Tutoriel WEAP-MABIA:
Bassin du fleuve Tana

Ce tutoriel a été mis à jour en 2026 par Doreen Brown Salazar, Nabil Kherbache et Brian Joyce.

Il s'agit d'une adaptation du tutoriel WEAP-MABIA développé par JABLOUN Mohamed et SAHLI Ali en 2012

Table des matières

M0 - Introduction **2**

M1 - Configuration et utilisation du modèle WEAP-MABIA **3**

M1.1 Objectifs d'apprentissage *3*

M1.2 Configuration initiale du modèle *4*

M1.3 Utilisez la bibliothèque de cultures « Crop Library » dans WEAP-MABIA *6*

M1.4 Configurer la capacité hydrique du sol (capacité de la couche supérieure sur WEAP) *13*

M1.5 Saisir les propriétés du sol *23*

M1.6 Saisir d'autres paramètres d'occupation des sols *26*

M1.7 Collecte et saisie des données climatiques quotidiennes *30*

M1.8 Saisir les données d'irrigation *32*

M1.9 Affichages des résultats *41*

M1.10 Conseils pour la validation des résultats du modèle MABIA *45*

M2 Le module de programmation de l'irrigation et de rendement des cultures **47**

M2.1 Objectifs d'apprentissage *47*

M2.2 Options de programme d'irrigation *49*

M2.3 Création et exécution de scénarios d'irrigation *52*

M2.4 Scénarios d'efficience de l'irrigation et de fraction mouillée *59*

M2.5 Scénarios climatiques *61*

Références **65**

M0 - Introduction

WEAP est un logiciel de planification intégrée des ressources en eau. Il a été développé par le *Stockholm Environment Institute* et a bénéficié de plusieurs améliorations depuis sa première mise en œuvre. Les méthodes de modélisation dans WEAP différent selon la disponibilité des données. Ainsi, il existe plusieurs méthodes alternatives de simulation des zones de captage de la demande dans WEAP à l'instar de celle des coefficients simplifiés, la méthode d'humidité du sol (méthode WEAP par défaut), méthode de croissance des plantes (PGM), méthode MABIA[1] (FAO 56, Double Kc, quotidien), etc. La méthode MABIA est très intéressante et plus détaillée pour améliorer la qualité de la modélisation des demandes d'irrigation étant donné que l'agriculture est de loin le plus grand secteur en termes de demandes d'eau avec 70 % des prélèvements totaux au niveau mondial (WWDR, 2024). Bon nombre de données et descriptions proviennent du rapport n° 56 de la FAO sur l'irrigation et le drainage publié en 1998. Ce rapport constitue une excellente ressource pour calculer les besoins en eau des cultures dans plusieurs climats du monde (Allen et al., 1998). Il est à noter que les modélisateurs WEAP expérimentés recommandent de modéliser les relations hydrologiques pluie-débit principalement à l'aide de l'une des deux méthodes pluie-débit de WEAP et d'utiliser WEAP MABIA spécifiquement pour les cultures irriguées. En effet, ce logiciel a été conçu avant tout comme une méthode complexe d'estimation des besoins en eau des cultures et non comme une méthode de modélisation des relations pluie-débit.

WEAP-MABIA est un ensemble de logiciels permettant de développer des modèles a distribution spatiale pour l'analyse des besoins en eau d'irrigation des cultures. Il est utilisé par les scientifiques, les ingénieurs et les responsables de la gestion des ressources pour simuler les besoins en irrigation des cultures, la planification de l'irrigation, la réduction des rendements et la performance des systèmes d'irrigation. WEAP-MABIA analyse l'eau totale disponible (Réserve Utile (RU)) (*Total Available Water (TAW)*) et l'eau immédiatement disponible (Réserve Facilement Utilisable (RFU)) *(Readily Available Water (RAW))* pour les cultures, en tenant compte de facteurs tels que : les périodes de semis, la capacité de rétention d'eau du sol, les propriétés du sol (dont le taux d'infiltration maximal), le

[1] Cette méthode a été développée en Tunisie par des chercheurs tunisiens à l'Institut National Agronomique (INAT). Le mot provient du nom de la ferme expérimentale de l'INAT dans la région de Mornag, près de Tunis.

climat, l'efficacité de l'irrigation, la fraction de sol humidifiée, les seuils d'humidité du sol pour l'irrigation et l'interaction des bassins versants irrigués avec les eaux souterraines.

Ce tutoriel présente les fonctionnalités du logiciel WEAP MABIA et les processus de saisie de données. Il est conçu d'une façon à faciliter l'apprentissage des fonctionnalités de base de la modélisation sous WEAP conformément aux méthodes de la FAO. Il présente la version actualisée du module WEAP-MABIA publié en 2012 (Jabloun et Sahli, 2012).

M1 - Configuration et utilisation du modèle WEAP-MABIA

M1.1 Objectifs d'apprentissage

À l'issue de cette section du tutoriel, les apprenants seront capables de simuler des stratégies d'irrigation contrastées sous WEAP-MABIA et d'en diagnostiquer les conséquences agronomiques et hydrologiques. Les apprenants seront capables de :

- Configurer le modèle de base en utilisant le module MABIA de WEAP ;
- Mobiliser la bibliothèque des cultures (*crop library*) dans les modélisations sous WEAP ;
- Analyser la dynamique de l'eau dans le sol via l'interface MABIA, en interprétant les interactions entre l'épuisement hydrique, la réserve facilement utilisable (l'eau immédiatement disponible ou RAW) et la réserve utile totale (l'eau totale disponible ou TAW) ;
- Modéliser des stratégies d'irrigation contrastées en utilisant l'assistant de programmation (*Irrigation Scheduling Wizard*) pour simuler des contraintes opérationnelles de l'irrigation

Ce tutoriel WEAP utilise le projet du fleuve de Tana

- Projet -> Ouvrir -> Tana Tutorial

Point de départ du modèle :

- Projet -> « Revenir à la version (*revert to version)*», -> 11b. Climate change – Answer key

M1.2 Configuration initiale du modèle

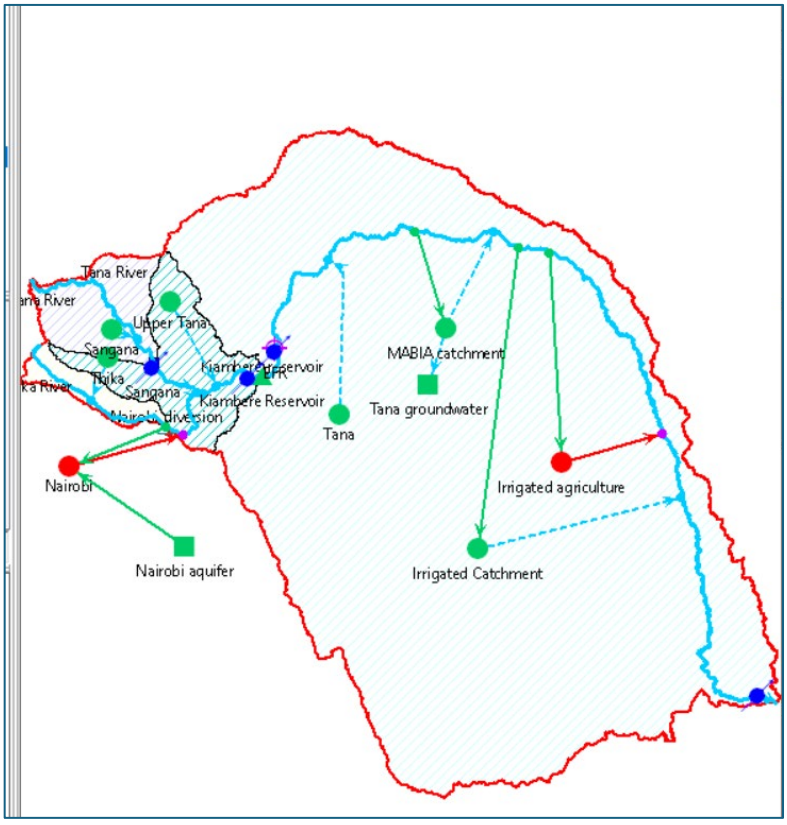
Créer un nœud de bassin versant agricole (nœud vert) et un nœud (site) d'eau souterraine

Glissez-déposez un nœud de bassin versant à proximité du site de demande agricole irriguée. Répondez « non » à la question du menu contextuel vous demandant si vous souhaitez créer le nœud à l'aide de la délimitation automatique du bassin versant. Nommez votre bassin versant « Bassin versant MABIA » *(MABIA Catchment)* et cochez la case indiquant qu'il comprend des zones irriguées.

- Ajoutez une liaison de transmission à partir du cours principal et une liaison de ruissellement/infiltration en aval de la liaison de transmission.
- Glissez-déposez un nœud « Eaux souterraines » (*Groundwater*) près de votre bassin versant agricole et nommez-le : « *Tana groundwater*». Insérez une liaison de ruissellement et d'infiltration entre le bassin versant agricole et le nœud des eaux souterraines, puis saisissez les propriétés suivantes (assurez-vous d'être dans les comptes courants lorsque vous saisissez les données suivantes ; vous vous rendrez compte que ce n'est pas le cas s'il n'y a pas d'onglet pour le stockage initial) :

  Capacité de stockage : *Illimité (par défaut, laisser vide)*
  Stockage initial : *100Mm^3*

Votre modèle devrait ressembler à ceci :



Sélectionnez la méthode de modélisation MABIA.

- Dans l'arborescence des données, accédez à votre bassin MABIA, cliquez sur l'onglet « Avancé » et sélectionnez la méthode : "*MABIA (FAO 56, dual KC, daily)*" (Allen et al., 1998).

Changez les anneees modelises a 20002014

Dans ce module, nous nous exercerons à la configuration de modèles à l'aide de données historiques, et nous examinerons les scénarios de changement climatique dans le module suivant. Par conséquent, modifiez les années modelises.

General -> Annees et Pas de temps -> 2000-2014

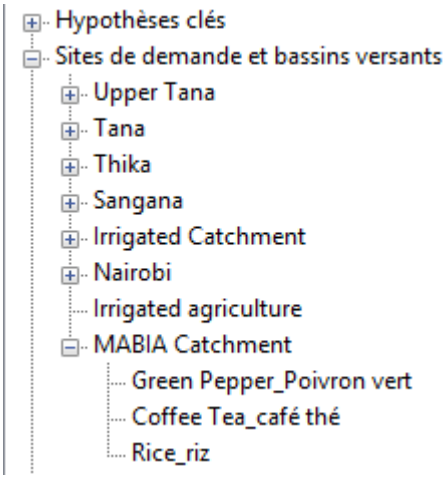
Créer trois zones de culture

Nous allons nous exercer avec trois types de cultures différents. Dans la fenêtre « Données », sélectionnez votre bassin MABIA et ajoutez les branches suivantes :

Green Pepper (Poivron vert)

Coffee Tea (café thé)

Rice (riz)

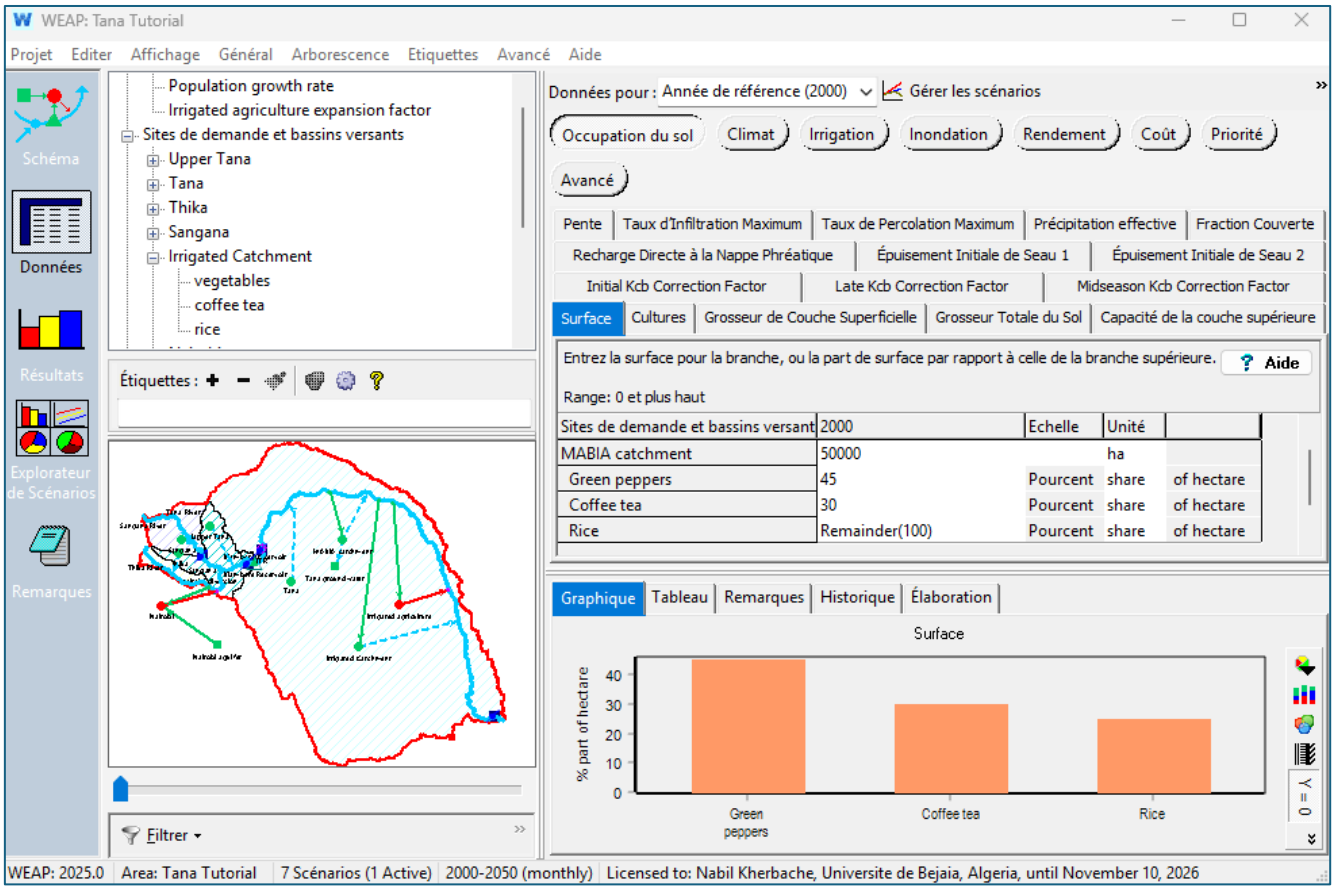


Sélectionnez le bassin versant agricole dans la fenêtre « Données » et saisissez les données suivantes après avoir cliqué sur le bouton « Occupation du sol » et sur l'onglet « Superficie » :

Superficie totale *50,000 ha (sélectionner d'abord les unités)*

Part de la superficie (percent) :

- *Green pepper (Poivron vert) : 45*
- *Coffee tea (Café thé) : 30*
- *Rice (Riz): on utilise la fonction : Remainder(100)*



M1.3 Utilisez la bibliothèque de cultures « *Crop Library* » dans WEAP-MABIA

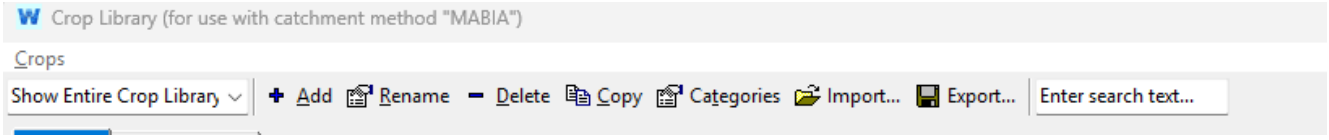
WEAP-MABIA comprend une « *Crop Library* » (bibliothèque des cultures) qui fournit les paramètres requis pour plus de 100 cultures, certaines avec plusieurs entrées pour différents climats ou régions du monde. La bibliothèque MABIA sur les cultures est un catalogue d'informations contenues dans le rapport FAO 56 (Allen et al., 1998). L'utilisateur final peut ajouter, modifier, supprimer, copier, exporter, importer ou rechercher dans la « *Crop Library* » une culture particulière

Consultez le "Crop Library" WEAPMABIA pour charger les données initiales sur les cultures

Cliquez sur l'onglet « Cultures » (*crops*) pour l'activer.

L'onglet « Cultures » sert à définir la (ou les) cultures et à définir la (ou les dates) de plantation pour ces cultures choisies qui seront utilisées dans le bassin versant sélectionné.

La barre supérieure de la bibliothèque des cultures vous offre des options pour ajouter, renommer, supprimer, copier, importer ou exporter des cultures :



Comme le montre le graphique, les paramètres pris en compte dans les algorithmes de calcul du modèle WEAP-MABIA sont les suivants :

Crop or Land Cover	Stage Length [days]					Kcb			Depletion Factor [0-0.99]			Yield Response Factor, Ky					Maximum Height [m]	Root Depth [m]	
	Initial (1)	Develop-ment	Mid-Season	Late	Total	Initial (2)	Mid-Season	Late	Initial (3)	Mid-Season	Late	Initial (4)	Develop-ment	Mid-Season	Late	Overall	(5)	Minimum	Maximum (6)
Fallow	365				365	0.01	0.01	0.01	0.99	0.99	0.99						0.15	1.00	1.00
Broccoli (Calif. Desert, USA)	35	45	40	15	135	0.15	0.95	0.85	0.45	0.45	0.45						0.30	0.15	0.50
Cabbage (Calif. Desert, USA)	40	60	50	15	165	0.15	0.95	0.85	0.45	0.45	0.45	0.40	0.40	0.50	0.50	0.95	0.40	0.15	0.65
Carrots (Arid climate)	20	30	40	20	110	0.15	0.95	0.85	0.35	0.35	0.35						0.30	0.15	0.75

- (1) **Longueur des phases de croissance des cultures** (***lengths of growth stages***) (L_{ini}, L_{dev}, L_{mid}, L_{late}) ont été calculées selon la méthode FAO-56 en fonction de la couverture végétale (f_c). La phase initiale (L_{ini}) s'étend de la date de plantation (semis) jusqu'à ce que la valeur fc atteigne 0,1, la phase de développement (L_{dev}) s'étend de la valeur fc de 0,1 jusqu'à la couverture végétale (conopée) complète (fc de 0,9), la phase de mi-saison (L_{mid}) s'étend de 90 %[2] de couverture du sol au début de la période de fin de saison et au début de la sénescence (jaunissement des feuilles). Le stade de fin de saison (L_{late}) s'étend de la fin du stade de mi-saison jusqu'à la fin de la saison de croissance début de la sénescence (vieillissement total de la culture). Les cultures pérennes (arbres fruitiers, etc.) devraient avoir une période de croissance totale de 365 jours.

[2] Dans, la fonction « aide » de WEAP (cliquez sur « Aide contextuelle » ou sur F1 pour l'afficher), vous allez trouver que la phase de développement de la culture s'étend généralement de 10 % à 70 % (ou plus) et celle mi-saison de 70 % jusqu'au début de la sénescence de la plante.

- ② Le **coefficient cultural de base** (***basal crop coefficient***) (K_{cb}) : MABIA utilise la méthode de double « Kc », dans laquelle la valeur Kc est divisée en un coefficient cultural de base, K_{cb}, et un composant distinct, K_e, représentant l'évaporation à la surface du sol. Le coefficient cultural de base représente les conditions d'ET réelle lorsque la surface du sol est sèche, mais que la zone racinaire contient suffisamment d'humidité pour permettre une transpiration complète. La courbe du coefficient de culture représente les variations de K_{cb} au cours de la saison de croissance, en fonction des changements dans la couverture végétale et la physiologie. Il est défini comme le rapport entre l'évapotranspiration des cultures (ETc) et l'évapotranspiration de référence (ETref) lorsque la surface du sol est sèche mais que la transpiration se produit à un taux potentiel.

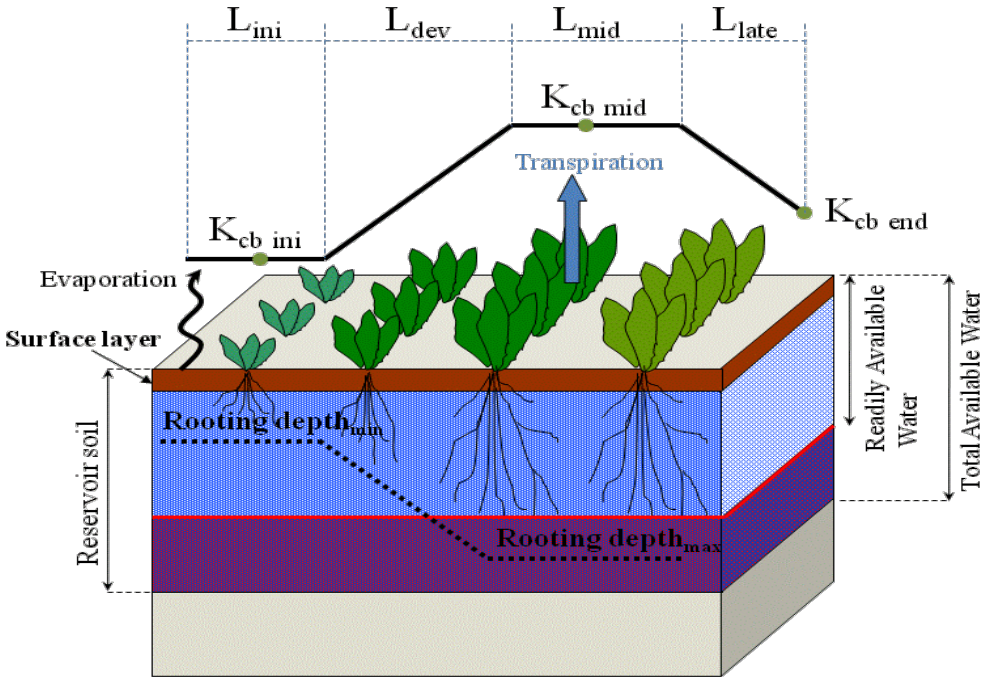
$$K_{cb} = \frac{ET_c}{ET_{ref}}$$

Par conséquent, le K_{cb} représente principalement la composante transpiration de l'évapotranspiration de la culture (ETc). Le coefficient K_{cb} sert de paramètre global (*lumped parameter*) pour intégrer les différences physiques et physiologiques entre les cultures. La variation du K_{cb} entre les différents stades de croissance dépend essentiellement du développement de la canopée (couvert végétal). Les valeurs fournies dans la « *crop library* » correspondent à un climat standard caractérisé par une humidité relative minimale quotidienne moyenne (RH_{min}) de 45 % et une vitesse de vent moyenne quotidienne mesurée à 2 m de hauteur (u_2) 2 m/s.

③ La **fraction de déplétion (ou le facteur d'épuisement)** (***depletion factor***) (p) est la fraction de l'eau totale disponible (*Total Available Water : TAW*)[3] qui peut être extraite de la zone racinaire avant que n'apparaisse un stress hydrique. Vous pouvez définir des valeurs différentes pour exprimer la variation de la sensibilité de la culture à la pénurie d'eau au cours des différents stades de croissance. Une valeur de 0,5 est couramment utilisée comme approximation pour de nombreuses cultures dans *Crop library* de WEAP. La valeur zéro n'est pas autorisée ; WEAP affichera un message d'erreur lors de l'exécution des résultats si cette valeur est nulle.

[3] P : définit la limite de la « réserve facilement utilisable » (RFU ou *RAW*) par rapport à la « réserve utile » totale (RU, ou *TAW* en anglais sous WEAP)

- ④ Le **facteur de réponse du rendement** ***(yield response factor)*** (K_y) est un facteur qui décrit la réduction du rendement relatif en fonction de la réduction de l'évapotranspiration de la culture (ETc) causée par une pénurie d'eau dans le sol et il apporte une réponse à la question suivante : *Si la plante manque d'eau, de combien va baisser le rendement ?* Il est basé sur le travail du rapport célèbre de la *FAO Irrigation and Drainage Paper 33* (Doorenbos et al., 1979). Les valeurs de Ky sont spécifiques à chaque culture et peuvent varier au cours de la saison de croissance. Ces valeurs sont fournies aussi bien pour les périodes de croissance individuelles que pour l'ensemble de la saison de croissance.



Graphique illustrant les différents paramètres pris en compte dans le module « cultures ».

– ⑤ La hauteur maximale de la culture

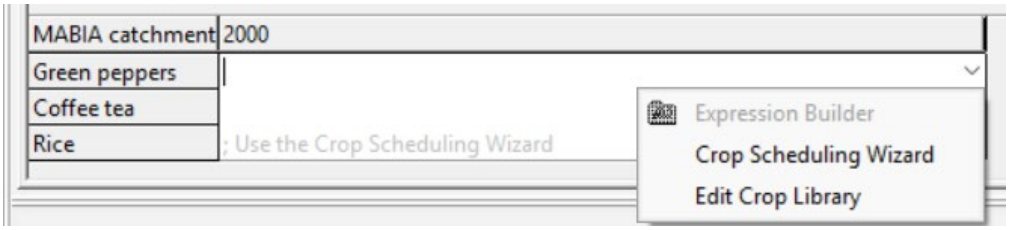
– ⑥ La **profondeur racinaire (*rooting depth*)** pour les cultures annuelles comporte trois phases de croissance. La profondeur racinaire est maintenue constante à sa valeur minimale ($Z_{r\ min}$) tout au long du stade initial de croissance de la culture. Ensuite, la zone racinaire augmente de manière linéaire jusqu'à atteindre une profondeur maximale ($Z_{r\ max}$) durant les stades de croissance végétative et de développement. Cette profondeur racinaire maximale est atteinte au début du stade de mi-saison (pic de croissance) et est maintenue tout au long des stades de mi-saison et de

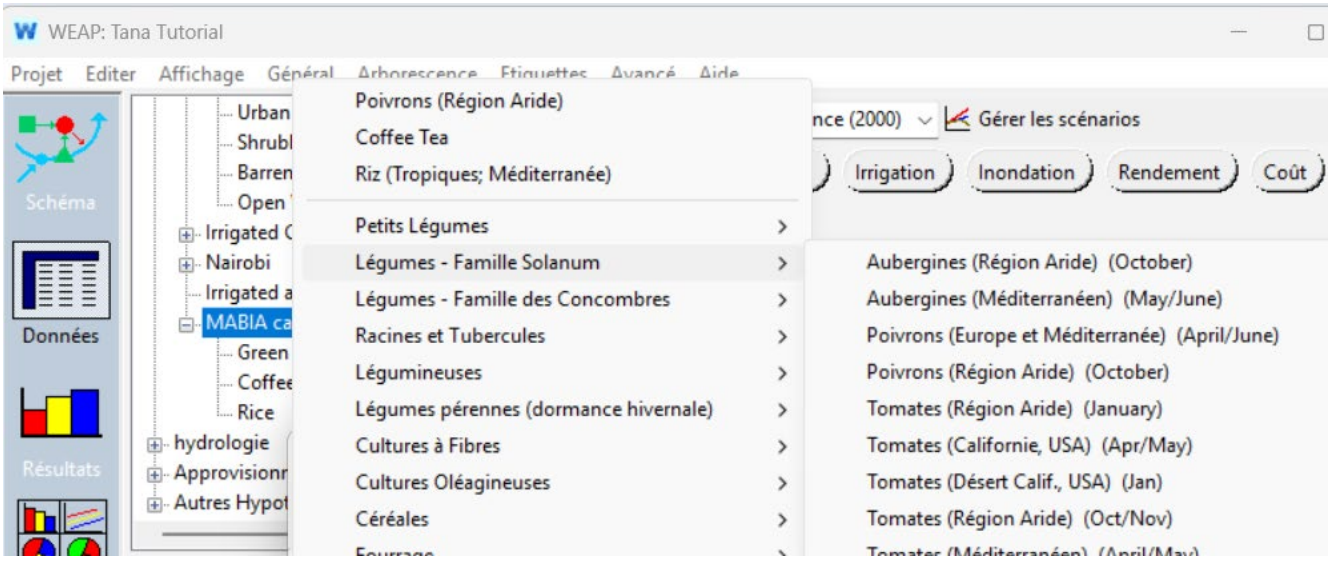
fin de saison. La profondeur racinaire détermine la quantité totale d'eau disponible pour l'évapotranspiration. La profondeur des racines des cultures pérennes est supposée être constante.

> Lire la "*Crop Library*" Rubrique d'aide (sous la sous-rubrique « *Data/Catchments/MABIA Method (FAO 56, dual Kc, daily)/Supporting screens*/Écrans d'aide » dans le sommaire de l'aide) pour une description plus détaillée de "*Crop Library*".

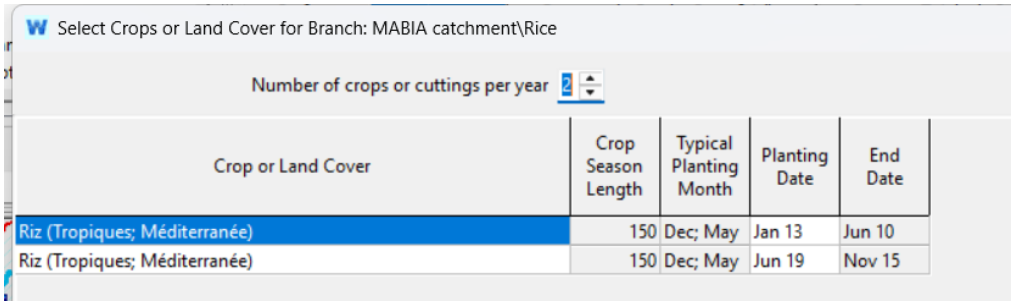
Utilisez « Crop Library » de WEAP-MABIA pour charger les données initiales sur les cultures.

Sous : *Green peppers* (poivrons verts) choisissez -> Culture, ouvrez l'assistant de planification des cultures « *crop scheduling wizard* », sélectionnez -> Légumes -Famille Solanum -> Poivrons (Region Aride) (October), puis indiquez la date de plantation comme étant le 13 octobre.



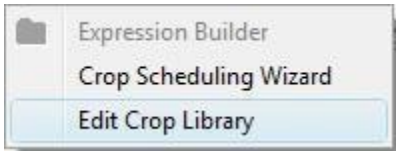


Pour le riz, choisissez Céréales -> Riz (Tropiques : Méditerranée) (Dec/May), et fixez deux dates de plantation : 13 janvier et 19 juin (deux plantations pour l'année).

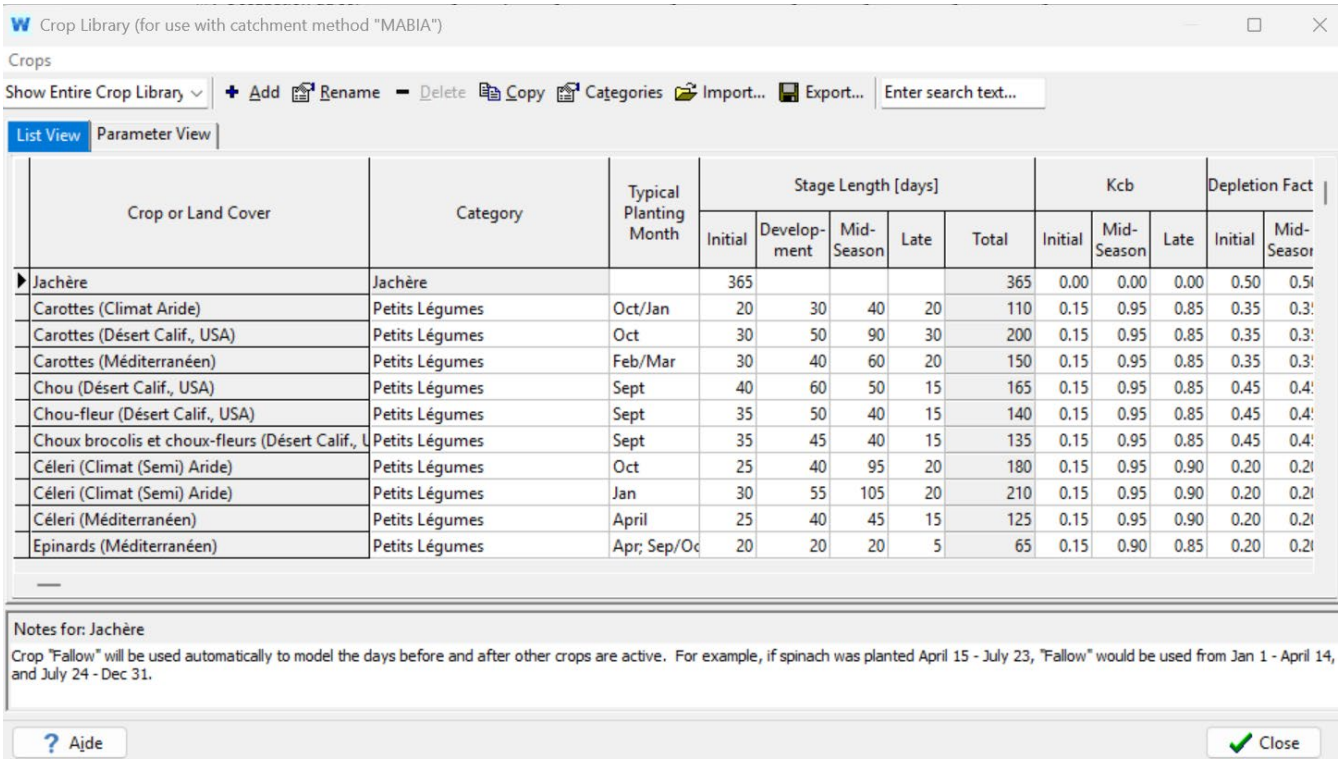


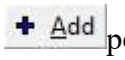
Pour le café thé, nous allons ajouter une culture à la bibliothèque des cultures.

Pour ajouter une nouvelle culture à la bibliothèque, dans le champ de culture correspondant à n'importe quelle culture, sélectionnez "*Edit Crop Library"*.

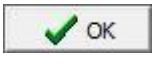


La fenêtre « *Crop Library* » s'affichera.

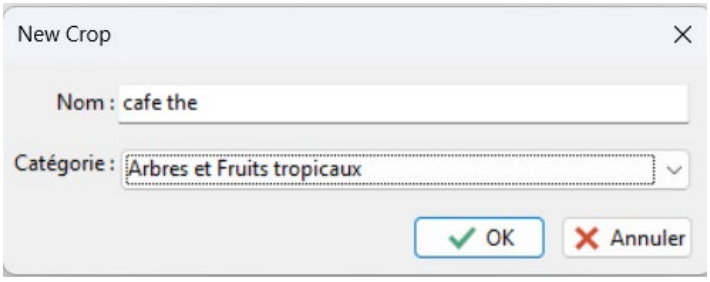


1. Cliquez sur le bouton 

pour ajouter une nouvelle culture.

2. Dans la fenêtre "*New Crop*" « Nouvelle culture », entrez le nom « café thé » et la catégorie « arbres et fruits tropicaux » de la culture. Cliquez ensuite sur 

La nouvelle culture sera ajoutée à la liste existante.



3. Sélectionnez le nom de la culture que vous avez ajouté dans la liste, puis cliquez sur « Affichage des paramètres » pour modifier les données. 

4. S'agissant d'une culture pérenne, considérez janvier comme le mois de semis typique (date de plantation le 1er janvier), avec un K_c de 1 tout au long de l'année. Complétez les données relatives à la culture comme indiqué dans la figure ci-dessous[4].

List View | Parameter View

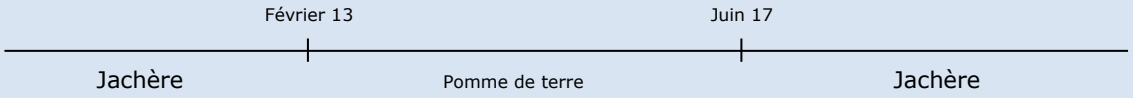
Crop or Land Cover	cafe the
Catégorie	Arbres et Fruits tropicaux
Typical Planting Month	Janvier
⊟Stage Length	
Initial	90
Développement	92
Mid-Season	93
Late	90
Total	365
⊟Kcb	
Initial	1.00
Mid-Season	1.00
Late	1.00
⊟Depletion Factor [0-0.99]	
Initial	0.30
Mid-Season	0.30
Late	0.30
⊟Yield Response Factor, Ky	
Initial	1.00
Développement	1.00
Mid- Season	1.00
Late	1.00
Globalement	1.00
Maximum Height[m]	2.00
⊟Profondeur Racinaire	
Minimum[m]	0.20
Maximum[m]	0.75

5. Une fois toutes les données saisies, cliquez sur 

pour confirmer que vous souhaitez enregistrer les nouvelles données.

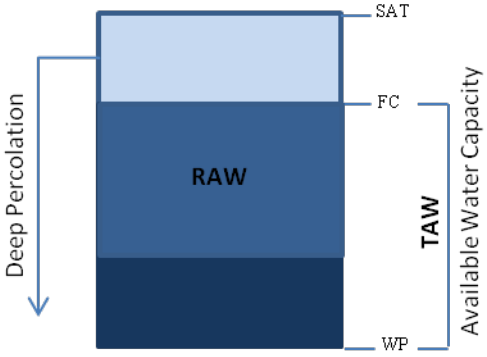
[4] Il est à rappeler que les périodes non cultivées sont considérées en jachère automatiquement dans WEAP

Notez que tous les jours non cultivés par une culture utiliseront automatiquement les caractéristiques de la culture nommée « Jachère » dans la bibliothèque des cultures. Vous n'avez pas besoin d'ajouter la jachère dans l'assistant de planification des cultures, car elle est ajoutée automatiquement. Par exemple, pour une culture de pomme de terre dont les dates de plantation et de récolte sont fixées au 13 février et au 17 juin, le calendrier cultural (*cropping pattern*) se présenterait comme suit :



M1.4 Configurer la capacité hydrique du sol (capacité de la couche supérieure sur WEAP)

Description de la capacité hydrique du sol



Dans le modèle WEAP-MABIA, la propriété hydrologique du sol la plus pertinente pour déterminer le bilan hydrique du sol est la capacité en eau disponible ou TAW (*Total Available Water*). Il est supposé que le profil du sol soit verticalement homogène et caractérisé par des propriétés identiques de rétention d'eau. La capacité en eau disponible ou l'eau totale disponible (TAW) peut alors être calculée en soustrayant la teneur en eau au point de capacité au champ (*field capacity (FC)*) de la teneur en eau au point de flétrissement (*Wilting point (WP)*).

La capacité disponible en eau du sol désigne la capacité d'un sol à retenir l'eau disponible pour les plantes. Après de fortes précipitations ou une irrigation excessive, le sol atteint la saturation (SAT) et se draine jusqu'à atteindre sa capacité au champ (FC). La capacité au champ correspond à la quantité d'eau qu'un sol bien drainé devrait retenir naturellement contre les forces gravitationnelles (après l'écoulement de l'excès de l'eau vers la percolation profonde *(Deep percolation)*), ou à la quantité d'eau restante lorsque le drainage vers le bas a considérablement diminué. En l'absence d'approvisionnement en eau (irrigation ou pluie), la teneur en eau dans la zone racinaire diminue en raison de l'absorption d'eau par les cultures (évapotranspiration). À mesure que l'absorption d'eau progresse, l'eau restante est retenue par les particules du sol avec une force plus importante, ce qui réduit son énergie potentielle et rend son extraction plus difficile pour la plante. Finalement, un point est atteint où la culture ne peut plus extraire l'eau restante. L'absorption d'eau devient

nulle lorsque le point de flétrissement (WP) est atteint. Le point de flétrissement est la teneur en eau à laquelle les plantes se flétrissent de manière permanente.

Comme la teneur en eau supérieure à la capacité au champ ne peut être retenue contre les forces de gravité et s'écoulera, et comme la teneur en eau inférieure au point de flétrissement ne peut être extraite par les racines des plantes, la capacité en eau disponible ou l'eau totale disponible (TAW) dans la zone racinaire correspond à la différence entre la teneur en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement.

La TAW est la quantité d'eau qu'une culture peut extraire de sa zone racinaire. La TAW d'un sol dépend du volume des pores et de la distribution de leur taille et varie donc en fonction des propriétés physiques du sol, telles que la classe de texture et la densité apparente. Outre ces facteurs d'influence, son ampleur dépend de la profondeur d'enracinement. Bien que l'eau soit théoriquement disponible jusqu'au point de flétrissement, les cultures commencent à subir un stress bien avant que ce point ne soit atteint. L'eau facilement disponible (RAW) est la fraction de l'eau totale disponible (TAW) qu'une culture peut extraire de la zone racinaire sans subir de stress (pomper sans aucun effort). Elle est exprimée dans le modèle MABIA comme le produit de la TAW et du facteur d'épuisement (fraction de déplétion), p (p est défini dans la bibliothèque des cultures).

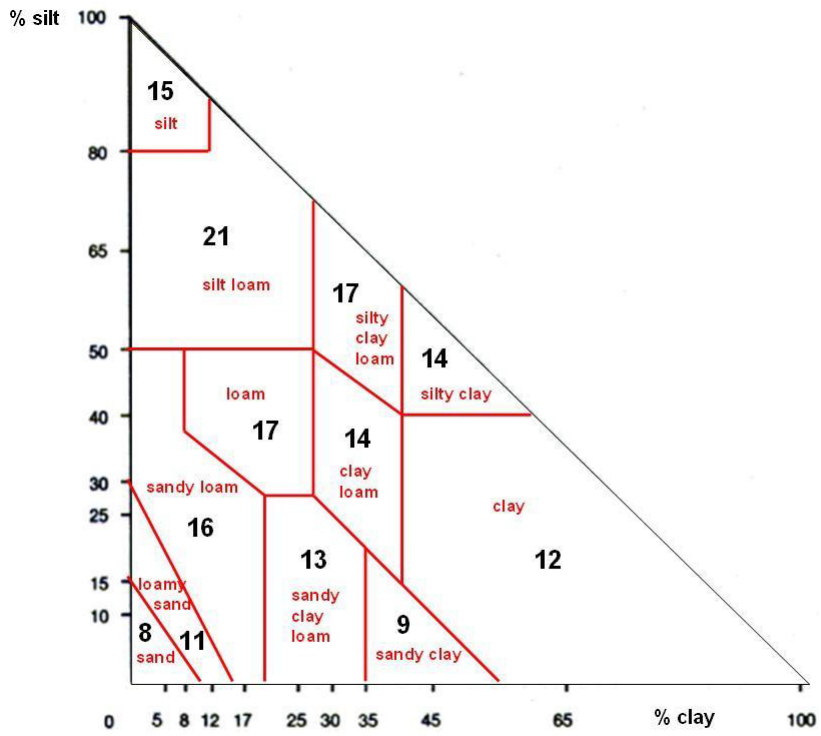


Figure : Capacité en eau disponible par classe de texture du sol selon la FAO.

WEAP inclut une bibliothèque des sols (*Soil Library*) (intégrée qui fournit des valeurs typiques pour la saturation (SAT), la capacité au champ (FC), le point de flétrissement permanent (PWP) et la capacité des eaux disponibles (TAW ou *Available Water Capacity (AWC)* sur la *Soil Library* de WEAP[5]) pour les 12 classes texturales. Vous avez la possibilité de modifier cette bibliothèque ou d'y ajouter de nouvelles entrées.

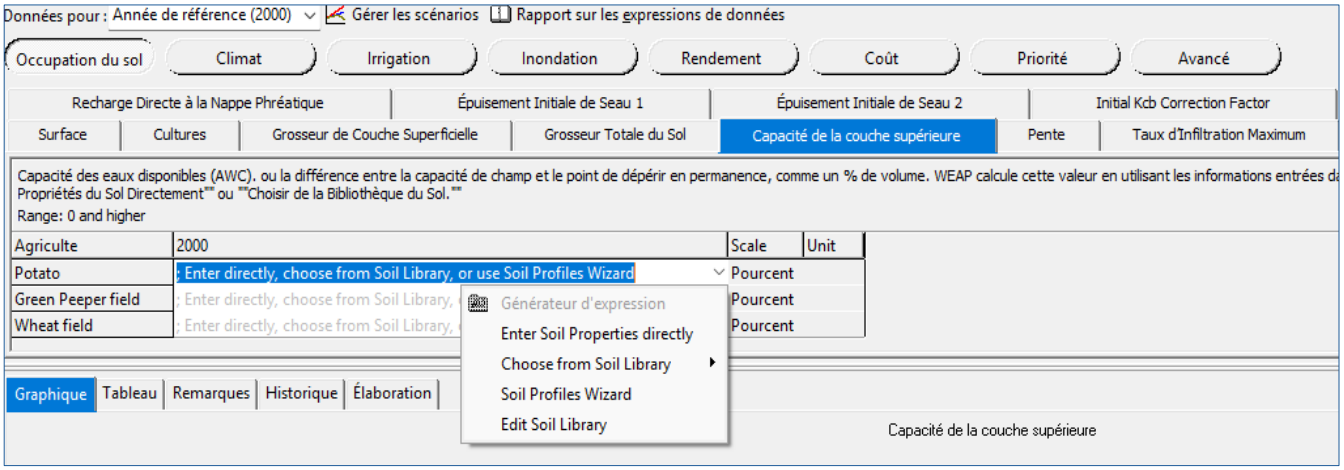


Malheureusement, la mesure directe de la teneur en eau à la saturation (SAT), à la capacité au champ (FC) et au point de flétrissement (PWP) demande une main-d'œuvre importante et s'avère peu pratique pour la plupart des applications de recherche et de gestion ; elle est généralement laborieuse, coûteuse et chronophage, particulièrement lorsqu'il s'agit de zones d'étude à relativement grande échelle à l'instar des bassins versants ou les grands périmètres agricoles.

[5] Bien que les termes AWC et TAW désignent tous deux la capacité de stockage en eau du sol, ils s'appliquent à des échelles différentes dans le modèle. L'AWC représente une caractéristique intrinsèque du sol, exprimée comme la quantité d'eau disponible par unité de profondeur (mm/m). La TAW telle que définie par la FAO-56, représente le volume d'eau réellement accessible à la culture sur l'ensemble de sa zone racinaire.

C'est pourquoi WEAP-MABIA intègre un Assistant de Profils de Sol (*Soil Profiles Wizard)* qui permet d'estimer la capacité moyenne en eau (AWA) du sol (saturation, capacité au champ et point de flétrissement) en utilisant l'une des sept Fonctions de *Pédotransfert* (PTF) disponibles. Cet outil sert à déterminer la capacité en eau du sol pour les branches d'occupation du sol des bassins versants dans la fenêtre des « Données », sous la section « Occupation du sol » (*Land Use*). En utilisant cet assistant, vous pouvez faire la moyenne des valeurs de teneur en eau sur plusieurs profils de sol (sites d'échantillonnage) et horizons de sol (couches). Cet assistant est conçu pour moyenner les AWC à partir de plusieurs couches de sol et de roche, mais il ne permet pas d'allouer des valeurs de capacité en eau (AWC) issues d'horizons spécifiques aux profondeurs racinaires d'une culture particulière à un stade de croissance précis. Les sept fonctions de *pédotransfert* (PTF) disponibles sont choisies de manière à pouvoir être utilisées selon différents scénarios de disponibilité des données pédologiques de base.

Les données pédologiques de base pouvant être utilisées sont : la distribution granulométrique (% d'Argile, % de Limon et % d'éléments grossiers) et/ou la densité apparente (BD) et/ou le pourcentage de matière organique du sol (%OM). Dans une première étape, la capacité en eau disponible est dérivée des informations sur la texture, la densité apparente et la matière organique. Ensuite, le résultat final est calculé en soustrayant le volume occupé par les éléments grossiers. WEAP-MABIA propose trois options pour saisir la saturation (SAT), la capacité au champ (FC) et le point de flétrissement (WP) (toutes disponibles dans le menu déroulant de la grille de données) :



Comme indiqué ci-haut (M1.4), la capacité au champ et le point de flétrissement comme terme de calcul de la TAW sont utilisées pour calculer la dose maximale d'eau pouvant être apportée par irrigation. Si la zone étudiée est relativement restreinte ou reconnue comme étant assez homogène au regard des propriétés physiques du sol et de la topographie, la détermination des teneurs en humidité à la capacité au champ et au point de flétrissement sur un nombre raisonnable de sites d'échantillonnage devrait fournir des estimations précises. Cependant, si la zone évaluée est suffisamment vaste pour présenter une variabilité spatiale substantielle de la disponibilité en eau du sol, il est pratiquement impossible de réaliser suffisamment de mesures pour obtenir de bonnes estimations compte tenu des contraintes temporelles et financières du projet. Dans de tels cas, des méthodes rapides et peu coûteuses pour estimer ces paramètres sont nécessaires.

De nombreuses méthodes indirectes pour l'estimation de la teneur en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement ont été proposées dans la littérature. La plupart de ces méthodes sont appelées Fonctions de Pédotransfert (PTF) (*Pedotransfer Functions (PTFs)*), car elles traduisent des données indirectes existantes (par exemple, la distribution granulométrique[6], la densité apparente et la teneur en matière organique) en propriétés hydrologiques du sol.

Fonctions de Pédotransfert (PTFs)

Les valeurs de SAT, FC et WP (saturation, capacité au champ et point de flétrissement) sont des mesures fondamentales déterminées expérimentalement dans des conditions de laboratoire. La mesure directe des propriétés de rétention d'eau est coûteuse, chronophage et nécessite une main-d'œuvre importante. Alternativement, ces propriétés peuvent être dérivées de données pédologiques disponibles, telles que la distribution granulométrique, la teneur en matière organique et la densité apparente. Ces méthodes d'estimation permettant d'obtenir les paramètres requis à partir de données d'entrée facilement cartographiables sont appelées « *fonctions dePédotransfer* » selon Bouma et van Lanen (1987). Ils ont suggéré de faire une distinction entre les caractéristiques fondamentales qui peuvent être mesurées en laboratoire ou estimées sur le terrain et d'autres caractéristiques (appelées propriétés du sol) qui peuvent être estimées à partir des caractéristiques fondamentales du sol.

[6] L'étude de la répartition des grains d'un sol en fonction de leur taille. En agronomie et en pédologie, c'est ce qui permet de définir la texture du sol (sable, limon ou argile).

Les fonctions de transfert relient différentes caractéristiques et propriétés du sol entre elles ou à la qualité des terres (Bouma, 1989). Elles servent à traduire, par le biais de relations empiriques, de régressions ou de relations fonctionnelles, les informations de base contenues dans les études pédologiques en une forme utile pour des applications plus larges, telles que la modélisation par simulation.

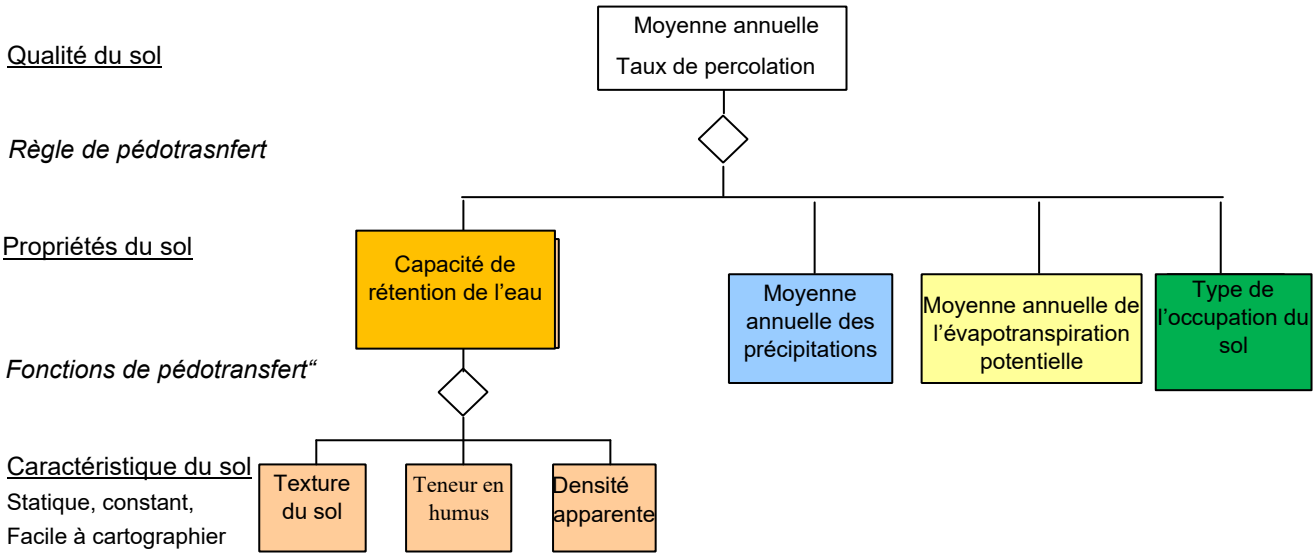


Figure : Organigramme illustrant le mode de fonctionnement des fonctions de Pédotransfer.

Une autre définition a été donnée par Jones et = Hollis (1996): Les Fonctions de Pédotransfert (PTF) sont des expressions mathématiques reliant les propriétés de base du sol, telles que le sable, le limon et l'argile, à des propriétés complexes comme la capacité de rétention d'eau. Les PTF peuvent être utilisées pour dériver des fonctions continues, telles que les paramètres exprimant la forme et la structure des relations entre la conductivité hydraulique, la succion[7] et la teneur en eau. Les fonctions de *pédotransfert* (PTF) sont classées en deux catégories : les PTF « de classe » et les PTF « continues ». Les PTF de classe prédisent certaines propriétés du sol en se basant sur la classe pédologique à laquelle appartient l'échantillon comme les PTFs de Carsel et Parrish (1988) et Rawls et al. (1982). Les PTF continues prédisent certaines propriétés du sol en tant que fonction continue d'une ou plusieurs variables mesurées. Ce dernier type de fonction de pédotransfert peut également être classé en régressions à un « point unique » ou « paramétriques ». Les PTF à point

[7] La succion (ou potentiel matriciel) est la force avec laquelle l'eau est retenue par les particules de terre.

unique prédisent une propriété du sol à un point spécifique de la courbe de rétention d'eau ou de la capacité en eau disponible ; c'est le cas, par exemple, des PTF de Jabloun et Sahli (2006). Les PTF paramétriques visent à prédire les paramètres d'un modèle, et le modèle hydraulique du sol le plus largement utilisé est la fonction de van Genuchten, 1980) ; c'est le cas, par exemple, des PTF de Vereecken et al. (1989) et de Wösten et al. (1999). De nombreux algorithmes concurrents ont été comparés et évalués sur la base de données de laboratoire d'un système d'information pédologique national ; les approches de Vereecken et Wösten ont obtenu les meilleurs résultats car elles présentaient l'écart le plus faible entre les valeurs estimées et mesurées. Par conséquent, elles servent d'outils standards de WEAP pour estimer les paramètres de rétention d'eau.

- ***Vereecken***: Vereecken et al. (1989) et ont utilisé la régression linéaire multiple incluant les teneurs en sable et en argile, la teneur en carbone organique et les données de densité apparente issues d'échantillons non remaniés de 182 horizons de 40 séries de sols belges pour résoudre les paramètres de l'équation de van Genuchten et développer leur PTF. La PTF ainsi dérivée est applicable aux sols présentant les gammes suivantes : Argile (Cl < 54,5%), Limon (Sl < 80,7%), Sable (5,6 < Sa < 97,8%), Densité apparente (1,04 < BD < 1,23 g cm^{-3}) et teneur en Matière Organique (OM < 11,4%).
- ***Wösten***: Wösten et al. (1999) ont utilisé la régression linéaire multiple incluant la distribution granulométrique, la teneur en carbone organique et la densité apparente de la base de données HYPRES pour estimer les paramètres de la fonction de rétention d'eau de van Genuchten (1980). La base de données HYPRES est constituée des propriétés physiques et hydrauliques de 5521 horizons de sol, collectées auprès de 20 institutions dans 12 pays européens.

- **Jabloun et Sahli :** Jablounet Sahli (2006) ont utilisé des données pédologiques de base provenant de 109 horizons de sols collectés sur différents types de sols tunisiens pour développer quatre PTF "à point unique" adaptées à différents niveaux de disponibilité des données. Les PTF ainsi dérivées sont applicables aux sols présentant les gammes suivantes : Argile (6,0 < Cl < 84,5%), Limon (4,3 < Sl < 61,0%), Sable (0,7 < Sa < 87,5%), Densité apparente (1,2 < BD < 1,8 g cm^{-3}) et teneur en Matière Organique (0,2 < OM < 3,2%).

La méthodologie utilisée est présentée ci-après :

Étape 1 :

Des techniques de régression linéaire multiple ont été utilisées pour relier la teneur en eau volumétrique à SAT, FC et WP à la granulométrie, à la densité apparente et à la teneur en matière organique. Les formes linéaires, inverses et logarithmiques de ces propriétés pédologiques de base ont été introduites dans l'analyse de régression et les interactions potentielles ont également été étudiées. L'équation présentait la forme suivante :

$$\theta_i = a_{i,1} + a_{i,2}\,Sa + a_{i,3}\,Si + a_{i,4}\,Cl + a_{i,5}\,OM + a_{i,6}\,BD + a_{i,7}\,(1/Sa) + a_{i,8}\,(1/BD) + a_{i,9}\,SaSi + \ldots + a_{i,j}\,SiCl + a_{i,j+1}\,Sa^2 + \ldots + a_{i,j+2}\,Cl^2 + a_{i,j+3}\,\ln(Sa) + \ldots + a_{i,j+4}\,\ln(Cl)$$

Où X_i est la valeur de la teneur en eau (i = 1 à 3 correspondants respectivement à SAT, FC et WP) ; Sa, Si et Cl sont respectivement les pourcentages de sable (2-0,05 mm), de limon (0,05-0,002 mm) et d'argile (< 0,002 mm) ; BD est la densité apparente (g cm-3) ; OM est le pourcentage de matière organique et $a_{i,j}$ (j = 1...n) sont des coefficients dérivés par régression linéaire multiple.

Étape 2 :

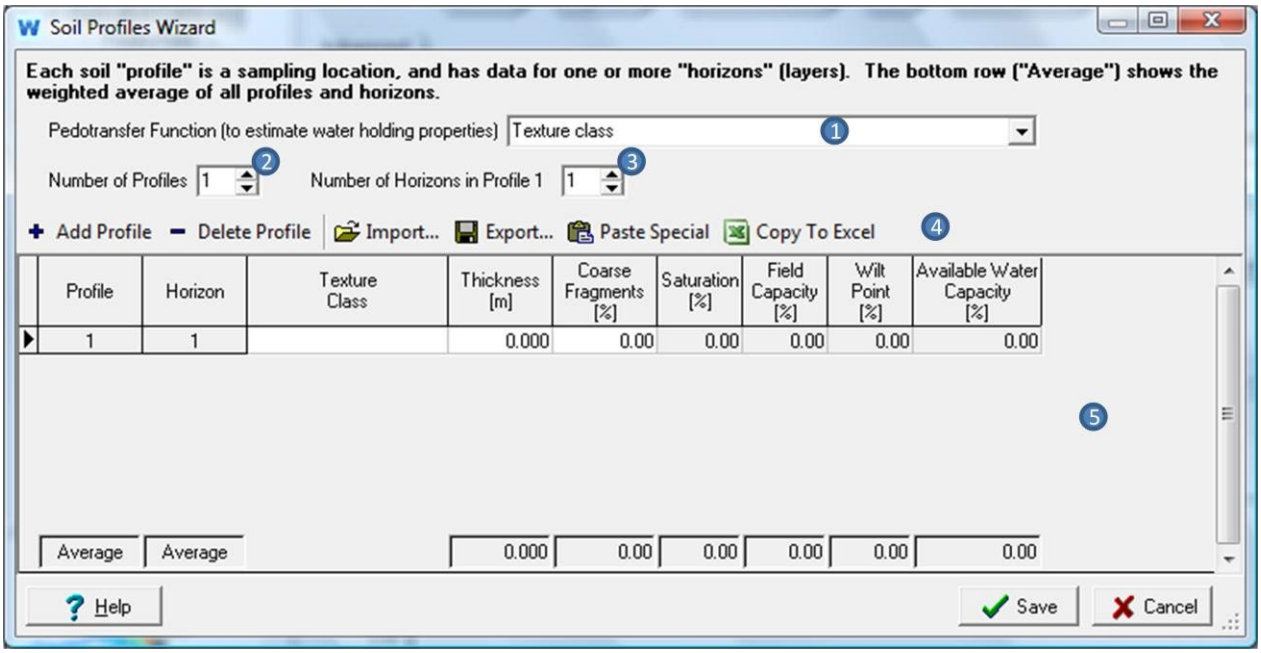
Par souci de parcimonie, le nombre de paramètres de cette dernière équation a été réduite à l'aide de techniques de régression pas à pas (*stepwise*), ne conservant dans l'équation finale que les variables expliquant une proportion significative de la variabilité des paramètres. Cependant, les utilisateurs de PTF sont fréquemment confrontés à des situations où une ou plusieurs variables d'entrée nécessaires sont indisponibles. Par conséquent, quatre équations ont été dérivées pour estimer SAT, FC et WP, selon les données disponibles : le modèle **JS_{PBO}** inclut toutes les informations de base (sable, limon, argile, densité apparente et teneur en matière organique) ; le modèle **JS_{PO}** exclut la densité apparente ; le modèle **JS_{PB}** exclut la matière organique ; et le modèle **JSP** exclut à la fois la densité apparente et la matière organique.

- Il convient de noter que les PTF sont développées sur la base de données comprenant un nombre limité d'échantillons de sol. Par conséquent, toute PTF est susceptible de fournir des prédictions moins précises, voire très médiocres, si elle est utilisée en dehors de la gamme de sols à partir de laquelle elle a été dérivée. Ainsi, la capacité prédictive des PTF est étroitement liée à la similitude entre l'ensemble de données utilisé pour le développement et celui utilisé pour le test de la PTF.

Options de saisie de l'assistant de profil de sol « Soil Profiles Wizard »

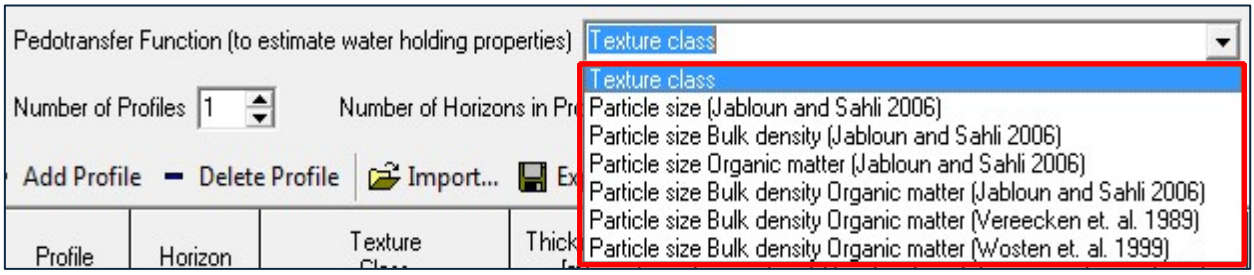
WEAP-MABIA intègre un *Soil Profiles Wizard* qui permet l'estimation de la capacité de rétention d'eau moyenne (saturation, capacité au champ et point de flétrissement) en utilisant l'une des sept fonctions de pédotransfert (PTF) disponibles. Cet outil sert à déterminer la capacité de rétention d'eau du sol pour les branches d'occupation du sol du bassin versant dans la fenêtre « Données » (*Data*), sous l'onglet « Occupation du sol » (*Land Use*). Grâce à cet assistant, il est possible d'établir une moyenne des teneurs en eau sur plusieurs profils de sol (sites d'échantillonnage) et plusieurs horizons (couches). Les sept PTF disponibles ont été sélectionnées pour s'adapter à différents scénarios de disponibilité des données pédologiques de base.

Cet assistant est conçu pour moyenner les capacités en eau disponible de plusieurs couches de sol et de roche. Veuillez noter que le *Soil Profiles Wizard* ne permet pas (encore) d'allouer l'AWC d'horizons pédologiques individuels aux profondeurs racinaires d'une culture à un stade de croissance spécifique. Par exemple, si le premier mètre du profil de sol est composé de 50 cm de limon (*silt loam*) surmontant 50 cm de roche consolidée, une capacité en eau disponible modérée (≈11 % en volume) est calculée (moyenne de 21 % et 0 %) ; cette moyenne est ensuite appliquée à tous les stades de croissance de la culture. Même avec une profondeur racinaire de 50 cm, le programme n'utilise pas les propriétés spécifiques de la couche limoneuse ; tous les calculs reposent sur une capacité en eau moyennée sur l'ensemble du profil de sol.



- ❶ Une liste déroulante permet de choisir l'une des sept fonctions de pédotransfert (PTF) disponibles pour estimer la capacité de rétention de l'eau par le sol. La décision quant à l'approche la plus appropriée dépend de la disponibilité des données locales sur les sols.

Parmi les sept fonctions de pédotransfert (PTF) disponibles, l'une repose sur la classe texturale tandis que les six autres utilisent la distribution granulométrique (PSD : % de Sable, % de Limon et % d'Argile), avec l'utilisation optionnelle de données sur la densité apparente (BD) ou la teneur en matière organique (OM). Les noms des PTF (incluant les références aux auteurs originaux et aux dates de publication) pouvant être utilisés, ainsi que les paramètres requis par ces fonctions, sont :



1. « Texture class »: Classe de texture, issue de la Bibliothèque des Sols (*Soil Library*)
2. Granulométrie "Particle size (Jabloun and Sahli, 2006)": PSD
3. "Particle size Bulk density (Jabloun and Sahli, 2006)": PSD et BD.
4. "Particle size Organic matter (Jabloun and Sahli, 2006)": PSD et %OM.
5. "Particle size Bulk density Organic matter (Jabloun and Sahli, 2006)": PSD, %BD et %OM.
6. "Particle size Bulk density Organic matter (Vereecken et al., 1989)": PSD, %BD et %OM.
7. "Particle size Bulk density Organic matter (Wösten et al., 1999)": PSD, %BD et %OM.

- ❷ Champ de texte permettant de spécifier le nombre de profils (sites d'échantillonnage) dont vous disposez.
- ❸ Champ de texte permettant de spécifier, pour chaque profil, le nombre d'horizons (couches) pour lesquels vous disposez de données.

- 4 Barre d'outils permettant d'ajouter ou de supprimer des profils, d'importer ou d'exporter des données, ainsi que de copier et de récupérer des données pédologiques depuis Excel.
- 5 Tableau de données utilisé pour la saisie des informations pédologiques. Les variables de données requises sont définies dynamiquement chaque fois que vous choisissez une fonction de pédotransfert (PTF) différente.

En général, les PTF basées sur une connaissance détaillée des propriétés physiques du sol sont plus performantes que celles utilisant la texture du sol comme seule variable d'entrée. Les capacités en eau disponible par classe de texture de la FAO, extraites de la Bibliothèque des Sols (*Soil Library*) interne, doivent être considérées comme des estimations approximatives.

- Il convient de préciser qu'il peut être très difficile de sélectionner la méthode la plus appropriée pour une application donnée dans un environnement spécifique et selon un scénario de disponibilité de données particulier, étant donné que les différentes PTF peuvent produire des résultats très divergents. Par conséquent, en supposant que certaines mesures de laboratoire ou de terrain des paramètres hydrologiques souhaités soient disponibles pour les sols locaux, les estimations des PTF peuvent être évaluées par rapport à ces données. Cela permet de sélectionner la méthode la plus performante, qui pourra ensuite être utilisée pour des sites similaires.

M1.5 Saisir les propriétés du sol

Dans cet exemple, vous allez vous exercer à :

- Utiliser les valeurs disponibles dans la « *Soil Library* »
- Saisir directement les propriétés du sol
- Modifier la « *Soil Library* ».

Le "*Soil Profiles Wizard*" sera présenté et décrit en détail dans un chapitre séparé. Pour plus d'informations, consultez la section intitulée « Utilisation de l'Assistant Profils de sol ».

Les données pédologiques à utiliser sont les suivantes :

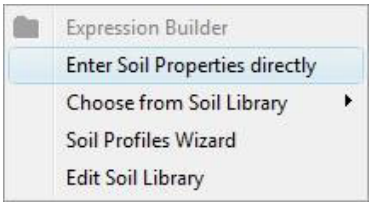
Branche	*Saturation*	*Capacité au champ*	*Point de flétrissement*	*Fragments grossiers*
Green peppers (silt loam)	48.6	34.5	13.1	0
Coffee tea	47.8	36.2	21.8	0
Rice	40.7	35.8	24.3	0

Utiliser les valeurs disponibles dans la bibliothèque des sols pour les poivrons verts



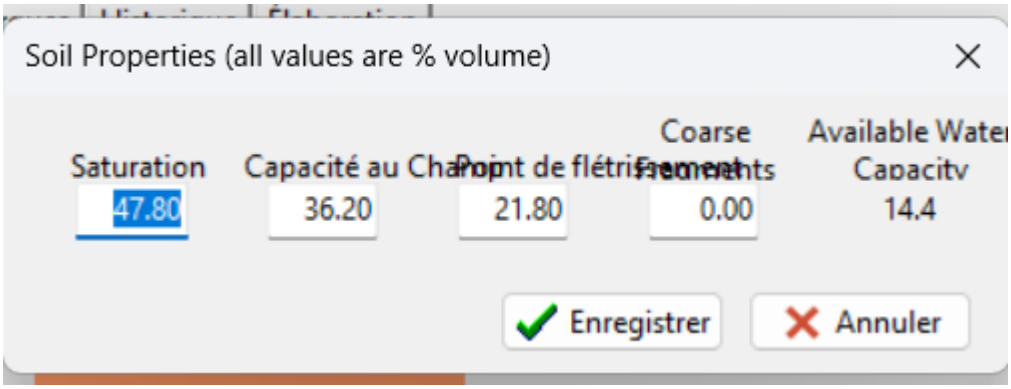
1. Sélectionnez la capacité de la couche supérieure sur WEAP ; pour green peppers , utilisez le menu déroulant pour sélectionner « Choisir dans la bibliothèque des sols » « *Choose from soil library* » -ensuite « Limons fins ».

Saisir directement les propriétés du sol pour café thé



2. Sélectionnez la capacité de la couche supérieure « *soil water capacity* »; pour *coffee tea*, utilisez le menu déroulant pour sélectionner « *Enter soil properties directly* » (Saisir directement les propriétés du sol).

Une fenêtre apparaîtra dans laquelle vous devrez saisir la saturation, la capacité au champ et le point de flétrissement de la branche « Champ de poivrons verts ». Cliquez ensuite sur « Enregistrer ».



Si les propriétés du sol d'une branche sont identiques à celles d'une autre branche, vous pouvez copier-coller l'expression d'une branche à l'autre.

Entrez les propriétés du sol à partir de la « Soil Library » pour le riz.

Vous allez utiliser la « Bibliothèque des sols » pour saisir les propriétés du sol du riz.

1. Sélectionnez ensuite l'option "*Edit Soil Library*" « Modifier la bibliothèque des sols » dans le menu déroulant de la grille de données de l'onglet « *Soil Water Capacity* ».



Une fenêtre apparaîtra dans laquelle vous trouverez les valeurs typiques des propriétés des 12 classes de sols.

3. Cliquez sur le bouton 

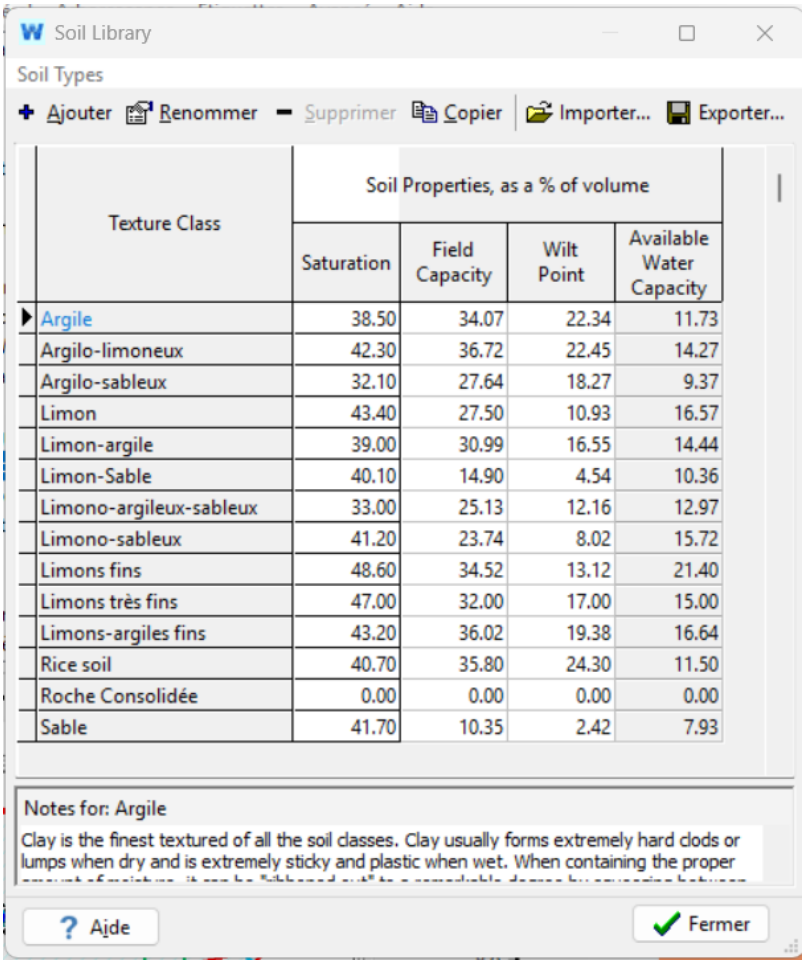
pour ajouter un nouveau sol à la bibliothèque.

Donnez un nom au sol du riz. Appelez-le « sol du riz » "Rice *Soil*".

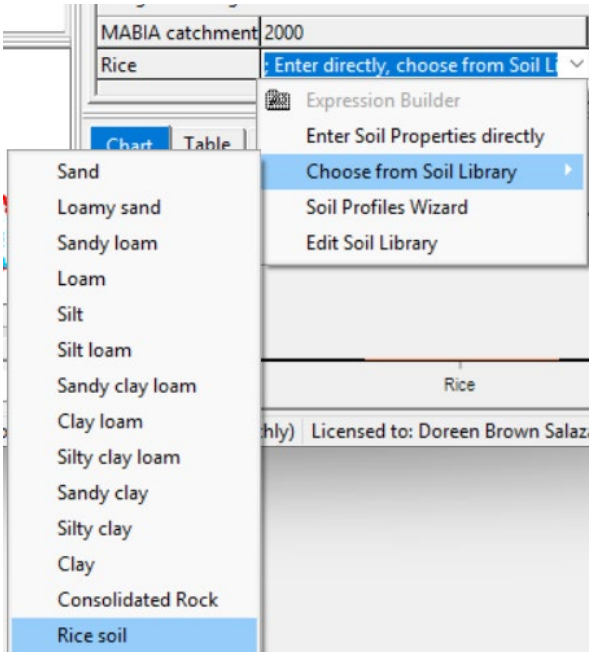
4. Entrez les propriétés de votre nouveau sol comme indiqué ci-dessous, puis cliquez sur 

pour confirmer que vous enregistrez vos données.

5. Dans la « Vue des données », sous l'onglet « Capacité de la couche supérieure », pour riz, utilisez le menu déroulant pour sélectionner "*Choose from Soil Library*". « Choisir dans la bibliothèque des sols ».



6. Dans la fenêtre des données, sectionnez "*Rice Soil*".



M1.6 Saisir d'autres paramètres d'occupation des sols

Le taux d'infiltration maximal

Le taux d'infiltration maximal correspond à la hauteur d'eau capable de s'infiltrer dans le sol sur une période de 24 heures. Plusieurs facteurs influencent le taux d'infiltration d'un sol : en général, les sols sableux tendent vers des conductivités hydrauliques plus élevées, tandis que les sols argileux se caractérisent par des valeurs plus faibles. Les sols présentant une croûte de battance possèdent des pores scellés qui restreignent l'entrée de l'eau.

De même, les sols compactés présentent une infiltration plus faible. Les sols dotés d'agrégats solides, tels que ceux ayant des structures granulaires ou polyédriques, affichent un taux d'infiltration plus élevé que les sols à structure fragile. Les taux d'infiltration sont généralement plus élevés lorsque le sol est sec et diminuent à mesure que l'humidité du sol augmente. Si les précipitations journalières (ou l'irrigation) excèdent ce taux, l'excédent s'écoule par ruissellement. La valeur saisie ici n'est pas nécessaire pour le calcul du bilan hydrique du sol proprement dit ; elle sert uniquement à répartir les précipitations entre le ruissellement de surface et l'infiltration. Si aucune valeur n'est renseignée, la précipitation brute est considérée comme égale à la précipitation nette, et la totalité des eaux de pluie est alors disponible pour l'infiltration.

Les valeurs typiques du taux d'infiltration maximal pour les 12 classes texturales sont présentées dans le tableau ci-dessous (d'après Davis et McCuen (2005).

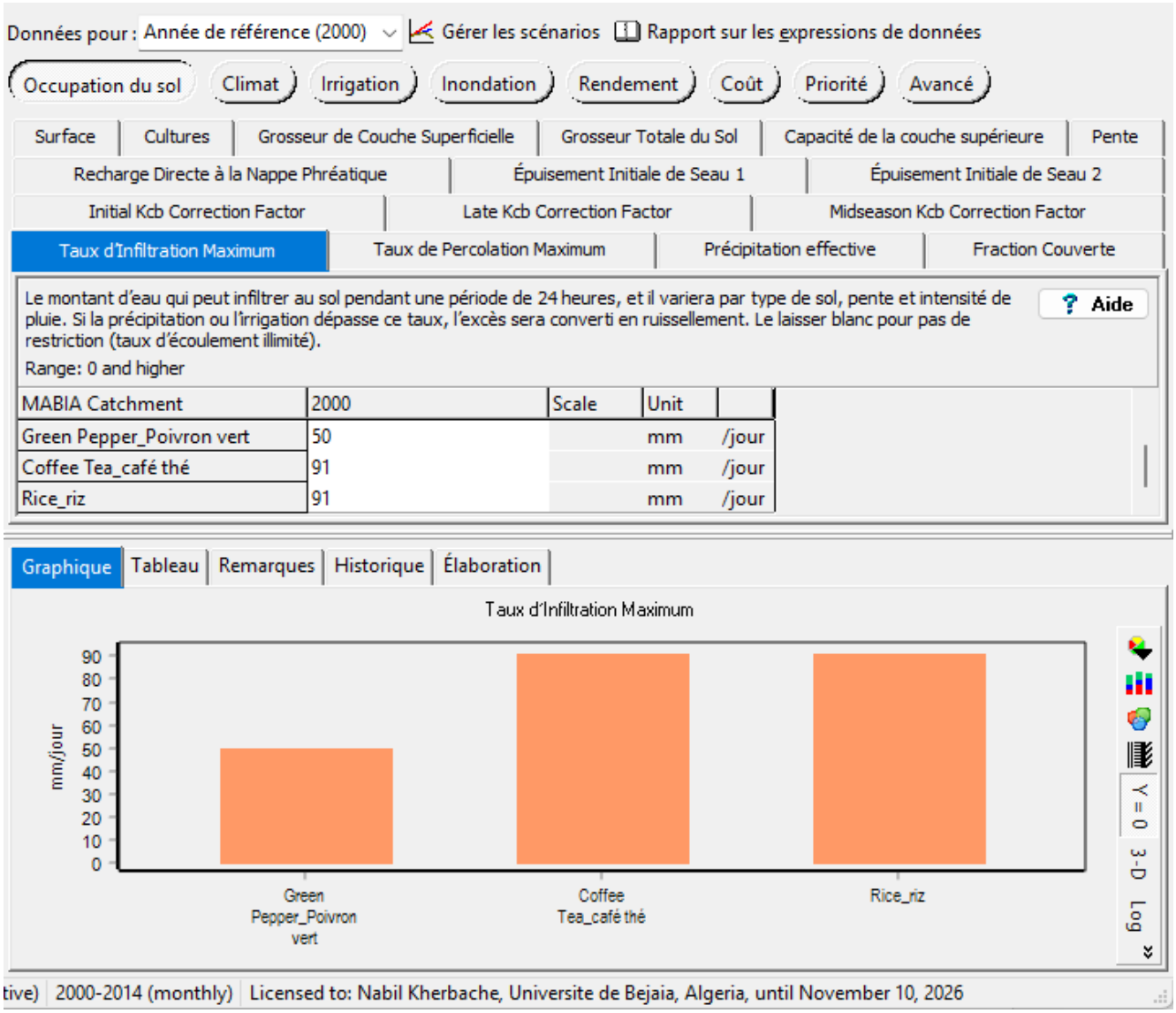
Classe de Sol (ou Classe Texturale)[8]	**Taux d'infiltration maximal**	
	(inches per hour (pouces par heure))[9]	**(mm/jour)***
Sable	5.0	3048.0
Limon-Sable	1.5	914.4
Limino-sableux	0.8	487.7
Limino-argileux-sableux	0.4	243.8
Limon	0.4	243.8
Limon-argile	0.25	152.4
Limon fins	0.20	121.9
Argile sableux	0.15	91.4
Limon très fins	0.15	91.4
Limono-argiles fins	0.08	48.8
Argileux limoneux	0.04	24.4
Argile	0.02	12.2

*Convertis en considérant : 1 inch. = 25.4 mm

Entrez 50 mm/jour pour les poivrons verts et 91 mm/jour pour café the et riz.

[8] Les noms sont une traduction conformément aux termes utilisés dans WEAP pour la langue française.

[9] 1 in./hr = 25,4 mm/hr = 609,6 mm/24h



Précipitations efficaces (effectives sur WEAP)

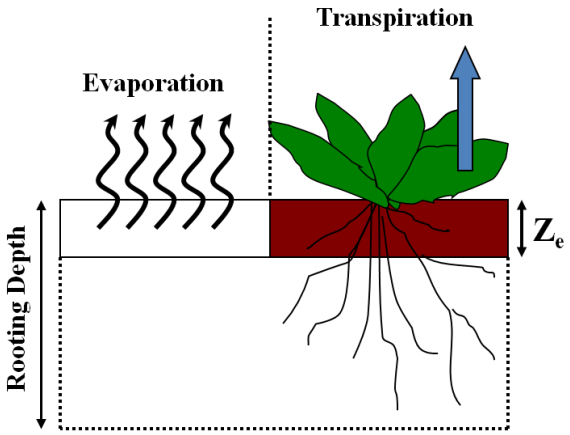
La précipitation efficace est définie comme le pourcentage de pluie disponible pour l'évapotranspiration. Le reste constitue le ruissellement direct. Par exemple, pour une pluie fine, 100 % peuvent être disponibles, tandis qu'avec l'augmentation de l'intensité de la pluie, un pourcentage plus faible de précipitations sera disponible pour l'évapotranspiration. À titre d'exemple, si la précipitation efficace est de 80 %, alors 20 % de la pluie seront perdus sous forme de ruissellement direct.

Certains modélisateurs WEAP utilisent une expression pour les précipitations efficaces liées à l'humidité du sol : les précipitations efficaces diminuant à mesure que l'humidité du sol approche 100 %.

Laissez ce champ vide pour les trois branches "MABIA Catchment" afin de considérer que 100 % des précipitations sont disponibles pour l'évapotranspiration.

Grosseur de couche superficielle (*Surface Layer Thickness*)

Dans le modèle MABIA, la transpiration de la culture et l'évaporation de la couche de sol exposée sont calculées séparément. Ainsi, le paramètre d'épaisseur de la couche de surface (Z_e) représente la profondeur de la couche de sol superficielle soumise au séchage par évaporation (réservoir évaporatif du sol). Lorsqu'aucune valeur spécifique n'est renseignée pour Z_e, une profondeur effective de la couche d'évaporation du sol de 0,10 m est supposée par défaut.



Dans certaines régions du monde, par exemple dans les conditions climatiques de l'Europe centrale, des épaisseurs de couche superficielle plus faibles, comprises entre 0,02 et 0,03 m, et les résultats de simulation qui en découlent correspondent mieux aux taux d'évaporation observés localement.

Laissez ce champ vide pour les trois branches « Mabia Catchment » afin de considérer que la couche superficielle du sol a une profondeur de 0,1 m. Notons qu'elle est généralement fixée entre 0,1 m et 0,15 m (10 à 15 cm) dans la plupart des modèles FAO-56.

Épuisement initial du sceau 1

L'épuisement initial correspond à la valeur de départ de l'épuisement de l'humidité du sol au premier jour de la période de calcul (simulation). Un épuisement nul signifie que la teneur en eau du sol est proche de la capacité au champ. La valeur maximale d'épuisement correspond à la réserve utile (capacité en eau disponible), telle que spécifiée sous la rubrique "Capacité en eau du sol" *"Soil Water Capacity"* ; saisir cette valeur impliquerait que le sol était initialement sec (au point de flétrissement). Par conséquent, comme notre modèle débute en période humide, nous

laisserons ce champ vide ; toutefois, pour les scénarios commençant en période estivale, nous pourrions saisir une valeur élevée (jusqu'à 100 %, reflétant l'absence de réserve évaporative dans la couche superficielle du sol).

Laissez ce champ vide pour les trois branches "*MABIA Catchment* »

M1.7 Collecte et saisie des données climatiques quotidiennes

Besoins en données climatiques

La méthode MABIA nécessite des informations quotidiennes sur les conditions météorologiques. Même si vous exécutez votre modèle global à un intervalle mensuel, la routine MABIA fonctionne avec des valeurs quotidiennes. Les conditions quotidiennes déterminent la quantité d'eau qui peut s'infiltrer dans le profil du sol et qui peut être extraite par l'évaporation de la couche superficielle du sol et la transpiration des cultures. Les données climatiques quotidiennes requises sont les suivantes :

- Précipitation quotidienne (mm);
- L'évapotranspiration d'une surface de référence, ET_{ref} (mm/jour), OU les valeurs d'entrée permettant à WEAP de calculer l'ET_{ref} à l'aide de l'équation de Penman-Monteith, comme recommandé par le rapport de FAO-56 :
    - Températures journalières minimale et maximale (°C) ;
    - Humidité relative de l'air moyenne journalière (%) ;
    - Vitesse du vent journalière mesurée à 2 m de hauteur (m/s) ;
    - Rayonnement solaire journalier (MJ/m^2) OU durée d'insolation journalière (h) OU latitude.

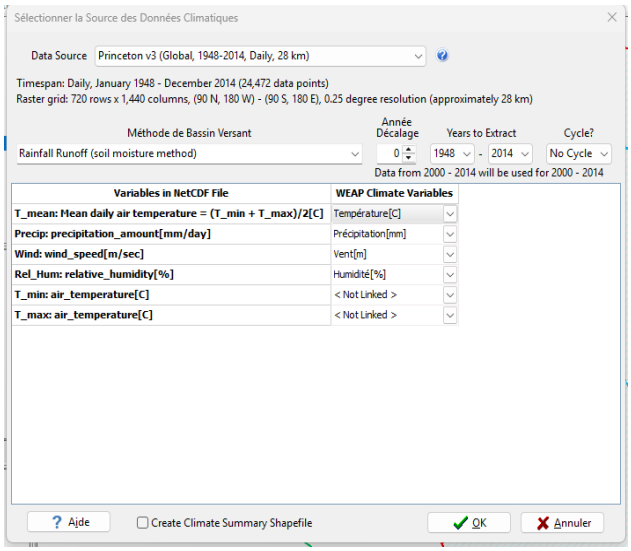
Remarque : si vous entrez ETref, vous n'avez pas besoin de saisir les températures, l'humidité, la vitesse du vent ou la latitude, et si vous entrez les données nécessaires à WEAP pour calculer ETref, vous n'avez pas besoin de saisir les valeurs d'ETref, car WEAP les calculera.

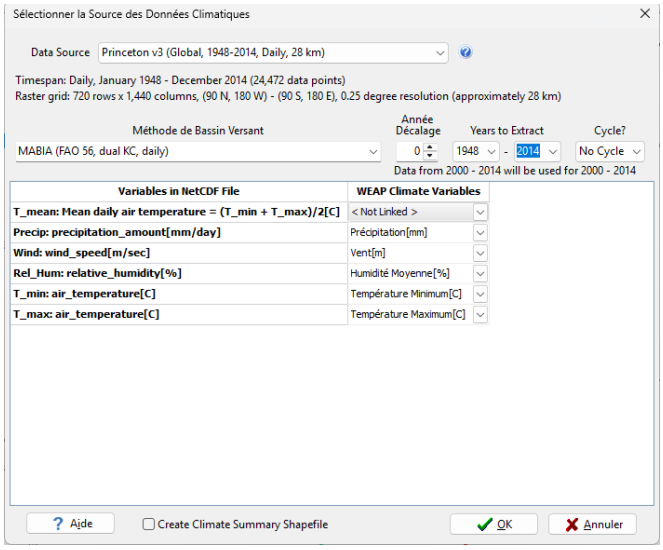
La vitesse journalière du vent est également utilisée pour corriger les valeurs de K_{cb} durant les phases de milieu et de fin de saison ; de plus, l'humidité relative minimale quotidienne de l'air est requise à cette même fin.

Utilisation du mode de délimitation du bassin versant pour télécharger les données journalières destinées au module MABIA

Nous continuerons à modéliser les données sur une base mensuelle et nous maintiendrons la modélisation de tous les bassins versants, à l'exception de *MABIA catchment*, en utilisant la méthode de l'humidité du sol (*Soil Moisture Method).* Cette méthode hydrologique est conçue pour modéliser la relation pluie-débit et constitue la méthode que nous avons utilisée pour calibrer notre modèle. Les données d'entrée pour la méthode MABIA diffèrent de celles de la méthode de l'humidité du sol: MABIA utilise les températures maximale (T_{max}) et minimale (T_{min}), ainsi que l'évapotranspiration de référence (ET_{ref}), tandis que la méthode de l'humidité du sol utilise uniquement la température moyenne (T_{mean}). Nous utiliserons la fonction de délimitation automatique des bassins versants de WEAP pour télécharger les données journalières publiques requises pour MABIA, comme suit :

- Activez le mode de délimitation automatique du bassin versant (clic droit sur le schéma et sélectionnez » « *Catchment Delineation Mode* ». Sélectionnez « *Load climate data* » (Charger les données climatiques), « *Princeton V3* », période "1948-2014", « *Daily data* » (Données journalières), et la méthode « MABIA (FAO 56, dual Kc, daily) ».
- Quittez le mode de délimitation automatique du bassin versant et copiez les valeurs du bassin "Tana" vers le bassin « MABIA Catchment » pour les paramètres suivants : précipitations, T_{max}, T_{min}, latitude, humidité moyenne et vitesse du vent.
- Entrez à nouveau dans le mode de délimitation automatique du bassin versant, sélectionnez les données climatiques à charger, puis sélectionnez Princeton V3, 1948-2014, données mensuelles et la méthode de ruissellement des précipitations et d'humidité du sol.
- Vérifiez que vos données climatiques sont correctement saisies pour le bassin versant de Tana et MABIA Catchment





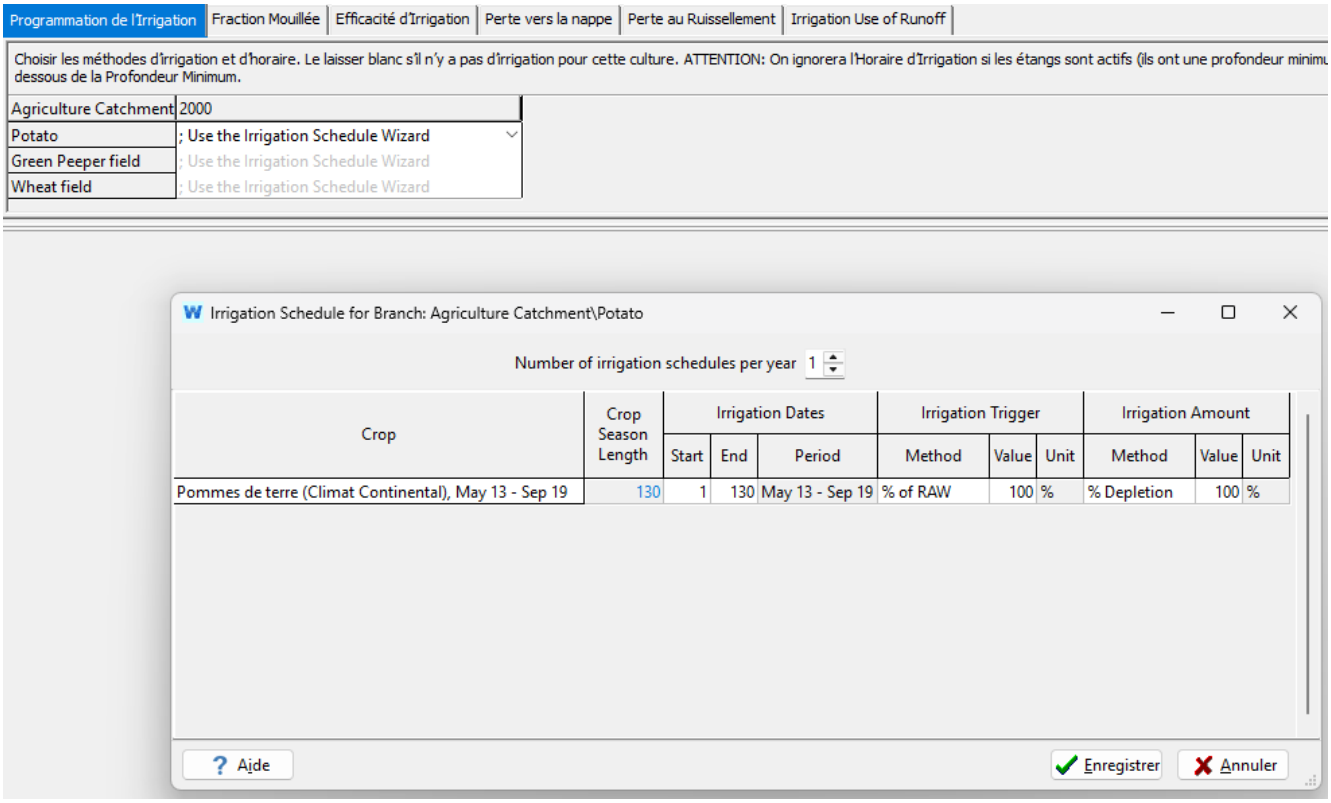
Mabia, quotidienne Humidité du sol, mensuelle

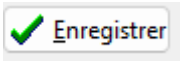
M1.8 Saisir les données d'irrigation

La prochaine étape dans la configuration du modèle pour utiliser la méthode « MABIA » consiste à saisir les données d'irrigation. L'irrigation est nécessaire lorsque les précipitations sont insuffisantes pour compenser la perte d'eau due à l'évapotranspiration. L'objectif principal de l'irrigation est d'apporter de l'eau au bon moment et en quantité adéquate. En calculant quotidiennement le bilan hydrique du sol dans la zone racinaire, il est possible de planifier le moment et la profondeur des irrigations futures. Pour éviter le stress hydrique des cultures, les irrigations doivent être effectuées avant ou au moment où l'eau facilement disponible dans le sol (RAW) est épuisée. (Épuisement ≤ RAW).

M1.8.1 Calendrier d'irrigation

Mabia catchment -> Irrigation -> Programmation de l'irrigation (sur WEAP) *(irrigation schedule)* -> Sélectionnez "*Irrigation Scheduling Wizard*" (assistant de programmation de l'irrigation) dans le menu déroulant. La fenêtre contextuelle suivante apparaîtra :



Cliquez sur 

et WEAP créera l'expression correspondante du programme d'irrigation qui intègre les données déjà définies par WEAP comme valeurs par défaut, sur la base des informations sur les cultures que nous avons saisies précédemment.

Répétez ces étapes pour les branches de poivron vert et de champ de blé du *MABIA Catchment*.

- L'« assistant de programmation de l'irrigation » sera présenté et décrit en détail dans un chapitre séparé. Pour plus d'informations, consultez la section intitulée « Module de programmation de l'irrigation et de rendement des cultures ».

M1.8.2 Fraction mouillée

De nombreux types de systèmes d'irrigation n'humidifient qu'une fraction de la surface du sol. Par exemple, dans le cas d'un système d'irrigation goutte à goutte, la fraction de la surface humidifiée,

F_w, peut n'être que de 0,4. Dans le cas des systèmes d'irrigation à la raie (ou sillon), la fraction de la surface humidifiée peut varier entre 0,3 et 0,8.

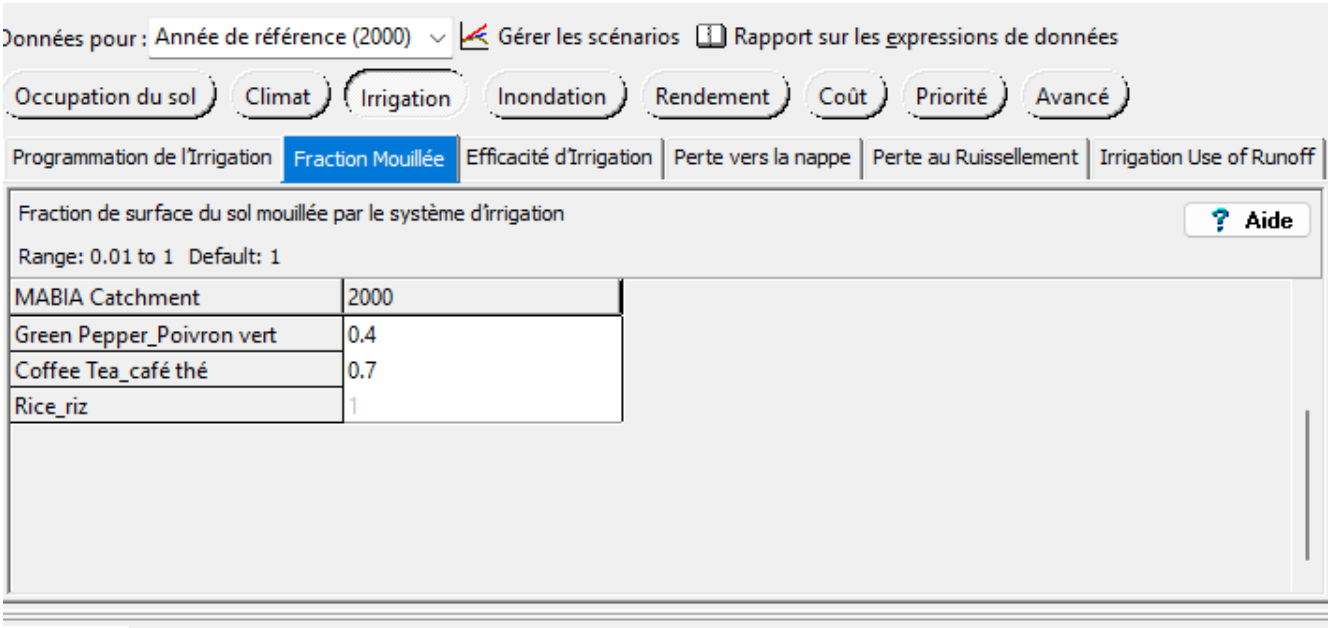
Vous trouverez ci-dessous les valeurs courantes de la fraction F_w pour certains systèmes d'irrigation :

Systéme d'irrigation	*Fw*
Irrigation par aspersion	*1*
Irrigation par bassin	*1*
Irrigation par submersion	*1*
Irrigation par sillons (chaque sillon), billons (ou lits) étroits	*0.6 - 1.0*
Irrigation par sillons (chaque sillon irrigué), billons (ou planches) larges	*0.4 - 0.6*
Irrigation par sillons alternés	*0.3 - 0.5*
Goutte-à-goutte	*0.3 - 0.4*

Source : FAO 56 (Allen et al., 1998, 2005)

Pour cet exemple, cliquez sur l'onglet « Fraction mouillée » et saisissez les données suivantes :

Branche	*Système d'irrigation*	*Fw*
Champ de pomme de terre	*Irrigation localisée*	*0.4*
Champ de poivrons verts	*Furrow irrigation*	*0.7*
Champ de blé	*Irrigation par aspersion*	*1*



M1.8.3 Efficience d'irrigation (Efficacité sur WEAP)

Toute l'eau appliquée au champ ne peut pas être utilisée par les plantes. Une partie de cette eau est perdue par évaporation, par pertes par ruissellement (*Loss to Runoff*) et par pertes vers les eaux souterraines (*Loss to Groundwater*). Pour refléter ces pertes d'eau, l'efficience d'application au champ (E_a) doit être spécifiée dans WEAP et est déterminée à l'aide de la formule suivante :

$$E_a = \frac{d_{net}}{d_{gross}}.100$$

d_{gross}: lame d'eau brute d'irrigation en mm

d_{net}: lame d'eau net d'irrigation en mm = Lame brute moins les pertes d'eau.

E_a: L'efficience d'application au champ exprimée en pourcentage. Elle exprime le pourcentage de l'eau disponible à l'évapotranspiration

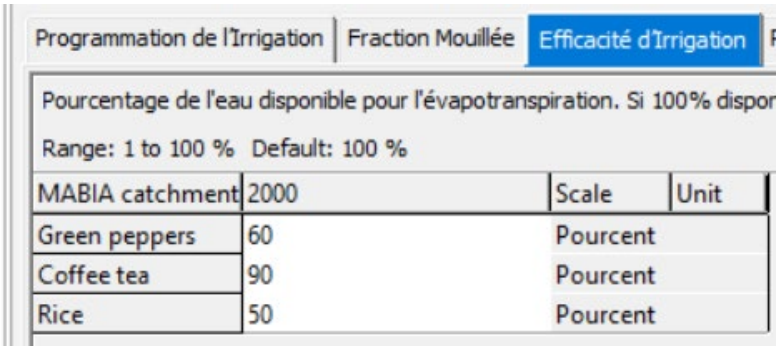
Si des données locales fiables sur l'efficience d'application au champ sont disponibles, celles-ci doivent être privilégiées. En l'absence de telles données, les valeurs empiriques suivantes, issues des recommandations de la FAO pour l'efficience d'application (Ea), peuvent être utilisées :

System Type	*Application Efficiencies, Ea (%)*
Systèmes sous pression	
Systèmes d'irrigation par aspersion	
● *Systèmes à poste fixe*	*70-80*
● *Canons d'arrosage*	
– *Canons portables*	*60-70*
– *Canons automoteurs / enrouleurs (Traveling guns)*	*65-75*
● *Pivot central et rampe frontale*	*70-85*
● *Rampes à déplacement périodique*	*65-75*
Systèmes de micro-irrigation	
● *Goutte-à-goutte ou lignes de goutteurs*	
– *En surface*	*70-90*
– *Enterré*	*70-90*
● *Micro-jets / Micro-aspersion*	*70-85*
● *Systèmes de barboteur*	*70-85*
Systèmes d'irrigation gravitaire	
Systèmes de fossés à ciel ouvert	
● *Réseau de transport par fossés ouverts*	
– *Écoulement continu (Flow through)*	*20-70*
– *Recyclage des eaux de colature (Tailwater recycle)*	*30-80*
● *Transport semi-fermé*	
– *Écoulement continu*	*30-70*
– *Recyclage des eaux de colature*	*40-80*
● *Systèmes de conduits souterrains*	*40-80*
● *Systèmes de surface (submersion / inondation)*	
– *Systèmes d'inondation en planches (Crown flood)*	*25-75*
– *Systèmes d'inondation continue (Rizières)*	*25-75*

Source: Washington State Department of Ecology (2024)

Pour cet exemple, cliquez sur l'onglet « Efficacité de l'irrigation » et saisissez les données suivantes :

Branche	*Système d'irrigation*	*Efficience d'irrigation*
Green peppers	*Irrigation à la raie (ou par sillons)*	*60*
Coffee tea	*Goutte-à-goutte*	*90*
Rice	*Irrigation pour inondation*	*50*



En saisissant une valeur estimée pour l'« Efficacité de l'irrigation », seule la quantité totale d'eau d'irrigation non disponible pour l'évapotranspiration (100-Efficacité d'irrigation) est connue. Cette eau est répartie entre l'évaporation, le ruissellement direct vers les eaux de surface et la percolation profonde vers les eaux souterraine (voir le schéma de flux). Si ces fractions sont connues, l'utilisateur peut les spécifier (voir organigramme de la section 1.8.5).

M1.8.4 Perte vers la nappe

La « Perte vers la nappe » " (*Loss to Groundwater*) est définie comme le pourcentage de l'eau fournie NON disponible pour l'évapotranspiration (100 %-Efficacité d'irrigation), qui s'infiltre jusqu'aux eaux souterraines.

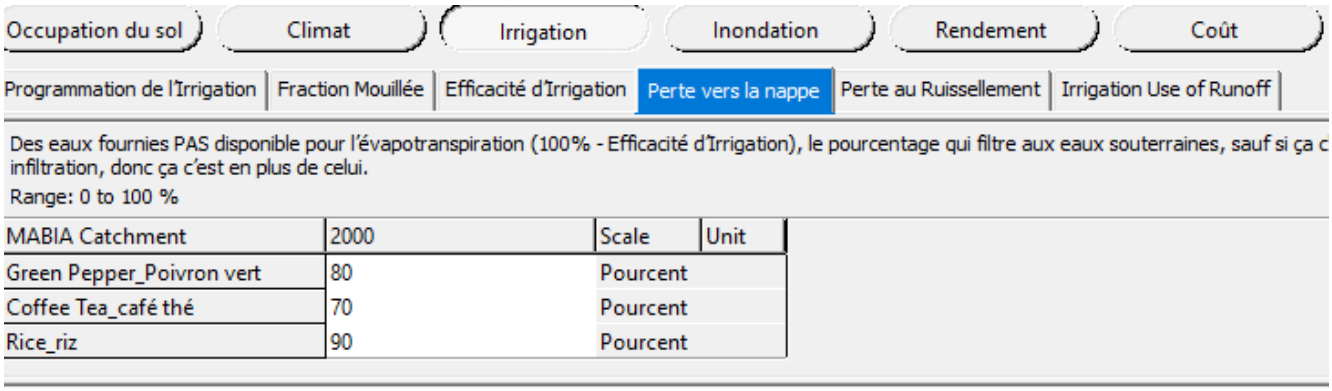
M1.8.5 Perte au ruissellement

La perte par Ruissellement (*Loss to Runoff*) représente la fraction de l'eau d'irrigation non infiltrée qui quitte la surface de la parcelle. Elle est définie comme le pourcentage de la lame d'eau brute non stockée dans la zone racinaire (100%-Efficacité d'irrigation) qui s'écoule superficiellement vers le réseau hydrographique ou les zones de collecte aval. Ce paramètre est essentiel pour simuler les flux de retour (*Return Flows*) vers les eaux de surface dans le bilan hydrique global du bassin.

- La quantité d'eau d'irrigation qui ne s'infiltre pas et ne s'écoule pas est supposée s'évaporer.

Pour cet exemple, on suppose le partage suivant :

Branche	*Perte vers la nappe*	*Perte au ruissellement*
Green peppers	*80*	*0*
Coffee tea	*70*	*0*
Rice	*70*	*0*



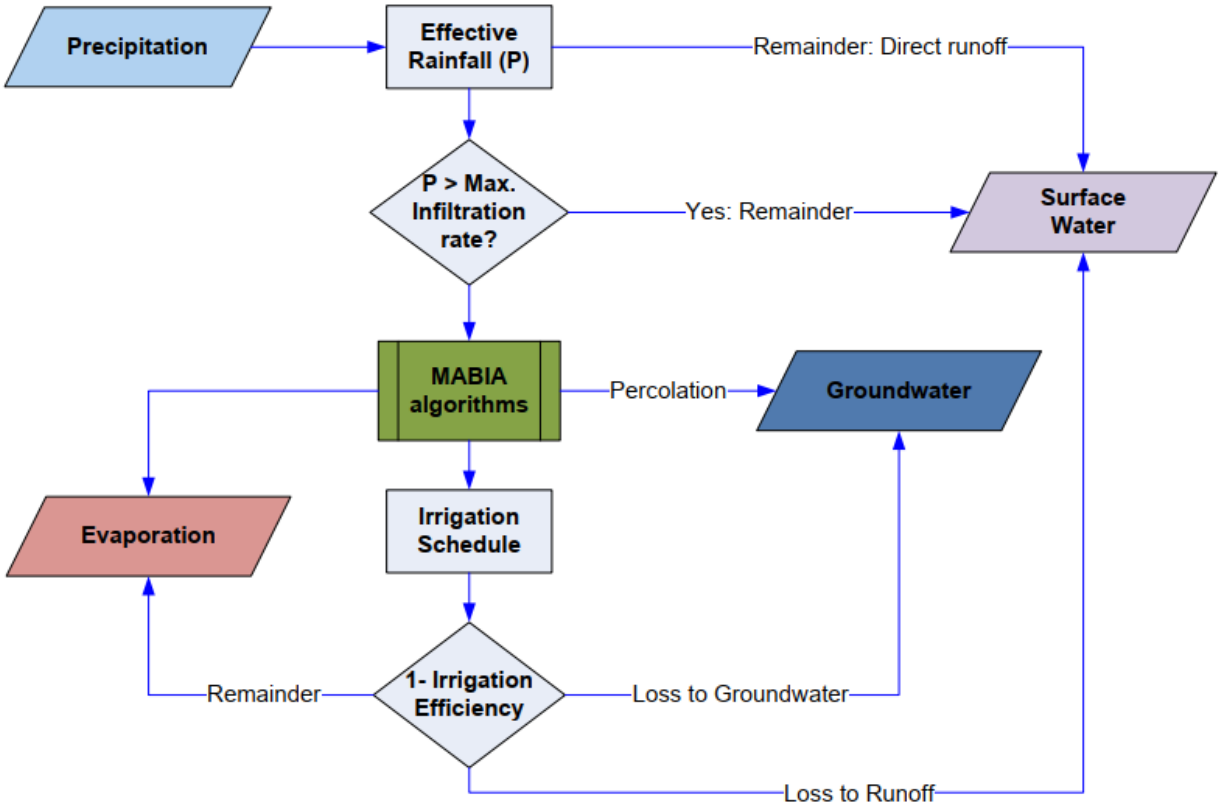


Figure : Organigramme illustrant les procédures de calcul des différentes pertes d'eau.

Comme le montre l'organigramme, le ruissellement direct vers les eaux de surface des bassins versants modélisés avec MABIA est calculé sur la base de six valeurs d'entrée que l'utilisateur de WEAP peut ajuster : les précipitations efficaces, le taux d'infiltration maximal, l'efficacité de l'irrigation, la fraction de perte d'efficacité de l'irrigation vers les eaux souterraines et la fraction de perte d'efficacité de l'irrigation vers les eaux de surface.

M1.8.6 Entrez les données de rendement appropriées

Dans les systèmes d'irrigation, les cultures ne souffrent pas de pénurie d'eau : l'eau d'irrigation est appliquée avant que les cultures ne subissent le stress hydrique.

Cependant, il peut s'avérer impossible d'appliquer l'eau d'irrigation exactement au moment optimal ; par exemple, lors d'une année sèche, la rivière peut ne pas avoir un débit suffisant pour irriguer tous les champs à temps ; les agriculteurs peuvent être mal organisés et gaspiller trop d'eau en tête de périmètre, causant ainsi des pénuries en aval ; la gestion du périmètre peut décider de répartir

l'eau disponible sur une plus grande surface, permettant ainsi à plus d'agriculteurs d'irriguer, bien qu'en quantités inférieures à l'optimum.

Dans ces cas de pénuries d'eau imprévues — ou parfois même planifiées —, on suppose que les rendements des cultures diminuent selon une fonction de production culture-eau linéaire simple, telle que définie par le bulletin n°33 de la FAO (*Irrigation and Drainage Paper No 33)* (Doorenbos et al., 1979). La réponse du rendement de la culture à la réduction de l'évapotranspiration, causée par un déficit hydrique du sol, est spécifique à chaque espèce et peut varier au cours de la saison de croissance. Les coefficients empiriques permettant d'évaluer cette réponse du rendement sont fournis par la FAO et font partie de la « Bibliothèque des cultures » intégrée à WEAP.

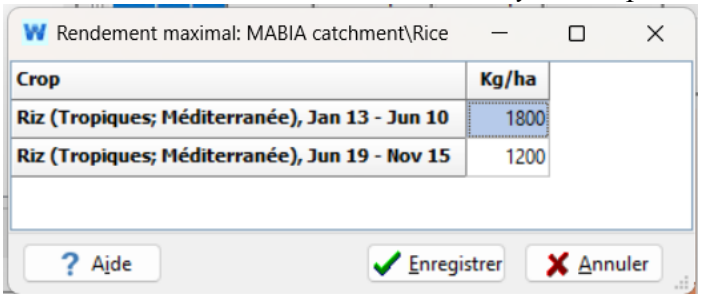
- Veuillez consulter l'aide "Yield" (sous *"Calculation Algorithms/Evapotranspiration, Runoff, Infiltration and Irrigation/MABIA Method"* pour obtenir une description plus détaillée du calcul de la réduction du rendement.

M1.8.7 Rendement maximal (Potential Yield)

Le Rendement Potentiel (maximal sur WEAP) (*Potential Yield*) est le rendement maximum de la culture sélectionnée en supposant un approvisionnement en eau optimal. Cette valeur sera utilisée pour estimer le rendement réel à l'aide de la fonction de production culture-eau *(crop-water production function)*.

Pour cet exemple, cliquez sur l'onglet "Rendement" et saisissez les données suivantes :

Branche	*Rendement maximal (kg/hectare)*
Green peppers	*5 000*
Coffee tea	*2 500*
Rice	*Utilisez la fonction : Rendement maximal wizard pour les deux cycles de plantation*

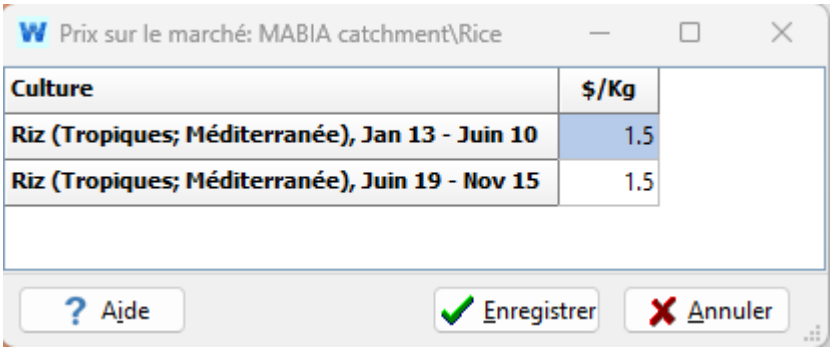


M1.8.8 Prix sur le marché

Ce paramètre définit le prix des cultures sur le marché

Pour cet exemple, utilisez les données suivantes :

Branche	*Prix sur le marché ($/kg)*
Green peppers	*1.50*
Coffee Tea	*0.15*
Rice	*Utilisez le prix sur le marché wizard*



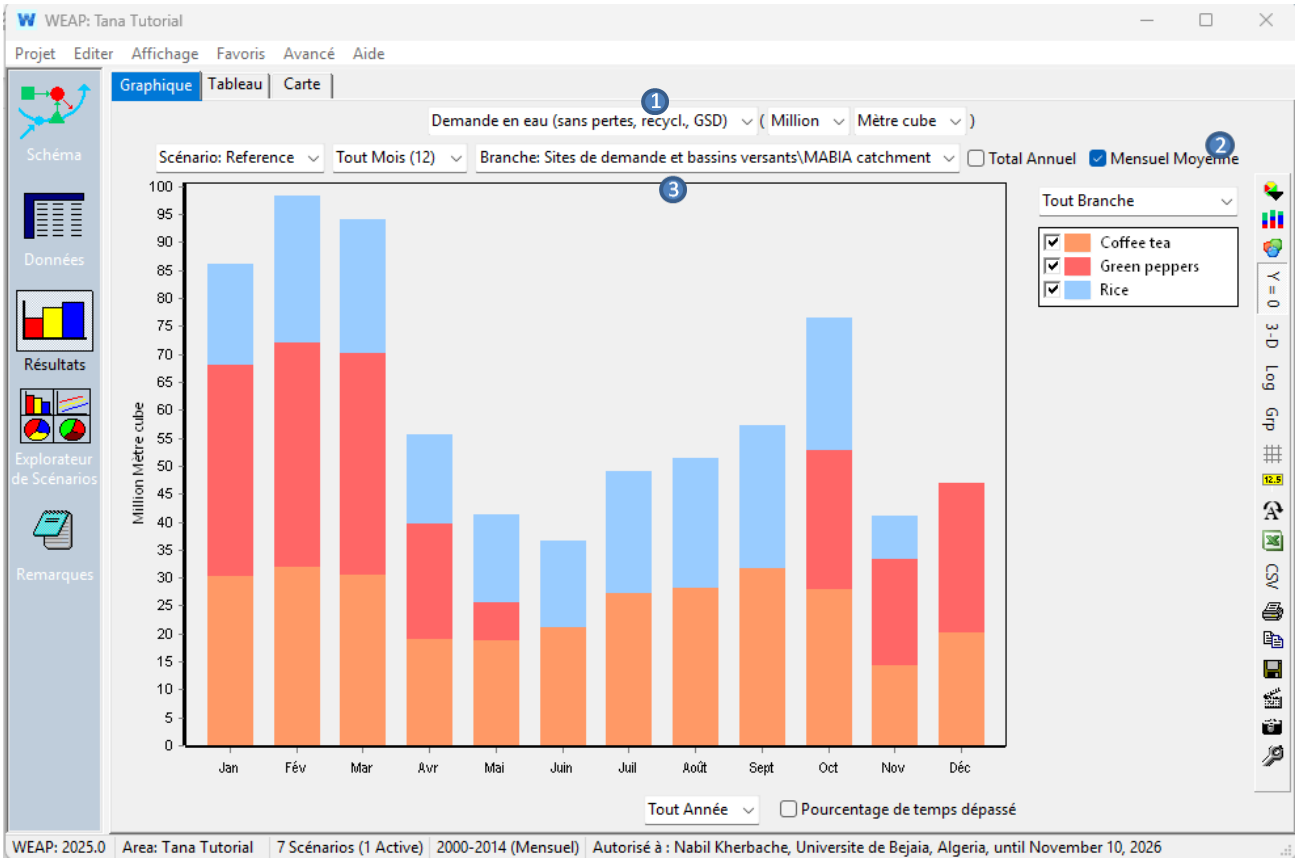
M1.9 Affichages des résultats

M1.9.1 Exécuter le modèle

Cliquez sur la fenêtre Résultats (*Results*) pour lancer le calcul. Lorsqu'il vous sera demandé si vous souhaitez recalculer, cliquez sur "OUI". Cela calculera l'intégralité du modèle pour le Scénario de Référence, le scénario par défaut généré à partir des informations des Comptes Actuels (*Current Accounts*) pour la période spécifiée pour le projet (ici, de 2000 à 2014). Une fois le calcul terminé, la vue des résultats s'affichera.

M1.9.2 Consultez les demandes mensuelles moyennes en eau par culture

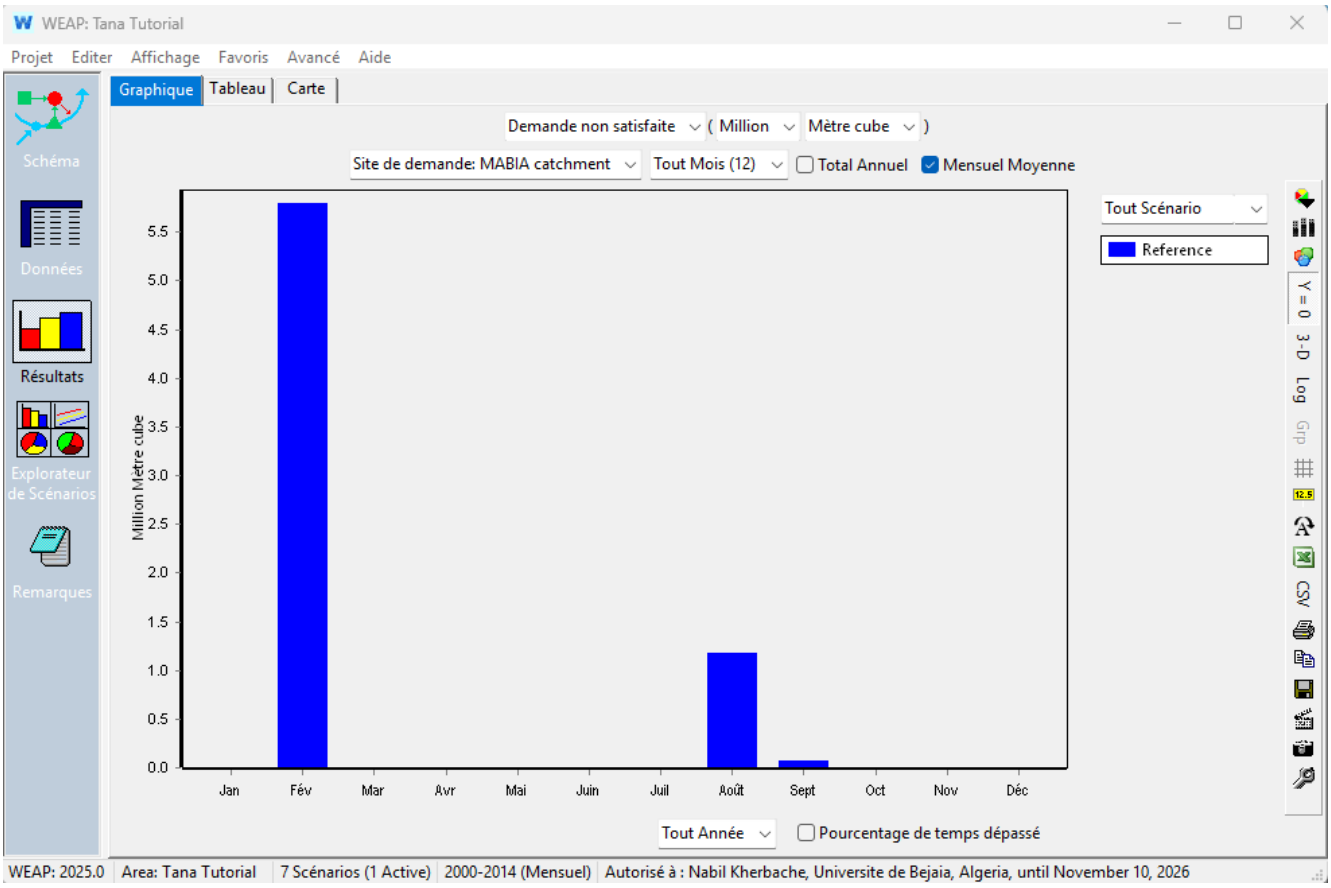
Sélectionnez le favori « Demande en eau » ❶, puis sélectionnez la branche « ***MABIA Catchment*** » (MABIA catchment) ❷ et l'option « Moyenne mensuelle » ❸. Choisissez un graphique en barres empilées (*Stacked bar graph*) en utilisant les options du menu de droite.



Notez les différences dans les demandes en eau des trois types de cultures par mois.

M1.9.3 Consultez les demandes non satisfaites

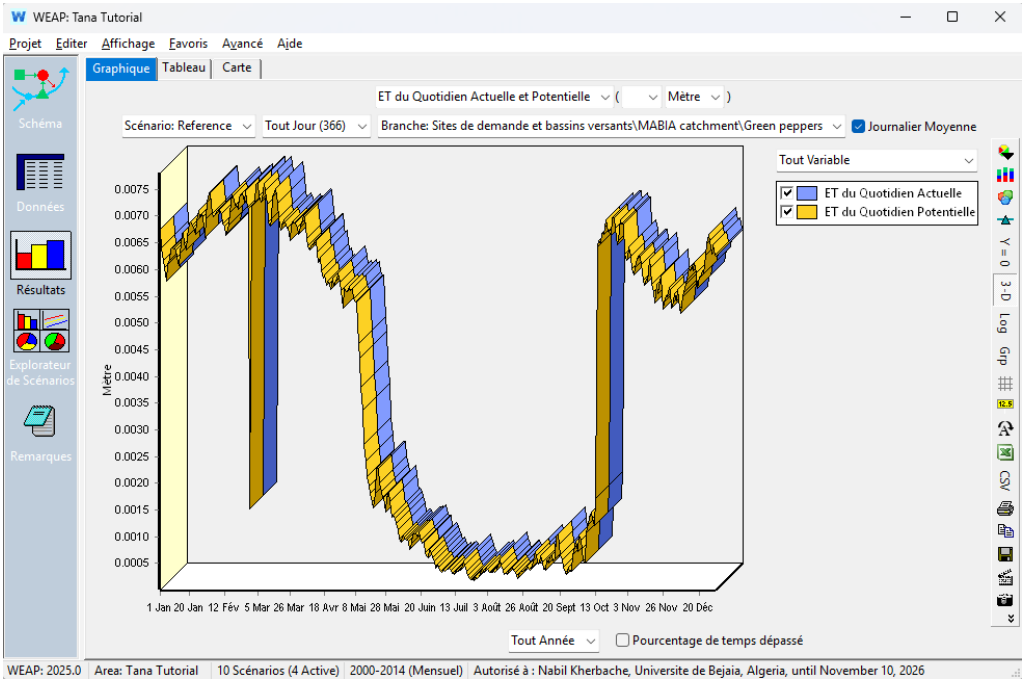
Pour consulter la demande non satisfaite dans le bassin versant de MABIA, sélectionnez « Demande non satisfaite » dans la barre supérieure, puis « Sites de demande sélectionnés » dans le menu déroulant de droite. Aucune demande n'est actuellement non satisfaite dans le bassin versant de MABIA.



M1.9.4 Consultez ET actual vs ET potentiel

Vous pouvez également vérifier si la culture a souffert ou non d'un stress pendant le cycle cultural en examinant le graphique ET réelle et potentielle (*ET Actual and Potential*). En fait, l'*ET Potential* représente la quantité d'eau qui serait consommée par évapotranspiration dans le bassin s'il n'existait aucune limitation en eau, tandis que l'*ET Actual* représente la quantité réelle d'eau consommée par évapotranspiration, incluant l'eau fournie par l'irrigation. Par conséquent, si une pénurie d'eau survient, vous remarquerez que l'*ET Potential* est supérieure à l'*ET Actual* pour la période durant laquelle la limitation en eau a été enregistrée. L'écart entre les deux montre l'ampleur du stress hydrique de la culture

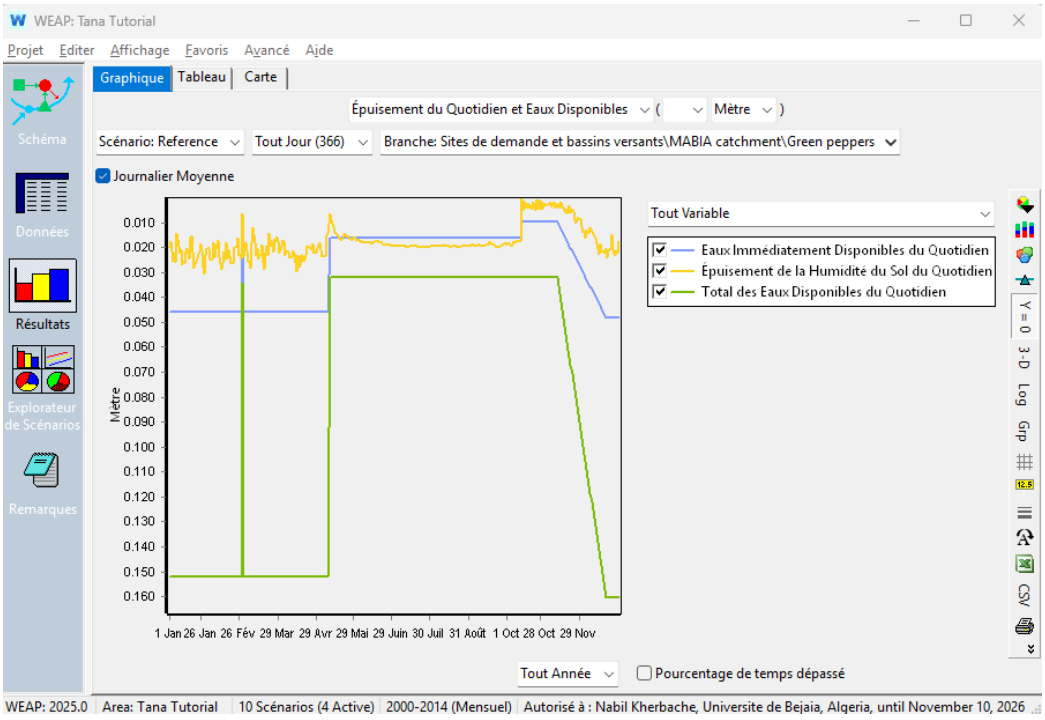
Sélectionnez "*ET du Quotidien Actuelle et Potentielle (MABIA)*" dans le menu déroulant des variables principales. Formatez le graphique en sélectionnant l'option 3D dans le menu de la barre latérale gauche. Le graphique devrait ressembler à celui ci-dessous.



Notons que dans ce modèle l'ET Potentielle et l'ET Réelle sont égales car l'eau est disponible pour la transpiration sans limitations, grâce à un approvisionnement en eau optimal par l'irrigation.

M1.9.5 Consultez TAW, RAW et depletion

À présent, examinez l'évolution quotidienne de l'épuisement de l'eau du sol pour le champ de poivrons verts *(green peppers)*, ainsi que l'évolution quotidienne de l'eau totale disponible (TAW) et de l'eau facilement disponible (RAW) sous forme graphique. Dans le menu déroulant des variables principales situé en haut au centre de la fenêtre, sélectionnez bassins verssants « *Catchments* » puis Épuisement du quotidien et eaux disponibles « *Daily Depletion and Available Water (MABIA)* »



Notez que l'échelle verticale s'étend de haut en bas, on peut voir que l'eau disponible dans le sol (TAW) (ligne bleue) ne descend pas en dessous du seuil RAW (ligne verte) pendant le cycle de culture des poivrons verts. Par conséquent, aucune pénurie d'eau n'est survenue, comme prévu, puisque les options de programmation de l'irrigation ont été choisies pour garantir une irrigation au bon moment et en quantité suffisante.

M1.9.6 Consultez des résultats supplémentaires

- Des rapports supplémentaires sont disponibles pour les bassins versants utilisant la méthode MABIA. Vous pouvez consulter la rubrique d'aide "*MABIA Method Results*" (sous la sous-section "*Results/Available Reports/Catchments Results*" dans le sommaire de l'aide) pour une description plus détaillée des rapports disponibles.

M1.10 Conseils pour la validation des résultats du modèle MABIA

Avant d'exécuter des scénarios et d'interpréter les résultats, assurez-vous que les données ont été correctement saisies et que les résultats se situent dans la plage attendue. Voici quelques conseils clés pour la vérification et la validation du modèle MABIA :

1. Vérifiez que toutes les données climatiques sont complètes pour l'ensemble de la période de modélisation des bassins versants MABIA ;

2. Vérifiez que WEAP calcule l'évapotranspiration de référence dans une plage d'environ 3 à 10 mm/jour.

3. Vérifiez les demandes non satisfaites : si elles sont supérieures aux prévisions, examinez les données d'entrée susceptibles d'affecter l'offre ou la demande ;

4. Comparez l'ET réelle à l'ET potentielle : elles doivent correspondre pendant les mois où les besoins en irrigation sont satisfaits. Si ce n'est pas le cas, vérifiez les données d'entrée, notamment le taux d'infiltration ;

5. Vérifiez les besoins en irrigation des cultures en m^3/ha et comparez les calculs du modèle avec les valeurs publiées pour chaque culture dans la zone climatique applicable au bassin versant MABIA. Cette valeur peut varier de 1 000 m^3/ha à 20 000 m^3/ha, mais se situe généralement entre 4 000 et 12 000 m^3/ha. Si les résultats du modèle s’écartent sensiblement des valeurs attendues, il convient de revoir les hypothèses utilisées.

M2 Le module de programmation de l'irrigation et de rendement des cultures

M2.1 Objectifs d'apprentissage

D'après l'expérience, les principales variables influençant les besoins en eau d'irrigation et les rendements agricoles sont les suivantes :

- Planification de l'irrigation ;
- Technologies d'irrigation (influant sur l'efficacité et la fraction mouillée) ;
- Changements climatiques, notamment la température ;
- Superficies cultivées ;
- Composition et structures des cultures irriguées ;
- Pertes dans les canaux d'irrigation ;
- Calendrier des semis et des récoltes.

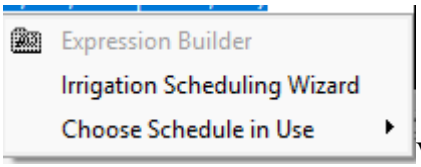
Cette section du tutoriel MABIA décrit les options de planification de l'irrigation dans WEAP MABIA et explore des scénarios liés aux trois premiers points mentionnés ci-dessus. À l'issue de cette section, les apprenants seront capables de :

- Modéliser différentes stratégies de planification de l'irrigation à l'aide de l'assistant de planification de l'irrigation *(Irrigation Scheduling Wizard)* et analyser leur impact potentiel sur les rendements agricoles ;
- Modéliser et comparer les différents scénarios de technologies d'irrigation ;
- Analyser l'impact potentiel des changements climatiques sur les besoins en irrigation et les rendements agricoles.

Point de départ du modèle :

- Projet -> « Revenir à la version (*revert to version)*», -> MABIA setup – Answer key

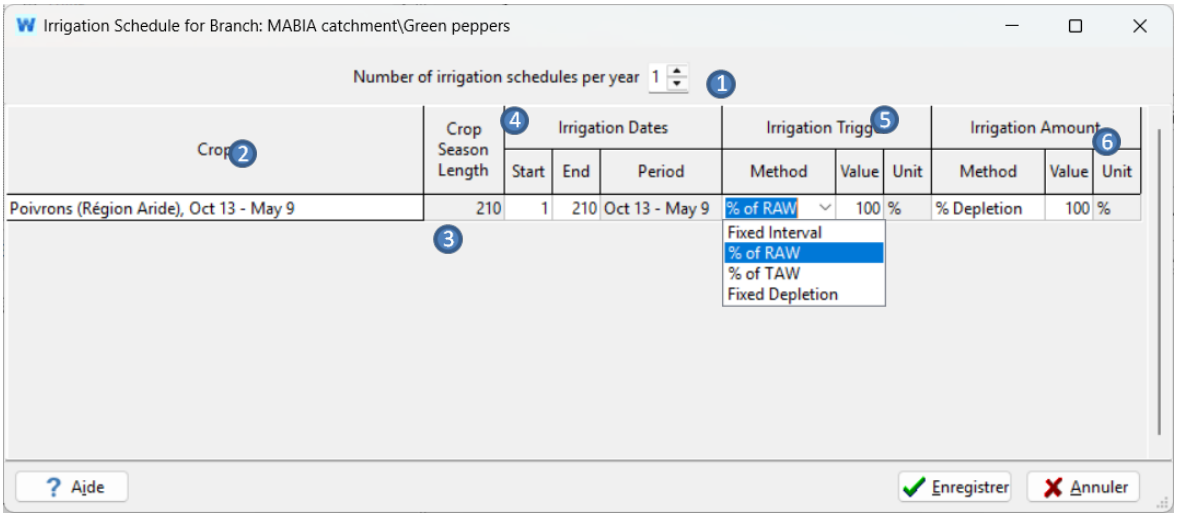
Description des options d'entrée d'irrigation



Vous pouvez choisir les critères et les options du programme d'irrigation à l'aide de l'« Assistant de programmation de l'irrigation » (*Irrigation Scheduling Wizard)*, ou en sélectionnant un programme déjà utilisé pour la même culture. Ces deux options sont disponibles dans le menu déroulant de la grille de données.

- Laissez le champ vide s'il n'y a pas d'irrigation pour cette culture ou cette couverture végétale.

L'Assistant de programmation de l'irrigation est utilisé conjointement avec la méthode MABIA pour l'hydrologie des bassins versants et les besoins en eau des cultures. Il est accessible via le menu déroulant dans la grille de données pour la variable « Calendrier d'irrigation » (*Irrigation Schedule*) sous l'onglet Irrigation.



En haut de l'assistant (1), vous pouvez sélectionner le nombre de programmes d'irrigation par an pour la culture utilisée. Laissez la valeur 1 si les mêmes critères d'irrigation seront utilisés pour toute la saison de culture.

- Si vous souhaitez définir deux critères d'irrigation différents pour deux périodes différentes, vous devez saisir 2.

Si l'expression du programme d'irrigation (*irrigation schedule*) est initialement vide, vous remarquerez que WEAP ajoutera automatiquement le nom de la culture utilisée et définira le programme d'irrigation par défaut : déclenché à 100 % de RAW, avec une application de 100 %

de l'épuisement. Cela garantira que l'épuisement de l'humidité du sol ne descende jamais en dessous de RAW, afin qu'aucun stress hydrique ne se produise sur les cultures.

M2.2 Options de programme d'irrigation

Bien sûr, vous pouvez modifier ces paramètres par défaut. Voici une brève description des différentes options proposées par WEAP-MABIA :

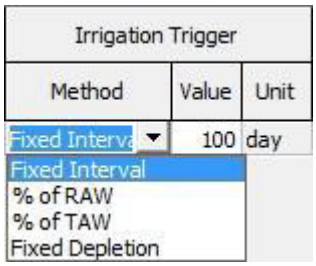
- ***Crop***: Choisissez la culture pour laquelle vous souhaitez définir le calendrier d'irrigation. Seules les cultures déjà sélectionnées pour cette branche sont disponibles ici. Par exemple, si vous avez choisi les poivrons et le ray-grass[10] pour cette branche, vous pouvez sélectionner le poivron dans le champ des cultures pour définir ses critères d'irrigation, et ne pas sélectionner le ray-grass. Par conséquent, le ray-grass sera considéré comme une culture pluviale (non irriguée).

- ***Crop Season Length***: La durée de la saison indiquée dans la bibliothèque des cultures pour cette culture (somme des quatre stades de croissance). Elle s'affiche à titre informatif lorsque vous sélectionnez une culture.

- ***Irrigation Dates***: Pour la date de début (*Start Date*) de l'irrigation, vous devez saisir le numéro du jour où ce programme d'irrigation prend effet, à compter du premier jour de la saison culturale. Pour commencer dès le premier jour, saisissez 1. Pour la date de fin (*End Date*), vous devez saisir le numéro du jour où ce programme se termine, toujours à compter du premier jour de la saison. Pour terminer au dernier jour, saisissez la durée totale de la saison culturale. Grâce à cette option, vous pouvez définir différents critères d'irrigation pour différentes périodes au sein d'une même culture.

- ***Irrigation Trigger***: WEAP-MABIA propose 4 méthodes de déclenchement (activation) de l'irrigation :

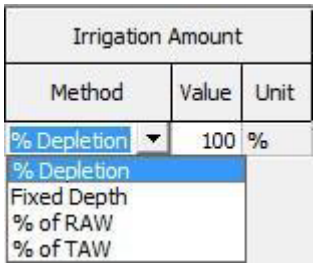
[10] Le ray grass est une adventice graminée très répandue dans les champs de céréales.



- *Fixed Interval*: Irriguer tous les N jours, où N est spécifié dans la valeur de déclenchement de l'irrigation.
- *% of RAW*: Irriguer lorsque la diminution de l'humidité du sol est supérieure ou égale à un pourcentage spécifié d'eau facilement disponible (RAW). Pour éviter le stress hydrique des cultures, la diminution ne doit jamais dépasser la RAW.
- *% of TAW*: Irriguer lorsque l'épuisement de l'humidité du sol est supérieur ou égal à un pourcentage spécifié de l'eau totale disponible (TAW). Pour éviter la mort de la culture (point de flétrissement permanent), l'épuisement ne doit jamais égaler ou dépasser la TAW.
- *Fixed Depletion*: Irriguer lorsque la perte d'humidité du sol est égale ou supérieure à une profondeur spécifiée (en mm).

Irrigation Trigger Value est la grandeur associée à la méthode de déclenchement choisie : elle s'exprime en jours pour la méthode à intervalle fixe, en pourcentage (%) pour les méthodes basées sur la RAW ou la TAW, et en millimètres (mm) pour la méthode par épuisement fixe.

- 6 ***Irrigation Amount***: WEAP-MABIA propose 4 méthodes de calcul du volume d'irrigation. La méthode définit la quantité d'eau à appliquer les jours où l'irrigation a lieu.



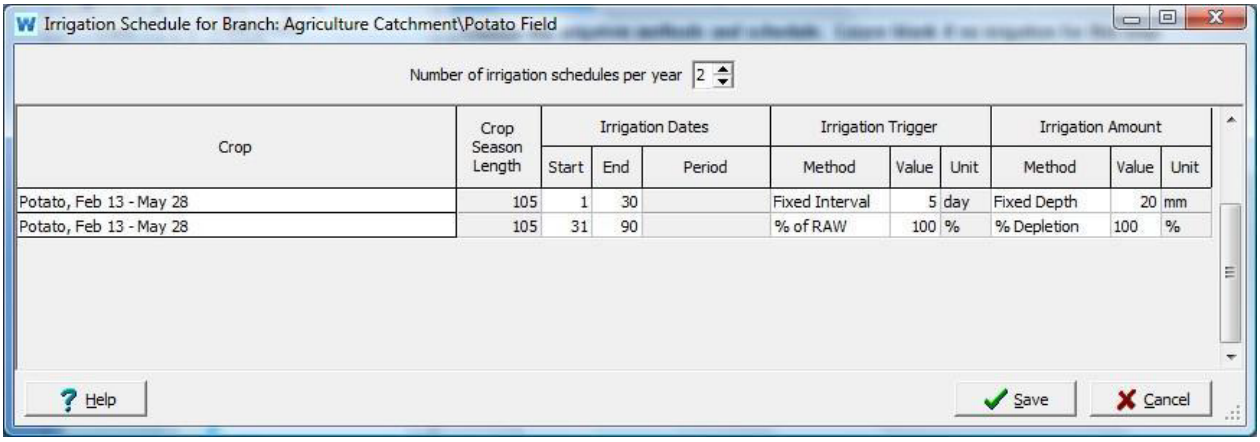
- *% Depletion*: Appliquez un pourcentage spécifié de l'épuisement actuel de l'eau du sol.
- *Fixed Depth*: Appliquez une profondeur d'eau spécifiée.
- *% of RAW*: Appliquez un pourcentage spécifié du niveau d'eau facilement disponible (RAW), indépendamment de l'épuisement actuel de l'eau du sol.
- *% of TAW*: Appliquez un pourcentage spécifié du niveau d'eau totale disponible (*TAW*), indépendamment de l'épuisement actuel de l'eau du sol.

La valeur de la dose d'irrigation (Irrigation Amount Value) est la grandeur associée à la méthode de calcul de la dose : elle s'exprime en pourcentage (%) pour les méthodes de comblement de l'épuisement, de la RAW ou de la TAW, et en millimètres (mm) pour la méthode à lame d'eau fixe.

Par exemple, si vous souhaitez définir trois critères d'irrigation pour la pomme de terre :

- *Du jour 1er au jour 30^{éme} (période d'établissement végétatif), il est recommandé d'irriguer tous les 5 jours avec une profondeur d'eau fixe de 20 mm..*
- *Du jour 31^{éme} au jour 90^{éme}, vous souhaitez déclencher l'irrigation lorsque 90 % de la RAW (Readily Available Water) sont épuisés, et vous souhaitez apporter une dose d'irrigation équivalente à la quantité perdue (ce qui correspond à 100 % de l'épuisement)*
- *Du jour 91^{éme} jusqu'à la fin du cycle cultural, vous ne souhaitez pas irriguer.*

L'assistant de programmation d'irrigation (Irrigation Schedule Wizard) devrait ressembler à ceci :



Crop	Crop Season Length	Irrigation Dates			Irrigation Trigger			Irrigation Amount		
		Start	End	Period	Method	Value	Unit	Method	Value	Unit
Potato, Feb 13 - May 28	105	1	30		Fixed Interval	5	day	Fixed Depth	20	mm
Potato, Feb 13 - May 28	105	31	90		% of RAW	100	%	% Depletion	100	%

- Chaque ligne du tableau définit un programme (ou calendrier) d'irrigation spécifique.

- Notez que si la ressource en eau est insuffisante pour satisfaire les besoins d'irrigation calculés par MABIA selon le programme défini, WEAP réduira chaque apport calculé, au sein du pas de temps défini, au prorata du pourcentage des besoins non satisfaits. Ce pourcentage de demande non satisfaite varie de 0 % (satisfaction totale des besoins) à 100 % (aucune distribution d'eau). Si par exemple une parcelle de blé a un besoin calculé par MABIA de 100 m^3 pour le mois de mars, mais que la ressource n'est que de 70 m^3 après avoir servi les priorités supérieures, WEAP appliquera une réduction de 30 % à chaque événement d'irrigation du mois. La plante ne recevra donc que 70 % de son besoin optimal.

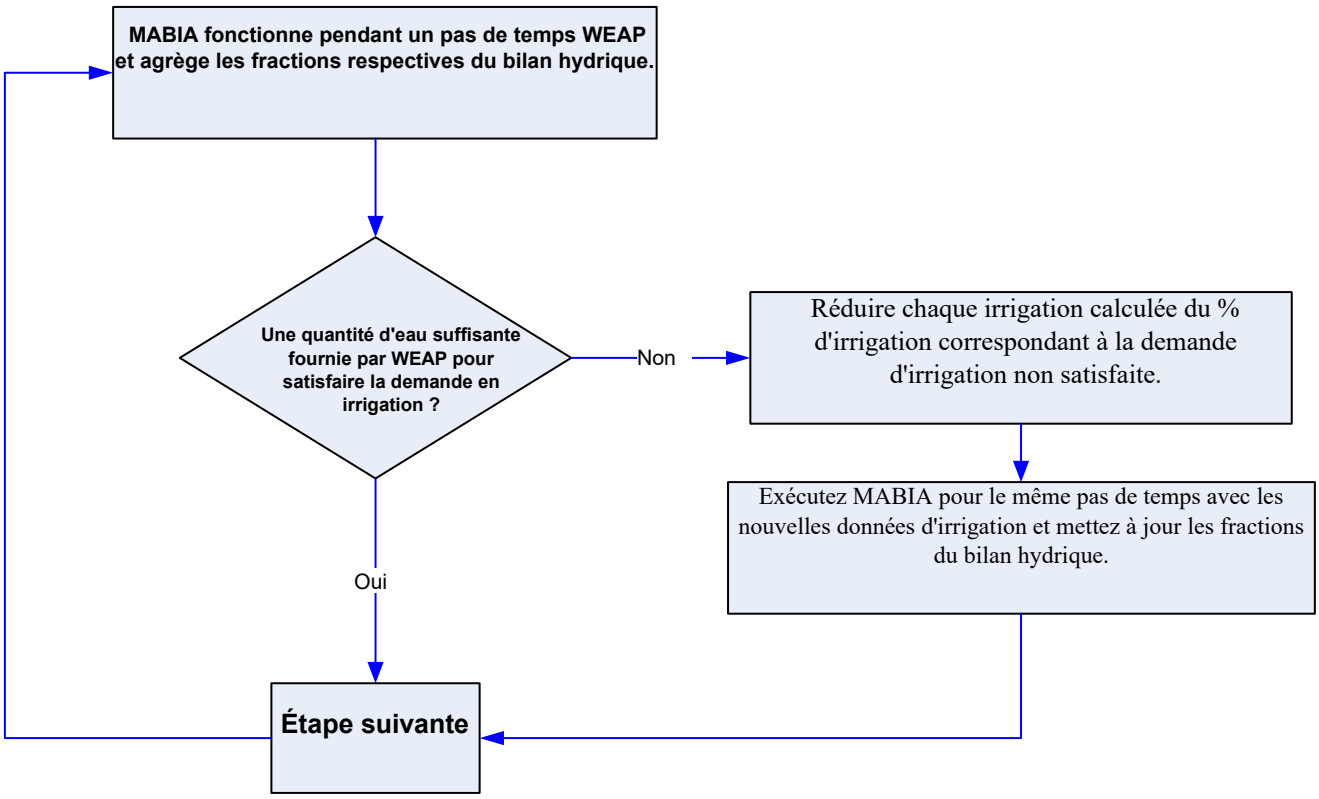


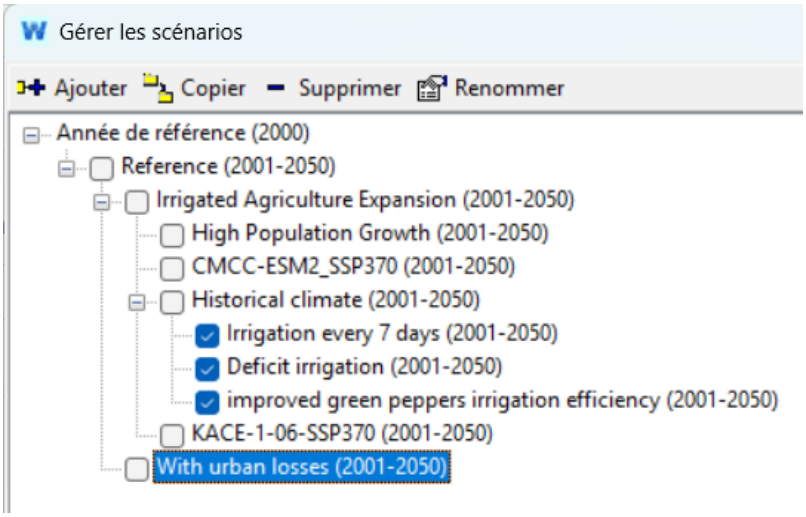
Figure : Diagramme de flux illustrant le mode opératoire du module d'irrigation

M2.3 Création et exécution de scénarios d'irrigation

Nous allons paramétrer et comparer les résultats de deux scénarios de programmation de l'irrigation.

Créer deux nouveaux scénarios pour modéliser différentes options d'irrigation

Créez deux nouveaux scénarios basés sur le scénario de référence : Irrigation tous les 7 jours (*Irrigation Every 7 Days*) et Irrigation Déficitaire (*Deficit Irrigation*). Le scénario d'irrigation déficitaire vous permettra d'évaluer l'impact du déficit hydrique sur les composantes du bilan hydrique ainsi que son effet sur la réduction du rendement.



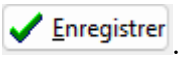
Saisissez les données pour ces scénarios

Effectuez les modifications suivantes dans la fenêtre « Données » (*Data*) pour le scénario : Irrigation tous les 7 jours :

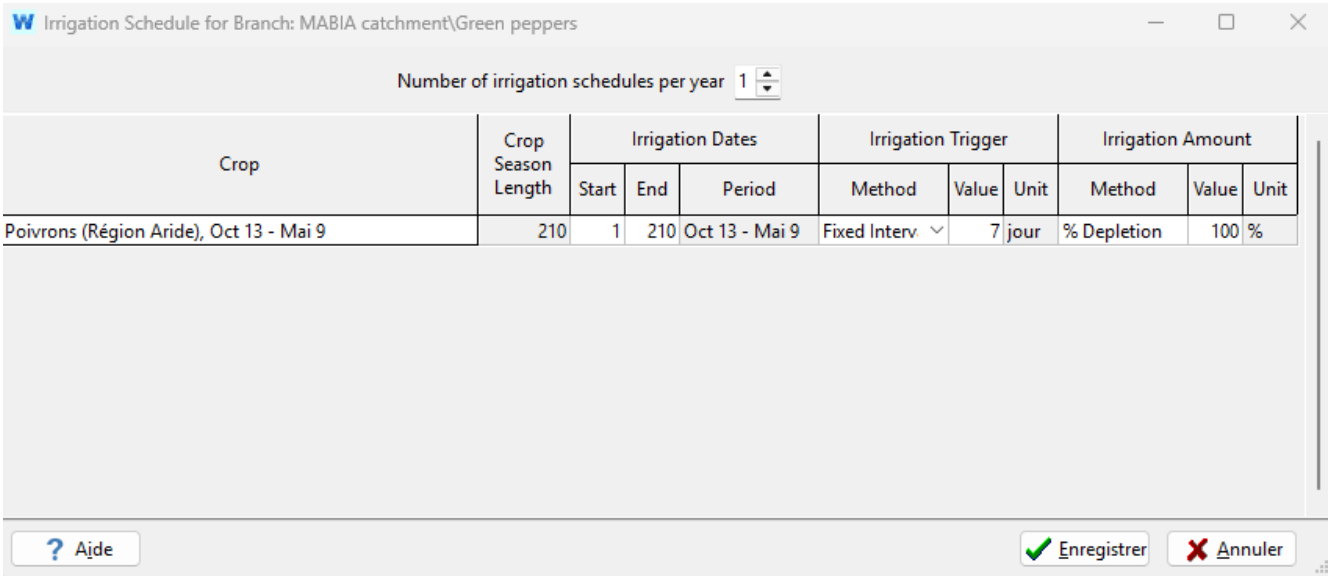
1. Sélectionnez le scénario : Irrigation tous les 7 jours dans le menu déroulant situé en haut de l'écran.

2. Sélectionnez l'onglet « Programme d'irrigation » (*Irrigation Schedule*) situé sous la variable « Irrigation ».

3. Modifier le calendrier d'irrigation du champ de poivronss verts *(Green peppers)* :

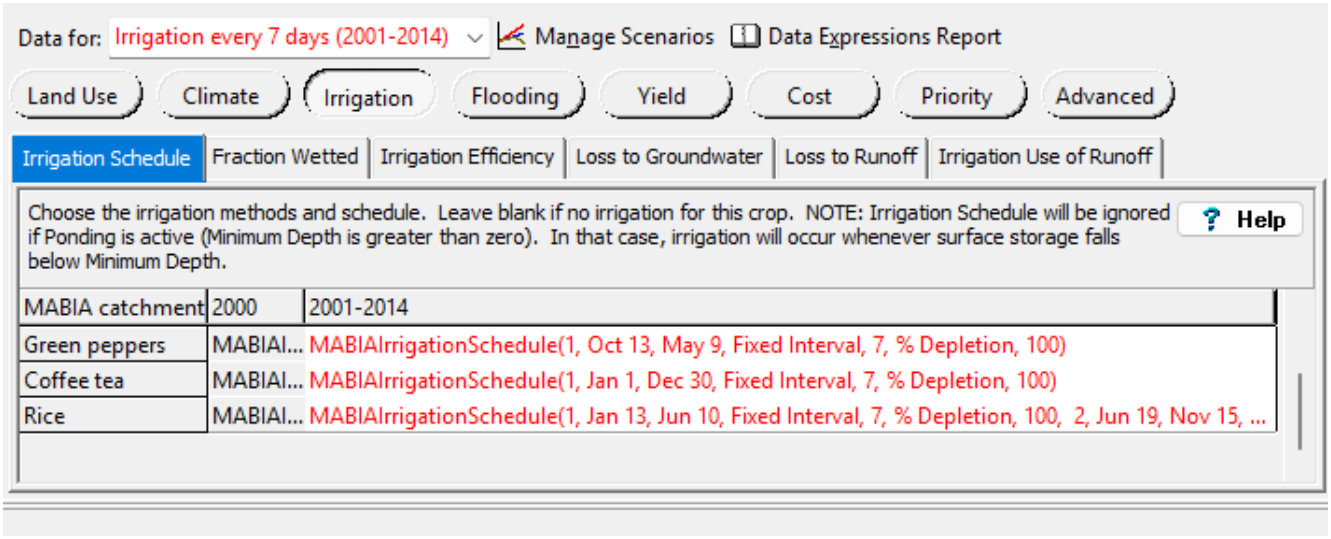
   - Cliquez sur la cellule vide située en face de « *Green peppers*» et sélectionnez *« Irrigation Scheduling Wizard* » dans le menu déroulant.
   - Modifiez la Méthode de déclenchement de l'irrigation (*Irrigation Trigger Method*) en remplaçant : % RAW par intervalle fixe (*Fixed Interval*), et changez l'*Irrigation Trigger Value* de 100 à 7 jours.
   - Cliquez 

.



4. Répétez la même procédure pour modifier le calendrier d'irrigation du *Cofee tea* et *Rice*.

Une fois l'ensemble des tâches décrites ci-dessus terminées, l'onglet *Irrigation Schedule* se présentera comme suit :



- Notez que la couleur du champ de données passe au rouge après la modification ; cela se produit pour toute valeur modifiée qui dévie de la valeur du scénario de *Reference*.

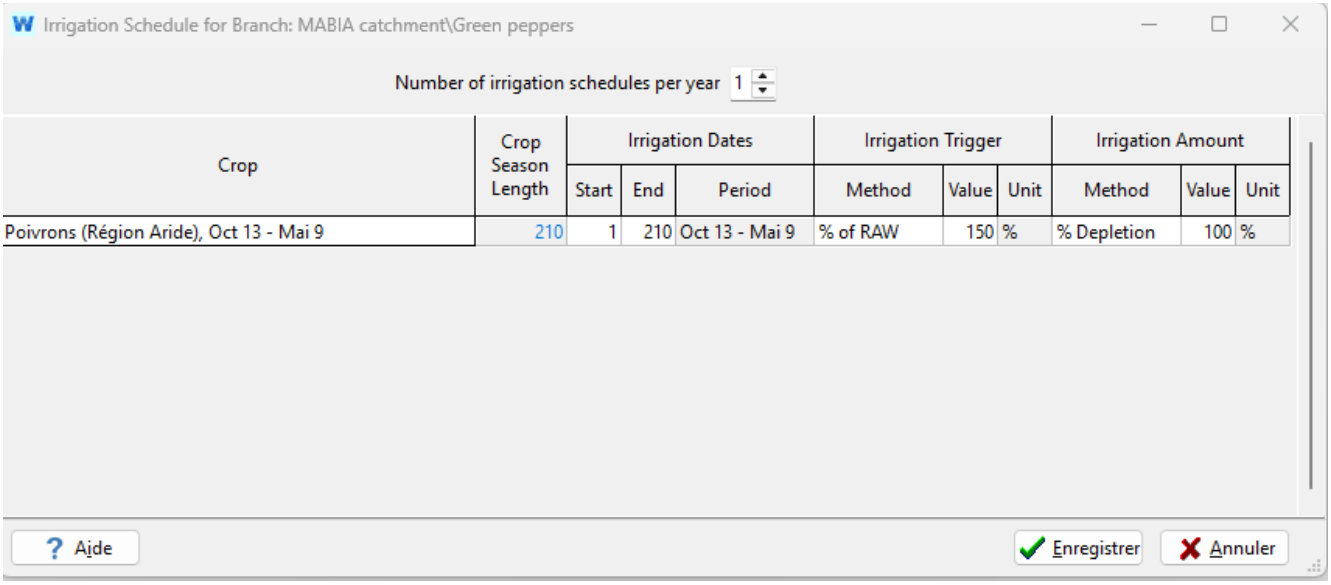
Apportez les modifications suivantes dans la fenêtre des « Données » pour le scénario « *Deficit irrigation* » :

1. Sélectionnez le scénario *Deficit Irrigation* dans le menu déroulant situé en haut de l'écran.

2. Sélectionnez l'onglet *Irrigation Schedule* sous la variable "Irrigation".

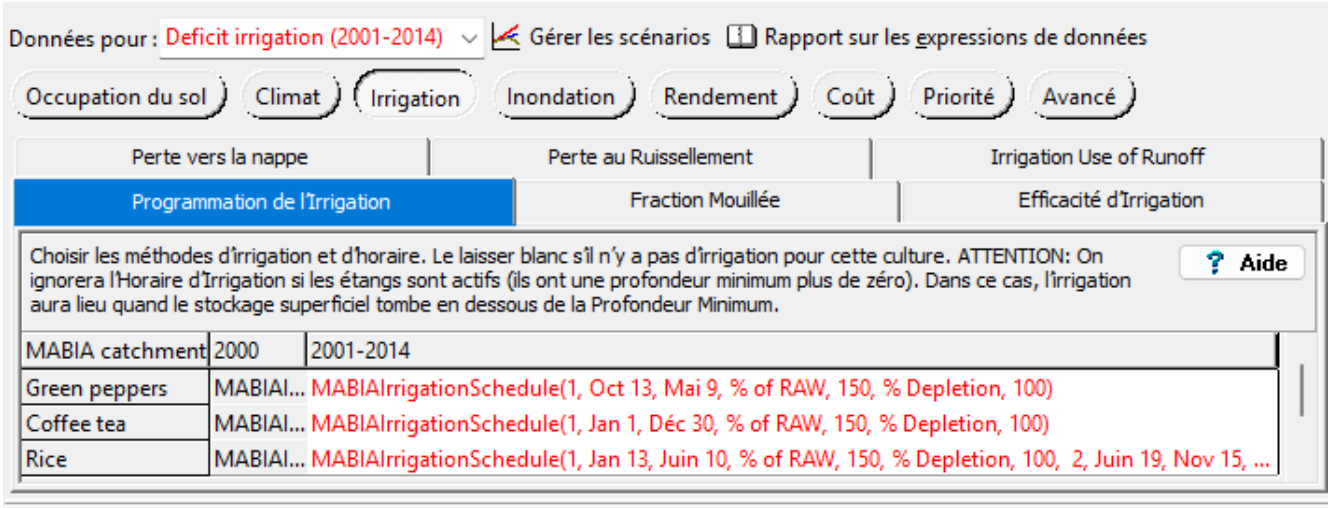
3. Appliquez les modifications suivantes au programme d'irrigation pour le champ de *green peppers* :

   - Sélectionnez l'Assistant *d'Irrigation Scheduling Wizard* dans le menu déroulant.
   - Modifiez *l'Irrigation Trigger Value* en passant de 100 à 150 %. Cela signifie qu'un déficit hydrique équivalent à 50 % de la RAW est autorisé avant que l'irrigation ne soit déclenchée. Par exemple, si la RAW est de 40 mm, l'irrigation ne se déclenchera qu'une fois qu'un épuisement de 60 mm aura été atteint.
   - Cliquez Enregistrer



4. Répétez la même procédure pour modifier le programme d'irrigation du Champ de *Cofee tea* et *Rice.*

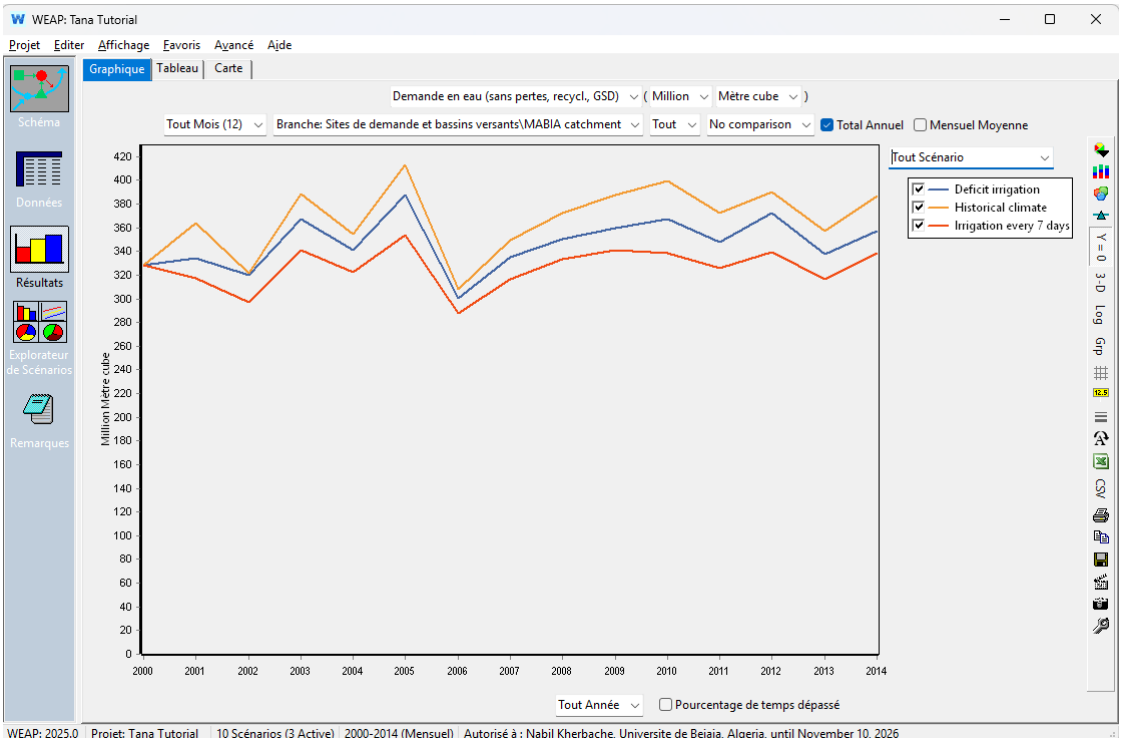
Une fois l'ensemble des tâches décrites ci-dessus terminées, l'onglet du calendrier d'irrigation (*Irrigation Schedule*) se présentera comme suit :



Comparez les résultats pour les scénarios de référence et d'irrigation

Comparez graphiquement les résultats des deux scénarios établis précédemment (Irrigation tous les 7 jours et Irrigation déficitaire) avec le avec le programme d'irrigation historique (pour lequel aucun déficit hydrique n'est survenu).

Par exemple, sélectionn ez « Demande en eau » dans le menu déroulant des variables principales. Cliquez sur le menu à droite de la zone du graphique et sélectionnez « Tous les scénarios ». Choisissez d'afficher uniquement la demande du site « MABIA Catchment » en le sélectionnant dans la liste en haut à gauche de la fenêtre des Résultats, puis cochez la case « Total annuel ». Votre graphique devrait être similaire à celui ci-dessous.



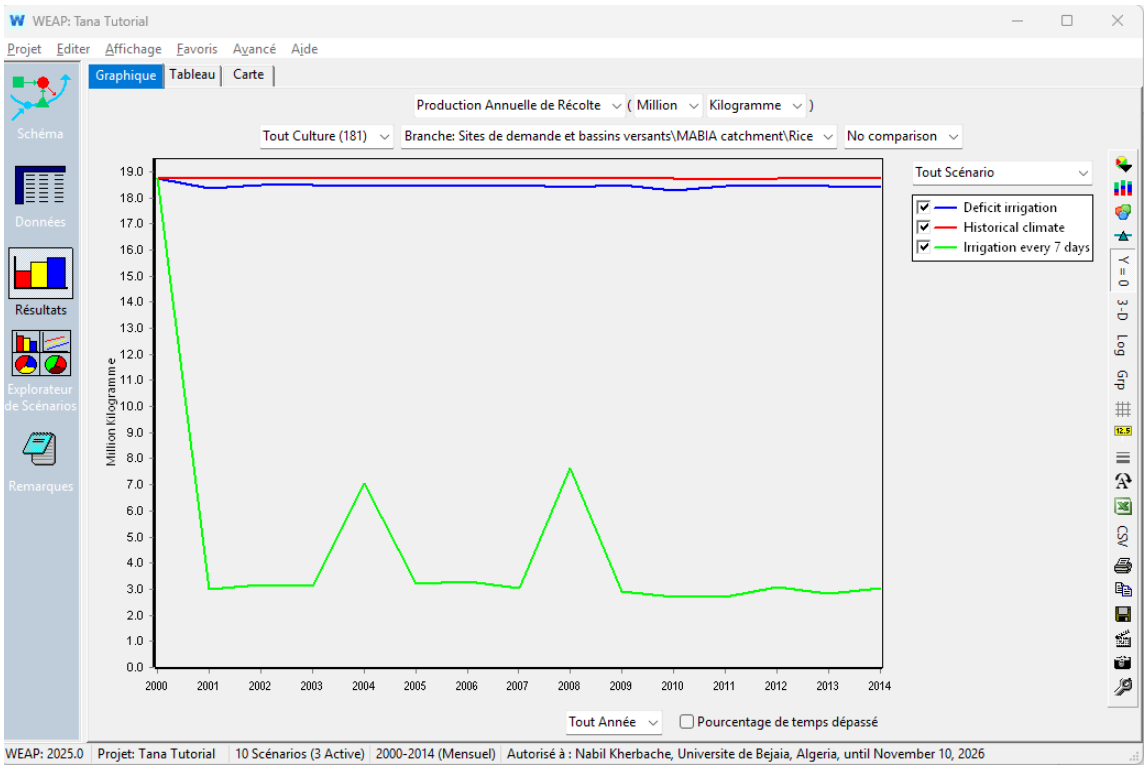
Notez que la demande en eau plus faible pour le site *MABIA catchment*, dans le cadre des deux nouveaux scénarios de programmation de l'irrigation, réduit la demande globale en eau. Si vous observez la demande non satisfaite (*Unmet Demand*), vous constaterez qu'il n'y en a pour aucun des scénarios.

Ensuite, examinez l'épuisement et l'eau disponible (*Depletion and Available Water*) pour le scénario « *Deficit irrigation* » appliqué au « champ de riz » (Rice). Utilisez le menu déroulant des variables principales pour sélectionner : Bassins versants/Épuisement et Eau Disponible (MABIA) (*Catchments/Depletion and Available Water (MABIA)).* »



Notez que si l'eau totale disponible (TAW) descend sous le niveau de l'eau facilement disponible (RAW) à n'importe quel moment du cycle cultural. Ce déficit hydrique réduira l'évapotranspiration réelle de la culture par rapport à l'évapotranspiration potentielle, ce qui entraînera une diminution du rendement en réponse au stress hydrique subi par la plante.

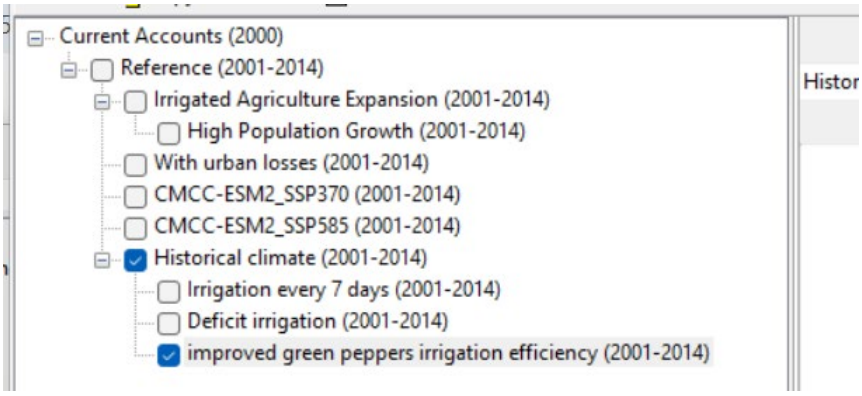
Ensuite, comparez la « Production de culture » (*Crop Production*) des trois scénarios avec la « référence ». Utilisez le menu déroulant des variables principales pour sélectionner : « Bassins versants/Production annuelle de récolte (MABIA) » (*Catchments/Annual Crop Production (MABIA)*).



M2.4 Scénarios d'efficience de l'irrigation et de fraction mouillée

Pour la culture de poivrons verts, supposons que nous ayons amélioré le système d'irrigation au goutte-à-goutte de sorte que l'efficience augmente de 60 % à 75 % et que la fraction mouillée diminue de 0,7 à 0,4. Nous allons créer un nouveau scénario avec ces modifications et évaluer leur impact sur la demande en eau et sur les besoins en approvisionnement pour les poivrons verts.

Créez un nouveau scénario intitulé : « Amélioration de l'efficience de l'irrigation du café » (*improved coffee irrigation efficiency*)



La demande en eau sera comme suite :

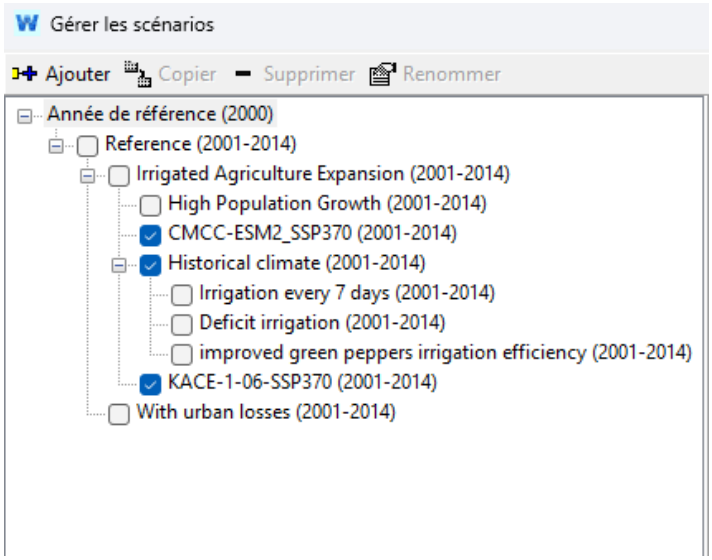


L'exigence de distribution sera ainsi :



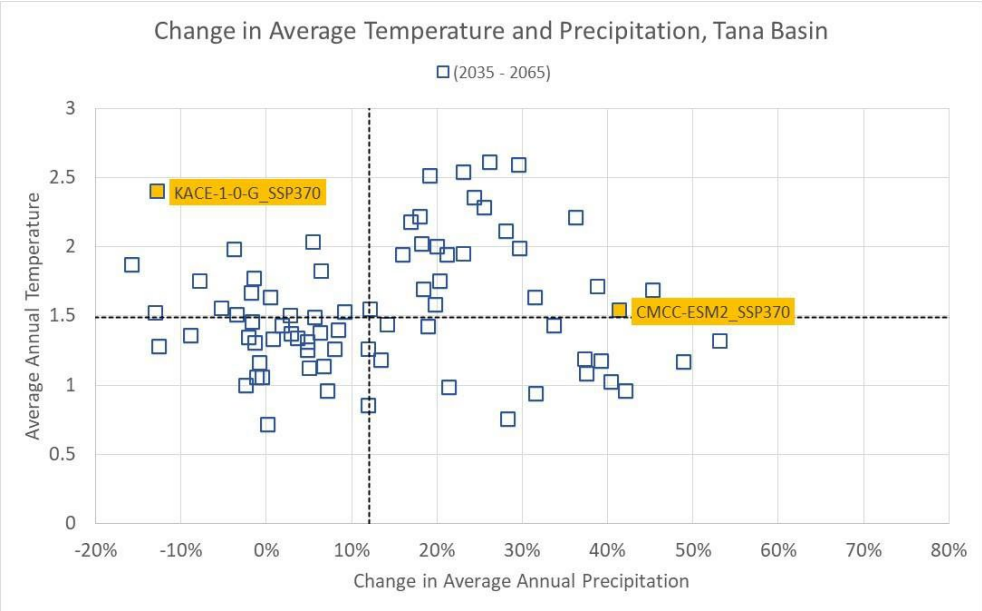
M2.5 Scénarios climatiques

La version du tutoriel Tana avec laquelle nous avons commencé inclut des scénarios de changement climatique comprenant des données climatiques mensuelles. Accédez au gestionnaire de scénarios et sélectionnez les scénarios climatiques historiques CMCC et KACE.



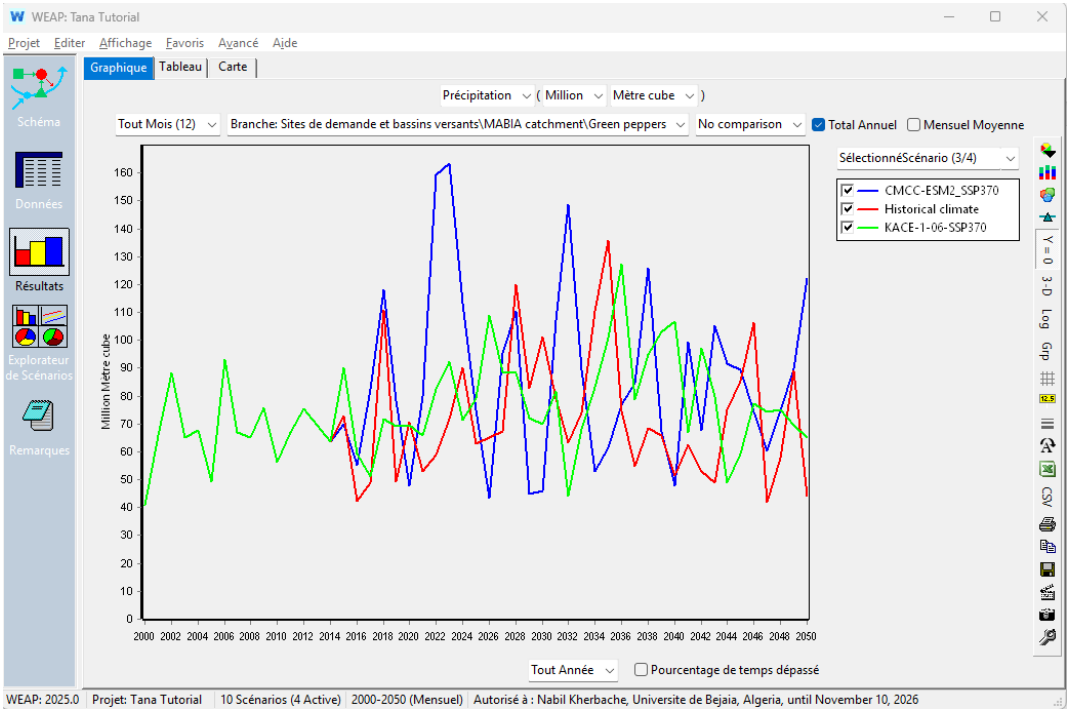
Les scénarios climatiques intégrés dans le tutoriel Tana ont été sélectionnés pour représenter un éventail de changements futurs potentiels de la température et des précipitations annuelles dans le bassin. Pour le bassin du Tana, l'augmentation moyenne projetée de la température (variation entre 1985-2014 et 2035-2065) est de 1,5 °C, et la variation projetée des précipitations est une augmentation de 12 %. Le graphique ci-dessous présente les données de synthèse pour le bassin du Tana pour 48 projections incluant le scénario de réduction modérée des émissions (SSP 245) et le scénario d'émissions élevées (SSP 585) (*CMIP Phase 6 (CMIP6) - Coupled Model Intercomparison Project, 2022*)[11], avec les deux exemples de scénarios sélectionnés mis en évidence.

[11] https://wcrp-cmip.org/cmip-phases/cmip6/

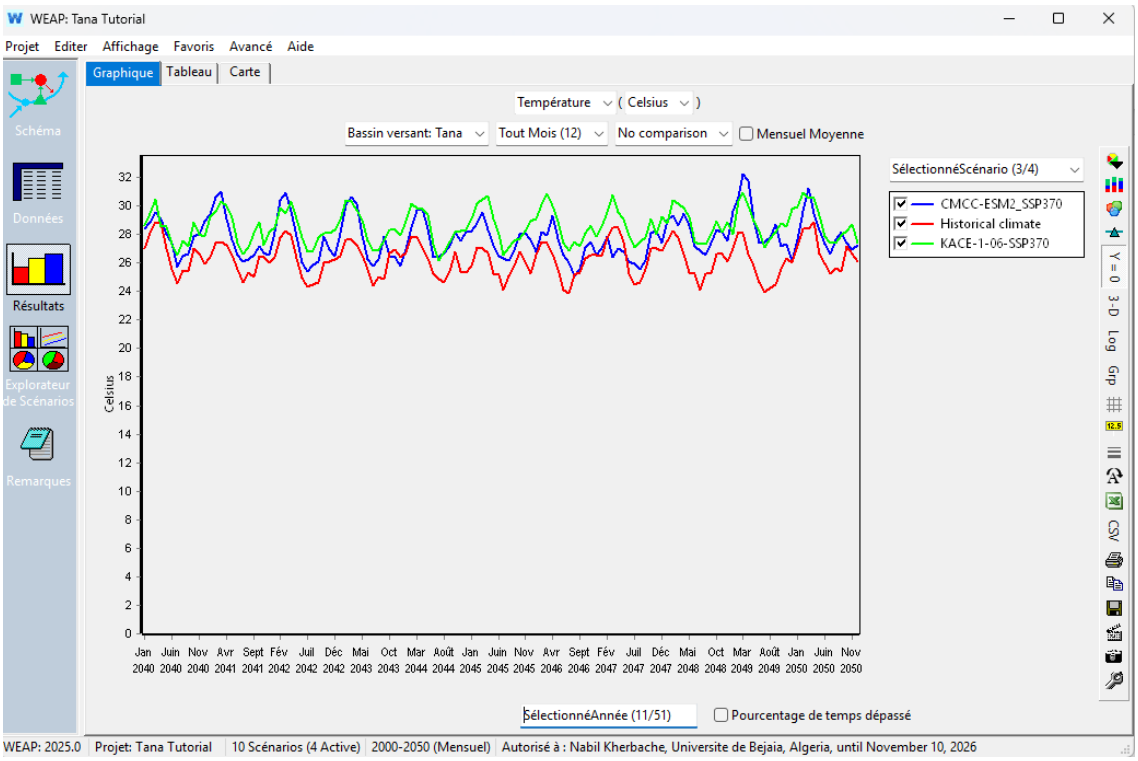


Les deux scénarios sélectionnés montrent des projections de variabilité interannuelle des précipitations plus importante que les tendances historiques, ainsi qu'une augmentation graduelle des températures au fil du temps.

- Projections des précipitations annuelles par rapport aux données historiques :



- Projections de température pour la période 2040-2050 :



Pour analyser l'impact potentiel du changement climatique sur les besoins en irrigation dans le *MABIA catchment*, nous devrons modifier les années et les pas de temps du modèle afin d'inclure les années futures, et nous devrons compléter les données climatiques projetées du CMIP6 par des données quotidiennes pour le modèle MABIA.

Tout d'abord, modifiez les années du modèle pour la période 2000–2050.

Ensuite, demandez à WEAP de télécharger les données quotidiennes nécessaires à MABIA : passez en mode de délimitation des bassins versants (*Catchment Delineation*) et sous l'onglet « charger les données climatiques », sélectionnez la méthode MABIA ainsi que les données climatiques quotidiennes pour les deux scénarios. Vous pouvez examiner et exporter les expressions dans les Comptes Actuels (*Current Accounts*) pour chaque scénario du bassin du Tana concernant les précipitations, les températures minimales et maximales, le vent et l'humidité moyenne. Vous constaterez que vous disposez de deux fichiers de données supplémentaires dans votre dossier de données climatiques (*Climate Data*) de la *WEAP Areas*.

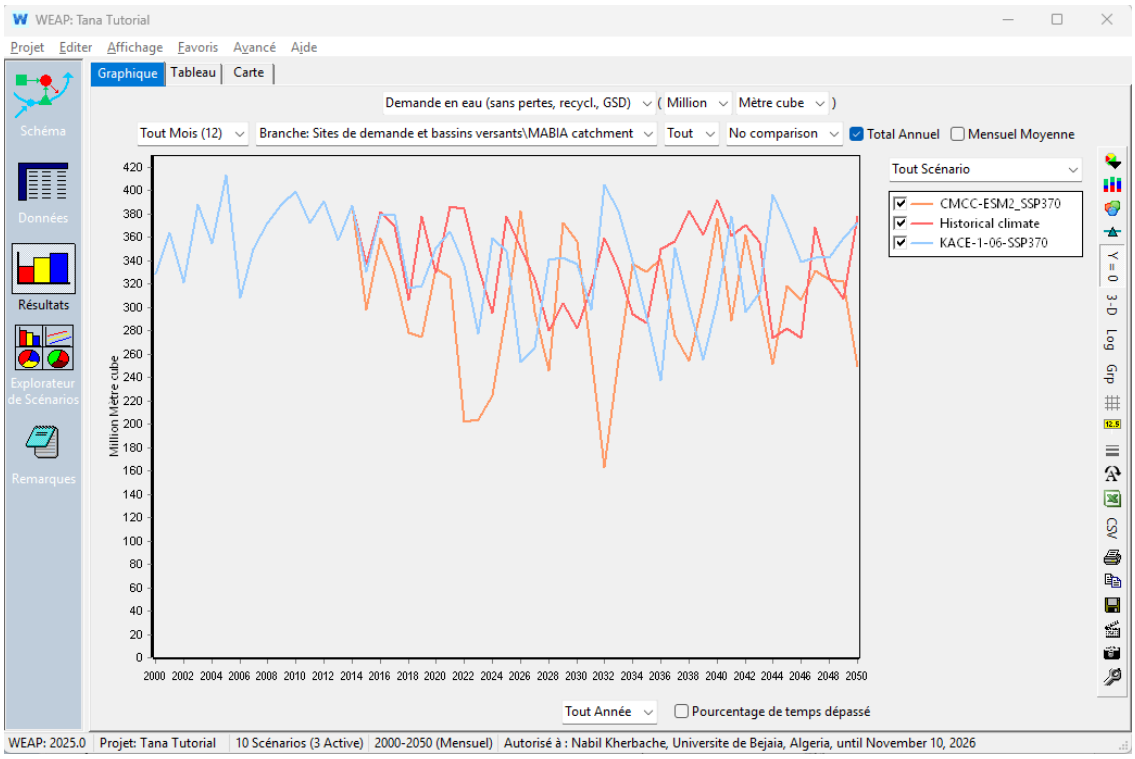
Une fois les fichiers climatiques quotidiens téléchargés, rétablissez les expressions des Comptes Actuels (*Current Accounts*) pour les bassins versants utilisant la méthode de l'humidité du sol

(*Soil Moisture*) à leurs valeurs d'origine. Pour ce faire, revenez en mode de délimitation des bassins versants, sélectionnez la méthode de l'humidité du sol, puis choisissez les données historiques Princeton V3.

Modifiez les expressions des scénarios futurs pour les variables : précipitations, température minimale, température maximale, vent et humidité moyenne pour le bassin versant MABIA. Faites en sorte que les données historiques soient lues pour les années antérieures à 2015 et que les données projetées soient lues à partir de 2015, en utilisant des instructions de type "si-alors" (*if-then*) comme celles présentées dans le tableau suivant. Le scénario historique utilise l'option « *cycle* » de la fonction « *ReadFromFile* » pour simuler l'impact de l'augmentation des zones irriguées et des cultures projetées dans le futur sous des conditions climatiques historiques.

Scénarios	**Example d'expressions**
Historical climate	ReadFromFile(ClimateData\PrincetonV3Daily\Catchment ID 334 - Tana.csv, "Precip[mm/day]", , , , Replace, , , , Cycle)
Current Accounts	ReadFromFile("ClimateData\PrincetonV3Daily\Catchment ID 334 - Tana.csv", "Precip")
KACE-1-0_SSP370 (hot, dry)	If(Year<2015,ReadFromFile("ClimateData\PrincetonV3Daily\Catchment ID 334 - Tana.csv", "Precip"),ReadFromFile("ClimateData\CMIP6_KACE-1-0_SSP370_Daily\Catchment ID 334 - Tana.csv", "Precip", , Sum))
CMCC-ESM2_SSP370 (wet)	If(Year<2015,ReadFromFile("ClimateData\PrincetonV3Daily\Catchment ID 334 - Tana.csv", "Precip"),ReadFromFile("ClimateData\CMIP6_CMCC-ESM2_SSP370_Daily\Catchment ID 334 - Tana.csv", "Precip", , Sum))

Pour le bassin *MABIA catchment*, malgré la légère baisse globale des précipitations et l'augmentation des températures projetées selon le scénario KACE, le modèle ne prévoit pas de tendance générale significative concernant l'évolution de la demande. Dans ce cas précis, l'interprétation des variations interannuelles potentielles des précipitations et de la demande en eau qui en découle serait d'une plus grande valeur pour les planificateurs des ressources en eau.



Références

Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and drainage paper 56. ed. ROME.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Smith, M., Raes, D., Wright, J.L., 2005. FAO-56 Dual Crop Coefficient Method for Estimating Evaporation from Soil and Application Extensions. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 131, 2–13. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(2)

Bouma, J., 1989. Using Soil Survey Data for Quantitative Land Evaluation, in: Stewart, B.A. (Ed.), Advances in Soil Science: Volume 9. Springer US, New York, NY, pp. 177–213. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3532-3_4

Bouma, J., van Lanen, H. a. J., 1987. Transfer functions and threshold values: from soil characteristics to land qualities.

Carsel, R.F., Parrish, R.S., 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. Water Resources Research 24, 755–769.

Davis, A.P., McCuen, R.H., 2005. Stormwater Management for Smart Growth. Springer Science & Business Media.

Doorenbos, J., Kassam, A.H., Branscheid, V., Bentvelsen, C.L.M., 1979. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper, no.33.

Jabloun, M., Sahli, A., 2012. WEAP-MABIA Tutorial (A collection of stand-alone chapters to aid in learning the WEAP-MABIA Module No. Version 1.0.1). SEI.

Jabloun, M., Sahli, A., 2006. Development and comparative analysis of pedotransfer functions for predicting soil water characteristic content for Tunisian soils. Presented at the Tunisia-Japan Symposium on Society, Science and Technology proceeding, 7th Edition, pp. 170-178.

Jones, R.J.A., Hollis, J.M., 1996. Pedotransfer rules for environmental interpretations of the EU Soil Map., in: Le Bas and M. Jamagne Soil Databases to Support Sustainable Development. EUR 16371 EN. Luxembourg, p. p.125-133.

Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., Saxtonn, K.E., 1982. Estimation of Soil Water Properties. Transactions of the ASABE 25, 1316–1320.

van Genuchten, M.Th., 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. Soil Science Society of America Journal 44, 892–898. https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x

Vereecken, H., Maes, J., Feyen, J., Darius, P., 1989. ESTIMATING THE SOIL MOISTURE RETENTION CHARACTERISTIC FROM TEXTURE, BULK DENSITY, AND CARBON CONTENT. Soil Science 148.

Washington State Department of Ecology, 2024. Determining Irrigation Efficiency and Consumptive Use. Program Guidance (No. Publication 20-11-076), WATER RESOURCES PROGRAM GUIDANCE. Olympia, Washington.

Wösten, J.H.M., Lilly, A., Nemes, A., Le Bas, C., 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. Geoderma 90, 169–185. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00132-3

WWDR, 2024, 2024. Water for prosperity and peace (The United Nations World Water Development Report 2024:). UNESCO on behalf of UN-Water. The list of UN-Water Members and Partners can be found on the following website: www.unwater.org.