INTRODUCTION SOMMAIRE À



1. Introduction

Cette « Introduction sommaire à WOFOST » est destinée à servir de texte d'introduction au modèle de système de culture WOFOST 7.2. Elle présente les concepts de base du modèle et les processus biophysiologiques mis en œuvre. De plus, des lignes directrices sont fournies sur l'interprétation des résultats WOFOST. Étant donné qu'une culture et le sol sur lequel elle pousse sont étroitement liés, une attention particulière est accordée à l'échange entre la culture et le sol et aux différentes options disponibles pour simuler les processus du sol avec WOFOST. En outre, ce document décrit les différentes implémentations logicielles du modèle.

En plus du matériel d'introduction, plusieurs annexes sont fournies. Tout d'abord, une liste de toutes les variables dans l'implémentation PCSE de WOFOST est donnée (annexe I). De plus, il existe des conseils pour l'étalonnage des paramètres, y compris la procédure à suivre (annexe II), un aperçu de la sélection des paramètres pour l'étalonnage du modèle (annexe III) et les données expérimentales requises (annexe IV).

Pour plus d’informations sur WOFOST, nous vous suggérons fortement de lire le matériel suivant :

• Wit, Allard de, Hendrik Boogaard, Davide Fumagalli, Sander Janssen, Rob Knapen, Daniel van Kraalingen, Iwan Supit, Raymond van der Wijngaart et Kees van Diepen. 25 ans du modèle de systèmes de culture WOFOST. Systèmes agricoles 168 (1er janvier 2019) : 154-67. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.06.018

• Wit de, A.J.W., H.L. Boogaard, I. Supit, M. van den Berg (éditeurs). 2020. Description du système du modèle de systèmes de culture WOFOST 7.2. Recherche environnementale de Wageningen. Mai 2020. Description mise à jour de Supit, I., A. A. Hooijer et C. A. Van Diepen. Description du système du modèle de simulation de culture WOFOST 6.0 implémenté dans CGMS, vol. 1 : Théorie et algorithmes. Centre commun de recherche, Commission des Communautés européennes, EUR 15956 (1994) : 146. La dernière version est disponible sur https://wofost.readthedocs.io

Enfin, des informations à jour sont disponibles sur notre site Web : http://wageningenur.nl/wofost.

Depuis juillet 2024, les modèles de systèmes de culture WOFOST 7.3 et WOFOST 8.1 ont été publiés. Par rapport à la version 7.2, ces nouvelles versions présentent de nombreuses améliorations (voir section 10.4) qui étendent les capacités de WOFOST. Cette « Introduction douce à WOFOST » ne couvre pas encore les versions WOFOST 7.3 et 8.1, mais sera progressivement étendue pour couvrir également ces versions.

1. Contexte

WOFOST (WOrld FOod STudies) est un modèle de simulation pour l'analyse quantitative de la croissance et de la production des grandes cultures annuelles. Il s'agit d'un modèle générique de culture qui simule de nombreuses cultures différentes en utilisant les mêmes principes et algorithmes. Les différences entre les cultures sont donc exprimées par des différences dans la valeur des paramètres du modèle, et non par un concept de modélisation différent. Avec WOFOST, vous pouvez simuler les propriétés des cultures comme le développement phénologique, le rendement des cultures, la biomasse totale et la consommation d'eau en fonction des connaissances sur le sol, les cultures, la météo et la gestion des cultures pour un endroit particulier.

WOFOST est un modèle mécaniste et dynamique qui explique la croissance quotidienne des cultures en fonction des processus sous-jacents, tels que la photosynthèse, la respiration et la manière dont ces processus sont influencés par les conditions environnementales.

Modèle mécaniste ou **mécanistique** vise à expliciter le **mécanisme** qui est responsable de la relation observée.

Modèle dynamique : est utilisée pour exprimer et modéliser le comportement du système au fil du temps

Modèle déterministique : type de modèle ou partie d'un modèle dont le résultat est connu exactement, dès lors que l'entrée est connue

Les modèles déterministes sont basés sur une loi connue ou hypothétique de la physique, des mathématiques ou d'une quelconque autre discipline, de sorte que des valeurs d'input données produisent toujours le même résultat.

le modèle stochastique accepte une certaine distribution de probabilité associée à des inputs donnés, dans les processus au sein du modèle et donc dans l'output, de sorte que le même input peut amener à différentes valeur d'output

La modélisation « à base d'agents » (ABM = Agent Based Modeling) est utilisée pour conceptualiser, modéliser et simuler des questions relevant des sciences de l'homme et de la société

Temps discret ou temps continu

Non spatiaux ou spatiaux

* Les chaînes de Markov sont des suites aléatoires sans mémoire, en quelque sorte. Dans l'évolution au cours du temps, l'état du processus à un instant futur ne dépend que de celui à l'instant présent, mais non de ses états antérieurs. On dit souvent que conditionnellement au présent, passé et futur sont indépendantsou avec mémoire

La croissance des cultures est calculée par pas de temps d'un jour, en fonction de la connaissance des processus à un niveau d'intégration inférieur (comme la courbe de réponse instantanée photosynthèse-lumière d'une seule feuille). Ensuite, les processus de bas niveau sont intégrés et combinés à d'autres processus (phénologie, respiration) pour expliquer le comportement du système à un niveau d'intégration supérieur. Néanmoins, certaines parties du modèle sont descriptives et/ou statiques. Cela est principalement dû au fait que certains des processus impliqués ne sont pas encore bien compris.

Comme tous les modèles mathématiques de production agricole, WOFOST est une simplification de la réalité. En pratique, le rendement des cultures résulte de l'interaction de facteurs écologiques, technologiques et socio-économiques. Tous ces facteurs ne sont pas pris en compte dans WOFOST.

1. Développement de WOFOST

WOFOST fait partie de la famille de modèles développés à Wageningen par l'école de C.T. De Wit (Bouman et al., 1996, Ittersum et al. 2003). WOFOST est né dans le cadre d'études interdisciplinaires sur la sécurité alimentaire mondiale et sur le potentiel de production alimentaire mondiale menées par le Center for World Food Studies (CWFS) en coopération avec l'Université de Wageningen et la Recherche, Département d'écologie de la production théorique (WAU-TPE) et le DLO-Center for Agrobiological Research and Soil Fertility (AB-DLO), Wageningen, Pays-Bas. Le potentiel de rendement de diverses cultures annuelles dans les pays tropicaux a été évalué (Van Keulen et Wolf, 1986 ; Van Diepen et al., 1988 ; Van Keulen et Van Diepen, 1990).

Après la cessation du CWFS en 1988, le DLO Winand Staring Centre (SC-DLO) a continué le développement du modèle en coopération avec AB-DLO et WAU-TPE. WOFOST 6.0 a été développé pour simuler la production de grandes cultures annuelles dans toute l'Europe pour le Centre commun de recherche (site JRC-Ispra) de la Commission européenne. À la fin des années 90, WOFOST a été développé et étendu avec une interface utilisateur graphique (GUI) donnant naissance à WOFOST 7.1 et au WOFOST Control Centre (WCC). Actuellement, le modèle WOFOST est maintenu et développé par Wageningen Environmental Research (WENR) en coopération avec le Plant Production Systems Group (PPS) de l'Université et de la Recherche de Wageningen et l'unité de sécurité alimentaire du Centre commun de recherche en Italie.

1. Niveaux de production

Pour pouvoir gérer la diversité écologique de l'agriculture, trois niveaux hiérarchiques de croissance des cultures peuvent être distingués (Ittersum et Rabbinge, 1997) : la production potentielle, la production atteignable et la production réelle (voir Figure 1). Chacun de ces niveaux de croissance ajoute un ensemble de facteurs de croissance : facteurs déterminants, facteurs limitatifs et facteurs réducteurs. La réalité correspond rarement exactement à l'un de ces niveaux de production, mais il est utile de réduire les cas spécifiques à l'un d'eux, car cela permet de se concentrer sur les principales contraintes environnementales à la production des cultures, telles que la lumière, la température, l'eau et les macro-éléments azote (N), phosphore (P) et potassium (K). D'autres facteurs peuvent souvent être négligés car ils n'influencent pas le taux de croissance des cultures.

Avec WOFOST 7.2, vous pouvez calculer la production potentielle et la production atteignable en tenant compte des limitations en eau. Les facteurs limitatifs et réducteurs de production (par exemple, les ravageurs, les maladies, les mauvaises herbes, etc.) ne sont pas inclus. Les niveaux de production sont hiérarchisés dans WOFOST.

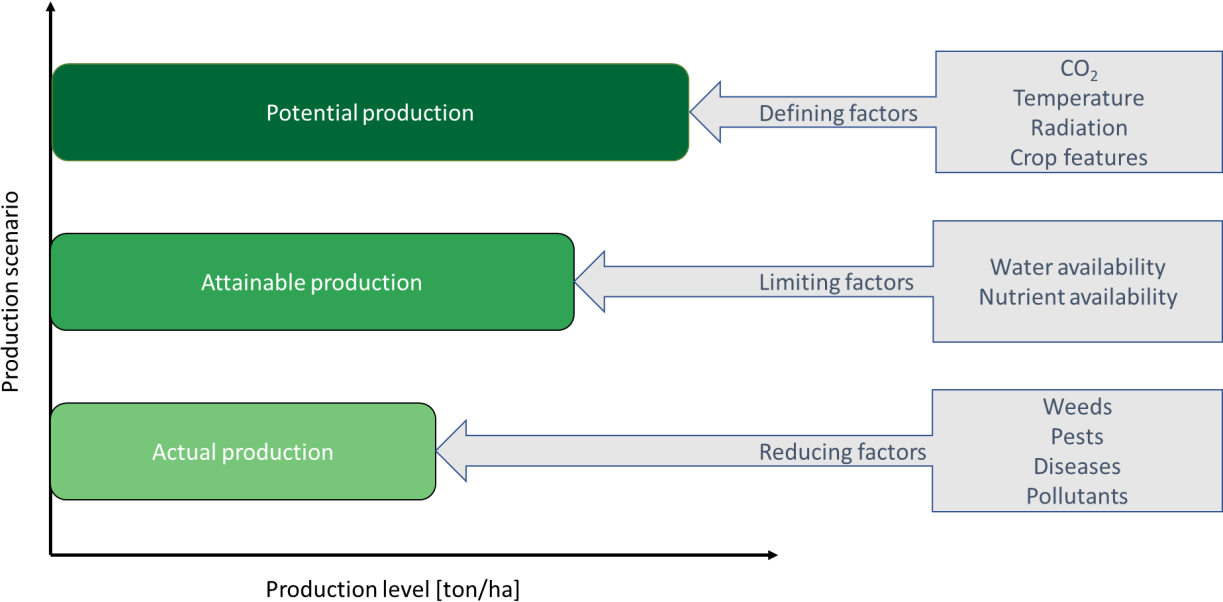
\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*

Figure 1. Trois niveaux hiérarchiques de croissance des cultures

4.1 Production potentielle

La croissance des cultures est déterminée uniquement par la concentration en CO2, l’irradiation, la température, les caractéristiques des plantes et la date de plantation. La production potentielle représente le plafond de production absolu pour une culture donnée lorsqu’elle est cultivée dans une zone donnée dans des conditions météorologiques spécifiques. Elle est déterminée par la réponse de la culture aux régimes de température et de rayonnement solaire pendant la saison de croissance. La concentration atmosphérique en CO2 est supposée constante. Tous les autres facteurs sont supposés optimaux (par exemple, lutte contre les ravageurs et les mauvaises herbes, absence de pertes causées par la circulation ou le pâturage) et en quantité suffisante (nutriments et eau).

Le rendement potentiel étant également déterminé par les propriétés des cultures, le potentiel de rendement varie selon les variétés de cultures et peut être augmenté par la sélection. Des niveaux de rendement proches du potentiel sont obtenus lors d’expériences sur le terrain par des instituts de recherche, des sociétés semencières et certains agriculteurs pionniers.

4.2 Production atteignable

Outre l’irradiation, la température et les caractéristiques des plantes, l’effet de la disponibilité en eau et/ou en nutriments est pris en compte pour le niveau de production atteignable. En cas de réduction du rendement due à des limitations d'eau, cela implique que l'approvisionnement en eau est sous-optimal pendant (certaines parties de) la saison de croissance, ce qui conduit à une production limitée par l'eau, qui est inférieure à la production potentielle en termes de biomasse végétale totale. Plus précisément, l'effet limitant du rendement des pénuries d'eau dépend de la disponibilité en eau du sol telle que déterminée par les quantités de précipitations et d'évapotranspiration, et de leur répartition sur la saison de croissance, par le type de sol, la profondeur du sol et l'influence des eaux souterraines. La différence entre la production potentielle et la production limitée par l'eau indique l'augmentation de la production qui pourrait être obtenue par l'irrigation.

Dans des cas particuliers, le rendement limité par l'eau (produit récoltable) peut être supérieur au rendement potentiel en raison d'un indice de récolte plus favorable. Un léger stress dû à la sécheresse peut limiter la croissance pendant la phase de croissance végétative, alors qu'une surface foliaire verte suffisante est encore formée pour effectuer un taux d'assimilation maximal. La quantité plus faible de biomasse végétative entraîne des besoins d'entretien moindres pour la culture, de sorte que davantage d'assimilats restent disponibles pour la croissance des grains. Dans les sols fortement fertilisés, un schéma de croissance similaire peut être observé, une croissance végétative très importante, conduisant à un indice de récolte plus faible et à un risque de verse dans les céréales. Un cas particulier de conditions limitées en eau est lié à un excès d'humidité du sol, provoquant un manque d'oxygène pour les racines des plantes. L'effet dépend de la sensibilité de la culture au stress oxydatif, des propriétés du sol et des mesures de drainage et est difficile à quantifier par modélisation.

Un manque de macro ou de micro nutriments dans le sol peut entraîner une croissance réduite de la culture car la croissance et la photosynthèse ne peuvent pas se dérouler à un rythme maximal en raison du manque de nutriments essentiels. Parmi les macronutriments (azote N, phosphore P et potassium K), l'azote est nécessaire en quantités relativement importantes et constitue donc généralement le facteur le plus limitant. Néanmoins, un apport équilibré de N/P/K ainsi que de nutriments secondaires et de micro nutriments est nécessaire car la croissance est souvent limitée par le nutriment le plus limitant. L'impact des limitations en nutriments dépend également du type de nutriment car le manque de certains nutriments a un impact sur la qualité du rendement ou sur la vigueur de la culture et sa résistance aux maladies. Actuellement, WOFOST 7.2 ne prend pas en compte les limitations en nutriments lors de la simulation de la croissance des cultures. Cependant, les résultats de WOFOST peuvent être utilisés comme entrée pour le modèle QUEFTS (Jansen et al. 1990, Ravensberger et al.

2021) qui peut estimer l'impact de la limitation N/P/K sur le rendement.

4.3 Production réelle

Le niveau de production réel correspond aux rendements généralement obtenus dans les champs des agriculteurs dans la pratique. Dans les conditions réelles du terrain, toutes sortes de facteurs de réduction de rendement supplémentaires se produisent, qui peuvent être causés par des stress biotiques tels que les infestations de mauvaises herbes, les insectes nuisibles et les maladies des plantes, ainsi que par des stress abiotiques tels que la destruction par le gel, le stress osmotique dû aux niveaux élevés de sel dans l'eau d'irrigation et les polluants comme l'ozone ou les métaux lourds. Ces effets sont très difficiles à estimer par des modèles de simulation car l'impact local est difficile à estimer (destruction par le gel), la dynamique n'est pas claire (interactions entre les cultures, les maladies et les conditions météorologiques) et l'impact sur la culture elle-même est difficile à décrire (ozone, métaux lourds) en termes de biophysique.

Néanmoins, des progrès sont réalisés sur plusieurs de ces aspects, tels que la modélisation de l’impact des ravageurs et des maladies des plantes (Savary et al. 2018) et de la destruction par le gel (Bergjord et al. 2018, Byrns et al. 2020).

5 Simulation de la croissance des cultures

Pour pouvoir travailler avec WOFOST de manière judicieuse, il est indispensable de posséder une connaissance de base de ses principes. Par conséquent, un bref aperçu des concepts utilisés dans WOFOST est présenté. Dans WOFOST, la croissance des cultures est simulée sur la base de processus écophysiologiques. Les principaux processus sont le développement phénologique, l'assimilation du CO2, la dynamique des feuilles, la transpiration, la respiration, la répartition des assimilats dans les différents organes et la formation de matière sèche. Les paragraphes suivants fournissent une description concise des principaux processus mis en œuvre dans WOFOST. Pour une littérature approfondie sur les principes de simulation de la croissance des cultures et d'analyse des systèmes, vous pouvez vous référer à Wit et al. (2020). Ceci est illustré dans la figure 2.

module

Intercepted Light

Soil module

Potential

transpiration rate

Potential gross assimilation

rate

Actual

transpiration rate

Actual gross assimilation rate

Maintenance respiration

Phenologic development

Net assimilation rate

Growth respiration

DVS

Partitioning

LAI

Leaves

Storage

Roots Stems

root zone moisture content

Crop

ASTRO module

Weather module

Root depth

Figure 2. Structure générale simplifiée du modèle explicatif dynamique de croissance des cultures WOFOST.

5.1 Assimilation et respiration

Le taux d'assimilation brut quotidien du CO2 d'une culture est calculé à partir du rayonnement absorbé et de la courbe de réponse photosynthèse-lumière des feuilles individuelles.

Dans l'assimilation du CO2, ou photosynthèse, le CO2 est réduit en glucides (CH2O) en utilisant l'énergie fournie par la lumière adsorbée :

CO2 + H2O → CH2O + O2

Le rayonnement absorbé est calculé à partir du rayonnement total entrant et de la surface foliaire. Étant donné que la photosynthèse réagit à l'intensité lumineuse de manière non linéaire, une variation du niveau de rayonnement a été prise en compte. Un type de variation se produit dans la canopée le long du plan vertical, car les feuilles supérieures reçoivent plus de lumière que les feuilles inférieures. Cela est pris en compte en divisant la canopée en différentes couches de feuilles. Le rayonnement intercepté par chaque couche de feuille est calculé sur la base du flux de rayonnement au sommet de la canopée et de la transmission par les couches sus-jacentes. L'assimilation de chaque couche de feuille est calculée à partir de la courbe de réponse photosynthèse-lumière des feuilles individuelles. Cette réponse dépend de la température et de l'âge des feuilles. La variation dans le plan horizontal, par exemple l'effet des rangées de plantes, n'est pas prise en compte. Le deuxième type de variation est temporel, causé par le cycle quotidien du soleil. Pour l'intégration sur la journée, on suppose une évolution sinusoïdale du rayonnement entrant sur la journée et on applique une méthode d'intégration gaussienne à trois points comme celle décrite par Goudriaan (1986).

Une partie des assimilats formés est utilisée pour la respiration d'entretien des organes végétaux. Les glucides restants sont convertis en matière végétale structurelle, comme la cellulose et les protéines (matière sèche). Il y a une perte nette de glucides due à cette conversion, appelée respiration de croissance.

La respiration d'entretien est estimée sur la base du poids sec des différents organes et de leur composition chimique, modifiée par la température ambiante. Lorsque la canopée recouvre entièrement le sol, l'augmentation de la biomasse, exprimée en matière sèche, est typiquement comprise entre 150 et 350 kg ha-

5.2 Développement phénologique

L'ordre et la vitesse d'apparition des organes végétatifs et reproducteurs caractérisent le développement phénologique de la culture. L'ordre d'apparition est une caractéristique de la culture, indépendante des conditions extérieures. La vitesse d'apparition peut varier fortement, notamment sous l'influence de la température et de la photopériode (durée du jour).

Dans WOFOST, la phénologie est décrite par la variable d'état sans dimension, le stade de développement (DVS). Pour la plupart des cultures annuelles, le DVS est fixé à 0 à l'émergence des plantules, à 1 à la floraison (pour les céréales) et à 2 à maturité. Le taux de développement est une fonction spécifique à la culture/variété de la température ambiante, éventuellement modifiée par la photopériode et la vernalisation.

Pour tenir compte de l'effet de la température sur le stade de développement, le concept de temps thermique est appliqué, parfois appelé somme de température ou degrés-jours de croissance. Le temps thermique est l'intégrale au fil du temps de la température effective journalière (Te) après l'émergence de la culture. Te est la différence entre la température moyenne journalière et une température de base en dessous de laquelle aucun développement ne se produit. Au-dessus d'une certaine température maximale effective, Te reste constante. Le DVS est calculé en divisant le temps thermique par le temps thermique nécessaire pour passer au stade de développement suivant.

Le développement phénologique de certaines cultures est également influencé par la photopériode. Ce phénomène est traité dans WOFOST par un facteur de réduction de la photopériode pour le taux de développement jusqu'à la floraison, basé sur une photopériode optimale et une photopériode critique. Enfin, le développement phénologique de certaines cultures est influencé par la vernalisation. Le "besoin de vernalisation" de la culture est l'ampleur de l'exposition à la température froide afin d'induire la floraison. WOFOST compte le nombre de jours avec des conditions favorables à la vernalisation et calcule un facteur de réduction en faisant la mise à l'échelle entre une vernalisation de base et une exigence de vernalisation saturée.

Le stade de développement dans WOFOST est une variable importante et détermine, entre autres, la répartition des assimilats sur les organes (feuilles, tiges, racines, organes de stockage), la surface foliaire spécifique et le taux maximal d'assimilation du CO2 par les feuilles.

5.3 Répartition de la matière sèche

La répartition est la subdivision des assimilats nets entre les différents organes de la plante (voir Figure 3). Après la germination, la plupart des assimilats sont convertis en tissu foliaire et racinaire, puis en tissu de la tige. La répartition vers le tissu racinaire diminue progressivement et est nulle si le stade de développement est égal à 1 (anthèse chez les céréales). À partir du stade de développement 1, les organes de stockage reçoivent la plupart des assimilats disponibles.

Après l'émergence, l'apport d'assimilats aux feuilles détermine l'augmentation de la surface foliaire, calculée en multipliant le poids de matière sèche des feuilles par une surface foliaire spécifique. Cependant, l'expansion de la surface foliaire peut être limitée par l'augmentation quotidienne maximale de l'indice de surface foliaire (c'est-à-dire un taux maximal de division et d'extension cellulaire), qui dépend de la température. L'augmentation de la surface foliaire conduit à une interception de lumière (potentielle) plus élevée et, par conséquent, à un taux de croissance potentiel plus élevé. Cela conduit à une croissance exponentielle de la culture, qui dure jusqu'à ce que presque toute la lumière soit interceptée (indice de surface foliaire ≥ 3). À partir de là, le taux de croissance est constant, jusqu'à ce que la surface foliaire et sa capacité photosynthétique diminuent en raison de la sénescence de la culture.

Dans WOFOST, le partitionnement est mis en œuvre au moyen de ce que l'on appelle des tables de partitionnement qui décrivent la fraction d'assimilats répartie entre les différents organes en fonction du stade de développement de la culture. Dans les calculs, une fraction des assimilats est d'abord attribuée aux racines, le reste est réparti entre les organes aériens (y compris les organes de stockage souterrains tels que les tubercules). Pour lancer la simulation, le poids sec de la culture à l'émergence doit être connu.

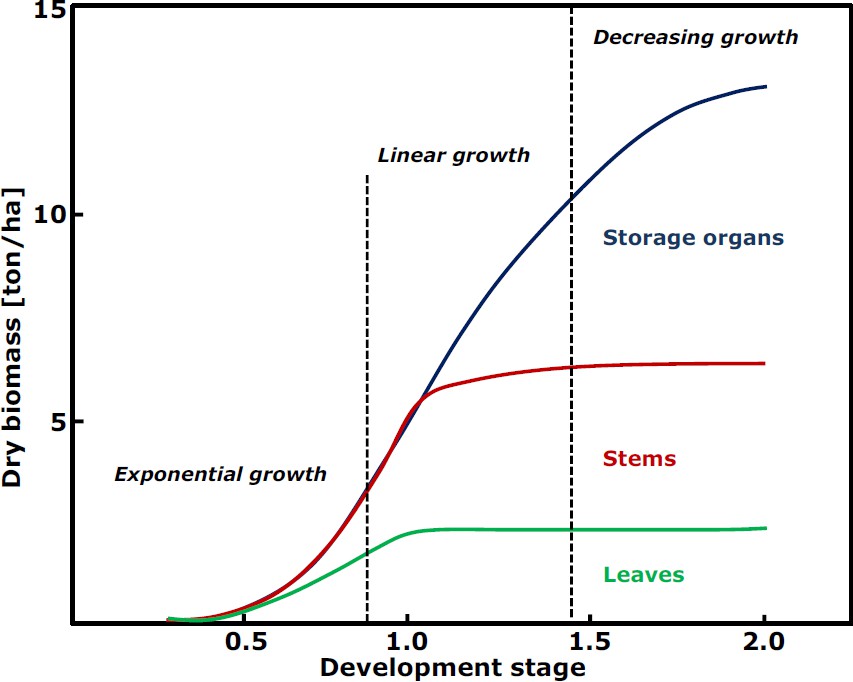


Figure 3. Exemple de répartition de la matière sèche entre les organes aériens en fonction du stade de développement. Les trois différentes phases de croissance ont également été indiquées.

5.4 Transpiration

La transpiration est la perte d'eau d'une culture vers l'atmosphère. La perte d'eau est causée par la diffusion de la vapeur d'eau des stomates ouverts vers l'atmosphère. Les stomates doivent être ouverts pour échanger des gaz (CO2 et O2) avec l'atmosphère. Pour éviter la dessiccation, une culture doit compenser les pertes par transpiration en absorbant l'eau du sol.

Le taux de transpiration potentiel dépend de la surface foliaire et de la demande évaporative de l'atmosphère. La demande évaporative est caractérisée par le niveau de rayonnement, le déficit de pression de vapeur et la vitesse du vent. La transpiration potentielle est calculée pour une culture de référence. Les différences entre les cultures peuvent être prises en compte par un facteur de correction, dont la valeur est de 1,0 pour la plupart des cultures. Une plage plausible pour ce facteur est de 0,8 pour les cultures économes en eau et de 1,2 pour les cultures dépensant relativement beaucoup d'eau.

Dans WOFOST, une plage d'humidité optimale du sol pour la croissance des plantes est déterminée en fonction de la demande d'évaporation de l'atmosphère (transpiration potentielle de référence d'un couvert végétal fixe), du groupe de cultures et de la capacité totale de rétention d'eau du sol (voir figure 4). Dans la plage optimale, les pertes par transpiration sont entièrement compensées. En dehors de la plage optimale, le sol peut être soit trop sec, soit trop humide. Ces deux conditions entraînent une réduction de l'absorption d'eau par les racines, dans un sol sec en raison d'un manque d'eau, dans un sol humide en raison d'un manque d'oxygène. Une culture réagit au stress hydrique par la fermeture des stomates. Par conséquent, l'échange de CO2 et d'O2 entre la culture et l'atmosphère diminue, et donc l'assimilation du CO2 est réduite. WOFOST applique le rapport entre la transpiration réelle et potentielle de la culture (Ta/Tp) comme facteur de réduction au taux d'assimilation brut.

Une image contenant texte, diagramme, ligne, Tracé

Description générée automatiquement

Figure 4. Relation entre la teneur en eau du sol, θ, et Ta/Tp pour une combinaison culture/sol. θwp, θcr, θfc et θsat représentent la teneur en eau du sol au point de flétrissement, le point critique pour la transpiration potentielle, la capacité au champ et la saturation, respectivement. La ligne en pointillés représente soit une espèce plus résistante à la sécheresse dans les mêmes conditions de terrain, soit la même espèce sous une demande d'évaporation plus faible, causée par des conditions météorologiques différentes (Penning de Vries et al., 1989 ; Van Laar et al., 1992).

6 Interprétation des résultats du modèle WOFOST

Bien que le modèle WOFOST comporte de nombreuses variables en interne (voir l'annexe I), il n'existe qu'un ensemble limité de variables d'état/taux qui sont d'une utilité pratique pour la plupart des applications. Dans cette section, nous fournirons une brève introduction sur la façon d'interpréter les résultats du modèle WOFOST et sur les informations qui peuvent être obtenues.

Avant d’entrer dans l’explication des différentes variables, il est important de comprendre que le résultat de WOFOST est directement lié au niveau de production choisi (Figure 1). Ainsi, en fonction du niveau de production, la variable d’intérêt a une interprétation légèrement différente bien que le nom de la variable soit le même. Ainsi, l’indice de surface foliaire (variable « LAI ») dans le cadre d’une production potentielle représente l’indice de surface foliaire correspondant à une culture poussant dans des conditions optimales. De même, pour une production limitée en eau, le nom de la variable sera toujours appelé « LAI », mais il représente désormais l’indice de surface foliaire pour une culture poussant dans des conditions limitées en eau. Il appartient au modélisateur de prendre les décisions appropriées concernant le niveau de production, le post-traitement des résultats et les conclusions qui en sont tirées.

Le tableau 1 montre une sortie de série chronologique du modèle WOFOST. Cet ensemble de résultats est typique de la mise en œuvre PCSE/WOFOST. Le tableau montre les cinq derniers jours d'une saison de blé de printemps simulée, l'exemple a été tiré du bloc-notes « Getting Started » de la collection PCSE1. Dans PCSE/WOFOST, il peut arriver que des variables liées à la culture ne soient pas disponibles et soient représentées par une représentation sans données (par exemple None, NaN ou NULL). Cela se produit lorsqu'il n'y a pas de culture sur le champ et que les variables n'existent pas à un jour donné pendant la simulation.

La première colonne du tableau 1 indique le jour auquel se rapportent les résultats de simulation de cette ligne. De gauche à droite, les variables suivantes sont présentes :

• DVS : le stade de développement de la culture. Une variable sans dimension qui définit le développement phénologique de la culture. Les valeurs DVS vont de -0,1 au semis, à 0,0 à l'émergence, 1,0 à la floraison et 2,0 à la maturité physiologique. Les valeurs DVS peuvent être facilement comparées d'une année à l'autre afin de déterminer si le cycle de développement des cultures est plus lent ou plus rapide que la moyenne à long terme ou que toute année précédente. Une note de bas de page dans l'interprétation du stade de développement des cultures est que le modèle phénologique utilisé par WOFOST est un modèle typique pour les céréales. Toutes les autres cultures sont forcées d'entrer dans ce modèle. Pour les céréales, DVS=1,0 (floraison) démarre la phase de reproduction et donc le remplissage des organes de stockage (grains). Pour les non-céréales, cela implique que DVS=1 correspond également au début de la formation du rendement. Par exemple, DVS=1 pour les pommes de terre signifie le début du gonflement des tubercules au lieu de la floraison, car la floraison chez les pommes de terre a peu de pertinence agronomique. De plus, DVS=2 représente la maturité physiologique. Cependant, pour certaines cultures (par exemple la betterave sucrière), il n'y a pas de véritable maturité physiologique et la culture est récoltée à une date donnée plutôt qu'à maturité. Pour ces cultures, DVS=2 n'a pas de véritable signification et sa valeur peut être inférieure ou supérieure à 2 à la récolte. Étant donné que les résultats du tableau 1 concernent une culture céréalière (un blé de printemps), la simulation se termine proprement avec DVS=2. Enfin, il faut comprendre que le DVS est une variable importante et que presque tous les autres processus de WOFOST en dépendent. Par conséquent, il est essentiel que le développement phénologique soit bien calibré et correctement simulé (voir annexe II).

• LAI : l'indice de surface foliaire de la culture. Il s'agit d'une variable sans dimension qui définit la surface unilatérale des feuilles vivantes (vertes) par surface de surface au sol. Le tableau 1 représente les 5 derniers jours de la simulation et le couvert végétal de la culture est complètement sénescent avec LAI=0. Comme LAI=0, il n'y a plus de photosynthèse et donc les colonnes relatives à la biomasse (TAGP, TWSO, TWLV, TWST, TWRT) n'augmentent plus et la transpiration de la culture (TRA) est également nulle.

• TAGP : la production totale au-dessus du sol représente la biomasse aérienne totale que la culture a produite en poids sec en kg/ha. TAGP est la somme des organes végétaux aériens individuels, donc TAGP = TWSO + TWLV + TWST.

• TWSO : le poids total des organes de stockage représente le produit récoltable (le rendement) de la culture. Pour les céréales, il s'agit des grains, pour la pomme de terre, il s'agit des tubercules, pour le soja, des haricots, etc. Il est toujours représenté en poids sec en kg/ha. Ce dernier signifie qu'il y aura une différence entre le rendement récolté et le rendement simulé en raison de la différence entre le poids sec et le poids frais. L'ampleur de cette différence dépend principalement de la teneur en eau du rendement final. Par exemple, les céréales n'ont qu'une teneur en eau de 10 à 15 %, tandis que les pommes de terre et la betterave sucrière contiennent beaucoup d'eau et il existe donc une grande différence entre le poids frais et le poids sec estimé par WOFOST.

• TWLV : le poids total des feuilles représente la quantité cumulée de biomasse foliaire qui s'est formée au cours du cycle de croissance. En interne, le TWLV est divisé en biomasse foliaire morte et vivante, cette dernière étant utilisée pour estimer le LAI de la culture. Les résultats du modèle dans le tableau 1 démontrent que LAI=0, ce qui implique qu'il n'y a plus de feuilles vivantes (vertes) et que toute la biomasse foliaire se trouve dans le pool mort.

• TWST : le poids total des tiges représente la quantité de biomasse représentée par les tiges de la culture en poids sec en kg/ha. La quantité de matière de tige varie beaucoup selon les espèces de culture et également selon les cultivars.

• TWRT : le poids total des racines représente la quantité de biomasse représentée par les racines de la culture en poids sec en kg/ha. Le schéma de partitionnement de WOFOST divise d'abord (partitionne) les assimilats entre les racines (sous le sol) et les pousses (au-dessus du sol). Ensuite, il répartit entre les organes végétaux au-dessus du sol (feuilles, tiges, stockage). La biomasse racinaire est souvent difficile à valider car les observations de la biomasse racinaire des plantes sont difficiles à obtenir. Notez que dans WOFOST, il n'y a pas de relation entre la biomasse racinaire et la profondeur des racines.

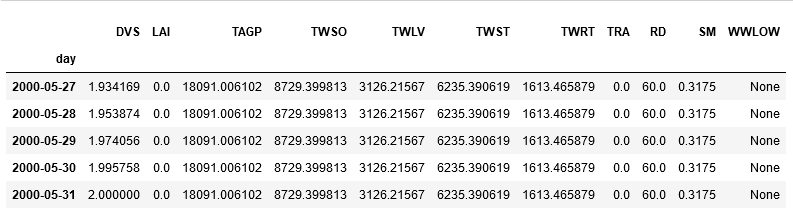
• TRA : La transpiration de la culture (à l'exclusion de l'évaporation du sol) en cm/jour qui représente la quantité d'eau que la culture obtient du sol et qui est transpirée à travers ses feuilles.

• RD : La profondeur d'enracinement de la culture en cm. Comme l'exemple se rapporte à la fin de la saison, RD représente la profondeur à laquelle les racines sont capables de pénétrer dans le sol. Elle est calculée comme le minimum entre la profondeur maximale d'enracinement de la culture (un paramètre de la culture) et la profondeur maximale d'enracinement du sol (en tant que paramètres du sol). Le tableau 1 présente les résultats d'une culture de blé de printemps dont la profondeur d'enracinement maximale est d'environ 125 cm. Les résultats actuels concernent donc un sol où la profondeur d'enracinement est limitée à 60 cm.

• SM : Dans ce cas, il s'agit de l'humidité du sol de la zone racinaire sous forme de fraction volumétrique. Un sol complètement sec a une valeur de zéro tandis que la valeur maximale se rapporte à un sol complètement saturé (dépendant du sol mais généralement d'environ 0,4 pour les sols minéraux). Cependant, son interprétation peut dépendre du type d'équilibre hydrique du sol utilisé. De plus, la dénomination de la variable peut différer selon les configurations du modèle. Dans ce cas, les résultats démontrent que SM est une valeur constante de 0,3175. Cela est dû au fait que nous fonctionnons pour une situation de production potentielle où l'humidité du sol est maintenue constante et suffisamment élevée pour ne pas limiter la croissance.

• WWLOW : cela représente la quantité d'eau en cm disponible dans la zone racinaire (variable W) plus la zone inférieure (non racinée) (variable WLOW). Dans l'exécution actuelle du modèle, sa valeur est égale à None, ce qui signifie que la valeur n'existe pas. Cela est dû au fait que la variable n'existe pas dans une simulation de production potentielle.

Tableau 1. Exemple de sortie de simulation du modèle PCSE/WOFOST 7.2 pour le niveau de production potentiel de blé de printemps dans le sud de l'Espagne (cinq dernières entrées).



Outre les résultats de séries chronologiques, la plupart des implémentations WOFOST fournissent également des résultats récapitulatifs (tableau 2). Les résultats récapitulatifs fournissent un bref aperçu des résultats de simulation à la fin du cycle de culture, ce qui est souvent suffisant lorsque plusieurs exécutions sont comparées. De plus, ils fournissent certaines variables qui sont autrement difficiles à obtenir, comme le jour où certains stades phénologiques ont été atteints. Notez que plusieurs ensembles de résultats récapitulatifs seront disponibles lorsque plusieurs cycles de culture sont simulés (rotations de cultures).

Tableau 2. Résultats récapitulatifs de l'implémentation PCSE/WOFOST 7.2 pour la production potentielle.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Variable** | **Value** | **Description** |
| DVS | 2.000000 | The crop development stage |
| LAIMAX | 6.232406 | The maximum LAI reached during the growth cycle |
| TAGP | 18091.006102 | The final TAGP |
| TWSO | 8729.399813 | The final TWSO |
| TWLV | 3126.215670 | The final TWLV |
| TWST | 6235.390619 | The final TWST |
| TWRT | 1613.465879 | The final TWRT |
| CTRAT | 26.975472 | The cumulated crop transpiration at the end of the growth cycle |
| RD | 60.000000 | The final rooting depth |
| DOS | None | The day-of-sowing, can be None if crop starts at emergence |
| DOE | 2000-01-01 | The day-of-emergence (DVS=0) |
| DOA | 2000-03-28 | The day-of-flowering (DVS=1) |
| DOM | 2000-05-31 | The day-of-maturity (DVS=2) |
| DOH | None | The day-of-harvest, can be None of crops run up till maturity |
| DOV | None | The day-of-vernalization, when vernalization requirements are reached. Can be None for crops that do not require vernalization. |
| CEVST | 6.173598 | The cumulated soil evaporation during the crop cycle at the end of the crop cycle |

Nous pouvons maintenant comparer les résultats des niveaux potentiel et limité en eau et interpréter les résultats. Dans la figure 5, vous trouverez la représentation graphique des variables les plus importantes du tableau 1 pour les niveaux potentiel et limité en eau. Tout d'abord, le stade de développement (DVS) est le même pour les deux niveaux. Actuellement, le stress dû à la sécheresse n'a aucun impact sur le développement phénologique, bien qu'en pratique, le stress dû à la sécheresse puisse accélérer le développement phénologique de certaines cultures, ce qui n'est pas simulé actuellement.

Dans les graphiques avec l'indice de surface foliaire (LAI), la biomasse aérienne totale (TAGP) et le poids total des organes de stockage (TWSO), nous voyons une nette différence entre les deux niveaux de production. L'indice de surface foliaire diminue légèrement à partir de la mi-mars et la biomasse totale de la culture et le poids des organes de stockage commencent à s'écarter de la production potentielle. Cette différence peut être bien corrélée avec la figure montrant la transpiration de la culture (TRA) qui démontre que la transpiration diminue dans la production limitée en eau en raison du manque d'eau dans la zone racinaire à partir de la mi-mars. Français En comparant le niveau d'humidité du sol de la zone racinaire (SM), nous pouvons conclure qu'un niveau d'humidité du sol < 0,2 commence à générer un stress hydrique sur la culture. Cela se produit principalement en mars ; en avril, certaines averses de pluie augmentent la teneur en humidité du sol au-dessus ou légèrement en dessous de 0,2, provoquant seulement un stress hydrique mineur. L'impact du stress hydrique en mars sur la biomasse totale est d'environ 2500 kg/ha et l'impact sur le rendement (TWSO) est légèrement inférieur à 2000 kg/ha. Les résultats démontrent que l'impact du stress hydrique en mars est déjà considérable mais est atténué par les précipitations d'avril et de mai et la culture peut se rétablir.

La raison de la récupération est que la sécheresse a eu un impact limité sur l'indice LAI de la culture. Même avec une diminution de l'indice LAI due à la mort des feuilles due au stress hydrique, l'indice LAI maximum est resté supérieur à 4, permettant une interception complète de la lumière et donc la photosynthèse a pu récupérer sa capacité maximale lorsque le stress hydrique a été réduit par les précipitations. Dans les cas où le stress hydrique réduit le LAI à des niveaux faibles (< 3), l’impact de la sécheresse peut devenir très grave et la culture n’est pas en mesure de récupérer même lorsque l’humidité du sol remonte à des niveaux favorables.



Figure 5. Comparaison des résultats des simulations PCSE/WOFOST 7.2 pour les niveaux de production potentiels et limités en eau pour le blé de printemps dans le sud de l'Espagne.

7 Interfaces : atmosphère et sol

La croissance et le développement des cultures sont influencés par leur environnement : l'atmosphère (météo, CO2) et le sol sous-jacent (hôte, apport en eau et nutriments). Dans les implémentations actuelles, l'interface avec le sol se limite à l'hébergement des racines des plantes et à l'apport en eau.

7.1 Atmosphère

Pour exécuter la simulation des cultures, WOFOST a besoin de variables météorologiques qui pilotent les processus simulés. WOFOST nécessite les variables météorologiques quotidiennes suivantes (tableau 5).

Tableau 3. Variables météorologiques quotidiennes requises par WOFOST.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Name** | **Description** | **Unit** |
| TMAX | Daily maximum temperature | ∘C |
| TMIN | Daily minimum temperature | ∘C |
| VAP | Mean daily vapour pressure | hPa |
| WIND | Mean daily wind speed at 2 m above ground level | m.sec−1 |
| RAIN2 | Precipitation (rainfall or water equivalent in case of snow or hail). | cm.day−1 |
| IRRAD | Daily global radiation | J.m−2.day−1 |
| SNOWDEPTH | Depth of snow cover (optional) | cm |

La profondeur de neige est une variable météorologique facultative et n'est utilisée que pour estimer l'impact des dégâts dus au gel sur la culture (si elle est activée). La profondeur de neige peut également être simulée par le module SnowMAUS si les observations ne sont pas disponibles quotidiennement. De plus, certaines variables météorologiques sont dérivées des précédentes (tableau 4).

Tableau 4. Variables météorologiques dérivées requises par WOFOST.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Name** | **Description** | **Unit** |
| E0 | Penman potential evaporation for a free water surface | cm.day-1 |
| ES0 | Penman potential evaporation for a bare soil surface | cm.day-1 |
| ET0 | Penman or Penman-Monteith potential evaporation for a reference crop canopy | cm.day-1 |
| TEMP | Mean daily temperature (TMIN + TMAX)/2 | ∘C |
| DTEMP | Mean daytime temperature (TEMP + TMAX)/2 | ∘C |
| TMINRA | The 7-day running average of TMIN | ∘C |

La profondeur de neige est une variable météorologique facultative et n'est utilisée que pour estimer l'impact des dégâts dus au gel sur la culture (si elle est activée). La profondeur de neige peut également être simulée par le module SnowMAUS si les observations ne sont pas disponibles quotidiennement. De plus, certaines variables météorologiques sont dérivées des précédentes (tableau 4).

Tableau 4. Variables météorologiques dérivées requises par WOFOST.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Name | Description | Unit |
| E0 | Penman potential evaporation for a free water surface | cm.day−1 |
| ES0 | Penman potential evaporation for a bare soil surface | cm.day−1 |
| ET0 | Penman or Penman-Monteith potential evaporation for a reference crop canopy | cm.day−1 |
| TEMP | Mean daily temperature (TMIN + TMAX)/2 | ∘C |
| DTEMP | Mean daytime temperature (TEMP + TMAX)/2 | ∘C |
| TMINRA | The 7-day running average of TMIN | ∘C |

7.2 Humidité du sol dans la zone racinaire

L'humidité du sol dans la zone racinaire est le lien principal entre le modèle de simulation de culture WOFOST et le modèle de sol sous-jacent. Afin d'établir la connexion, WOFOST fournit la profondeur d'enracinement de la culture et le taux de transpiration requis de la culture au modèle de sol, tandis que le modèle de sol fournit la teneur en humidité du sol (ou succion matricielle) à WOFOST. L'humidité du sol dans la zone racinaire a une influence sur le taux de transpiration réel de la culture et par conséquent sur l'assimilation du CO2 de la culture, car cette dernière est réduite par le rapport entre la transpiration réelle et potentielle de la culture. À son tour, une transpiration réduite de la culture réduit l'extraction d'eau du sol, ce qui complète le couplage entre la culture et le modèle de sol.

Étant donné cette séparation claire entre le modèle de culture et le modèle de sol, il est relativement facile de connecter WOFOST à ​​différentes approches de simulation du comportement de l'eau dans le sol. En conséquence, il existe plusieurs implémentations de WOFOST connectées à différents modules de sol avec des objectifs différents. Le tableau 5 donne un aperçu des différents modèles d'eau disponibles auprès des groupes de recherche de Wageningen, de leur objectif et des différents détails de mise en œuvre.

Tableau 5. Aperçu des modules de bilan hydrique disponibles connectés à WOFOST.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  | **Implementations** | | | **Boundary conditions** | |
| Production level1 | Description | PCSE | WISS | SWAP | Freely draining | Ground- water |
| PP | Simple constant-level soil moisture model | • | • | • | n.a. | n.a. |
| WLP | Simple one-layer tipping bucket model | • | • |  | • |  |
| WLP | A simple multi-layer model driven by both differences in gravity and matric suction (7.3 and 8.1 only) | • |  |  | • | • |
| WLP | A complex Richards-equation based multi-layer model driven by both differences in gravity and matric suction |  |  | • | • | • |

1PP = niveau de production potentiel, WLP = niveau de production limité par l'eau

Modèle simple d'humidité du sol à niveau constant :

Le premier et le plus simple bilan hydrique du sol s'applique au niveau de production potentiel. En supposant un sol constamment humide, les besoins en eau des cultures sont quantifiés comme la somme de la transpiration et de l'évaporation des cultures du sol ombragé sous la canopée.

Modèle simple à auget basculant à une couche :

Dans ce modèle, le profil du sol est divisé en deux compartiments, la zone racinaire et la zone inférieure entre la profondeur d'enracinement réelle et la profondeur d'enracinement maximale. Le sous-sol en dessous de la profondeur d'enracinement maximale n'est pas défini. La deuxième zone fusionne progressivement avec la première zone à mesure que les racines s'enfoncent plus profondément vers la profondeur d'enracinement maximale. Le principe de ce bilan hydrique du sol est celui d'une cascade (auget débordant). L'eau de pluie s'infiltre, une partie peut être temporairement stockée au-dessus de la surface ou ruisseler.

La perte par évapotranspiration est calculée. L'eau infiltrée qui dépasse la capacité de rétention d'un compartiment du sol s'infiltre vers le bas. Il n'y a pas de remontée capillaire. Ce bilan hydrique est souvent utilisé pour des applications avec des informations limitées sur les propriétés du sol où souvent seule la capacité de rétention d'eau du sol est connue.

Un modèle multicouche simple piloté à la fois par les différences de gravité et de succion matricielle :

Ce bilan hydrique utilise une solution simple mais élégante pour estimer le débit d'eau à travers le sol en tenant compte à la fois du flux gravitationnel et du débit dû aux différences de succion matricielle. Il vise à faire de bonnes estimations de la disponibilité en eau des cultures dans des conditions où les propriétés du sol sont bien connues, mais sans entrer dans la complexité des modèles d'eau du sol de type équation de Richards. Ce modèle a récemment été étendu avec une approche simple pour estimer l'impact des eaux souterraines peu profondes sur la disponibilité en eau des cultures.

Un modèle multicouche complexe piloté à la fois par les différences de gravité et de succion matricielle :

L'implémentation WOFOST connectée au modèle SWAP dispose d'un bilan hydrique détaillé, basé sur l'équation de Richard, incluant la température du sol et le transport des solutés, ce qui permet de réaliser des simulations détaillées du comportement de l'eau et des solutés dans le sol et de son impact sur la croissance des plantes. Actuellement, le modèle SWAP est le seul modèle capable de prendre en compte l'impact des eaux souterraines peu profondes de manière physiquement réaliste. Le modèle propose également différentes options pour prescrire la condition limite inférieure. Des informations détaillées sur le modèle SWAP peuvent être trouvées sur : <https://swap.wur.nl/>.

8 Échelle temporelle et spatiale

D'un point de vue spatial, WOFOST est un modèle de simulation unidimensionnel, c'est-à-dire sans référence à une échelle géographique. Cependant, la taille d'une région à laquelle WOFOST peut être appliqué est limitée. Cela est dû aux effets d'agrégation causés par la réponse non linéaire des modèles de culture aux entrées du modèle. Le comportement non linéaire implique que l'agrégation des données d'entrée, puis l'exécution du modèle, donne des résultats différents de ceux obtenus en exécutant le modèle sur les données d'origine, puis en agrégeant les résultats du modèle.

En pratique, ce problème est résolu en divisant le domaine spatial du modèle en petites unités spatiales où les entrées du modèle (météo, culture, sol, gestion) peuvent être supposées constantes. L'agrégation des résultats de simulation est réalisée en agrégeant les résultats de simulation des unités spatiales individuelles dans des unités spatiales plus grandes. En Europe, WOFOST est généralement appliqué à des unités spatiales de 25 x 25 km pour lesquelles les erreurs d'échelle sont négligeables.

D'un point de vue temporel, WOFOST simule généralement la croissance des cultures avec une résolution temporelle d'un jour. La variation du calendrier de production des cultures peut être prise en compte en faisant varier la date de début de la saison de croissance et/ou en sélectionnant des variétés de cultures ayant des durées de croissance différentes.

9 Mise en œuvre de la dynamique des cultures

WOFOST est un modèle dynamique et mécaniste qui simule la croissance des cultures avec des pas de temps d'un jour, en s'appuyant sur la connaissance des processus à un niveau d'intégration inférieur. Pour garantir l'exactitude des résultats de la simulation, les différents types de calculs (intégration, variables motrices et calculs de taux)3 doivent être strictement séparés. En d'autres termes, tous les états doivent d'abord être mis à jour, puis toutes les variables motrices doivent être calculées, après quoi tous les taux de changement doivent être calculés. Si cette règle n'est pas appliquée rigoureusement, il existe un risque que certains taux concernent des états à l'heure actuelle tandis que d'autres concernent des états du pas de temps précédent. Dans WOFOST, les calculs de taux et d'états ne sont pas mélangés pendant un pas de temps mais sont tous exécutés séparément. Cela est pris en charge en regroupant tous les calculs d'état dans un seul bloc comme le font tous les calculs de taux pour les différentes composantes du modèle.

10 Remarques finales

10.1 Sensibilité et incertitude

WOFOST est un modèle, donc une simplification de la réalité. L'utilisateur doit toujours être prudent lorsqu'il tire des conclusions des résultats de simulation. La qualité des résultats du modèle ne peut pas surpasser la qualité des données d'entrée. Par conséquent, la sélection minutieuse des données d'entrée est de la plus haute importance. En règle générale, vous ne devez pas simuler la croissance des cultures sans expérimentation. L'expérimentation est nécessaire pour obtenir des paramètres de culture spécifiques et pour calibrer et vérifier les résultats du modèle.

Avant de calibrer WOFOST sur des données expérimentales, il est important de comprendre quels paramètres se rapportent à quels processus et quels paramètres sont sensibles et varient selon les variétés d'une culture. Un facteur de confusion est que la sensibilité des paramètres WOFOST peut varier selon les cultures, les emplacements et les saisons. De plus, la sensibilité des paramètres du modèle est également liée à la variable cible sélectionnée : les sensibilités des paramètres peuvent différer selon que la variable cible est le rendement de la culture, la biomasse totale de la culture ou l'utilisation de l'eau par la culture. Il est donc difficile de fournir des estimations exactes de la sensibilité des paramètres, bien que les directives d'étalonnage des annexes II et III donnent un bon aperçu des paramètres à choisir pour une analyse de sensibilité. De plus, des notebooks Jupyter sont fournis sur github qui guident l'utilisateur dans une analyse de sensibilité avec PCSE/WOFOST.

Lors de la réalisation d'une analyse de sensibilité, il est également important d'estimer des plages représentatives de paramètres du modèle. Nous avons observé que dans la littérature, les résultats d'analyses de sensibilité sont parfois rapportés avec des plages de paramètres bien trop larges pour être représentatifs d'une culture donnée. Souvent, ces plages de paramètres ont été obtenues en analysant les valeurs des paramètres du modèle sur toutes les cultures de la bibliothèque de cultures de WOFOST. Par exemple, l'efficacité de conversion en organes de stockage (CVO) varie de 0,4 (colza) à 0,85 (pomme de terre), mais cette plage est déterminée par le type de substance dont sont composés les organes de stockage. Les organes de stockage avec une concentration élevée de protéines et de lipides ont des efficacités de conversion bien inférieures à celles des cultures dont les organes de stockage stockent principalement de l'amidon (pomme de terre) ou du sucre (betterave sucrière). Cependant, le fait de définir la plage de paramètres pour CVO sur la plage complète (0,4 à 0,85)

3 Les variables d'état sont des quantités telles que la biomasse. Les variables motrices (ou fonctions de forçage) caractérisent l'influence de facteurs externes sur le système mais ne sont pas influencées par les processus au sein du système. Les exemples sont les variables météorologiques telles que le rayonnement et la température de l'air. Les variables de taux indiquent la vitesse à laquelle les variables d'état changent à un certain moment et sur une certaine période de temps. Les variables de taux sont calculées sur la base des variables d'état et motrices.

déterminer à tort que CVO est un paramètre sensible qui est sujet à l'étalonnage, alors qu'en réalité, CVO ne peut être déterminé qu'à partir d'expériences en laboratoire et non à partir de données observées sur le terrain. En général, la plage sur laquelle les paramètres peuvent être testés pour la sensibilité diminue des paramètres « libres » vers les paramètres « statiques » (voir annexe II). Les premiers peuvent être modifiés sur des plages assez larges, tandis que les seconds sont généralement fixes et ne doivent pas être modifiés sur plus de 10 % de leur valeur actuelle. Voir également la section 3.7 de la description du système WOFOST pour plus de détails et la sensibilité des paramètres WOFOST.

Un deuxième point de confusion avec l'analyse de sensibilité est que WOFOST contient un certain nombre de paramètres qui ne sont pas scalaires mais tabulaires décrivant la valeur du paramètre en fonction d'un autre état (généralement le stade de développement ou la température). L'étalonnage de ces paramètres et/ou la détermination de leur sensibilité est assez difficile car les paires XY dans un tel paramètre tabulaire ne peuvent pas être considérées comme indépendantes des autres paires XY (elles ont souvent une forme fonctionnelle). La meilleure approche pour une analyse de sensibilité sur des paramètres tabulaires est donc de les remplacer par des fonctions qui peuvent imiter la forme du paramètre mais permettent des ajustements en modifiant les valeurs des paramètres de fonction. Une telle approche a été mise en œuvre avec succès pour les tables de partitionnement en les remplaçant par des fonctions logistiques. Un exemple est disponible sous forme de bloc-notes Jupyter sur github.

L’incertitude est un autre aspect des résultats de simulation du modèle, qui couvre les exigences plus larges de l’application de WOFOST plutôt que la seule paramétrisation et sensibilité du modèle. Tout d’abord, les résultats de WOFOST se rapportent à un certain niveau de production théorique (Figure 1) qui suppose soit des conditions entièrement optimales, soit des limitations dues à l’eau ou aux macronutriments. Cependant, dans la pratique (par exemple dans les champs des agriculteurs), de nombreux autres facteurs limitatifs sont souvent présents, tels que les mauvaises herbes, les ravageurs/maladies ou le manque de (micro)nutriments. Plus la situation réelle s’écarte des niveaux de production théoriques simulés par WOFOST, moins les résultats du modèle seront représentatifs et incertains. Dans de nombreux cas, les résultats du modèle peuvent toujours être utilisés de manière relative (par exemple, comment se porte la saison en cours par rapport à la précédente), mais les valeurs absolues prédites par le modèle ne peuvent pas être utilisées directement et doivent être corrigées par des ajustements empiriques.

Une deuxième source d’incertitude est représentée par les entrées du modèle qui peuvent être divisées en conditions météorologiques, de culture, de sol et initiales. La disponibilité et la qualité des variables météorologiques se sont grandement améliorées ces dernières années, notamment grâce à la disponibilité de données de réanalyse telles que AgERA5 (XXX) ou NASA POWER (XXX). En conséquence, l'incertitude des données météorologiques a été considérablement réduite pour des variables telles que le rayonnement, la température et la vitesse du vent. Cependant, les données sur les précipitations restent une variable difficile à estimer ou à prévoir et l'incertitude dans les estimations des précipitations est souvent considérable dans les zones où il y a peu de stations météorologiques. L'incertitude sur les propriétés du sol est souvent importante en raison du manque de cartes détaillées des sols dans de nombreuses régions du monde.

En fonction des conditions météorologiques, cela peut se traduire par une grande incertitude sur les résultats simulés. La disponibilité de nouvelles ressources sur les sols telles que SoilGrids (de Sousa et al., 2020) a constitué une amélioration majeure par rapport aux cartes des sols précédentes et, en particulier pour les applications régionales, cela est souvent suffisant.

Cependant, pour les applications locales, l'impact des paramètres du sol doit être soigneusement évalué afin d'obtenir des résultats représentatifs pour les résultats de simulation limités en eau et en nutriments. Les conditions initiales telles que l'humidité initiale du sol peuvent également avoir un impact important sur les résultats de simulation. Heureusement, l'incertitude peut souvent être réduite en prenant un délai important avant le début de la culture. Cela permet de réduire les incertitudes dans les niveaux d'humidité du sol simulés (De Wit et al. 2013).

Enfin, l'agrogestion peut représenter une source majeure d'incertitude lorsque les calendriers de culture exacts et/ou les variétés de cultures sont désormais connus pour un lieu donné. Ratallino et al. (2021) ont démontré que des calendriers de culture mal définis en raison d'une mauvaise connaissance de l'agronomie locale ont un impact majeur sur les estimations du potentiel de rendement et des écarts de rendement. Cela démontre que toute application de WOFOST nécessite une bonne connaissance des pratiques agronomiques de la zone d'intérêt afin de réduire l'incertitude sur les résultats de WOFOST.

Malgré l'incertitude, qui est souvent inévitable avec les applications de modèles complexes comme WOFOST, il existe des outils disponibles afin de réduire l'incertitude sur les résultats de simulation. En particulier, l'utilisation d'observations externes (observations locales, observations par satellite ou capteurs IOT) des variables des cultures (LAI,

hauteur de la plante, concentration en N des feuilles) combinée à des algorithmes d'assimilation de données peut être un outil puissant pour mieux estimer les dates d'émergence, ajuster les sommes de température et modifier les paramètres de la canopée, ce qui conduit à de meilleurs résultats de simulation avec une incertitude plus faible (Gaso et al. 2021, Huang et al. 2019, Pan et al. 2019, Wit et al. 2012). Avec l'augmentation des volumes de données disponibles au niveau des champs individuels (et au-delà), on s'attend à ce que l'application de l'analyse des données fasse partie de la configuration opérationnelle de nombreuses applications de WOFOST.

10.2 Validation

Le modèle WOFOST a été appliqué et validé par de nombreux chercheurs dans des études menées dans le monde entier, couvrant un large éventail de types de cultures et de systèmes de culture (un aperçu des études est disponible sur le site Web WOFOST). Néanmoins, il existe des différences dans la rigueur avec laquelle WOFOST a été validé pour différents types de cultures. En général, WOFOST a été appliqué et validé de manière plus approfondie pour les cultures cultivées en Europe, notamment les céréales comme le maïs, le blé et l'orge, ainsi que les racines et tubercules comme la pomme de terre et la betterave sucrière. Les cultures oléagineuses comme le colza et le tournesol, ainsi que les céréales tropicales comme le riz, le millet et le sorgho, ont également été relativement bien étudiées. Le nombre d'études ayant appliqué et validé WOFOST est considérablement plus faible pour la canne à sucre et les légumineuses, le soja et les féveroles étant inclus dans certaines études, tandis que les légumineuses comme le haricot mungo, le pois d'Inde ou le niébé ont reçu très peu d'attention. Enfin, la simulation de cultures à fibres comme le coton a reçu une attention limitée.

Dans l’ensemble, il est valable d’affirmer que les concepts mis en œuvre par WOFOST pour simuler la croissance et la production de cultures arables ont été validés de manière exhaustive dans de nombreuses études. Cependant, pour les types de cultures qui ont été peu testés dans la pratique, il y aura plus d’incertitude et des expériences détaillées sur les cultures seront nécessaires afin de paramétrer et de valider le modèle WOFOST de manière plus approfondie.

10.3 Aptitude à l’utilisation et aux applications

La modélisation des systèmes de culture a été reconnue comme une technologie mature issue de la recherche scientifique (Holzworth et al., 2015), qui est actuellement appliquée dans des applications pertinentes pour la société, telles que l’analyse des écarts de rendement (Van Ittersum et al., 2013), la prévision du rendement des cultures (Wit de et al., 2020), le changement climatique (Ewert et al., 2015), la compréhension des réponses des cultures dans les essais sur le terrain et les circonstances (Asseng et al., 2013) et l’inclusion des effets de la productivité des cultures dans les décisions de gestion de l’eau (Hack-ten Broeke et al., 2019). Dans ces différents domaines, WOFOST a été mis en œuvre avec succès, à l'échelle locale et régionale, et a été validé par rapport aux données de phénologie et de rendement observées (voir également les annexes II, III et IV sur l'étalonnage et la validation).

Par exemple, WOFOST a été appliqué de manière opérationnelle au cours des 25 dernières années dans le cadre du système européen de prévision du rendement des cultures MARS (MCYFS). De nombreuses améliorations méthodologiques et logicielles ont été introduites en raison des exigences du système opérationnel. Les améliorations méthodologiques comprenaient des approches d'étalonnage à grande échelle (voir Boons-Prins et al., 1993 ; Ceglar et al., 2019), des améliorations de la robustesse et de la représentation des cultures d'hiver (y compris la destruction par l'hiver et la vernalisation). Voir pour plus d'informations Wit, et al. (2019).

Dans le cadre du Global Yield Gap Atlas (GYGA), WOFOST est utilisé pour estimer le potentiel de production agricole inexploité (voir le chapitre sur les niveaux de production) sur les terres agricoles existantes, en fonction du climat actuel et des ressources en sol et en eau disponibles (par exemple Schils et al., 2018 ; Van Ittersum et al., 201). Il comprend des directives spécifiques pour calibrer et valider les modèles dans le cadre du GYGA.

L'organisme néerlandais WaterVision Agriculture applique WOFOST pour évaluer les décisions de gestion hydrologique sur la production agricole au niveau du champ. Les pertes de production dues aux stress hydriques, oxygénés et/ou salins sont calculées pour le climat actuel et les scénarios climatiques futurs.

Dans le domaine du changement climatique, WOFOST a été utilisé pour étudier l'effet des changements de température et de concentration atmosphérique en dioxyde de carbone sur les rendements potentiels et pluviaux des cultures (par exemple Supit et al., 2012). Les performances des modèles de croissance des cultures dans l'évaluation des effets des changements climatiques ont été

étudiées dans plusieurs initiatives telles que l'AGMIP (le projet d'intercomparaison et d'amélioration des modèles agricoles ; Bassu et al., 2014 ; Ruane et al., 2016) et MACSUR (Modélisation de l'agriculture européenne avec le changement climatique pour la sécurité alimentaire ; Ewert et al., 2015). Récemment, WOFOST a été étendu avec des processus supplémentaires pour mieux simuler les réponses des cultures à la température critique (à la fois froide et chaude) et la réponse de l'assimilation des cultures aux changements du niveau de CO2 ambiant (voir Wit et al., 2019).

En outre, WOFOST a été utilisé par de nombreux chercheurs dans le monde entier et a été appliqué à de nombreuses cultures dans une large gamme de conditions climatiques et de gestion (voir portail WOFOST - lien). WOFOST a été utilisé pour analyser :

* le risque de rendement et la variabilité interannuelle du rendement ;
* la variabilité du rendement selon les types de sol ou selon une gamme de conditions agro-hydrologiques ;
* les différences entre les cultivars ; • importance relative des facteurs déterminants de la croissance ;
* stratégies de semis ;
* effets du changement climatique ;
* périodes critiques d'utilisation des machines agricoles.
* évaluations régionales du potentiel de rendement des cultures ;
* estimation des bénéfices maximaux de l'irrigation ;
* détection de conditions de croissance défavorables ;
* prévisions de rendement régionales.

En résumé, WOFOST a prouvé sa valeur dans différents domaines d'application en tant qu'outil robuste, pratique et fiable.

10.3 Aptitude à l'emploi et applications

La modélisation des systèmes de culture a été reconnue comme une technologie mature issue de la recherche scientifique (Holzworth et al., 2015), qui est actuellement appliquée dans des applications pertinentes pour la société, telles que l'analyse des écarts de rendement (Van Ittersum et al., 2013), la prévision du rendement des cultures (Wit de et al., 2020), le changement climatique (Ewert et al., 2015), la compréhension des réponses des cultures dans les essais sur le terrain et les circonstances (Asseng et al., 2013) et l'inclusion des effets de la productivité des cultures dans les décisions de gestion de l'eau (Hack-ten Broeke et al., 2019). Dans ces différents domaines, WOFOST a été mis en œuvre avec succès, à l'échelle locale et régionale, et a été validé par rapport aux données de phénologie et de rendement observées (voir également les annexes II, III et IV sur l'étalonnage et la validation).

Par exemple, WOFOST a été appliqué de manière opérationnelle au cours des 25 dernières années dans le cadre du système européen de prévision du rendement des cultures MARS (MCYFS). De nombreuses améliorations méthodologiques et logicielles ont été introduites en raison des exigences du système opérationnel. Les améliorations méthodologiques comprenaient des approches d'étalonnage à grande échelle (voir Boons-Prins et al., 1993 ; Ceglar et al., 2019), des améliorations de la robustesse et de la représentation des cultures d'hiver (y compris la destruction par l'hiver et la vernalisation). Voir pour plus d'informations Wit, et al. (2019).

Dans le cadre du Global Yield Gap Atlas (GYGA), WOFOST est utilisé pour estimer le potentiel de production agricole inexploité (voir le chapitre sur les niveaux de production) sur les terres agricoles existantes, en fonction du climat actuel et des ressources en sol et en eau disponibles (par exemple Schils et al., 2018 ; Van Ittersum et al., 201). Il comprend des directives spécifiques pour étalonner et valider les modèles dans le cadre du GYGA.

L'association néerlandaise WaterVision Agriculture utilise WOFOST pour évaluer les décisions de gestion hydrologique sur la production agricole au niveau du champ. Les pertes de production dues aux stress hydriques, oxygénés et/ou salins sont calculées pour le climat actuel et les scénarios climatiques futurs.

Dans le domaine du changement climatique, WOFOST a été utilisé pour étudier l'effet des changements de température et de concentration atmosphérique en dioxyde de carbone sur les rendements potentiels et pluviaux des cultures (par exemple Supit et al., 2012). La performance des modèles de croissance des cultures dans l'évaluation des effets des changements climatiques a été

étudiée dans plusieurs initiatives telles que l'AGMIP (le projet d'intercomparaison et d'amélioration des modèles agricoles ; Bassu et al., 2014 ; Ruane et al., 2016) et MACSUR (Modélisation de l'agriculture européenne avec le changement climatique pour la sécurité alimentaire ; Ewert et al., 2015). Récemment, WOFOST a été étendu avec des processus supplémentaires pour mieux simuler les réponses des cultures aux températures critiques (froid et chaud) et la réponse de l'assimilation des cultures aux changements du niveau de CO2 ambiant (voir Wit et al., 2019).

En outre, WOFOST a été utilisé par de nombreux chercheurs du monde entier et a été appliqué à de nombreuses cultures dans une large gamme de conditions climatiques et de gestion (voir portail WOFOST - lien). WOFOST a été utilisé pour analyser :

* le risque de rendement et la variabilité interannuelle du rendement ;
* la variabilité du rendement selon les types de sol ou sur une gamme de conditions agro-hydrologiques ;
* les différences entre les cultivars ;
* l'importance relative des facteurs déterminants de la croissance ;
* les stratégies de semis ;
* les effets du changement climatique ;
* les périodes critiques d'utilisation des machines agricoles.
* les évaluations régionales du potentiel de rendement des cultures ;
* l'estimation des avantages maximaux de l'irrigation ;
* la détection de conditions de croissance défavorables ;
* les prévisions de rendement régionales.

En résumé, WOFOST a prouvé sa valeur dans différents domaines d'application en tant qu'outil robuste, pratique et fiable.

10.4 Développement ultérieur de WOFOST

Les modèles de simulation des cultures nécessitent un investissement continu pour rester pertinents en tant qu'outil pour les études scientifiques ainsi que pour les applications pratiques telles que la gestion agricole ou l'estimation des besoins en engrais. Ces investissements doivent être réalisés pour couvrir tous les aspects de la maintenance du modèle :

- Développement de logiciels pour garantir que les implémentations du modèle restent à jour avec les développements récents des TIC (par exemple, le cloud computing, les interfaces avec de nouvelles sources de données, etc.)

- Collecte de données expérimentales sur les cultures pour l'étalonnage et la validation. Cela est nécessaire pour obtenir des ensembles de paramètres de culture validés pour les variétés modernes.

- Inclusion de nouvelles connaissances physiologiques améliorées sur les cultures pour inclure de nouveaux processus pertinents dans les conditions (climatiques) actuelles et futures

Au cours de la dernière décennie, des efforts considérables ont été consacrés au développement de nouvelles implémentations du modèle WOFOST. Une implémentation a été développée en Python, qui s'intègre bien à la pile de logiciels scientifiques et est très adaptée à la science et à l'éducation. Une deuxième implémentation a été développée en Java, qui présente des performances de modèle élevées, ce qui la rend particulièrement adaptée aux applications à grande échelle nécessitant des millions d'exécutions de modèles.

Contrairement au développement du logiciel, une attention limitée a été accordée à l'expérimentation pour mettre à jour la bibliothèque de modèles de cultures. Certaines expériences ont été menées pour le blé et plus récemment des expériences dédiées ont été menées pour la pomme de terre (dans le cadre du projet Holland Innovative Potato), mais pour de nombreuses autres cultures, les paramètres remontent essentiellement à 1970-1980. Cela pose problème en particulier pour les types de cultures pour lesquels WOFOST n'a guère été appliqué.

Enfin, l'inclusion de nouvelles connaissances physiologiques des cultures liées à WOFOST a reçu très peu d'attention. WOFOST 7.2 hérite de son noyau biophysique de WOFOST 6.0 avec seulement de petites modifications aux routines de développement phénologique. Heureusement, les versions WOFOST 7.3 et WOFOST 8.1 désormais publiées introduisent de nouveaux développements importants :

• WOFOST 8.1 simule la dynamique de l'azote dans la culture et calcule les taux de croissance limités par l'azote en reliant le taux d'assimilation brut de CO2 au niveau des feuilles à la teneur spécifique en azote des feuilles. De plus, il

inclut des options de réaffectation de la biomasse qui permettent de prendre en compte le transfert de biomasse des tiges/feuilles vers les organes de stockage, ce qui peut être important pour certaines cultures.

• Un nouveau bilan hydrique stratifié du sol avec une dynamique hydrique du sol nettement améliorée. Ce bilan hydrique se situe à mi-chemin entre le simple bilan hydrique du godet basculant et le modèle SWAP.

• Un nouveau module C/N du sol appelé SNOMIN qui a été conçu pour estimer la quantité d'azote disponible à partir de la décomposition de la matière organique du sol, des amendements organiques du sol et des engrais synthétiques.

• WOFOST 7.3 n'inclut pas la dynamique de l'azote mais inclut la réponse du CO2 à l'assimilation, des options de réaffectation de la biomasse et un lien avec le bilan hydrique stratifié du sol.

Ensemble, ces améliorations offrent de nouvelles opportunités pour simuler le transfert de carbone, d'azote et d'eau entre les cultures dans une rotation et permettent à WOFOST de travailler davantage au niveau d'un système de culture plutôt que d'une seule culture dans une rotation.

Pour le développement futur autour de WOFOST, nous recommandons de cibler le financement sur les aspects suivants :

- Obtenir des données expérimentales sur les cultures adaptées à la mise à jour et à la validation des ensembles de paramètres de culture WOFOST pour les cultivars modernes ainsi que la main-d'œuvre pour effectuer ces exercices d'étalonnage/validation. Cela est particulièrement pertinent pour les cultures C4, qui ne peuvent pas encore être simulées avec WOFOST 8.1. Une partie de ces données expérimentales peut être disponible à partir de référentiels de données ouverts (par exemple, CGIAR Guardian). Une partie devra être obtenue en mettant en place de nouvelles études expérimentales. Ces dernières devraient être réalisées en coopération avec d'autres groupes de Wageningen afin de maximiser la valeur de ces expériences grâce à une utilisation multiple. Voir également le tableau 6 pour un aperçu des différentes cultures dans WOFOST en ce qui concerne leur statut de validation/évaluation.

- Inclure des informations physiologiques nouvelles et améliorées dans WOFOST, y compris (mais sans s'y limiter) :

o Impact des événements extrêmes tels que le stress dû au froid et à la chaleur et leur impact sur divers autres processus tels que la phénologie, l'assimilation, la respiration et la répartition.

o Poursuite du développement de la physiologie racinaire et des interactions culture/sol en coopération avec les groupes de pédologie de Wageningen, y compris le modèle SWAP.

- - Poursuite du développement des applications de WOFOST à ​​l'échelle du champ et à l'échelle intra-champ, permettant ainsi d'intégrer des observations externes grâce à des techniques d'assimilation de données. De tels efforts sont en cours dans le cadre de la Digital Future Farm, mais nécessiteront davantage d'efforts, de tests et enfin de validation sur les rendements des agriculteurs pour démontrer les avantages.

- Accroître la visibilité de Wageningen UR et du modèle WOFOST, par exemple en améliorant l'application WOFOST-Online actuelle qui pourrait être développée davantage pour donner aux utilisateurs davantage d'options pour ajouter leurs propres données et observations et optimiser WOFOST pour leur cas spécifique.

Tableau 6. Statut des différentes cultures dans la bibliothèque de cultures WOFOST.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Crop simulated** | **Status** | **Recommendation** |
| Wheat, barley, maize, potato, sugar beet, rice, millet, sorghum, sunflower, rapeseed | Well tested and validated | Update parameterization for modern varieties and include new physiological insights |
| Sugar cane, field bean, soybean | Limited testing and validation | Update and validate current parameter sets with standard field trials. Test model at multiple sites in order to test stability of model results. |
| Mungbean, pidgeon pea, cowpea, cassava, cotton, fababean,  groundnut, sweet potato | Hardly any testing and validation | Detailed field experiments are required in order to estimate/validate basic plant traits (AMAX, SLA, etc.). Next, adaptation for different cultivars and  locations. Finally, test model for multiple sites to test stability of the model |
| New crops | New full parameterization required | Detailed field experiments are required in order to estimate basic plant traits (AMAX, SLA, etc.). Next, adaptation for different cultivars and locations.  Finally, test model for multiple sites to test stability of the model |

11 Implémentations

Nous fournissons plusieurs implémentations de WOFOST dans différents langages de programmation (FORTRAN, Python, Java). De plus, nous fournissons les ensembles de paramètres requis pour exécuter WOFOST pour différentes cultures et un ensemble de notebooks Jupyter qui démontrent les capacités de PCSE/WOFOST.

Actuellement, quatre implémentations de WOFOST sont disponibles auprès de l'Université et de la Recherche de Wageningen :

- PCSE/WOFOST : basé sur Python, versions 7.2, 7.3 et 8.1 : WOFOST implémenté dans l'environnement de simulation de cultures Python (PCSE) ;

- WISS/WOFOST : basé sur Java, version 7.2 : WOFOST implémenté dans le simulateur de systèmes intégrés de Wageningen (WISS), un framework Java ciblant le domaine de la modélisation agroécologique ;

- SWAP/WOFOST : basé sur Fortran, version 7.2 intégrée dans le système de modélisation sol-eau-atmosphère-plante (SWAP) écrit en Fortran90.

- Centre de contrôle WOFOST : basé sur Fortran, version 7.1.7 : l'implémentation originale de WOFOST écrite en FORTRAN77 et intégrée dans une interface utilisateur graphique. Cette implémentation est toujours disponible, mais n'est plus activement maintenue ;

Toutes ces implémentations héritent de leur noyau biophysique de WOFOST 6.0 mais diffèrent dans leurs capacités à gérer les E/S (fichier, base de données), leur interface utilisateur ou leur flexibilité générale. Les différences entre 7.1.7 et

7.2 sont l'intégration de l'effet de la vernalisation sur le développement phénologique.

# Annex I – Aperçu des variables du modèle

Les noms des variables concernent l'implémentation PCSE/WOFOST et sont classés par ordre alphabétique dans chaque module PCSE

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| VARIABLES | DESCRIPTION | UNIT | MIN | MAX | PCSE MODULE |
| campaign\_start\_date | Start date of this campaign | yyyy-mm-dd |  |  | Agromanagement |
| comment | Additional information crop management event | - |  |  | Agromanagement |
| crop\_end\_date | End date crop simulation | yyyy-mm-dd |  |  | Agromanagement |
| crop\_end\_type | End type crop simulation | maturity/harvest |  |  | Agromanagement |
| crop\_name | Crop name | - |  |  | Agromanagement |
| crop\_start\_date | Start date crop simulation | yyyy-mm-dd |  |  | Agromanagement |
| crop\_start\_type | Start type crop simulation | sowing/emergence |  |  | Agromanagement |
| event\_signal | Crop management event | e.g. apply\_npk or irrigate |  |  | Agromanagement |
| event\_state | State variable triggering cop management event | - |  |  | Agromanagement |
| events\_table | Quantifies crop management for certain day or state variable value | - |  |  | Agromanagement |
| max\_duration | Maximum duration crop simulation | days |  |  | Agromanagement |
| name | Name crop management event | - |  |  | Agromanagement |
| next\_campaign\_start\_date | Start date of next campaign | yyyy-mm-dd |  |  | Agromanagement |
| variety\_name | Variety name | - |  |  | Agromanagement |
| zero\_condition | How crop management is triggered in case of state variable | rising, falling, neither |  |  | Agromanagement |
| AMAX | Maximum leaf CO2 assimilation rate | -;kg ha-1hr-1 | 1 | 70 | Assimilation |
| AMAXTB | Maximum leaf CO2 assimilation rate as a function of development stage | -;kg ha-1 hr-1 | 1 | 70 | Assimilation |
| CO2 | Atmospheric CO2 level\* (ppm), default 360 | ppm | 0 | 700 | Assimilation |
| CO2AMAXTB | Multiplication factor for AMAX to account for an increasing CO2 concentration | ppm; - | 0 | 3 | Assimilation |
| CO2EFFTB | Multiplication factor for EFF to account for an increasing CO2 concentration (function of CO2) | ppm; - | 0 | 3 | Assimilation |
| DTGA | Daily total gross assimilation | kg CH2O ha-1day-1 | 0 | 1000 | Assimilation |
| EFF | Initial light-use efficiency of CO2 assimilation of single leaves | °C; (kg ha-1 hr-1)/(J m-2  s-1) | 0.4 | 0.5 | Assimilation |
| EFFTB | Initial light-use efficiency of CO2 assimilation of single leaves as function of mean daily temperature | °C; (kg ha-1hr-1)/(J m-2  s-1) | 0.4 | 0.5 | Assimilation |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| VARIABLES | DESCRIPTION | UNIT | MIN | MAX | PCSE MODULE |
| KDIF | Extinction coefficient for diffuse visible light | - | 0.44 | 1 | Assimilation |
| PGASS | Potential assimilation rate | kg CH2O ha-1day-1 | 0 | 1000 | Assimilation |
| TMNFTB | Reduction factor of gross assimilation rate as function of low minimum temperature | -;°C | 0 | 1 | Assimilation |
| TMPFTB | Reduction factor of AMAX as function of average temperature | -;°C | 0 | 1 | Assimilation |
| KDIFTB | Extinction coefficient for diffuse visible light as function of development stage | - | 0.44 | 1 | Assimilation / Evapotranspiration  / Leaf\_dynamics |
| ANGOT | Angot radiation at top of atmosphere | J m-2 day-1 | 0 | 36000000 | Astro |
| ATMTR | Daily atmospheric transmission | - | 0 | 1 | Astro |
| COSLD | Amplitude of sine of solar height | - | -1 | 1 | Astro |
| DAYL | Astronomical daylength (base = 0 degrees) | h | 0 | 24 | Astro |
| DAYLP | Astronomical daylength (base =-4 degrees) | h | 0 | 24 | Astro |
| DIFPP | Diffuse irradiation perpendicular to direction of light | J/m2.s | 0 | 36 | Astro |
| DSINBE | Daily total of effective solar height | s | 0 | 86400 | Astro |
| SINLD | Seasonal offset of sine of solar height | - | -1 | 1 | Astro |
| CFET | Correction factor for evapotranspiration in relation to the reference crop | - | 0.8 | 1.2 | Evapotranspiration |
| CO2TRATB | Multiplication factor for maximum transpiration rate TRAMX to account for an increasing CO2 concentration (function of CO2) | ppm; - | 0 | 3 | Evapotranspiration |
| DEPNR | Crop group number for soil water depletion (from 1 = drought- sensitive to 5 = drought-resistant) | - | 1 | 5 | Evapotranspiration |
| IDOS | Indicates oxygen stress on this day | true or false |  |  | Evapotranspiration |
| IDOST | Nr of days with oxygen stress | days | 0 | 250 | Evapotranspiration |
| IDWS | Indicates water stress on this day | true or false |  |  | Evapotranspiration |
| IDWST | Nr of days with water stress | days | 0 | 250 | Evapotranspiration |
| IOX | Flag controlling calculation of water-limited yield without (0) or with (1) accounting for oxygen shortage in root zone | - | 0 | 1 | Evapotranspiration |
| RFOS | Reduction factor for oxygen stress | - | 0 | 1 | Evapotranspiration |
| RFTRA | Reduction factor for crop transpiration | - | 0 | 1 | Evapotranspiration |
| RFWS | Reduction factor for water stress | - | 0 | 1 | Evapotranspiration |
| TRA | Actual transpiration rate from the specific crop canopy | cm day-1 | 0 | 2 | Evapotranspiration |
| TRAMX | Maximum transpiration rate from the plant canopy | cm day-1 | 0 | 2 | Evapotranspiration |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| VARIABLES | DESCRIPTION | UNIT | MIN | MAX | PCSE MODULE |
| IAIRDU | Presence (1) or absence (0) of airducts in the roots (1=can tolerate waterlogging) | - | 0 | 1 | Evapotranspiration/Root\_dynamic s |
| DALV | Death rate leaves due to aging | kg ha-1day-1 | 0 | 1000 | Leaf\_dynamics |
| DRLV | Death rate leaves as a combination of DSLV and DALV | kg ha-1day-1 | 0 | 1000 | Leaf\_dynamics |
| DSLV | Maximum of DLSV1, DSLV2, DSLV3 | kg ha-1day-1 | 0 | 1000 | Leaf\_dynamics |
| DSLV1 | Death rate leaves due to water stress | kg ha-1day-1 | 0 | 1000 | Leaf\_dynamics |
| DSLV2 | Death rate leaves due to self-shading | kg ha-1day-1 | 0 | 1000 | Leaf\_dynamics |
| DSLV3 | Death rate leaves due to frost kill | kg ha-1day-1 | 0 | 1000 | Leaf\_dynamics |
| DWLV | Dry weight of dead leaves | kg ha-1 | 0 | 100000 | Leaf\_dynamics |
| FYSAGE | Increase in physiological leaf age | - |  |  | Leaf\_dynamics |
| GLAIEX | Sink-limited leaf expansion rate (exponential curve) | ha ha-1day-1 | 0 | 0.5 | Leaf\_dynamics |
| GLASOL | Source-limited leaf expansion rate (biomass increase) | ha ha-1day-1 | 0 | 0.5 | Leaf\_dynamics |
| GRLV | Growth rate leaves | kg ha-1day-1 | 0 | 1000 | Leaf\_dynamics |
| LAI | Leaf area index | - | 0 | 12 | Leaf\_dynamics |
| LAIEM | LAI at emergence | - |  |  | Leaf\_dynamics |
| LAIEXP | Leaf area according to exponential growth curve | - | 0 | 12 | Leaf\_dynamics |
| LAIMAX | Maximum LAI reached during growth cycle | - |  |  | Leaf\_dynamics |
| LASUM | Total leaf area as sum of LV\*SLA, not including stem and pod area | - |  |  | Leaf\_dynamics |
| LV | Leaf biomass per leaf class | kg ha-1 | 0 | 100000 | Leaf\_dynamics |
| LVAGE | Leaf age per leaf class | day | 0 | 200 | Leaf\_dynamics |
| LVSUM | Sum of LV | kg ha-1 | 0 | 100000 | Leaf\_dynamics |
| PERDL | Maximum relative death rate of leaves due to water stress | -; kg kg-1 day-1 | 0 | 0.1 | Leaf\_dynamics |
| RGRLAI | Maximum relative increase in LAI | ha ha-1 day-1 | 0.007 | 0.5 | Leaf\_dynamics |
| SLA | Specific leaf area per leaf class | kg ha-1 | 0 | 100000 | Leaf\_dynamics |
| SLAT | Specific leaf area for current time step, adjusted for source/sink limited leaf expansion rate | ha.kg-1 | 0 | 0.0042 | Leaf\_dynamics |
| SLATB | Specific leaf area as a function of development stage | -; ha kg-1 | 0.0007 | 0.0042 | Leaf\_dynamics |
| SPAN | Life span of leaves growing at 35°C | day | 17 | 50 | Leaf\_dynamics |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| VARIABLES | DESCRIPTION | UNIT | MIN | MAX | PCSE MODULE |
| TBASE | Lower threshold temperature for ageing of leaves | °C | -10 | 10 | Leaf\_dynamics |
| TWLV | Total weight of leaves | kg ha-1 | 0 | 100000 | Leaf\_dynamics |
| WLV | Dry weight of living leaves | kg ha-1 | 0 | 100000 | Leaf\_dynamics |
| TDWI | Initial total crop dry weight | kg ha-1 | 0.5 | 300 | Leaf\_dynamics/Root\_dynamics/St em\_dynamics/Storage\_organ\_dy namics |
| FL | Fraction partitioned to leaves | - | 0 | 1 | Partitioning |
| FLTB | Fraction of above ground dry matter increase partitioned to leaves as a function of development stage | -;mass mass-1 | 0 | 1 | Partitioning |
| FO | Fraction partitioned to storage organs | - | 0 | 1 | Partitioning |
| FOTB | Fraction of above ground dry matter increase partitioned to storage organs as a function of development stage | -;mass mass-1 | 0 | 1 | Partitioning |
| FR | Fraction partitioned to roots | - | 0 | 1 | Partitioning |
| FRTB | Fraction of total dry matter increase partitioned to roots as a function of development stage | -;mass mass-1 | 0 | 1 | Partitioning |
| FS | Fraction partitioned to stems | - | 0 | 1 | Partitioning |
| FSTB | Fraction of above ground dry matter increase partitioned to stems as a function of development stage | -;mass mass-1 | 0 | 1 | Partitioning |
| DLC | Critical daylength for development (lower threshold) | hr | 6 | 18 | Phenology |
| DLO | Optimum daylength for development | hr | 6 | 18 | Phenology |
| DOA | Anthesis date | - |  |  | Phenology |
| DOE | Emergence date | - |  |  | Phenology |
| DOH | Harvest date | - |  |  | Phenology |
| DOM | Maturity date | - |  |  | Phenology |
| DOS | Sowing date | - |  |  | Phenology |
| DOV | Date when vernalisation requirements are fulfilled | - |  |  | Phenology |
| DTSMTB | Daily increase in temperature sum as function of average temperature | °C.day | 0 | 38 | Phenology |
| DTSUM | Increase in temperature sum for anthesis or maturity | °C | 0 | 30 | Phenology |
| DTSUME | Increase in temperature sum for emergence | °C | 0 | 30 | Phenology |
| DVR | Development rate | day-1 | 0 | 1 | Phenology |
| DVS | Crop development state (-0.1 = sowing; 0 = emergence; 1 = flowering; 2 = maturity) | - | -0.1 | 2 | Phenology |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| VARIABLES | DESCRIPTION | UNIT | MIN | MAX | PCSE MODULE |
| DVSEND | Development stage at harvest (= 2.0 at maturity) (WOFOST- WISS has default DVS = 2 as end value) | - | 1 | 2.5 | Phenology |
| DVSI | Initial crop development stage | - | -0.1 | 0.5 | Phenology |
| ISVERNALISED | Boolean reflecting the vernalisation state of the crop | true or false |  |  | Phenology |
| STAGE | Current phenological stage | emerging, vegetative, reproductive, mature |  |  | Phenology |
| TBASEM | Lower threshold temperature for emergence | °C | -10 | 8 | Phenology |
| TEFFMX | Maximum effective temperature for emergence | °C | 18 | 32 | Phenology |
| TSUM | Temperature sum | °C.day | 0 | 3000 | Phenology |
| TSUM1 | Temperature sum from emergence to anthesis | °C.day | 150 | 1050 | Phenology |
| TSUM2 | Temperature sum from anthesis to maturity | °C.day | 600 | 1550 | Phenology |
| TSUME | Temperature sum for emergence | °C.day | 0 | 170 | Phenology |
| TSUMEM | Temperature sum from sowing to emergence | °C.day | 0 | 170 | Phenology |
| VERN | Vernalisation state | day | 0 | 100 | Phenology |
| VERNBASE | Base vernalization requirement in pre-yield formation phase | day | 0 | 100 | Phenology |
| VERNDVS | Critical DVS for vernalization to switch off in pre-yield formation phase | - | 0 | 1 | Phenology |
| VERNFAC | Reduction factor on development rate due to vernalisation effect | - |  |  | Phenology |
| VERNR | Rate of vernalisation | - |  |  | Phenology |
| VERNRTB | Temperature response function for vernalization in pre-yield formation phase | °C; - | 0 | 1 | Phenology |
| VERNSAT | Saturated vernalization requirement in pre-yield formation phase | day | 0 | 100 | Phenology |
| IDSL | Switch for phenological development options | 0 = temperature only, 1= including daylength,  2 = including vernalization | 0 | 1 | Phenology/Abioticdamage |
| ANGSTA | Ångström coefficient A | - | 0 | 1 | Reference\_ET |
| ANGSTB | Ångström coefficient B | - | 0 | 1 | Reference\_ET |
| ETMODEL | Method to calculate canopy reference | PM = Penman-Monteith method, P = modified  Penman method |  |  | Reference\_ET |
| PMRES | Potential maintenance respiration rate | kg CH2O ha-1day-1 | 0 | 1000 | Respiration |
| Q10 | Relative change in respiration rate per 10°C temperature change | - | 1.5 | 2 | Respiration |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| VARIABLES | DESCRIPTION | UNIT | MIN | MAX | PCSE MODULE |
| RFSETB | Reduction factor for senescence as function of development stage | - | 0.25 | 1 | Respiration |
| RML | Relative maintenance respiration rate leaves | kg(CH2O) kg-1 day-1 | 0.002 | 0.03 | Respiration |
| RMO | Relative maintenance respiration rate storage organs | kg(CH2O) kg-1 day-1 | 0.002 | 0.03 | Respiration |
| RMR | Relative maintenance respiration rate roots | kg(CH2O) kg-1 day-1 | 0.002 | 0.03 | Respiration |
| RMS | Relative maintenance respiration rate stems | kg(CH2O) kg-1 day-1 | 0.002 | 0.03 | Respiration |
| DRRT | Death rate root biomass | kg ha-1day-1 | 0 | 1000 | Root\_dynamics |
| DWRT | Dry weight of dead roots | kg ha-1 | 0 | 100000 | Root\_dynamics |
| GRRT | Growth rate root biomass | kg ha-1day-1 | 0 | 1000 | Root\_dynamics |
| GWRT | Net change in root biomass | kg ha-1day-1 | 0 | 1000 | Root\_dynamics |
| RD | Rooting depth | cm | 10 | 150 | Root\_dynamics |
| RDI | Initial rooting depth at emergence | cm | 10 | 50 | Root\_dynamics |
| RDMCR | Maximum rooting depth of mature crop (plant characteristic) | cm | 50 | 400 | Root\_dynamics |
| RDRRTB | Relative death rate of roots as a function of development stage | -; kg kg-1 day-1 | 0 | 0.02 | Root\_dynamics |
| RR | Growth rate root depth | cm | 0 | 3 | Root\_dynamics |
| RRI | Daily increase in rooting depth | cm day-1 | 0 | 3 | Root\_dynamics |
| TWRT | Total weight of roots | kg ha-1 | 0 | 100000 | Root\_dynamics |
| WRT | Dry weight of living roots | kg ha-1 | 0 | 100000 | Root\_dynamics |
| DRST | Death rate stem biomass | kg ha-1day-1 | 0 | 1000 | Stem\_dynamics |
| DWST | Dry weight of dead stems | kg ha-1 | 0 | 100000 | Stem\_dynamics |
| GRST | Growth rate stem biomass | kg ha-1day-1 | 0 | 1000 | Stem\_dynamics |
| GWST | Net change in stem biomass | kg ha-1day-1 | 0 | 1000 | Stem\_dynamics |
| RDRSTB | Relative death rate of stems as a function of development stage | -; kg kg-1 day-1 | 0 | 0.04 | Stem\_dynamics |
| SAI | Stem Area Index | - |  |  | Stem\_dynamics |
| SSATB | Specific stem area as a function of development stage | -; ha kg-1 | 0.0003 | 0.0003 | Stem\_dynamics |
| TWST | Total weight of stems | kg ha-1 | 0 | 100000 | Stem\_dynamics |
| WST | Dry weight of living stems | kg ha-1 | 0 | 100000 | Stem\_dynamics |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| VARIABLES | DESCRIPTION | UNIT | MIN | MAX | PCSE MODULE |
| DRSO | Death rate storage organs | kg ha-1day-1 | 0 | 1000 | Storage\_organ\_dynamics |
| DWSO | Dry weight of dead storage organs | kg ha-1 | 0 | 100000 | Storage\_organ\_dynamics |
| GRSO | Growth rate storage organs | kg ha-1day-1 | 0 | 1000 | Storage\_organ\_dynamics |
| GWSO | Net change in storage organ biomass | kg ha-1day-1 | 0 | 1000 | Storage\_organ\_dynamics |
| PAI | Pod Area Index | - |  |  | Storage\_organ\_dynamics |
| SPA | Specific pod area | ha kg-1 | 0.0008 | 0.003 | Storage\_organ\_dynamics |
| TWSO | Total weight of storage organs | kg ha-1 | 0 | 100000 | Storage\_organ\_dynamics |
| WSO | Dry weight of living storage organs | kg ha-1 | 0 | 100000 | Storage\_organ\_dynamics |
| DSLR | Days since last rainfall | day | 0 | 200 | WaterbalanceFD |
| DSOS | Days since start of oxygen shortage | day | 0 | 10 | WaterbalanceFD |
| EVST | Cumulated evaporation from soil | cm | 0 | 100 | WaterbalanceFD |
| EVWT | Cumulated evaporation from surface water layer | cm | 0 | 100 | WaterbalanceFD |
| IFUNRN | Flag indicating the way the non-infiltrating fraction of rainfall is determined: 0 = fraction is fixed at NOTINF; 1 = fraction depends on NOTINF and on daily rainfall as given by NINFTB | - | 0 | 1 | WaterbalanceFD |
| K0 | Hydraulic conductivity of saturated soil | cm day-1 | 0.1 | 14 | WaterbalanceFD |
| KSUB | Maximum percolation rate of water to subsoil | cm day-1 | 0.1 | 14 | WaterbalanceFD |
| LOSST | Cumulated loss of water by deep drainage | cm | 0 | 100 | WaterbalanceFD |
| NOTINF | Non-infiltrating fraction: if IFUNRN=0 non-infiltrating fraction of rainfall, if IFUNRN=1 maximum non-infiltrating fraction | - | 0 | 1 | WaterbalanceFD |
| PERCT | Cumulated percolation | cm | 0 | 100 | WaterbalanceFD |
| RAINT | Total precipitation since start of season | cm | 0 | 100 | WaterbalanceFD |
| RDM | Maximum rooting depth (determined by crop and soil) | cm | 10 | 150 | WaterbalanceFD |
| SM | Actual soil moisture content in rooted zone | - | 0.01 | 0.9 | WaterbalanceFD |
| SMLIM | Maximum initial soil moisture in rooted zone (will be forced between SMW and SM0) | cm | 0 | 10 | WaterbalanceFD |
| SOPE | Maximum percolation rate of water through the root zone | cm day-1 | 0 | 10 | WaterbalanceFD |
| SS | Surface storage | cm | 0 | 2 | WaterbalanceFD |
| SSI | Initial surface storage | cm | 0 | 2 | WaterbalanceFD |
| SSMAX | Maximum surface storage capacity | cm | 0 | 2 | WaterbalanceFD |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| VARIABLES | DESCRIPTION | UNIT | MIN | MAX | PCSE MODULE |
| TOTINF | Cumulated infiltration | cm | 0 | 100 | WaterbalanceFD |
| TOTIRR | Total amount of effective irrigation | cm | 0 | 100 | WaterbalanceFD |
| TSR | Surface runoff | cm day-1 | 0 | 14 | WaterbalanceFD |
| W | Amount of water (=depth) in rooted zone | cm | 0 | 150 | WaterbalanceFD |
| WAV | Initial amount of water in rootable zone in excess of wilting point, but not exceeding SMLIM (will be cutoff) | cm | 0 | 50 | WaterbalanceFD |
| WBALRT | Checksum for root zone waterbalance | cm | 0 | 0.0001 | WaterbalanceFD |
| WBALTT | Checksum for total waterbalance | cm | 0 | 0.0001 | WaterbalanceFD |
| WDRT | Water addition to rooted zone by root growth (WDRT starts with initial water) | cm | 0 | 20 | WaterbalanceFD |
| WI | Initial amount of water in the root zone | cm | 0 | 150 | WaterbalanceFD |
| WLOW | Amount of water (=depth) in unrooted zone (zone between current rooting depth and maximum rooting depth) | cm | 0 | 150 | WaterbalanceFD |
| WLOWI | Initial amount of water in the subsoil | cm | 0 | 150 | WaterbalanceFD |
| WTRAT | Total water lost as transpiration as calculated by the water balance | cm | 0 | 100 | WaterbalanceFD |
| WWLOW | Amount of water in whole rootable zone | cm | 0 | 150 | WaterbalanceFD |
| CRAIRC | Critical soil air content for aeration (used when IOX = 1) | cm³ cm-3 | 0.04 | 0.1 | WaterbalanceFD/Evapotranspirati on |
| EVSMX | Maximum evaporation rate from a soil surface below the crop canopy | cm day-1 | 0 | 1 | WaterbalanceFD/Evapotranspirati on |
| EVWMX | Maximum evaporation rate from a water surface below the crop canopy | cm day-1 | 0 | 1 | WaterbalanceFD/Evapotranspirati on |
| SM0 | Soil moisture content of saturated soil | cm³ cm-3 | 0.3 | 0.9 | WaterbalanceFD/Evapotranspirati on |
| SMFCF | Soil moisture content at field capacity | cm³ cm-3 | 0.05 | 0.74 | WaterbalanceFD/Evapotranspirati on |
| SMW | Soil moisture content at wilting point | cm³ cm-3 | 0.01 | 0.35 | WaterbalanceFD/Evapotranspirati on |
| RDMSOL | Maximum rootable depth of soil | cm | 10 | 150 | WaterbalanceFD/Root\_dynamics |
| ELEV | Altitude | m | -300 | 7000 | WeatherDataContainer |
| IRRAD | Global radiation sum at earth surface | J m-2 day-1 | 0 | 36000000 | WeatherDataContainer |
| LAT | Latitude | dd | -90 | 90 | WeatherDataContainer |
| LON | Longitude | dd | 0 | 360 | WeatherDataContainer |
| RAIN | Precipitation sum of the day | cm day-1 | 0 | 14 | WeatherDataContainer |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| VARIABLES | DESCRIPTION | UNIT | MIN | MAX | PCSE MODULE |
| SNOWDEPTH | Snow depth | cm | 0 | 100 | WeatherDataContainer |
| TEMP | Mean daily temperature (TMIN + TMAX)/2 | °C | -35 | 50 | WeatherDataContainer |
| TMAX | Maximum temperature | °C | -20 | 50 | WeatherDataContainer |
| TMIN | Minimum temperature | °C | -35 | 35 | WeatherDataContainer |
| VAP | Mean vapour pressure | hPa | 0 | 35 | WeatherDataContainer |
| WIND | Mean windspeed at 2 m above earth surface | m s-1 | 0 | 15 | WeatherDataContainer |
| E0 | Potential evaporation rate from a free water surface | cm day-1 | 0 | 2 | WeatherDataContainer/Reference  \_ET |
| ES0 | Potential evaporation rate from a bare soil surface | cm day-1 | 0 | 2 | WeatherDataContainer/Reference  \_ET |
| ET0 | Potential evapo(transpi)ration rate from a general crop canopy | cm day-1 | 0 | 2 | WeatherDataContainer/Reference  \_ET |
| ADMI | Aboveground dry matter increase | kg ha-1day-1 | 0 | 1000 | Wofost |
| ASRC | Net available assimilates (GASS - MRES) | kg CH2O ha-1day-1 | 0 | 1000 | Wofost |
| CTRAT | Cumulated crop transpiration | cm | 0 | 100 | Wofost |
| CVL | Conversion efficiency of assimilates into leaf | mass mass-1 | 0.6 | 0.76 | Wofost |
| CVO | Conversion efficiency of assimilates into storage organ | mass mass-1 | 0.45 | 0.85 | Wofost |
| CVR | Conversion efficiency of assimilates into root | mass mass-1 | 0.65 | 0.76 | Wofost |
| CVS | Conversion efficiency of assimilates into stem | mass mass-1 | 0.63 | 0.76 | Wofost |
| DAY | Date | - |  |  | Wofost |
| DMI | Total dry matter increase, calculated as ASRC times a weighted conversion efficiency | kg ha-1day-1 | 0 | 1000 | Wofost |
| DOF | Date representing the day of finish of the crop simulation | - |  |  | Wofost |
| FINISH\_TYPE | String representing the reason for finishing the simulation: maturity, harvest, leave death, etc | - |  |  | Wofost |
| GASS | Assimilation rate corrected for water stress | kg CH2O ha-1day-1 | 0 | 1000 | Wofost |
| GASST | Total gross assimilation | kg CH2O ha-1 | 0 | 400000 | Wofost |
| HI | Harvest Index | - |  |  | Wofost |
| MRES | Actual maintenance respiration rate, taking into account that MRES <= GASS | kg CH2O ha-1day-1 | 0 | 1000 | Wofost |
| MREST | Total gross maintenance respiration | kg CH2O ha-1 | 0 | 400000 | Wofost |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| VARIABLES | DESCRIPTION | UNIT | MIN | MAX | PCSE MODULE |
| TAGP | Total above ground production | kg ha-1 | 0 | 150000 | Wofost |

Annexe II - Procédures d'étalonnage des paramètres de culture WOFOST

Pour appliquer WOFOST à ​​une variété de culture spécifique et à des conditions spécifiques en ce qui concerne le climat et les conditions du sol, un étalonnage du modèle est souvent nécessaire. Dans un étalonnage de modèle, le nombre de variables de modèle qui peuvent être modifiées est énorme. Par conséquent, l'étalonnage du modèle doit être effectué dans un certain ordre. Une procédure d'étalonnage pour les différentes parties de WOFOST est décrite dans cette annexe. Alors que cette annexe donne une bonne introduction à la procédure d'étalonnage et aux principaux paramètres à étalonner, l'annexe III fournit un aperçu complet des paramètres qui pourraient être étalonnés dans certaines circonstances. L'annexe IV fournit les informations expérimentales requises pour l'étalonnage de WOFOST.

L'étalonnage du modèle est d'abord effectué pour une situation de production potentielle. Cela nécessite des informations provenant d'essais sur les cultures dans des conditions de production potentielles. Cela signifie que la croissance des cultures n'est pas limitée par un excès ou une pénurie d'eau ou par une pénurie de nutriments, que les pertes de rendement dues à la concurrence des mauvaises herbes, aux infestations de ravageurs et de maladies sont pratiquement nulles et que la réduction de la croissance due à d'autres facteurs (mauvaise structure du sol, salinité ou acidité) est également évitée. Cela nécessite une gestion optimale des cultures et un apport en nutriments, une irrigation et un drainage, une protection des cultures, etc., qui ne se trouvent en général que dans des essais bien menés. Ensuite, l'étalonnage du modèle est effectué pour la situation de production limitée en eau. Cela nécessite des informations provenant d'expériences sur les cultures dans des conditions de limitation en eau. Cela signifie que la croissance des cultures peut être limitée par un excès ou un manque d'eau, car aucune eau d'irrigation n'est appliquée et le drainage peut éventuellement être limité. Cependant, la gestion des cultures, l'apport en nutriments et la protection des cultures doivent également être optimaux dans ces expériences.

L'étalonnage du modèle est effectué d'abord pour le potentiel (aspects n° 1, 2 et 3 de WOFOST) puis pour la situation de production limitée en eau (aspects n° 4, 5 et 6) dans l'ordre suivant :

1. Durée de la période de croissance et phénologie ;

2. Interception de la lumière et production potentielle de biomasse ;

3. Répartition de l'assimilation entre les organes de la culture ;

4. Disponibilité en eau ;

5. Évapotranspiration ;

6. Production limitée en eau.

Dans la section suivante, plusieurs paramètres de culture sont introduits entre parenthèses. Pour plus d'informations sur ces paramètres de culture et des descriptions détaillées des processus, veuillez consulter l'annexe I et la description du système du modèle de systèmes de culture WOFOST 7.2 (Wit de et al, 2020.).

1 Durée de la période de croissance et phénologie

La durée de la période de croissance est la période entre l'émergence de la culture et la date de maturité ou de sénescence de la culture (jaunissement des feuilles). La production totale de biomasse est égale à la production quotidienne moyenne de biomasse multipliée par la durée totale de croissance ; cette durée de croissance doit donc être bien simulée pour une prédiction fiable de la biomasse et du rendement.

La date de semis ou l'émergence de la culture est une donnée de gestion importante pour WOFOST. Si la date de semis est utilisée comme donnée d'entrée, la date d'émergence est calculée sur la base d'une somme de température du semis à l'émergence (TSUMEM). Dans ce cas, TSUMEM doit être étalonné sur les dates de semis et d'émergence observées lors d'expériences sur le terrain avec la même variété de culture.

La date de maturité de la culture dans WOFOST est calculée sur la base de deux paramètres décrivant la somme de température requise : TSUM1 décrit la somme de température de l'émergence à l'anthèse (floraison) et TSUM2 de l'anthèse à la maturité. L'augmentation quotidienne de la somme de température est généralement égale à la température moyenne quotidienne moins une température de base (par exemple 0 °C pour le blé). La phénologie de la culture est exprimée sous la forme d'un stade de développement (variable DVS) qui est le rapport entre la somme de température accumulée et les paramètres TSUM1 et TSUM2. Le DVS atteint 1 à l'anthèse et 2 à maturité.

Une culture produit non seulement de la biomasse mais passe par plusieurs stades de développement phénologique. En fonction du stade phénologique (c'est-à-dire DVS), WOFOST attribue la biomasse produite aux

différents organes de la culture (voir également l'aspect 3). Par exemple, si DVS >1, tous les assimilats produits par une culture de blé sont attribués aux grains. Ceci montre l'importance de calibrer correctement TSUM1 et TSUM2, par exemple, pour obtenir une date d'anthèse correcte. Par exemple, une date d'anthèse simulée trop tard entraîne une biomasse verte trop élevée et un faible rendement en grains.

2 Interception de la lumière et production potentielle de biomasse

La production quotidienne de biomasse dans une situation de production potentielle dépend principalement de la quantité d'irradiation interceptée. Pour la plupart des cultures, la canopée est complètement fermée pendant la période de croissance principale et presque toute l'irradiation est interceptée. Comme sur une base hebdomadaire (ou plus longue), la variation de l'irradiation est généralement limitée, la production de biomasse par semaine est souvent assez constante pendant la partie principale de la période de croissance. Il en résulte une augmentation linéaire de la biomasse avec le temps pendant la période de croissance principale. L'évolution temporelle de la production totale de biomasse pour la plupart des cultures peut être décrite par trois phases :

a) phase de croissance exponentielle avec de petites plantes pendant la première période de croissance, interception de la lumière incomplète (mais en augmentation exponentielle) et donc production de biomasse faible mais en augmentation rapide ;

b) phase de croissance principale linéaire avec interception de la lumière presque complète et production importante de biomasse ;

c) phase de croissance décroissante avec des feuilles mourantes et une production de biomasse en diminution rapide jusqu'à la mort finale de la canopée.

La production totale de biomasse peut être estimée approximativement à partir de la production quotidienne moyenne de biomasse pendant la phase de croissance linéaire multipliée par la durée de la phase de croissance linéaire plus un quart de la durée des phases de croissance exponentielle et décroissante. Cela indique la forte relation entre la production de biomasse atteignable et donc le niveau de rendement, et la durée de la phase de croissance linéaire. L'établissement rapide de la canopée en raison de conditions de croissance optimales et d'un taux de semis élevé d'une part et d'un contrôle optimal des ravageurs et des maladies qui retarde la sénescence et les dommages des feuilles d'autre part, se traduit par la phase de croissance linéaire la plus longue et la production de biomasse la plus élevée.

Si l'indice de surface foliaire simulé (LAI) ou la fraction de lumière interceptée est trop élevé mais que la quantité de biomasse foliaire est bien simulée, le LAI peut être abaissé en saisissant une surface foliaire spécifique inférieure (SLATB, ha de surface foliaire/kg de masse foliaire). Si le LAI devient plus bas, les valeurs simulées pour l'interception de la lumière et donc la production de biomasse deviennent également plus basses.

Si la production totale simulée au-dessus du sol est trop faible par rapport à la production de biomasse observée à la récolte, l'étalonnage doit être axé sur le taux de photosynthèse quotidien. Ce taux dépend de la courbe de réponse photosynthèse-lumière, dont l'angle initial (EFFTB) est généralement constant et dont le maximum (AMAXTB) peut être modifié. Le maximum est souvent spécifique à la variété de culture et diminue en cas de pénurie de nutriments et de vieillissement de la canopée en raison d'une diminution de la teneur en chlorophylle.

L'évolution temporelle simulée du LAI et de l'interception de la lumière au début et à la fin de la période de croissance peut également être calibrée d'une manière différente de celle décrite ci-dessus. Pendant la phase initiale d'établissement de la culture, le LAI est largement basé sur le LAI à l'émergence (calculé à partir du TDWI) et sur l'augmentation relative maximale (limitée par le puits ou la croissance des feuilles) du LAI (RGRLAI). Ces deux paramètres affectent fortement l'augmentation initiale du LAI et donc la durée jusqu'à la phase de croissance linéaire avec interception complète de la lumière. L'évolution temporelle simulée du LAI pendant la période de croissance finale est fortement affectée par la durée de vie des feuilles (SPAN). Une valeur plus élevée pour SPAN entraîne une période plus longue pendant laquelle les feuilles restent vertes et productives et, par conséquent, un LAI plus élevé et donc une production de biomasse à l'approche de la maturité de la culture.

3 Répartition des assimilats entre les organes de la culture

Une culture ne produit pas seulement de la biomasse mais passe par plusieurs stades phénologiques. Par exemple, le blé a des périodes d'établissement et de première croissance, une période de croissance végétative (tallage et développement de l'épi), une période de floraison (anthèse) et une période de remplissage et de maturation des grains. La durée de ces périodes peut être calculée à partir des sommes de température (voir aspect 1 : Durée de la période de croissance et

phénologie). WOFOST ne décrit pas réellement la formation des organes de la culture mais il alloue les assimilats produits aux différents organes de la culture en fonction du stade de développement phénologique de la culture. L'allocation des assimilats produits aux différents organes de la culture dans la simulation WOFOST est importante principalement pour deux raisons : premièrement, elle détermine la masse foliaire et donc le LAI et l'interception de la lumière ; deuxièmement, elle détermine l'allocation aux produits économiques (grains, racines, etc.) et donc le niveau de rendement et l'indice de récolte.

Pour l'allocation, WOFOST utilise des facteurs de partitionnement (FLTB, FOTB, FSTB et FRTB) en fonction du DVS. Par exemple, pour le blé, si DVS<0,3, la majeure partie des assimilats est allouée aux racines et aux feuilles et lorsque DVS >1, tous les assimilats sont alloués aux grains. De cette manière, différentes variétés de cultures peuvent être décrites dans les simulations WOFOST. Par exemple, une variété de blé avec une période relativement longue jusqu'à l'anthèse (TSUM1 élevé) et une période relativement courte de l'anthèse à la date de maturité (TSUM2 faible) donne une grande biomasse verte, un faible rendement en grains et donc un indice de récolte relativement faible. Pour une production de grains de blé plus élevée, la variété doit produire moins de biomasse verte et doit produire et remplir les grains pendant une période plus longue, ce qui entraîne un rapport plus élevé entre le rendement en grains et la biomasse totale (par exemple, indice de récolte - HI). Cela nécessite une variété avec un TSUM1 réduit et un TSUM2 augmenté.

Dans une situation où la répartition simulée des assimilats aux différents organes de la culture est clairement différente de la répartition observée des assimilats et où les dates des principaux stades phénologiques (c.-à-d. émergence, anthèse, maturité) sont bien simulées, les facteurs de répartition FLTB, FOTB, FSTB et FRTB doivent être modifiés.

4 Disponibilité en eau

Les sections suivantes (4-6) décrivent l'étalonnage du modèle WOFOST pour des conditions de limitation en eau. Dans cette section, la disponibilité en eau est abordée et dans les sections suivantes, l'utilisation de l'eau par évapotranspiration et la production limitée en eau qui en résulte.

La disponibilité en eau est déterminée d'abord par les caractéristiques physiques du sol et ensuite par le bilan hydrique. Dans la section 4-6, nous nous concentrons sur la mise en œuvre d'un modèle simple de seau d'eau à une seule couche. Le bilan hydrique dans la zone racinaire pendant la période de croissance est égal à la différence entre l'apport en eau provenant des précipitations et de l'irrigation et les pertes en eau par transpiration des cultures, évaporation du sol et percolation vers les couches plus profondes du sol. Les caractéristiques physiques du sol déterminent la quantité d'eau qui peut être stockée au maximum dans le sol et qui peut être fournie à la culture.

À quelques endroits, le niveau de la nappe phréatique est peu profond et la remontée capillaire des nappes phréatiques peut entraîner un apport en eau supplémentaire considérable. Cela nécessite des informations supplémentaires spécifiques à l'emplacement qui ne sont souvent pas disponibles, telles que la relation entre la conductivité hydraulique et la remontée capillaire du sol, l'évolution temporelle du niveau des eaux souterraines et le degré de drainage artificiel. Comme ces zones à eaux souterraines peu profondes (bassins fluviaux de basse altitude et deltas fluviaux) ne se produisent pas très souvent, cette contribution des eaux souterraines à la disponibilité en eau n'est pas traitée ci-après. Cependant, notez que les différentes implémentations de bilans hydriques pour WOFOST incluent des solutions pour gérer l'effet des eaux souterraines sur la disponibilité en eau (voir la section sur les interfaces).

La ​​capacité maximale de rétention d'eau du sol dans une situation de drainage libre est déterminée par la profondeur maximale d'enracinement de la culture et par la fraction d'humidité maximale disponible dans le sol. Cette dernière variable est égale à la différence entre la teneur en humidité du sol à la capacité au champ, SMFCF, (c'est-à-dire la teneur en humidité après un ou deux jours de drainage libre d'un sol mouillé) et la teneur en humidité du sol au point de flétrissement, SMW, (pF=4,2 qui correspond à peu près à la succion du sol à laquelle les plantes meurent de manière irréversible). La profondeur maximale d'enracinement (RDMCR) est déterminée par la culture. Par exemple, pour le blé, la profondeur d'enracinement maximale (RDMCR) est de 125 cm. Cependant, de nombreuses racines de blé peuvent aller au-delà de 125 cm. Cela signifie cependant que, dans un sol humide, cette quantité maximale d'eau disponible (c'est-à-dire 125 cm \* fraction d'humidité maximale disponible) peut être utilisée par une culture de blé. Pour les sols peu profonds ou présentant des structures ou des couches de sol défavorables, une profondeur d'enracinement plus faible en raison de la limitation du sol (RDMSOL) peut être définie. Ainsi, si RDMSOL < RDMCR, la profondeur d'enracinement maximale est égale à RDMSOL.

Les valeurs de la teneur en eau du sol à la capacité au champ (SMFCF) et du point de flétrissement (SMW) sont déterminées par le type de sol et diffèrent principalement en fonction de la classe de texture du sol et de la teneur en matière organique. La profondeur d'enracinement maximale limitée au sol (RDMSOL) et la fraction d'humidité maximale disponible peuvent être dérivées à l'aide de fonctions de pédotransfert à partir de caractéristiques communes du sol comme la texture et la matière organique. Cependant, pour des simulations fiables de production limitée en eau avec WOFOST, il est préférable de mesurer les teneurs en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement (c'est-à-dire la valeur moyenne de la profondeur d'enracinement maximale) pour chaque type de sol pour lequel des simulations sont effectuées.

La disponibilité initiale en eau à l'émergence de la culture dépend de l'apport en eau par les précipitations et l'irrigation et de l'utilisation de l'eau par la transpiration de la culture et l'évaporation du sol au cours des mois précédant l'émergence de la culture. Pour les simulations de croissance avec WOFOST, la disponibilité initiale en eau n'est généralement pas connue. Dans ce cas, on suppose souvent qu'initialement la profondeur d'enracinement maximale se situe à la capacité au champ. Dans les zones humides où les précipitations dépassent l'évapotranspiration pendant l'hiver, cette hypothèse fonctionne bien pour la croissance des cultures à partir du printemps. Cependant, dans les zones où les périodes de sécheresse (par exemple les zones semi-arides) précèdent l'émergence des cultures, la disponibilité initiale en eau peut être largement surestimée. Cela peut entraîner un apport en eau fortement surestimé pendant la période de croissance dans la simulation WOFOST. Cela indique la nécessité de mesurer la disponibilité initiale en eau à l'émergence de la culture ou de commencer à simuler le bilan hydrique bien avant la date d'émergence (par exemple 2 à 3 mois avant les données d'émergence en commençant avec la fraction d'humidité disponible à mi-chemin entre la capacité du champ et le point de flétrissement).

Le bilan hydrique simulé peut, en plus de l'évolution temporelle de la production limitée en eau et de l'humidité du sol dans la zone racinaire, être utilisé pour vérifier et calibrer la production limitée en eau simulée.

Les conditions hydriques initiales dans la zone racinaire sont déterminées dans une simulation WOFOST par deux variables. Tout d'abord, la variable SMLIM qui spécifie la teneur en humidité initiale du sol dans la zone racinaire initiale (profondeur de 0 à 10 cm). Deuxièmement, la variable WAV qui spécifie la quantité d'humidité du sol initialement disponible (au-dessus de la teneur en humidité au point de flétrissement) dans la zone racinaire maximale. La sensibilité de la production limitée en eau à ces conditions hydriques initiales semble être assez forte.

La production limitée en eau est également déterminée par la capacité maximale de rétention d'eau du sol. Cette capacité est déterminée d'abord par la profondeur d'enracinement maximale (RDMSOL), comme indiqué ci-dessus, et par la fraction d'humidité du sol disponible (c'est-à-dire la teneur en humidité du sol à la capacité au champ, SMFCF, moins celle au point de flétrissement, SMW). La production limitée en eau de WOFOST peut changer si la fraction d'humidité du sol disponible ou RDMSOL change et qu'en même temps les précipitations sont insuffisantes.

5 Évapotranspiration

L'évapotranspiration potentielle d'une surface de sol nu, d'une surface d'eau et d'une surface de culture est généralement calculée avec l'approche de Penman et Penman-Monteith. Cette approche est universelle et fonctionne en général bien dans la plupart des situations. Cependant, certaines possibilités d'étalonnage de l'évapotranspiration réelle sont données ci-dessous.

Dans WOFOST, la transpiration réelle de la culture est égale à l'évapotranspiration potentielle multipliée par des facteurs de correction pour le degré d'interception de la lumière, le degré de stress hydrique et pour la culture en général. Ce dernier facteur, variable CFET, est en général de 1,0. Cependant, sa valeur peut être augmentée jusqu'à 1,15 par exemple si la simulation WOFOST sous-estime la transpiration réelle en raison de la hauteur relativement importante et donc de la transpiration importante, par exemple, d'une culture de maïs. La raison en est que les approches Penman et Penman-Monteith sont principalement développées pour une culture courte comme l'herbe. Dans les zones (semi-)arides avec advection, la transpiration simulée peut également être trop faible par rapport aux observations et peut nécessiter une correction.

Le degré de stress hydrique et la réduction du taux de transpiration qui en résulte, et proportionnellement de la photosynthèse également, sont déterminés par la teneur en humidité du sol dans la zone racinaire. Si la teneur en humidité du sol devient inférieure à la teneur en humidité critique, le facteur de correction du stress hydrique est progressivement réduit de 1,0 à 0,0 à une teneur en humidité égale à celle du point de flétrissement. Cependant, la teneur en humidité critique du sol n'est pas une valeur constante. Elle diffère selon les espèces et les variétés de cultures, mais dépend également de l'évapotranspiration elle-même. Cette dernière est causée par le fait que les plantes sont plus sujettes au stress hydrique

lorsque la demande d'évaporation atmosphérique est élevée et donc que l'évapotranspiration potentielle des plantes est élevée. Dans WOFOST, la sensibilité des cultures au stress de la sécheresse est indiquée par la variable DEPNR, les valeurs les plus élevées indiquant une culture moins sensible à la sécheresse (par exemple 4,5 pour le blé et 3,0 pour la pomme de terre). Les différences de sensibilité à la sécheresse entre les variétés de cultures peuvent être prises en compte en modifiant DEPNR.

La teneur en humidité du sol peut également devenir trop élevée pour la croissance des cultures, en général dans les sols où le drainage est limité. Si la teneur en air devient inférieure à la valeur de la variable CRAIRC, la transpiration et la photosynthèse sont réduites en raison du manque d'oxygène. Par conséquent, dans des conditions de croissance humides, cette variable CRAIRC peut nécessiter un calibrage plus précis. Dans les sols bien drainés, il n'y a généralement pas de pénurie d'oxygène.

6 Production limitée en eau

Le calibrage du modèle est d'abord effectué pour une situation de production potentielle. Si cela est bien fait, le modèle doit ensuite être calibré sur la base d'informations provenant d'expériences sur les cultures dans des conditions de limitation en eau. Dans cette section, nous nous concentrons sur la mise en œuvre simple du modèle de seau d'eau à une seule couche.

La production limitée en eau est déterminée par la disponibilité en eau et l'utilisation de l'eau pendant la période de croissance des cultures. L'utilisation de l'eau est principalement déterminée par la transpiration des cultures et l'évaporation du sol, et parfois par la percolation vers les couches profondes du sol. Cette utilisation de l'eau est en général bien calculée par le modèle. Comme décrit dans la section précédente, la transpiration des cultures peut nécessiter un certain calibrage dans des conditions (semi)-arides.

La disponibilité en eau pendant la période de croissance est déterminée à la fois par la disponibilité initiale en eau, la capacité maximale de rétention d'eau du sol en fonction de la profondeur d'enracinement et de la fraction d'humidité disponible dans le sol, et l'équilibre des apports d'eau (principalement les précipitations) et de l'utilisation (voir ci-dessus) pendant la période de croissance. La disponibilité initiale en eau du sol à la profondeur d'enracinement maximale doit être basée sur la mesure de la teneur en humidité du sol à l'émergence de la culture ou sur le calcul du bilan hydrique au cours des mois précédant l'émergence de la culture. Souvent, seule une estimation approximative de la disponibilité initiale en eau du sol est disponible pour la simulation WOFOST, mais la sensibilité de la production limitée en eau à cette disponibilité initiale en eau du sol est souvent assez forte.

La capacité maximale de rétention d'eau du sol est déterminée par la profondeur d'enracinement maximale (de la culture adulte) et la fraction d'humidité disponible du sol (teneur en humidité à la capacité du champ moins celle au point de flétrissement). Pour ces trois variables, des valeurs fiables doivent être disponibles pour chaque type de sol pour lequel des simulations WOFOST sont effectuées, afin de réaliser des analyses précises de la production de cultures limitées en eau. Cependant, pour les études à l'échelle régionale, les valeurs moyennes régionales (basées sur les fonctions de pédotransfert) ne sont souvent disponibles que pour ces variables qui déterminent la capacité maximale de rétention d'eau du sol.

Dans de nombreuses études à l'échelle régionale, nationale ou continentale, les informations sur la disponibilité initiale en eau du sol et sur la capacité maximale de rétention d'eau du sol manquent. Dans ce cas, il est important de calibrer WOFOST en se basant sur les informations limitées provenant d'expériences de terrain représentatives dans des conditions de manque d'eau. Si les données de production de biomasse ou de rendement en grains sont principalement disponibles à partir de telles expériences de terrain, la disponibilité initiale en eau du sol et/ou la capacité maximale de rétention d'eau du sol peuvent être calibrées pour arriver à des niveaux comparables de biomasse et de rendement en grains.

# Annexe - Données expérimentales requises pour l'étalonnage de WOFOST

# Données sur les cultures

# Des données sur les cultures sont requises à partir d'expériences représentatives de la région étudiée, c'est-à-dire pour

# - les principales cultures

# - dans la gamme principale de conditions environnementales (principaux types de sol, climats, conditions hydrologiques, etc.)

# - avec des types de gestion représentatifs (apport optimal de nutriments et protection des cultures avec et sans irrigation (c'est-à-dire production potentielle et limitée en eau))

# Les informations suivantes issues des expériences sont nécessaires :

# - Valeurs initiales de la culture : a. poids des semences ou du matériel de plantation ; b. densité de semis ; c. date de semis/plantation ;

# - Informations sur la culture pendant la période de croissance : a. développement phénologique ou date de semis/plantation, date d'émergence, date d'anthèse et date de maturité ; b. indice de surface foliaire ou interception de la lumière ; c. densité de la plante ;

# - Informations sur la culture provenant des récoltes intermédiaires et finales : a. biomasse totale ; b. répartition de la biomasse sur les organes de la plante ; c. poids des feuilles vivantes et mortes ; d. composition de la culture à la récolte finale : p. ex. plantes/m2, épis par plante, grains par épi et poids des grains ;

# - Autres informations sur la culture telles que, par exemple : a. dommages aux feuilles ; b. pertes de rendement par infestation de ravageurs et de maladies et/ou concurrence des mauvaises herbes ; c. pertes de rendement par manque de nutriments.

# Données sur le sol

# À partir d'expériences représentatives des principales cultures et des conditions environnementales de la région étudiée, les informations suivantes sur le sol sont nécessaires :

# - Informations initiales sur le sol : a. caractéristiques physiques du sol (courbe pF ou teneur en humidité du sol à la capacité au champ et au point de flétrissement et porosité du sol) ; b. profondeur d'enracinement limitée par le sol ; c. éventuellement, conductivité hydraulique ; d. pour le riz paddy, stockage d'eau de surface (hauteur de la digue) ;

# - Informations sur le sol pendant la période de croissance : a. teneur en humidité du sol dans le sol enraciné ; b. niveau de la nappe phréatique ;

# - Caractéristiques particulières du sol et du paysage (le cas échéant et importantes pour la croissance des cultures et/ou la disponibilité en eau) : a. hydrologie ; b. salinité ; c. sodicité ; d. couches ou structures particulières du sol ; e. pente et degré de ruissellement de surface.

# Données météorologiques

# Pour simuler avec WOFOST la croissance des cultures observée sur les sites expérimentaux et pour utiliser ces informations expérimentales pour l'étalonnage du modèle, des informations météorologiques provenant de ces sites sont également nécessaires.

Name Description Unit

TMAX Daily maximum temperature ∘C

TMIN Daily minimum temperature ∘C

VAP Mean daily vapour pressure hPa

WIND Mean daily wind speed at 2 m above ground level m.sec−1

RAIN5 Precipitation (rainfall or water equivalent in case of snow or hail). cm.day−1

IRRAD Daily global radiation J.m−2.day−1

# 5 L'approvisionnement en eau par ruissellement de surface à partir de positions plus élevées sur la pente n'est pas pris en compte dans WOFOST.

# Autres informations complémentaires

# - Engrais minéraux appliqués, engrais animaux et verts ;

# - Gestion et protection des cultures ;

# - Rotation des cultures ;

# - Méthode d'irrigation et quantité d'eau d'irrigation appliquée ; - Méthode de travail du sol ;

# - Système de drainage.