120; ***
/PARAM_CULTUR/EDITION I= 1
/***** Fin de ce pas
```

On obtient alors les informations suivantes :

États des cultures dans les 5 zones : Pas de temps n° 120 - t= 120											
Num Zon	Num Cultu	Date Semis	Depuis Semis	Depuis Germin	jusqu' Matur	jusqu' Récol	Coef. CC	Coef. LAI	Coef. KC	Prof. Racines	
1	30	20	100	23	63	83	0.7865	0	0.7	41.958	
2	20	20	100	22	62	95	0.7874	0	1.25	101.41	
3	0	
4	20	20	100	22	62	98	0.7874	0	1.25	101.41	
5	30	20	100	23	63	70	0.7865	0	0.7	41.958	

Date Semis	= Date à laquelle a eu lieu le semis
Depuis Semis	= Temps écoulé depuis le semis jusqu'à la fin du pas de temps
Depuis Germin	= Temps écoulé depuis la germination jusqu'à la fin du pas de temps
Jusqu'à Matur	= Temps restant avant la maturité
Jusqu'à Recol	= Temps restant avant la récolte
Coef. CC	= Indice foliaire (Crop Cover)
Coef. LAI	= Indice foliaire (Leaf Area Index)
Coef. KC	= Coefficient cultural (constant pendant la période de culture)
Prof. Racines	= Profondeur des racines de la culture : en unité de hauteur verticale (c'est-à-dire en unité de charge hydraulique).

On remarque que dans cet exemple, qui correspond à un schéma de transpiration LEACHP, seul le coefficient **CC** est calculé. En revanche l'indice **LAI**, qui est utilisé uniquement par le schéma MACRO, n'est pas calculé.

8.2. Bilan hydroclimatique par zone

Si on a demandé un bilan hydroclimatique par zones : on obtient les valeurs :

- Du flux de **transpiration** (potentielle),
- Du LAI (**Leaf Area Index**) ou du « **Crop cover** »,
- De la **profondeur de racines** (exprimée en unité de hauteur verticale).

8.3. Champs de flux d'ETR et de Transpiration (potentielle)

À n'importe quel pas de temps, il est possible de sauvegarder une carte de :

- Flux d'ETR, ou d'ETR cumulée depuis une date :
Objet : **FLUX_ETR**, Action : « EDITION », c'est-à-dire « Sauvegarde »
- Flux de Transpiration potentiel (ou cumul depuis une date) :
Objet : **TRANSPI_CULT** Action : « EDITION », c'est-à-dire « Sauvegarde »

8.4. Champ des numéros de culture courants

À n'importe quel pas de temps, il est possible de sauvegarder une carte des numéros de culture courants :

Objet : **NUM_CULTUR**, Action : « EDITION », c'est-à-dire « Sauvegarde »

8.5. Historiques

En n'importe quelle maille de surface il est possible de demander des historiques :

- de flux d'**ETR calculés**,
- de **profondeur de racines**
Dans ces historiques la profondeur des racines est exprimée en unité utilisateur de « hauteur verticale » (pour comparaison avec les couches du maillage), bien que les profondeurs maximales aient été données en centimètre,
- de LAI (**Leaf Area Index**) ou de « **Crop cover** ».

9. Exemples d'application

Deux exemples d'application montrent la mise en œuvre de la prise en compte des cultures et permettent de valider cette fonctionnalité par rapport à des mesures sur des parcelles expérimentales et sur des lysimètres.

- Le premier exemple est relatif à une parcelle cultivée avec du maïs sur le site de la Côte St-André. Les résultats sont comparés avec une parcelle voisine laissée en sol nu.
- Le deuxième exemple est relatif à un ensemble de lysimètres situés près de la ville de Jülich (Allemagne).

9.1. Parcelle cultivée avec du maïs sur le site de la Côte St-André

Les données de cet exemple proviennent du site expérimental de « La côte Saint André » en Isère ; elles nous ont été fournies gracieusement par le LTHE de Grenoble, et en particulier par Béatrice Normand que nous remercions.

Les données concernent deux parcelles de sol : une parcelle en sol nu et une parcelle cultivée avec du maïs. Le bilan hydrique a été suivi pendant les trois années de la période 1991 à 1993. Pendant les périodes de culture (avril à novembre) de chaque année, les variations de teneur en eau et de succion, en conditions naturelles, ont été suivies sur une épaisseur de 80 cm, et le débit de drainage a été mesuré à la profondeur de 80 cm. (Duwig et al., 2003).

L'évapotranspiration réelle a alors été déterminée par bilan, connaissant le débit de percolation et la variation de stock total d'eau dans la tranche de sol de 80 cm.

Pour chaque année on dispose de mesures pendant 30 à 60 jours répartis du printemps à l'automne. Ces données concernent :

- Les teneurs en eau à huit profondeurs,
- Les succions à cinq profondeurs,
- Le débit de drainage,
- L'évapotranspiration réelle calculée.

La mise en œuvre détaillée de cet exemple d'application est décrite dans le « [Didacticiel du code de calcul MARTHE v7.5](#) », Rapport [BRGM/RP-64997-FR](#) (Thiéry 2015d) : projet « *Crop_StAndre_Corn.rma* ».

9.1.1. Définition du système modélisé

Les caractéristiques du système sont les suivantes :

Géométrie :

Colonne verticale :

- Hauteur verticale = 150 cm.
- Largeur = 100 cm ; épaisseur = 100 cm, soit une section de 1 m².

Paramètres hydrodynamiques :

La colonne est découpée en quatre zones (« Zones Géométriques »), correspondant à des faciès différents, ayant des paramètres uniformes. Ces quatre zones correspondent aux profondeurs suivantes :

- Zone n°1 : Profondeur 0 à 40 cm
- Zone n°2 : Profondeur 40 à 60 cm
- Zone n°3 : Profondeur 60 à 75 cm
- Zone n°4 : Profondeur 75 à 150 cm

Chaque horizon est caractérisé par :

- Une perméabilité à l'eau (exprimée ici en cm/j),
- Une porosité (ou teneur en eau à saturation) (exprimée ici en %),
- Une teneur en eau résiduelle : égale ici à **0** pour chaque horizon,
- Une loi de rétention de « Van Genuchten » définie par :
 - Une « Succion à ½ saturation » (exprimée ici en cm) h_t . Comme expliqué dans la notice d'utilisation c'est l'inverse du paramètre classique « α » exprimé en cm^{-1} .
 - Un exposant b_t (qui est l'inverse du paramètre classique « n »).
- Une loi de perméabilité de type « Puissance » définie uniquement par un exposant b_k .

Les paramètres des quatre horizons sont rassemblés dans la Figure 24.

Zone	Perméabilité (cm/j)	Porosité (%)	Succion à ½ saturation (cm)	Exposant loi de Rétention [-]	Exposant loi de Perméabilité [-]
1	12	30.14	8.319	0.8846	19.67
2	12	30.46	27.248	0.8382	14.765
3	15	33.12	33.67	0.7644	10.407
4	15	33.00	9.20	0.8058	12.091

Figure 24 – Site de la Côte St-André : Paramètres d'écoulement en Zone Non Saturée.

Conditions aux limites :

- Historiques de « Pluie + Irrigation » et historiques d'Évapotranspiration potentielle (ETP) en surface.
- Surface de suintement (« Index de suintement = 1 ») en bas de la colonne.

État initial :

Profil de teneur en eau initiale. Teneur en eau comprise entre 24.8 % et 28 %.

Régime d'écoulement :

- Régime transitoire pendant 1096 jours du 01/01/1991 au 31/12/1993.

Paramètres pour le développement des cultures :

On choisit les caractéristiques suivantes

- Type de Zones pour les Cultures (et Nitrates) : **Zones de Sol**
- Schéma de Transpiration et Développement de la Végétation : **LEACHP**
- Schéma de Stress Hydrique : **SWAP**

Au cours des trois années de simulation, il y a uniquement une culture de maïs (« corn » en anglais) avec des paramètres identiques chaque année.

Les paramètres relatifs à cette culture sont les suivants :

- Durée avant maturité depuis la germination (« émergence ») = 120 jours
- Durée avant récolte depuis la germination (« émergence ») = 178 jours
- Crop Cover maximal « CC_Max) = 0.9
- Coefficient cultural appliqué au flux d'ETP « KC » = 1
- Profil de densité des racines « Densi_Racines » = 0 ⇔ « Cylindrique »
- Profondeur maximale des racines = 76 cm
- Succion de flétrissement pour le calcul du facteur de stress = 8000 cm (unité de charge)
- Succion de flétrissement pour le calcul du facteur de stress = 500 cm (unité de charge)
- Succion de flétrissement pour le calcul du facteur de stress = 50 cm (unité de charge)

Les dates de semis et de récolte du maïs pour les 3 années sont :

- Semis : 22/04/1991 Récolte : 05/10/1991
- Semis : 23/04/1992 Récolte : 08/10/1992
- Semis : 20/04/1993 Récolte : 15/10/1993

Dans cet exemple les « durées de germination » (durées d'émergence) ne sont pas connues. On a donc considéré que la durée de germination, pendant laquelle il n'y a pas de développement foliaire ni de développement des racines, est égale à 0 jour.

9.1.2. Modélisation avec MARTHE**Discrétisation :**

La colonne verticale est modélisée en coupe verticale comme une « colonne » unique de 100 cm de largeur comprenant 36 lignes de largeurs variables, avec une discrétisation fine près de la surface (lignes n°1 à n°2).

Les ordonnées, correspondant aux altitudes vont de $y = 0$ (à la surface du sol) à $y = -150$ cm, en bas de la dernière ligne.

Les largeurs des lignes, représentant la verticale, sont les suivantes :

- Lignes n°1 et n°2 : 0.25 cm
- Lignes n°3 et n°6 : 1 cm
- Ligne n°7 : 2 cm

- o Ligne n°8 : 3 cm
- o Lignes n°9 à n°36 : 5 cm

Les quatre zones correspondent alors aux lignes suivantes :

- o Zone n°1 : lignes n°1 à n°14
- o Zone n°2 : lignes n°15 à n°18
- o Zone n°3 : lignes n°19 à n°21
- o Zone n°4 : lignes n°22 à n°36

Paramètres numériques :

- o Nombre maximal d'itérations pour le Régime Transitoire = 70
- o Nombre maximal d'itérations pour le Régime Permanent = 0
- o Variation moyenne de charge entre 2 itérations pour convergence = 10^{-6}
- o Coefficient de sous-relaxation pour le calcul de l'hydraulique = 0.3

Pour les calculs en Zone Non Saturée

- o Durée minimale du pas de temps de calcul interne = **0.03** jours
- o Durée maximale du pas de temps de calcul interne = **1** jour
- o Variation maximale de teneur en eau pendant le pas de temps de calcul = 30 unités de teneur en eau = **30 %**
- o Erreur maximale de bilan global acceptée = **2 %** de bilan
- o Succion maximale <==> Assèchement maximal = **8000** cm (80 m)
- o Perméabilité minimale (pour sécurité numérique) = 10^{-6} (unités de perméabilité)
- o Loi de rétention par défaut : **Van_Gen** [facultatif]
- o Loi de Perméabilité par défaut : **Puiss** [facultatif]

Fichier des « Paramètres cultureux des Cultures »

Au cours des trois années de simulation, il y a uniquement une culture de maïs (« corn » en anglais) avec des paramètres identiques chaque année. On définit donc uniquement une seule culture qu'on appelle « culture n°1 » : numéro de culture = 1.

La Figure 25 présente le fichier des « Paramètres cultureux ». Pour une meilleure lisibilité, la ligne présentant les 19 paramètres relatifs à la culture a été coupée en 2 sur la figure, mais dans le fichier il y a 1 seule ligne de 19 colonnes

```

Côte St-André : Fichier des Paramètres Cultureux de chaque Culture
<< Ici 1 seule culture = Maïs = Culture n°1 >>
<< Explications sur les paramètres possibles sur 10 lignes >>
#<v7.6># --- Fin du texte libre --- ; Ne pas modifier/retirer cette ligne
Num TGermi TMatu TReco CCMax KC X1 X2 LAIMn LAIMx LAIRec Besoin
1 0 120 178 0.9 1.0 2.0 0.7 0. 3.5 2.5 400
    
```

[Colonnes n°1 à n°12]

```

Den_Racin Prof_Racin Form_Racin Fletri Strs- Strs+ Seuil_Strs # Nom
0 76 3.67 8000 500 50 0.6 # Maïs
    
```

[Colonnes n°13 à n°19 (+ le nom facultatif)]

Figure 25 – Site de la Côte St-André : Fichier des paramètres cultureux. Ce fichier comporte 6 lignes. Sur la figure la 6^{ème} ligne, qui comporte 19 colonnes, a été découpée en 2 une meilleure lisibilité. Seuls les paramètres en caractères gras sont utilisés pour ce calcul.

Avec le schéma de développement de LEACHP, les paramètres d'évolution du LAI, et le « besoin total d'eau » ne sont pas utilisés.

Avec le profil de densité « Cylindrique », le « Facteur de forme » pour un profil exponentiel n'est pas utilisé.

Avec le schéma de stress SWAP, le « Seuil de Stress » n'est pas utilisé.

9.1.3. Résultats obtenus pour la parcelle de maïs

La Figure 26 présente l'historique des débits de drainage calculés au bas de la colonne. (Elle est obtenue à partir du fichier « *histobil_debit.prn* » ou du fichier « *historiq.prn* »).

La Figure 27 permet de comparer l'ETP, l'ETR et la transpiration des racines. (Elle est obtenue à partir du fichier « *histoclim.prn* »).

La Figure 28 montre la diminution de transpiration due au stress des racines et la diminution d'ETR due à la « Désaturation », c'est-à-dire à une succion qui dépasse la valeur maximale (8000 cm) fixée dans le paragraphe « Zone Non-Saturée » du fichier des « Paramètres généraux ». (Elle est obtenue à partir des fichiers « *histoclim.prn* » et « *histobil_debit.prn* »).

La Figure 29 montre l'évolution du couvert végétal (« Crop cover ») et de la profondeur des racines. (Elle est obtenue à partir du fichier « *histoclim.prn* »).

La Figure 30 montre que le modèle simule très bien les mesures effectuées dans la zone non saturée. Elle présente la comparaison « simulation – mesures » de l'évolution de la pression à 15 cm de profondeur et de la teneur en eau à 80 cm de profondeur. (fichier « *historiq.prn* ».)

On dispose des relevés des cumuls du débit de drainage en bas de colonne et de l'ETR calculée à partir des variations du stock dans la tranche de sol.

La Figure 31 montre que le modèle simule très bien les mesures de drainage et d'ETR effectuées pendant chacune des trois saisons de culture en 1991, 1992 et 1993.

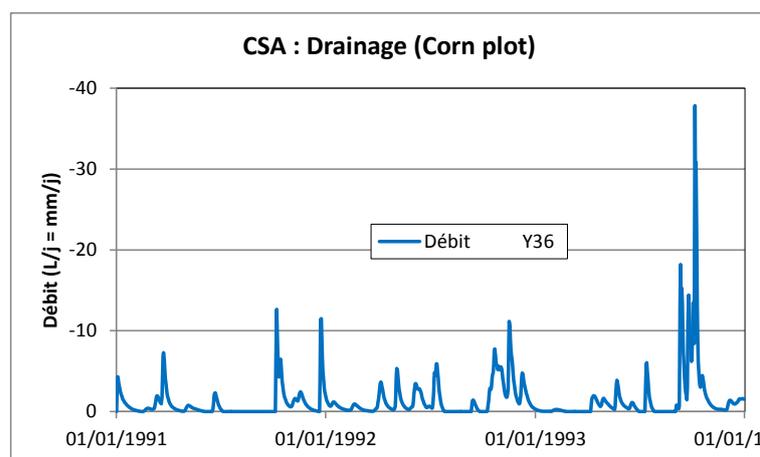


Figure 26 – Site de la Côte St-André : Débit de drainage calculé (en bas de la colonne)

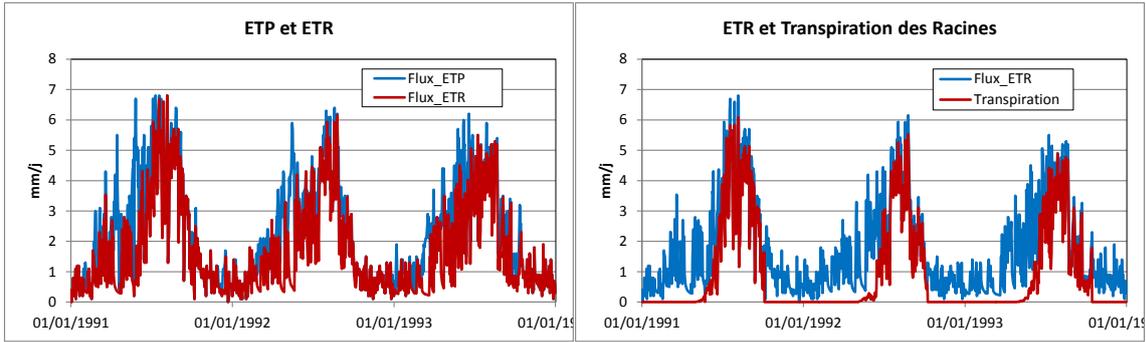


Figure 27 – Site de la Côte St-André : Flux d'ETP, d'ETR et de transpiration

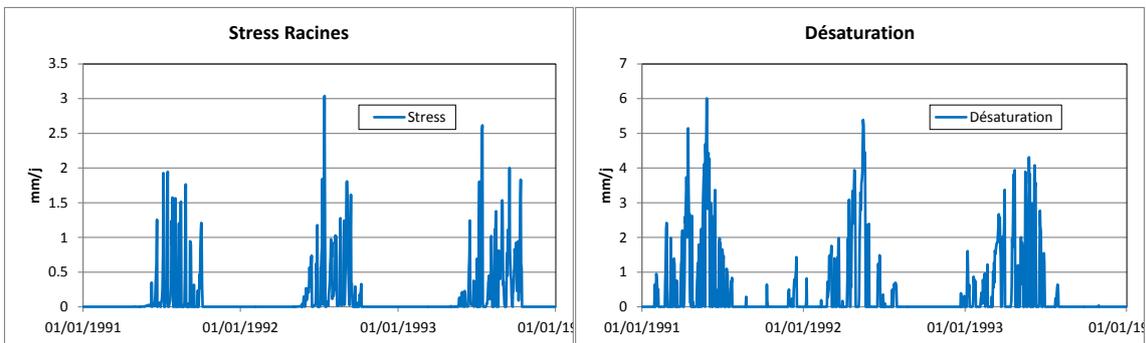


Figure 28 – Site de la Côte St-André : Réduction de l'évapotranspiration
Par le stress des racines (à gauche) ;
Par la limitation de l'évaporation par la succion maximale (à droite)

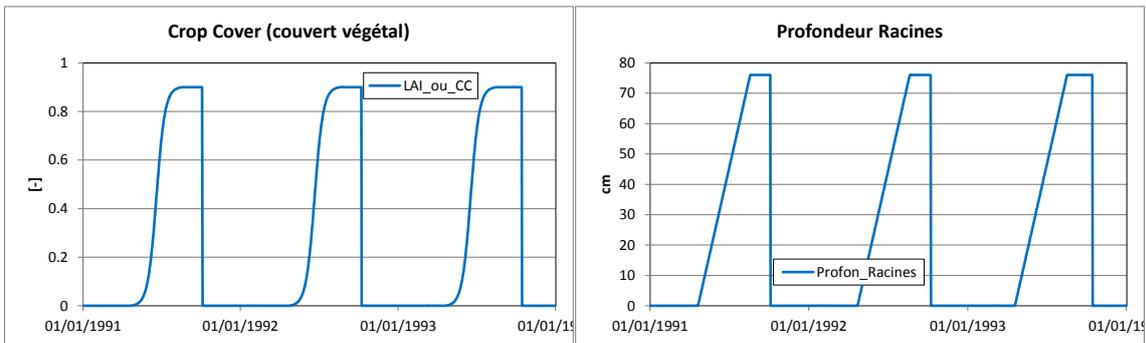


Figure 29 – Site de la Côte St-André : Évolution du couvert végétal et de la profondeur des racines

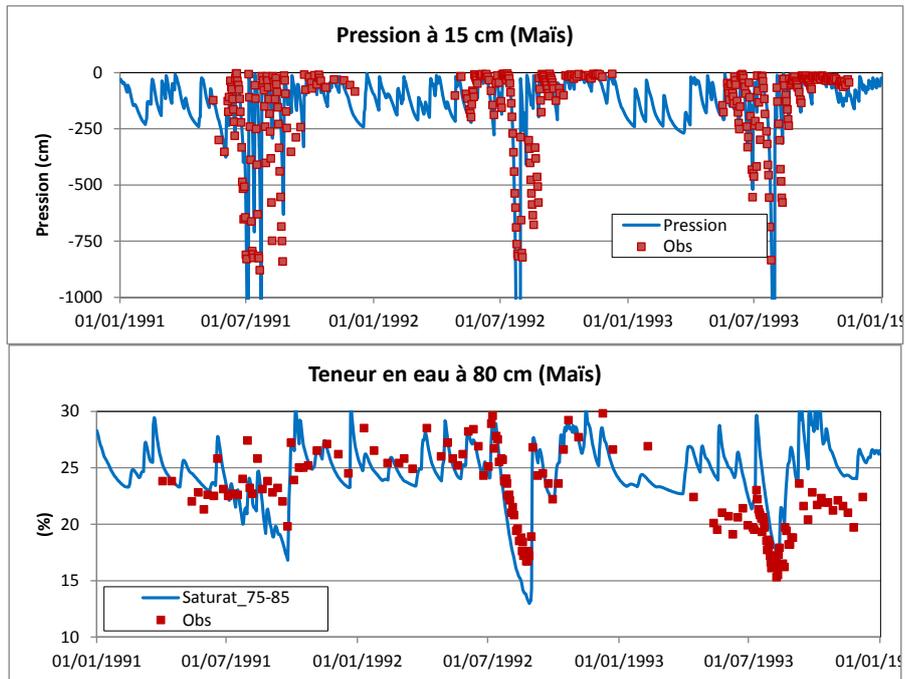


Figure 30 – Site de la Côte St-André parcelle de maïs période 1991-1993 : Observations et simulations. En haut : Pression à 15 cm ; en bas : Teneur en eau à 80 cm

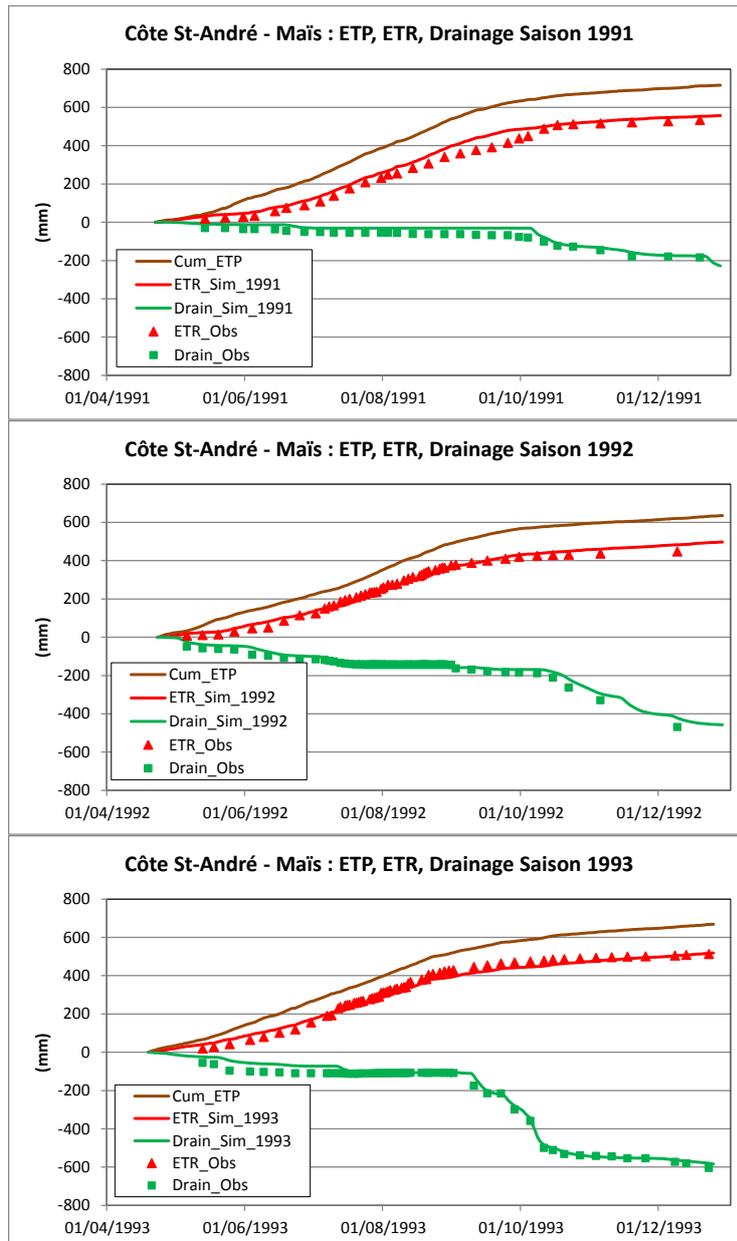


Figure 31 – Site de la Côte St-André : saisons 1991, 1992 et 1993. Parcelle de maïs : Observations et simulations des composantes du bilan : ETP, ETR et Drainage Cumuls à partir de la date de semis.

9.1.4. Comparaison avec une parcelle de sol nu (sans culture)

On dispose des mesures relatives à une parcelle de sol nu située à proximité immédiate. À titre de comparaison, pour mettre en évidence l'influence des cultures, on a réalisé le même calcul pour un sol nu.

Pour le sol nu : la « Succion à ½ saturation » de la loi de rétention de la zone (géométrique) n°4 a une valeur un peu différente : 20 cm (au lieu de 9.2 cm).

Les valeurs de flux de « Pluie + Irrigation » sont très légèrement différentes. Les valeurs de flux d'ETP sont identiques à celles de la parcelle de maïs.

Les résultats obtenus pour le sol nu sont assez différents :

Les Figure 32 et Figure 33 montre que le modèle simule correctement les mesures effectuées dans la zone non saturée pour le sol nu. La Figure 32 permet la comparaison de l'évolution de la pression à 15 cm de profondeur avec culture de maïs en en sol nu. Elle montre qu'en sol nu, en l'absence de racines, pendant la saison 1991 la dépression (la succion) est beaucoup moins grande (250 cm au lieu de 1000 cm). La Figure 33 montre que pendant la saison 1992 la teneur en eau à 80 cm de profondeur diminue nettement moins pendant l'été.

La Figure 34 compare les débits de drainage. Elle montre un accroissement significatif du drainage en sol nu pendant l'été.

La Figure 35 compare les cumuls de drainage et de l'évapotranspiration réelle (ETP) pendant la saison 1991. Elle montre qu'en sol nu le drainage total est doublé suite à une diminution marquée de l'ETR.

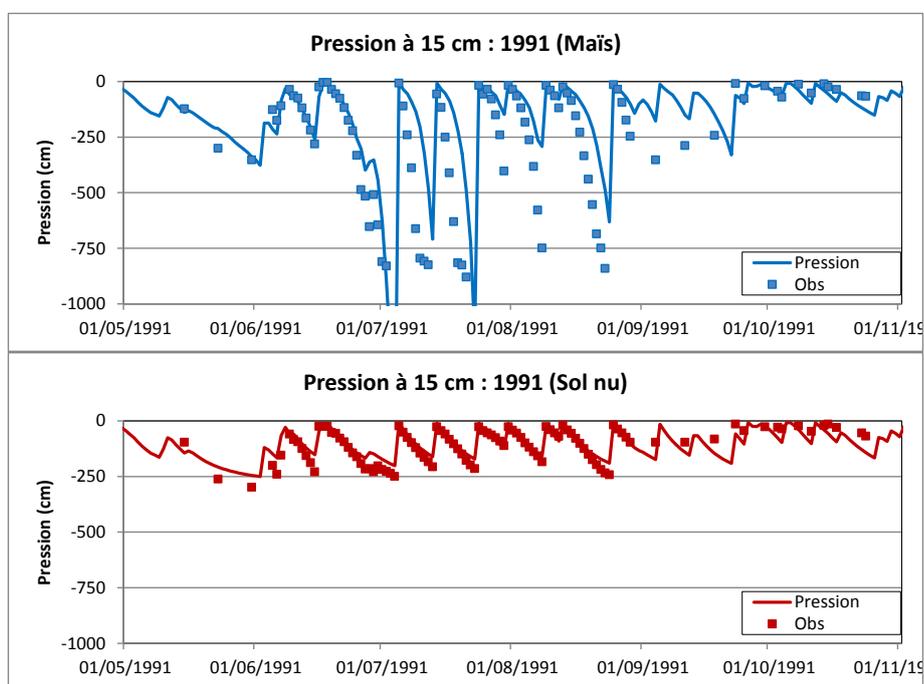


Figure 32 – Site de la Côte St-André : saison 1991. Parcelle de maïs et parcelle de sol nu : Observations et simulations de la pression à 15 cm. En haut parcelle de maïs ; en bas : sol nu

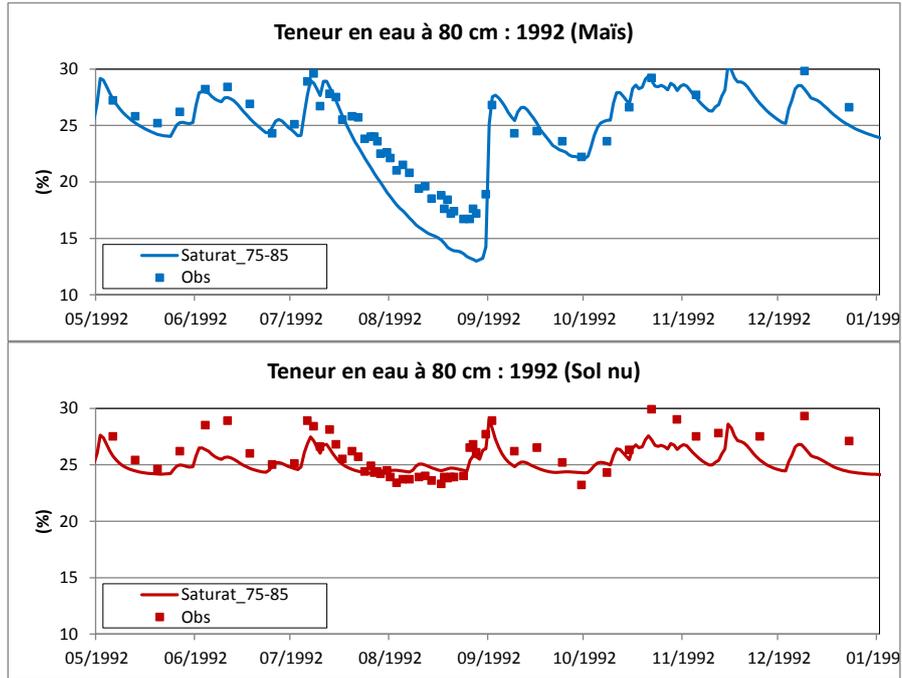


Figure 33 – Site de la Côte St-André : saison 1992. Parcelle de maïs et parcelle de sol nu : Observations et simulations de la teneur en eau à 80 cm. En haut parcelle de maïs ; en bas : sol nu

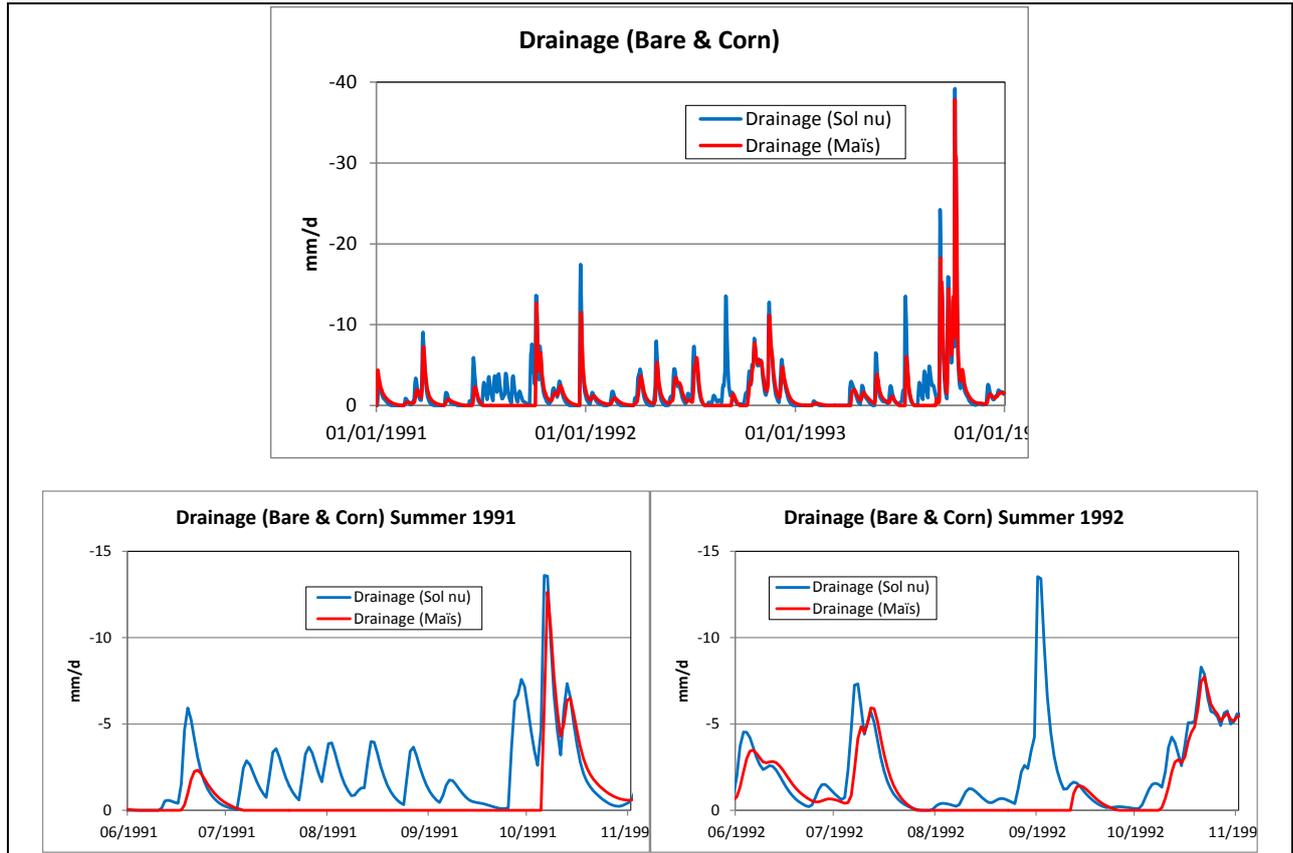


Figure 34 – Site de la Côte St-André : saison 1992. Parcelle de maïs et parcelle de sol nu :
 Comparaison des débits de drainage calculés.
 En haut pour toute la période ; En bas à gauche en 1991, En bas à droite en 1992

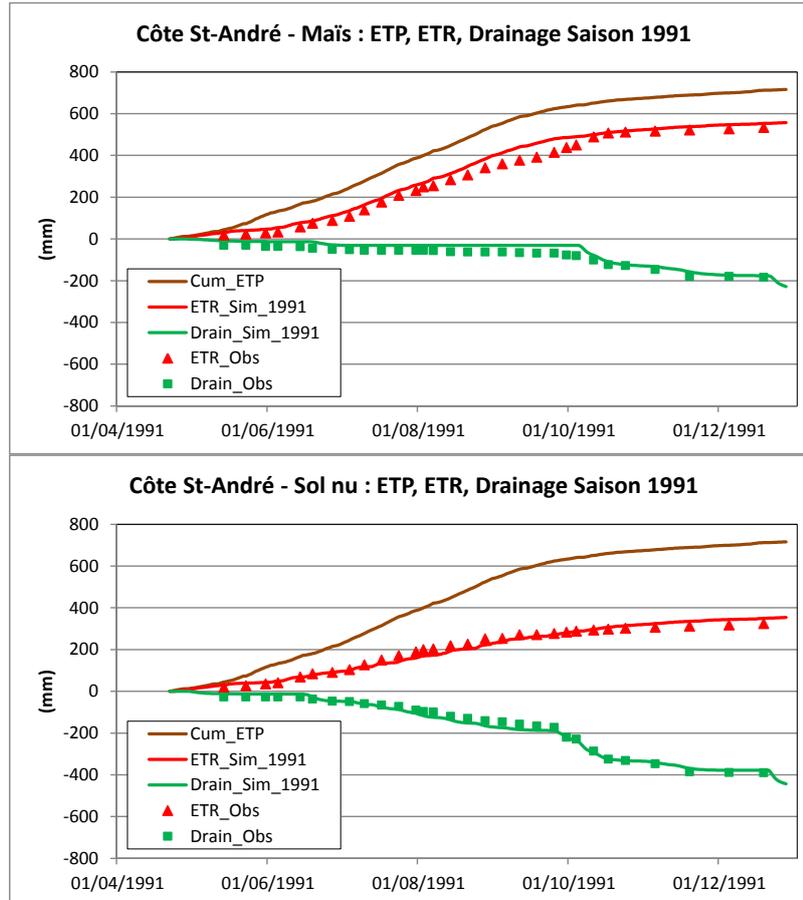


Figure 35 – Site de la Côte St-André : saison 1991. Parcelle de maïs et parcelle de sol nu : Comparaison du drainage et de l'évapotranspiration réelle (ETP). En sol nu, le drainage total est doublé suite à une diminution de l'ETR

9.2. Lysimètre avec rotation de cultures de blé, d'orge et d'avoine sur le site de Jülich

Les données de cet exemple proviennent d'un ensemble de cinq grands lysimètres soumis à des cultures de céréales et suivis pendant une période de 21 mois (Herbst et al. 2005).

Les cinq lysimètres à drainage libre, constitués chacun d'un monolithe de sol non perturbé contenant un Luvisol orthique, ont été utilisés pour suivre le bilan hydrique du sol. Les monolithes avaient une profondeur de 1.10 m et une surface de 1.0 m².

- Du blé d'hiver a été semé en premier avec une période de pré-germination en novembre 1988,
- Pendant la période de végétation suivante, c'est de l'orge d'hiver (*Hordeum vulgare* L.) qui a été semée en octobre 1989 puis récoltée en mai 1990,
- La culture suivante était de l'avoine (*Avena sativa* L.), qui a été récoltée en août 1990.

Pendant les 627 jours de la période du 25 novembre 1988 au 13 août 1990, les précipitations, l'humidité de l'air, la température de l'air, la vitesse du vent et le rayonnement ont été suivis sur une base quotidienne. La teneur en eau du sol a été mesurée environ tous les 4 à 5 jours avec

une sonde à neutrons à différentes profondeurs. Le drainage du lysimètre a pu être mesuré directement, tandis que l'évapotranspiration réelle ETR (mm) a été calculée à partir du bilan hydrique des sols :

$$\text{ETR} = \text{Pluie} - \text{Drainage} - \text{Diff_Stock}$$

La mise en œuvre détaillée de cet exemple d'application est décrite dans le « [Didacticiel du code de calcul MARTHE v7.5](#) », Rapport [BRGM/RP-64997-FR](#) (Thiéry 2015d) : projet « *Crop_Lysim_Julich.rma* ».

9.2.1. Définition du système modélisé

Les caractéristiques du système sont les suivantes :

Géométrie :

Colonne verticale :

- Hauteur verticale = 110 cm.
- Section de 1 m².

Paramètres hydrodynamiques :

La colonne est découpée en trois zones (« Zones Géométriques »), ayant des paramètres uniformes. Ces trois zones correspondent aux profondeurs suivantes :

- Zone n°1 : Profondeur 0 à 40 cm)
- Zone n°2 : Profondeur 40 à 60 cm)
- Zone n°3 : Profondeur 60 à 110 cm)

Chaque horizon est caractérisé par :

- Une perméabilité à l'eau (exprimée ici en cm/j)
- Une porosité (ou teneur en eau à saturation) (exprimée ici en %)
- Une teneur en eau résiduelle (exprimée ici en %)
- Une loi de rétention « Homographique » définie par :
 - Une « Succion à ½ saturation » (exprimée ici en cm) h_t . Comme expliqué dans la notice d'utilisation.
 - Un exposant b_t .
- Une loi de « perméabilité fonction de la succion » de type « Homographique » définie par :
 - Une « Succion à ½ perméabilité » (exprimée ici en cm) h_k . Comme expliqué dans la notice d'utilisation des calculs en Zone Non Saturée du code de calcul MARTHE.
 - Un exposant b_k .

Les paramètres d'écoulement en ZNS des trois horizons sont rassemblés dans la Figure 36.

Zone	Perméabilité (cm/j)	Porosité (%)	Teneur en eau Résid. (%)	Succion à ½ saturat. (cm)	Exposant loi de Rétention [-]	Succion à ½ perméabilité (cm)	Exposant loi de Perméa. [-]
1	84.09	39	0	277.78	1.2195	0.9578	1.554
2	162.63	40	7	270.27	1.2642	0.5924	1.452
3	39.80	38	10	666.67	1.3298	0.5394	1.408

Figure 36 – Lysimètre de Jülich : Paramètres d'écoulement en Zone Non Saturée.

Conditions aux limites :

- Historiques de Pluie et d'Évapotranspiration potentielle (ETP) en surface.
- Surface de suintement (« Index de suintement = 1 ») en bas de la colonne.

État initial :

Profil de pression initiale :

- Profondeur : 0-30 cm : Pression = -134.99 cm.
- Profondeur : 30-40 cm : Pression = -117.84 cm.
- Profondeur : 40-60 cm : Pression = -220.00 cm.
- Profondeur : 60-80 cm : Pression = -1038.0 cm.
- Profondeur : 80-110 cm : Pression = -742.95 cm

Régime d'écoulement :

- Régime transitoire pendant 627 jours du 25/11/1988 au 13/08/1990.

Paramètres pour le développement des cultures :

On choisit les caractéristiques suivantes

- Type de Zones pour les Cultures (et Nitrates) : **Zones de Sol**
- Schéma de Transpiration et Développement de la Végétation : **LEACHP**
- Schéma de Stress Hydrique : **SWAP**

Au cours de la période de simulation, il y a successivement 3 cultures auxquelles on attribue les numéros 1 à 3.

Les paramètres relatifs à ces cultures sont les suivants :

- Durée avant maturité depuis la germination (« émergence ») = 150, 130 et 60 jours
- Durée avant récolte depuis la germination (« émergence ») = 230, 196 et 90 jours
- Crop Cover maximal « CC_Max) = 0.8 pour les 3 cultures
- Coefficient cultural appliqué au flux d'ETP « KC » = 1.08, 0.8 et 0.8
- Profil de densité des racines « Densi_Racines » = 3 ⇔ « Exponentiel »
- Profondeur maximale des racines = 110, 100 et 80 cm
- Facteur de forme pour un « patron racinaire » exponentiel = 3.67 pour les 3 cultures
- Succion de flétrissement pour le calcul du facteur de stress = 8000 cm (unité de charge)
- Succion de flétrissement pour le calcul du facteur de stress = 500 cm (unité de charge)
- Succion de flétrissement pour le calcul du facteur de stress = 50 cm (unité de charge)

Pour la période simulée, les dates de semis (ou plutôt de germination) et de récolte des cultures sont :

- Semis : 16/12/1988 Récolte : 03/08/1989 : Blé d'hiver
- Semis : 21/10/1989 Récolte : 11/05/1990 : Orge d'hiver
- Semis : 15/05/1990 Récolte : 13/08/1990 : Avoine

Dans cet exemple les « durées de germination » (durées d'émergence) ne sont pas connues. On a donc considéré que la durée de germination, pendant laquelle il n'y a pas de développement foliaire ni de développement des racines, est égale à 0 jour.

9.2.2. Modélisation avec MARTHE

Discrétisation :

La colonne verticale discrétisée en une « colonne » unique de 100 cm de largeur comprenant 110 lignes de 1 cm de largeur.

Les ordonnées, correspondant aux altitudes vont de $y = 0$ (à la surface du sol) à $y = -110$ cm, en bas de la dernière ligne.

Les trois zones correspondent alors aux lignes suivantes :

- Zone n°1 : lignes n°1 à n°40
- Zone n°2 : lignes n°40 à n°60
- Zone n°3 : lignes n°60 à n°110

Paramètres numériques :

- Nombre maximal d'itérations pour le Régime Transitoire = 100
- Nombre maximal d'itérations pour le Régime Permanent = 0
- Variation moyenne de charge entre 2 itérations pour convergence = 10^{-6}
- Coefficient de sous-relaxation pour le calcul de l'hydraulique = 0.3
- Nombre d'itérations internes pour le solveur = 30

Pour les calculs en Zone Non Saturée

- Durée minimale du pas de temps de calcul interne = **0.03** jours
- Durée maximale du pas de temps de calcul interne = **1** jour
- Variation maximale de teneur en eau pendant le pas de temps de calcul = 20 unités de teneur en eau = **20 %**
- Erreur maximale de bilan global acceptée = **1 %** de bilan
- Succion maximale <==> Assèchement maximal = **8000** cm (80 m)
- Perméabilité minimale (pour sécurité numérique) = **10^{-6}** (unités de perméabilité)
- Loi de rétention par défaut : **Homogr** [facultatif]
- Loi de Perméabilité par défaut : **Homogr** [facultatif]

Fichier des « Paramètres cultureux des Cultures »

Au cours de la période de simulation, il y a successivement trois cultures auxquelles on attribue les numéros 1 à 3.

La Figure 37 présente le fichier des « Paramètres cultureux ». Pour une meilleure lisibilité, les trois lignes présentant les 19 paramètres relatifs aux cultures ont été coupées en deux sur la figure. Mais dans le fichier elles apparaissent chacune sous forme d'une ligne de 19 colonnes

Lysimètre Juelich : Fichier des Paramètres Cultureux de chaque Culture											
#<v7.6># --- Fin du texte libre --- ; Ne pas modifier/retirer cette ligne											
Num	TGermi	TMatu	TReco	CCMax	KC	X1	X2	LAIMn	LAIMx	LAIRec	Besoin
1	0	150	230	0.8	1.08	2.0	0.7	0.	3.5	2.5	400
2	0	130	196	0.8	0.8	2.0	0.7	0.	3.5	2.5	400
3	0	60	90	0.8	0.8	2.0	0.7	0.	3.5	2.5	400

[Colonnes n°1 à n°12]

Den_Racin	Prof_Racin	Form_Racin	Fletri	Strs-	Strs+	Seuil_Strs	#	Nom
3	110	3.67	8000	500	50	0.6	#	Blé hiv
3	100	3.67	8000	500	50	0.6	#	Orge hiv
3	80	3.67	8000	500	50	0.6	#	Avoine

[Colonnes n°13 à n°19 (+ le nom facultatif)]

Figure 37 – Site de Jülich : Fichier des paramètres cultureux.
 Sur la figure les 3 lignes des cultures n°1 à n°3, qui comportent chacune 19 colonnes,
 ont été découpées en 2 une meilleure lisibilité.
 Seuls les paramètres en caractères gras sont utilisés pour ce calcul.

Avec le schéma de développement de LEACHP, les paramètres d'évolution du LAI, et le « besoin total d'eau » ne sont pas utilisés.

Avec le schéma de stress SWAP, le « Seuil de Stress » n'est pas utilisé.

9.2.3. Résultats obtenus pour le lysimètre de Jülich

La Figure 38 montre que le modèle simule très bien les mesures d'Évapotranspiration réelle (ETR). Le cumul de l'ETR est également très bien reproduit ce qui montre qu'il n'y a pas de biais.

La Figure 39 montre que le modèle reproduit bien le cumul du débit de drainage mesuré à la base du lysimètre. (Fichier « *histobil_debit.prn* » ou fichier « *historiq.prn* »).

La Figure 40 montre que le modèle simule très bien les mesures de teneur en eau dans la zone non saturée à 25 cm de profondeur et à 85 cm de profondeur. (Fichier « *historiq.prn* »).

La Figure 41 montre l'évolution du couvert végétal (« Crop cover ») et de la profondeur des racines. La profondeur maximale des racines est différente pour chaque culture. (Fichier « *histoclim.prn* »).

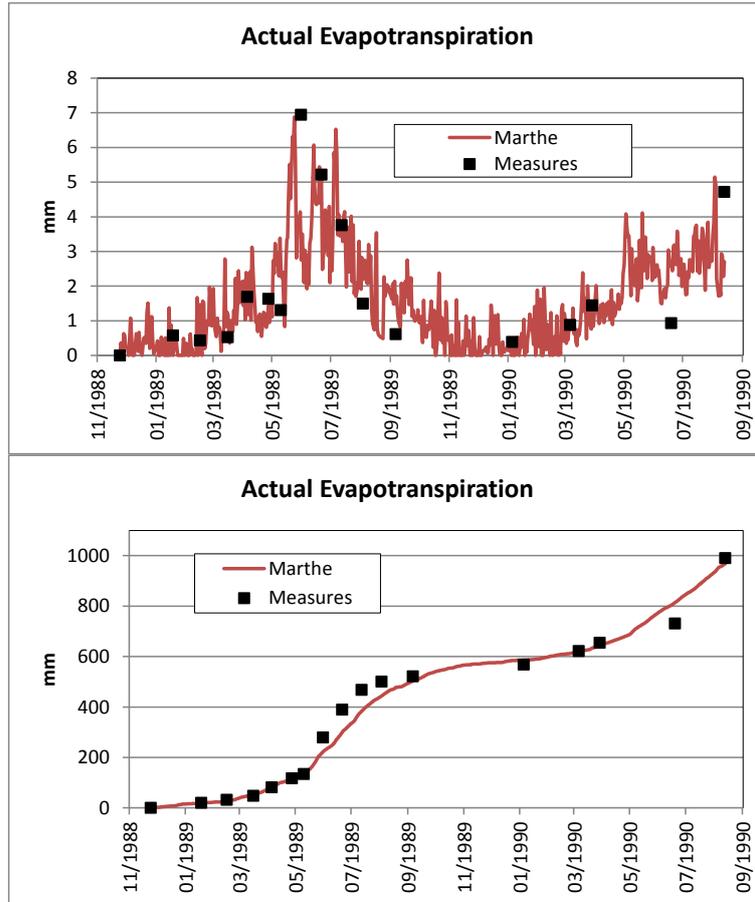


Figure 38 – Site de Jülich : Simulation de l'ETR (en haut) et du cumul de l'ETR (en bas).

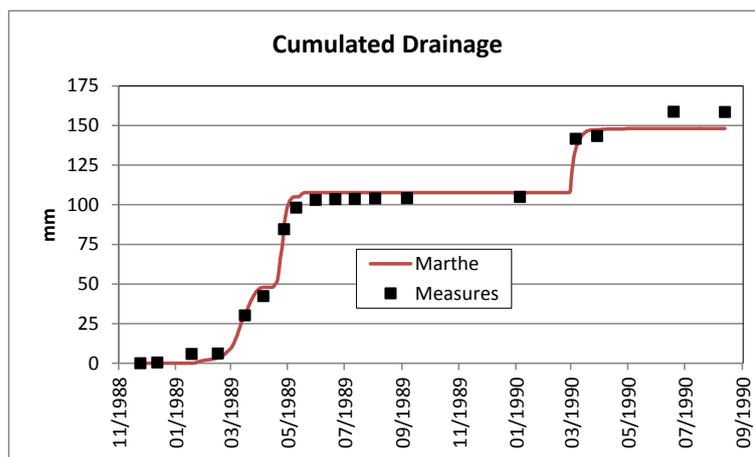


Figure 39 – Site de Jülich : Simulation du cumul du débit de drainage en bas du lysimètre.

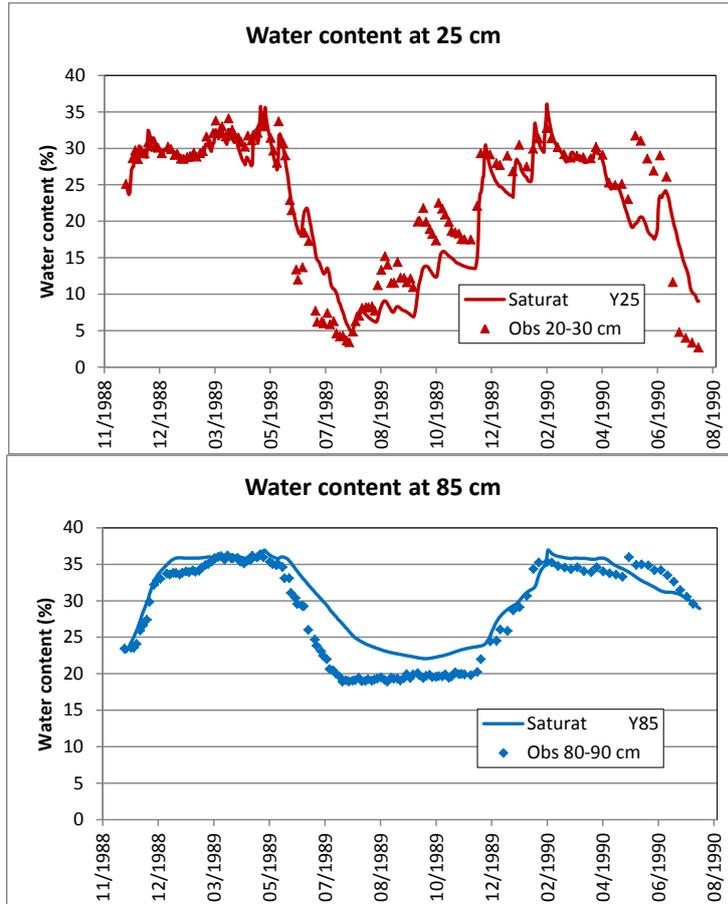


Figure 40 – Site de Jülich : Simulation de la teneur en eau à 25 cm et à 85 cm de profondeur.

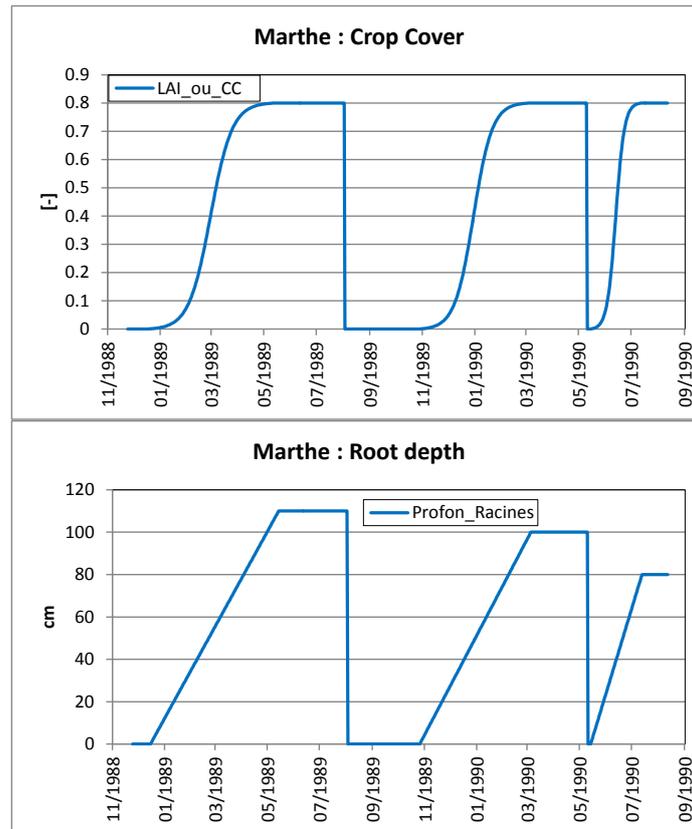


Figure 41 – Site de Jülich : Évolution du couvert végétal et de la profondeur des racines.
La profondeur maximale des racines est différente pour chaque culture.

10. Conclusions

Des schémas d'interactions de l'atmosphère avec les couches superficielles du sol, dépendant de la végétation (ou des cultures) qui le recouvre, sont disponibles dans le code MARTHE du BRGM. Ces schémas permettent en particulier de simuler un prélèvement par transpiration qui dépend de l'état de la végétation, ainsi qu'un prélèvement de masse (fertilisant, phytosanitaires).

Les fonctionnalités disponibles sont les suivantes :

- Répartition de l'évapotranspiration en une évaporation appliquée au sol, et une transpiration par la végétation. Cette répartition dépend en particulier de l'état de développement des parties aériennes de la végétation (feuilles),
- Prélèvement d'eau par la végétation sur une profondeur variable qui dépend : de l'état de développement des racines, et de leur répartition sur la verticale,
- Limitation des prélèvements d'eau par la végétation en fonction de son éventuel état de stress.

Pour les calculs de transfert de masse (fertilisant, phytosanitaires), les fonctionnalités suivantes sont également disponibles :

- Pas de prélèvement de masse par l'évaporation à la surface du sol,
- Prélèvement de masse par la transpiration des racines selon le produit (fertilisant etc.).

11. Valeurs de référence pour les paramètres de culture

Les figures des pages suivantes présentent sous forme de tableaux (certains étant déjà reproduits dans le corps du rapport) :

- Un récapitulatif des différents schémas et paramètres cultureux implémentés dans le code MARTHE (Figure 42),
- [Les paramètres cultureux pour 5 cultures classiques](#) en Allemagne et 8 cultures en Picardie (Figure 43 et Figure 45),
- Une liste de facteurs **KC**. (Figure 46),
- Une liste de paramètres cultureux établis pour la ville de Châteaudun (France). (Figure 47).

Paramètre	Description	Schéma				Valeur Réf.
		LEACHP	MACRO	AGRIFLUX		
Transpiration et évaporation						
t_Matur	Durée en jours de la germination à la maturité	+	+	+		
t_Récolte	Durée en jours de la germination à la récolte	+	+			
CCmax	Valeur maximale du Crop Cover (schéma LEACHP)	+				0 à 1
KC	Coefficient cultural appliqué au flux d'ETP	+	+	+		
x ₁	Exposants pour calculer le LAI (schéma MACRO)		+			Environ 2
x ₂						Environ 0.7
LAI _{min}	Paramètres pour calculer le LAI (schéma MACRO)					Général. 0
LAI _{max}			+			3 à 5
LAI _{récolte}						Environ 1
Besoin_Tot	Besoin hydrique total de la culture (AGRIFLUX)			+		
Développement Racinaire						
Schéma_raci	Numéro du schéma de densité Racinaire:		+	+		0 Cylindrique 1 Conique 2 Hémispher. 3 Exponentiel
Prof_Racin	Profondeur racinaire maximale. en centimètre		+	+		
Form_Racin	Facteur de forme adimensionnel pour un schéma exponentiel		(schéma exponent.)			Approx. 3.7
Stress Hydrique						
Succ_fletr	Succion de flétrissement (Wilting Point) pour calculer le facteur de stress		+		+	
Succ_max	Succion maximale pour calculer le facteur stress (succion en unités de charge)		+		+	
Succ_min	Succion minimale pour calculer le facteur de stress [Pas de stress entre succ_min et succ_max]		+		+	
Seuil_Stress	Seuil de stress [-] [stress en dessous de ce seuil]		+			Approx. 0.1
Prélèvement de Masse par la végétation						
fc	Facteur de concentration racinaire					0 à 1

Figure 42 – Récapitulatif des schémas et des paramètres cultureux dans le logiciel MARTHE.

Paramètres de référence pour 5 cultures classiques. Elles correspondent au site de Zwischensholle situé en Rhénanie du Nord-Westphalie (Allemagne). Les paramètres correspondent au schéma de développement de MACRO et au schéma de stress également de MACRO.

Jours Maturité (après germin.)	Jours Récolte (après germin.)	KC	X1	X2	LAI mini	LAI maxi	LAI Récolte	Nom
99	149	0.94	2	0.7	0	4.2	1	Maïs
87	130	0.94	2	0.7	0	3	1	Pommes de terre
194	291	0.84	2	0.7	0	3.8	1	Blé d'hiver
109	163	0.93	2	0.7	0	4.2	1	Betteraves à sucre
92	185	1	2	0.7	0	2	1	Herbe Prairie

Figure 43 – Paramètres culturaux de 5 cultures de référence (1^{ère} partie).

Répartition racines	Profond racines	Succion Flétriss.	Succion Stress min..	Succion Stress. max.	Seuil Stress	Nom
[-]	(cm)	(m)	(m)	(m)	[-]	
Conique	120	80	3.25	0.3	0.1	Maïs
Conique	70	160	3.2	0.25	0.1	Pommes de terre
Conique	110	160	5	0.01	0.1	Blé d'hiver
Conique	120	160	3.2	0.25	0.1	Betteraves à sucre
Conique	60	80	2	0.25	0.1	Herbe Prairie

Figure 44 – Paramètres culturaux de 5 cultures de référence (2^{ème} partie).

T_Germin	T_Maturité	T_Récolte	dt_Matu-Germi	dt_Récolt-Germi	Nom
(Jours)	(Jours)	(Jours)	(Jours)	(Jours)	
154	215	294	61	140	Blé
23	110	188	87	166	Betterave
171	246	321	75	150	Colza
54	90	161	36	107	Féverolles
11	116	181	105	170	Maïs
3	63	141	60	138	Orge de Printemps
3	64	125	61	122	Pois de Printemps
1	29	63	28	62	Interculture

Figure 45 – Durées de développement de 8 cultures de référence en Picardie
 « T_Germi » = Durée du semis à la germination, « T_Maturité » = Durée du semis à la Maturité,
 « T_Récolte » = Durée du semis à la récolte.
 « dt_Matu_Germi » = Durée de Germination à Maturité ; « dt_Récolt_Germi » = Durée de Germination à Récolte.

Crop	kc_season	kc_year
Perennial		
Apples	0.98	0.99
Grass	1.00	1.00
Vines	0.79	0.89
Strawberries	1.00	1.00
Bushberries	1.00	1.00
Citrus	0.73	0.73
Field and vegetable crops		
Potatoes	0.83	0.94
Sugar beet	0.87	0.93
Winter cereals	0.74	0.84
Beans	0.73	0.89
Cabbage	0.87	0.97
Carrots	0.85	0.96
Maize	0.86	0.94
Oilseed rape (summer)	0.85	0.93
Oilseed rape (winter)	0.74	0.78
Onions	0.76	0.91
Peas	0.89	0.96
Spring cereals	0.80	0.92
Tomatoes	0.88	0.97
Linseed	0.69	0.84
Soybean	0.81	0.92
Sunflower	0.70	0.86
Tobacco	0.94	0.98
Cotton	0.87	0.95

Figure 46 – Exemples de facteurs de coefficients culturaux KC
reliant l'évapotranspiration d'une culture à une évapotranspiration de référence.
D'après : « Generic guidance for FOCUS groundwater scenarios Version: 1.1 April 2002 »

Culture	Crop	Growth stage			LAI		Root depth cm
		Planting	Emergence	Harvest	Max. LAI		
		(dd/mm)	(dd/mm)	(dd/mm)	m ² m ⁻²	(dd/mm)	
Pommiers	Apples	perennial	01/04	01/10	4	31/05	90
Herbe Luzernz	Grass + Alfalfa	perennial	01/04	15/05	5	15/05	50
			16/05	30/06	5	30/06	50
			01/07	15/08	5	15/08	50
			16/08	30/09	5	30/09	50
Pommes de terre	Potatoes	15/04	30/04	01/09	4	15/06	60
Betteraves à sucre	Sugar beet	25/03	16/04	15/10	5	15/07	100
Céréales d'hiver	Winter cereals	20/10	26/10	15/07	7.5	31/05	80
Choux	Cabbage		20/04 ^{&}	15/07	3	31/05	60
			31/07 ^{&}	15/10	3	05/09	60
Carottes	Carrots	28/02	10/03	31/05	3	20/04	80
		30/06	10/07	20/09	3	10/08	80
Maïs	Maize	20/04	01/05	01/10	4.5	15/08	80
Colza (hiver)	Oil seed Rape (winter)	30/08	07/09	10/07	4	20/04	100
Oignons	Onions	15/04	25/04	01/09	3	30/06	60
Pois	Peas (animals)	25/03	05/04	15/08	4	07/06	60
Céréales de printemps	Spring cereals	20/02	10/03	20/07	5	10/06	60
Tomates	Tomatoes		10/05	25/08	6	30/06	80
Vigne	Vines	perennial	01/04	01/11	6	31/07	190

Figure 47 – Paramètres culturels pour la ville de Châteaudun (France).
D'après : « Generic guidance for FOCUS groundwater scenarios Version: 1.1 April 2002 »

12. Références bibliographiques

- Banton, O., Larocque, M., Lafrance, P., Montminy, M., Gosselin, M.A. (1997) Développement d'un outil d'évaluation des pertes environnementales de pesticides : intégration d'un module PestiFlux au logiciel AgriFlux. Scientific report INRS-Eau. Ste-Foy, Québec, Canada. 144 p.
- Boesten and van der Pas (2000) Movement of water, bromide ion, and the pesticides ethoprophos and bentazone in a sandy soil: description of Vredepeel dataset, *Agricultural Water Management*, 44, 21-42.
- Boesten and van der Pas (1999) Movement of water, bromide ion, and the pesticides ethoprophos and bentazone measured in a sandy soil in Vredepeel (The Netherlands), Wageningen, DLO Winand starting Centre, Report 122, 98 pages.
- Dust (2000), Simulation of water and solute transport in field soils with the LEACHP model, *Agricultural Water Management*, 44, 225-245.
- Duwig, C., Normand, B., Vauclin, M., Vachaud, G., Green, S.R., Becquer, T. (2003) - Evaluation of the WAVE Model for Predicting Nitrate Leaching for Two Contrasted Soil and Climate Conditions. *Vadose Zone Journal* 2:76–89 (2003).
- Feddes, R.A., Kowalik, P.J., Zarandy, H. (1978). Simulation of field water use and crop yield. Simulation Monographs. Pudoc, Wageningen 189 pp.
- Herbst M., Fialkiewicz W., Chen T., Pütz T., Thiéry D., Mouvet C., Vachaud G., Vereecken H. (2005) - Intercomparison of Flow and Transport Models Applied to Vertical Drainage in Cropped Lysimeters. *Vadose Zone J.* 2005; 4(2): p. 240–254. ISSN 1539–1663. doi.org/10.2136/vzj2004.0070. (Accès Août 2016).
- Jarvis, N. (1994), The MACRO Model (version 3.1) – Technical description and Sample Simulations, 52 pages. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Soil Sciences. Uppsala.
- Jarvis, N. (2002), The MACRO Model (version 4.3) – Technical description, 41 pages. SLU, Department of Soil Sciences. Uppsala Sweden.
- Hutson (2000), LEACHM: Model Description and User's Guide. School of Chemistry, Physics, and Earth Science, The Flinders University of South Australia, Adelaide, South Australia. Ground Water Modeling Center, Riverside, CA, 143 pages.
- Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec (MEF) : Aide en ligne du logiciel AGRIFLUX (version 2.0).
- Thiéry, D., (1993) - Modélisation des aquifères complexes - Prise en compte de la zone non saturée et de la salinité. Calcul des intervalles de confiance. *Revue Hydrogéologie*, 1993, n°4 pp. 325-336. <https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-01062466> (Accès Août 2016).

- 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 Août 2016).
- Thiéry, D. (2007) - Tutorial for the WinMarthe v4.0 pre-processor. BRGM/RP-54652-EN, 89 p., 48 fig.
- Thiéry, D. (2014) – Logiciel GARDÉNIA, version 8.2. Guide d'utilisation. Rapport BRGM/RP-62797-FR, 126 p., 65 fig., 2 ann.
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-62797-FR.pdf>. (Accès Août 2016).
- Thiéry, D. (2015a) – Code de calcul MARTHE - Modélisation 3D des écoulements dans les hydrosystèmes - Notice d'utilisation de la version 7.5. Rapport BRGM/RP-64554-FR, 306 p., 150 fig.
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-64554-FR.pdf> (Accès Août 2016).
- Thiéry, D. (2015b) – Modélisation 3D des écoulements en Zone Non Saturée avec le code de calcul MARTHE – version 7.5. Rapport BRGM/RP-64495-FR. 87 p., 32 fig.
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-64495-FR.pdf> (Accès Août 2016).
- Thiéry, D. (2015c) – Modélisation 3D du transport de masse et du transfert thermique avec le code de calcul MARTHE – version 7.5. Rapport BRGM/RP-64765-FR, 324 p., 158 fig.
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-64765-FR.pdf> (Accès Août 2016).
- Thiéry, D. (2015d) – 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.
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-65010-FR.pdf> (Accès Août 2016).
- Thiéry, D. (2015e) – Didacticiel du code de calcul MARTHE v7.5. Exploration des fonctionnalités de modélisation des hydrosystèmes. Rapport BRGM/RP-64997-FR. 277 p., 170 fig.
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-64997-FR.pdf> (Accès Août 2016).
- Thiéry, D. (2015f) - Validation du code de calcul GARDÉNIA par modélisations physiques comparatives. Rapport BRGM/RP-64500-FR, 48 p., 28 fig.
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-64500-FR.pdf>. (Accès Août 2016).



Centre scientifique et technique
Direction 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