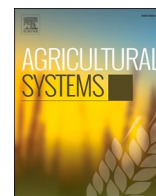




Listes des contenus disponibles sur [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

## Systèmes agricoles

page d'accueil du journal : [www.elsevier.com/locate/agsy](http://www.elsevier.com/locate/agsy)



# Modélisation de la croissance du piment (*Capsicum annuum* L.) avec le modèle modèle *WOFOST*

Ruoling Tang <sup>(a) (.) (b) (.) (\*)</sup>, Iwan Supit <sup>b</sup>, Ronald Hutjes <sup>b</sup>, Fen Zhang <sup>(a) (.) (d)</sup>, Xiaozhong Wang <sup>(a) (.) (d)</sup>, Xuanjing Chen <sup>(a) (.) (c) (.) (\*)</sup>, Fusuo Zhang <sup>(a) (.) (c)</sup>, Xinping Chen <sup>a</sup>

<sup>a</sup>Centre de recherche interdisciplinaire pour le développement vert de l'agriculture dans le bassin du fleuve Yangtze, Collège des ressources et de l'environnement, Université du Sud-Ouest, Chongqing 400716, Chine

<sup>b</sup>Water Systems and Global Change Group, Wageningen University & Research, Droevendaalsesteeg 4, 6708, PB, Wageningen, Pays-Bas

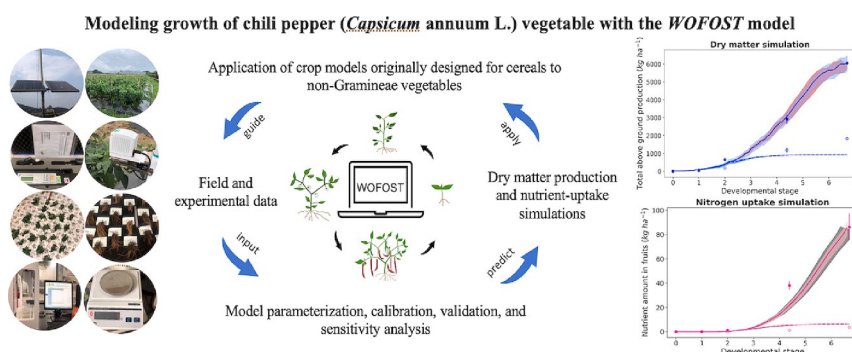
<sup>c</sup>College of Resources and Environmental Sciences, National Academy of Agriculture Green Development, Key Laboratory of Plant-Soil Interactions, Ministry of Education, China Agricultural University, 2 Yuanmingyuan West Road, Beijing 100193, China

<sup>d</sup>Académie des sciences agricoles, Université du Sud-Ouest, Chongqing, Chine

## LES I G N E S D E H A U T E U R S

- *WOFOST* a été adapté pour la première fois à la simulation du Chili.
- Un ensemble continu de données d'essais sur le terrain sur 3 ans a été utilisé pour la calibration et la validation du modèle.
- *WOFOST-Chili* est capable de reproduire à la fois la croissance potentielle et la croissance limitée par les nutriments.
- Une analyse de sensibilité systématique a permis d'accroître la robustesse de la simulation du modèle.

## A B S T R A C T G R A P H I Q U E



## A R T I C L E I N F O

Nom de l'éditeur : Guillaume Martin

Mots-clés :

Piment

*WOFOST*

Réponse à l'engrais

Absorption des

nutriments

Production de matière sèche

Analyse de sensibilité

## A B S T R A C T

**CONTEXTE :** Le piment (*Capsicum annuum* L.) est l'un des légumes les plus importants d'un point de vue économique et agricole, et relativement riche en nutriments. Jusqu'à présent, il n'a guère été pris en compte dans les études de modélisation relatives à la production de matière sèche et aux prévisions d'absorption de nutriments. Il existe un besoin urgent de modèles permettant d'analyser les impacts potentiels du changement climatique, ainsi que des options d'adaptation adaptées, tout en optimisant la productivité par rapport à l'utilisation d'engrais afin de réduire la pollution par les nutriments.

**OBJECTIF :** Nous avons adapté le modèle de simulation de croissance des cultures pour le piment (*WOFOST-Chili*) de World Food Studies (*WOFOST*) afin de quantifier la production de matière sèche en fonction de la gestion des engrais, du climat et des conditions du sol.

**MÉTHODES :** Nous avons utilisé les données d'essais sur le terrain de 2021 dans des conditions de croissance optimales dans le sud-ouest de la Chine pour paramétrer et calibrer *WOFOST-Chili*. Le modèle a été testé dans des conditions sans engrais et validé avec les données de 2019 et 2020. En outre, une analyse de sensibilité sur les trois années consécutives a été réalisée.

\* Auteurs correspondants.

Adresses électroniques : [ruoling.tang@wur.nl](mailto:ruoling.tang@wur.nl) (R. Tang), [cxj0214@email.swu.edu.cn](mailto:cxj0214@email.swu.edu.cn) (X. Chen).

**RÉSULTATS ET CONCLUSIONS :** Dans l'ensemble, le modèle *WOFOST-Chili* développé montre de bonnes simulations de la dynamique de croissance du piment en réponse à la fertilisation azotée (N), à la fois sur l'assimilation de la biomasse (rRMSE = 0,07 pour la production aérienne totale ; rRMSE = 0,06 pour le poids sec des fruits) et l'absorption des nutriments (rRMSE = 0,46 pour la quantité de N dans les feuilles ; rRMSE = 0,29 pour la quantité de N dans les fruits). En outre, la robustesse du modèle est accrue par l'analyse de sensibilité de l'initialisation de la culture (par exemple, la biomasse et l'indice de surface foliaire au moment de la transplantation) et des paramètres dépendant du climat (par exemple, les sommes de température déterminant le taux de développement et l'efficacité de l'utilisation de la lumière déterminant la productivité), l'éventail de simulation plus large qui en résulte couvrant davantage d'observations. Cette bonne performance n'est limitée que par une simulation plus faible de l'indice de surface foliaire (LAI) (rRMSE = 0,76), qui est partiellement attribuée aux limitations des mesures (par exemple, équipement, conditions météorologiques et contraintes de temps et de travail). La validation du modèle confirme la bonne performance dans des conditions potentielles, qui est légèrement réduite dans des conditions de manque de nutriments.

**PERTINENCE :** Ces résultats améliorent notre compréhension des interactions entre le rendement et les éléments nutritifs du piment. Ils donnent un aperçu de l'extension de l'application des modèles de culture conçus à l'origine pour les céréales aux légumes autres que les céréales, tout en appelant à l'amélioration future de la précision des modèles dans le cadre de différentes stratégies d'application d'engrais.

## 1. Introduction

Le piment est l'un des légumes les plus importants au monde sur le plan économique et agricole en termes de zone de culture, de production, de valeur commerciale et de consommation (FAOSTAT, 2020). Les principales zones de production sont situées dans des régions chaudes et humides avec des températures autour de 18 à 30 °C (Khaitov et al., 2019), par exemple le bassin du fleuve Yangtze en Chine, Chihuahua au Mexique (Producepay, 2021), ou la région de la mer Noire en Turquie. Selon les recommandations de la Stratégie mondiale pour l'alimentation, l'exercice physique et la santé de l'Organisation mondiale de la santé, les adultes devraient consommer au moins 400 g d<sup>(-)</sup> de fruits et légumes par personne (Cammarano et al., 2022). Une plus grande attention a été accordée à la production de piment en raison de ses effets positifs sur la santé, car il est riche en vitamines E et C, en provitamine A, en fibres alimentaires, en capsaïcine et en autres composés bioactifs (Baenas et al., 2019). En outre, le piment peut contribuer à réduire la mortalité due aux maladies cardiovasculaires et au cancer (Kaur et al., 2022).

Dans la production en plein champ, en raison de leur système d'enracinement peu profond et de leur courte durée de vie, les éléments nutritifs libérés par la fertilité du sol ne correspondent généralement pas aux besoins des légumes (Liu et al., 2012 ; Tei et al., 2020). D'une part, une perte de rendement peut se produire sans application d'engrais supplémentaire. D'autre part, si le champ est surfertilisé, des effets inhibiteurs sur la croissance des plantes (par exemple, une réduction du rendement des cultures) combinés à une grave pollution par les nutriments peuvent se produire (Lu et Tian, 2017). Pour assurer la sécurité alimentaire (en particulier nutritionnelle) et environnementale, la gestion des engrais doit être optimisée et adaptée aux conditions locales. La plupart des recherches existantes sur l'impact de la gestion des engrais sur le rendement du chili ont été menées dans le cadre d'expériences sur le terrain spécifiques à un site (Stan et al., 2021 ; Wang et al., 2018). Chaque étude a utilisé un ensemble distinct de pratiques agricoles spécifiques à la région locale, impliquant des dates et des taux d'application d'engrais, des méthodes de placement d'engrais (à la volée, en bandes ou en bandes latérales), la composition des produits fertilisants et d'autres pratiques de gestion des champs. C'est pourquoi il est difficile de reproduire dans d'autres régions la productivité obtenue grâce à une gestion optimale dans le cadre d'expériences spécifiques à un site. Il est donc de plus en plus nécessaire de réaliser une étude à grande échelle des relations quantitatives entre les plantes, la gestion des engrais et les conditions climatiques. Une telle étude pourrait améliorer la prévision des rendements potentiels, la formulation de politiques sur les besoins en engrais et la distribution régionale des zones de plantation pour les endroits les plus appropriés à la culture des légumes.

Les modèles de culture sont considérés comme des outils utiles pour étudier les interactions entre la physiologie des cultures, la gestion agricole et l'environnement afin d'améliorer la prise de décision dans les systèmes de production réels. La plupart des études de modélisation des cultures portant sur l'influence des engrais se sont concentrées sur le blé, le maïs, le riz et la pomme de terre, tandis que les fruits et les légumes ont reçu moins d'attention (Kadigi et al., 2020 ; Liu et al., 2021 ; Tahir et al., 2021 ; Timsina et al., 2021). Les recherches sur le développement de modèles de croissance pour les cultures de poivrons restent rares, sans parler de la réponse du rendement à différentes stratégies de fertilisation (Saqib et Anjum, 2021). Certaines études antérieures ont développé des modèles mécanistes pour le poivron afin d'examiner les processus physiologiques tels que la photosynthèse, la répartition de la matière sèche et l'absorption des nutriments (Diao et al., 2009 ; Marcelis et al., 2004). Pour les

Par exemple, sur la base du modèle INTKAM (Gijzen, 1994), Marcelis et al. (2004) ont créé un modèle mécaniste pour le poivron en combinant un modèle de concombre piloté par la photosynthèse (Marcelis, 1994) pour la production et le partage de la matière sèche avec une routine d'absorption des nutriments provenant d'un modèle de tomate (Marcelis et al., 2003). Ces relations plantes-nutriments ont toutefois été obtenues dans des conditions bien contrôlées de culture en serre sans sol et ne peuvent pas être directement appliquées à la prédiction de la production en plein champ. Outre les modèles mécanistes, des modèles de poivron basés sur les processus ont également été rapportés dans des études antérieures. Un modèle "VegSyst" basé sur les processus s'est avéré capable de simuler à la fois la production de matière sèche et l'absorption d'azote (N) du poivron, mais uniquement dans des conditions d'eau et d'azote non limitatives et dans des serres de type méditerranéen (Gimenez et al., 2013). La dernière version du poivron, *VegSyst V2*, suppose une seule phase de croissance avec un ensemble uniforme de paramètres de culture (y compris une valeur d'URE singulière) pour simuler l'ensemble de la phase de croissance. L'approche de modélisation "une seule phase" ne pose aucun problème pour la simulation des poivrons cultivés sous serre dans le sud-est de l'Espagne, car ils sont généralement récoltés avant que les plantes n'atteignent leur pleine maturité pour des raisons commerciales (Gallardo et al., 2016). Cette approche de modélisation ne peut toutefois pas être utilisée directement pour simuler les poivrons cultivés en plein champ, qui suivent des modèles de croissance plus indéterminés et des maturités de fruits multiples. Un autre modèle de poivron axé sur les processus, *CROPGRO-Bellepepper* (CROP GROwth), permet de simuler la réponse du rendement à 5 niveaux d'azote supplémentaires allant de 0 à 100 kg ha<sup>(-)</sup> par fertigation en plein champ. Cependant, aucun résultat de simulation de l'absorption des nutriments n'a été montré dans cette étude particulière (Reddy et Tiwari, 2018). À notre connaissance, si le modèle *CROPGRO* a été utilisé avec succès pour simuler la demande en azote des cultures, l'équilibre en azote du sol et l'absorption d'azote par les cultures dans d'autres cultures, son efficacité pour modéliser l'absorption d'éléments nutritifs dans les cultures de poivrons reste inexplorée (Boote et al., 2008 ; Boote et al., 2018 ; Mendez, 2000). Des simulations de la croissance et de l'absorption des nutriments du poivron en plein champ ont également été trouvées dans EU-Rotate\_N (Doltra et Munoz, 2010), un modèle largement basé sur les processus. Cependant, un rendement maximal réalisable doit être fourni sur la base de l'expérience de l'utilisateur avant de lancer les simulations (Ovsthus et al., 2021). Dans ce cas, la prévision dynamique de la croissance des cultures sera limitée lorsque les données de rendement ciblées ne seront pas disponibles. *WOFOST* (World Food Studies) est bien connu pour simuler la production de cultures en plein champ. En outre, comparé à d'autres modèles de culture (par exemple *APSIM*, *EPIC*, *CROPSYST* et *STICS*), *WOFOST* ont montré une performance similaire de la réponse de la production de matière sèche avec le niveau le moins complexe de la dynamique de l'azote (Di Paola et al., 2016 ; Salo et al., 2016). Cependant, nous ne disposons toujours pas d'une approche de modélisation appropriée qui permette de suivre à la fois la production dynamique de matière sèche et l'absorption des nutriments par les cultures dans le cadre de différentes stratégies de fertilisation, du climat et des conditions du sol pour le piment en plein champ (y compris le modèle *WOFOST*).

Notre recherche vise à explorer la possibilité d'étendre l'application du modèle de culture *WOFOST*, conçu à l'origine pour les céréales, aux légumes (en particulier les piments). A cette fin, nous avons (i) paramétré, calibré et validé le modèle *WOFOST-Chili* développé en utilisant trois années consécutives de données d'essais sur le terrain, (ii) évalué la performance du modèle dans des conditions potentielles et déficientes en nutriments, et (iii) effectué une analyse de sensibilité pour évaluer la robustesse du modèle *WOFOST-Chili*.

(iii) effectué une analyse de sensibilité pour évaluer la robustesse des simulations du modèle.

## 2. Matériels et méthodes

### 2.1. Vue d'ensemble du modèle WOFOST-chili

WOFOST est un modèle de culture basé sur les processus, exécuté à des pas de temps quotidiens, qui simule plusieurs processus physiologiques, tels que le développement phénologique, l'assimilation par photosynthèse, la respiration, la transpiration, la dynamique des feuilles, des tiges, des grains et des racines, l'absorption des nutriments et la répartition entre les composants de la plante. Deux questions majeures ont été abordées lors de l'adaptation de WOFOST-Chili : (i) la redéfinition des stades de développement clés (transplantation, anthèse, début de la fructification, milieu de la fructification, pic de la fructification/récolte ; Fig. 1) et (ii) le recalcul des paramètres clés en utilisant des données observées (Tableau 1, Tableau 2). Dans l'échelle standard du Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt and Chemical industry (BBCH), 9 stades sont utilisés pour décrire complètement le cycle de vie du piment, depuis la germination des graines jusqu'à la sénescence (Meier, 1997). Normalement, dans les systèmes de production actuels, les stades de croissance ne sont pas distingués avec autant de précision, car c'est la matière sèche des fruits qui retient le plus l'attention. C'est pourquoi nous avons redéfini le stade de développement du piment (DVS) sur la base de plusieurs cycles de maturité des fruits. Dans le modèle WOFOST-Chili développé, TSUM1 a été redéfini comme la somme des températures requises (TSUM) de la transplantation à l'anthèse. Le TSUM2 a été redéfini comme la TSUM requise de l'anthèse au stade du début de la fructification. Nous avons conservé le stade de l'anthèse comme DVS = 1, et le stade du début de la fructification comme DVS = 2. Les deux stades de maturité des fruits suivants étaient le stade mi-fructification et le stade pic-fructification/récolte, tandis que la DVS correspondante a été calculée comme étant égale à 2 plus la TSUM accumulée du stade début-fructification au stade actuel, divisée par la TSUM2 (Fig. 1), comme indiqué dans l'Eq. 1.

$$\frac{TSUM - TSUM2}{TSUM2}$$

$$DVS = 2 + \frac{TSUM - TSUM2}{TSUM2} \quad (1)$$

Où DVS est le stade de développement, TSUM est la somme totale des températures depuis le repiquage jusqu'au stade actuel. TSUM2 est la somme des températures entre l'anthèse et le début de la fructification.

### 2.2. Expériences en plein champ

Une expérience en plein champ a été menée à Hechuan, Chongqing, Chine (30,0°N ; 106,1°E) de 2019 à 2021. Le site bénéficie d'un climat subtropical de mousson humide. Les données météorologiques nécessaires au fonctionnement de WOFOST-Chili ont été collectées à partir d'une station météorologique située sur le site. Une variété commerciale de piment "Xinxiang #8" a été cultivée en conditions pluviales sur le site du luvisol haplique avec la densité de plantation recommandée de

3,4 plantes m<sup>-2</sup> (2). Six traitements d'engrais azotés différents ont été conçus : traitement de contrôle sans application d'engrais (CK), quantité optimale d'engrais synthétique (OPT), excès d'engrais synthétique selon les pratiques habituelles des agriculteurs locaux (FNP), mélange d'engrais organiques et synthétiques (OIF), produits d'engrais pour la dénitrification (DMPP) et produits d'engrais à libération contrôlée lente (SCR). Tous les traitements ont été réalisés selon un plan en blocs complets aléatoires avec 4 répétitions. Les plantes ont été transplantées le 20 mai, le 12 mai et le 27 avril et récoltées le 10 août, le 6 août et le 27 avril.

août et le 25 juillet en 2021, 2020 et 2019, respectivement. Les engrais ont été appliqués pendant la transplantation, puis en trois applications fractionnées à l'anthèse, au début de la fructification et à la mi-fructification (Fig. 1). Les précipitations quotidiennes moyennes pendant la période de croissance du chili ont été de 7 mm jour<sup>-1</sup> et 6 mm jour<sup>-1</sup> en 2019 et 2020, respectivement, et ont été assez uniformément réparties. En 2021, elles étaient de 4 mm jour<sup>-1</sup>, mais plus concentrées autour de 40-60 jours après la transplantation (ddt). Nous avons supposé qu'il n'y avait pas de limitation de l'eau, même sans irrigation régulière (annexe 1, figure S2). Les meilleures pratiques agronomiques ont été appliquées pour minimiser les risques de perte de rendement par les insectes, les pathogènes et les mauvaises herbes. Les composants et quantités d'engrais détaillés, la gestion des cultures, la conception des parcelles et les informations météorologiques du site sont présentés dans l'annexe 1 (tableau S1 ; Fig. S1 ; Fig. S2).

Des évaluations physiologiques non destructives, y compris le nombre maximal de feuilles, ont été effectuées.

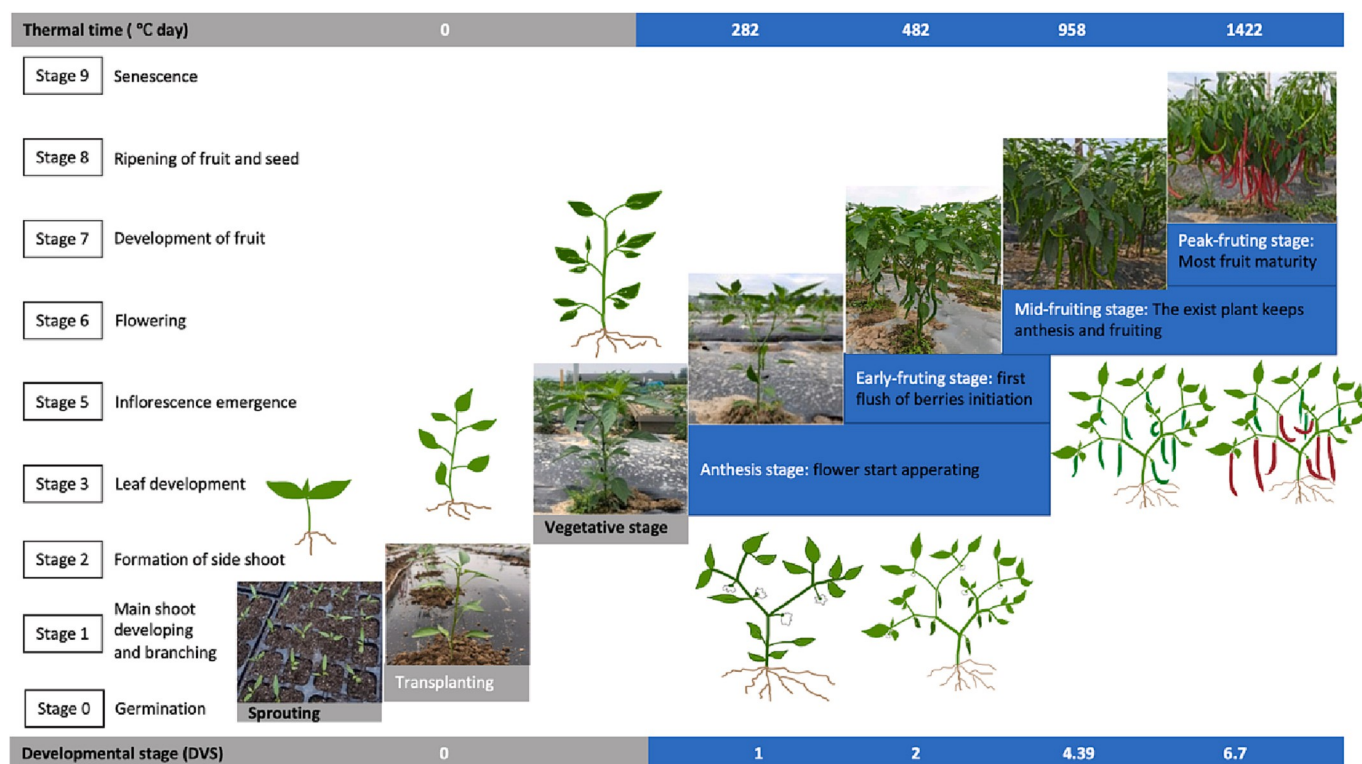


Fig. 1. Illustration du schéma de croissance phénologique du piment. Les principaux stades de développement de WOFOST-Chili sont représentés sur l'axe horizontal en bas, avec les sommes de températures correspondantes en haut. Sur l'axe vertical, la croissance du piment est décrite en utilisant l'échelle du Biologische Bundesanstalt, du Bundes-sortenamt et de l'industrie chimique.

**Tableau 1**

Valeurs des paramètres scalaires dans le fichier WOFOST-Chili qui sont paramétrées avec des données observées (année 2021) et chacune est représentée par une valeur numérique unique.

Abréviations	Description des paramètres scalaires	Catégories	Valeur calibrée Valeur
TSUMEM	Somme des températures de l'ensemencement à repiquage [cel d]	Emergence	644
TSUM1	Somme des températures de repiquage à l'anthèse [cel d]	phénologie	282
TSUM2	Somme des températures de l'anthèse à la fructification [cel d]		200
TDW1	Poids sec initial de la culture totale [kg ha <sup>(1)</sup> ]		16.17
LAIEM	Indice de surface foliaire à l'émergence [ha ha <sup>(1)</sup> ]	Initiale	0.0106
RGR_LAI	Augmentation relative maximale de l'indice de surface foliaire		0.039
NPK_TRA	[ha ha <sup>-1</sup> d <sup>(1)</sup> ]		
	Translocations N-P-K à partir des racines en tant que fraction de resp. des quantités totales de N-P-K transloquées à partir des feuilles et des tiges		0.30
NMAXRT_FR	Concentration maximale de N dans les racines en tant que fraction de la concentration maximale de N dans les feuilles		0.22
NMAXST_FR	Concentration maximale de N dans les tiges en tant que fraction de la concentration maximale de N dans les feuilles		0.26
PMAXRT_FR	Concentration maximale de P dans les racines en tant que fraction de la concentration maximale de P dans les feuilles		0.605
PMAXST_FR	Concentration maximale de P dans les tiges en tant que fraction de la concentration maximale de P dans les feuilles	Utilisation des nutriments	0.737
KMAXRT_FR	Concentration maximale de K dans les racines en tant que fraction de la concentration maximale de K dans les feuilles		0.719
KMAXST_FR	Concentration maximale de K dans les tiges en tant que fraction de la concentration maximale de K dans les feuilles		0.955
NMAXSO	Concentration maximale de N (= 1,6*min. conc. N) dans les organes de stockage [kg N kg <sup>(1)</sup> (biomasse sèche)]		0.0365
PMAXSO	Concentration maximale de P (= 1,6*min. conc. P) dans les organes de stockage [kg P kg <sup>(1)</sup> (biomasse sèche)]		0.0060
KMAXSO	Concentration maximale de K (= 1,6*min. conc. K) dans les organes de stockage [kg K kg <sup>(1)</sup> (biomasse sèche)]		0.0326

Le taux d'assimilation du CO<sub>2</sub> au point de saturation de la lumière (Amax) et l'efficacité de l'utilisation de la lumière (EFF) ont été exécutés sur des plantes à la transplantation, à l'anthèse, au début de la fructification, au milieu de la fructification et au pic de la fructification/récolte de l'année 2021. Une série de mesures périodiques de la courbe de réponse à la lumière photosynthétique a été réalisée avec un Licor-6800 (LICOR, Lincoln, Nebraska, États-Unis) sur la feuille supérieure entièrement développée de 3 plantes représentatives dans une parcelle sélectionnée par traitement. Quatorze niveaux d'intensité lumineuse souhaités,

**Tableau 2**

Valeurs des paramètres tabulaires dans le fichier de culture WOFOST-Chili paramétré avec des données observées (année 2021), et chacun est représenté par un ensemble de valeurs en fonction des stades de développement (DVS).

Abréviations	Description des paramètres tubulaires	Catégories	Valeur calibrée (en fonction du DVS)				
			DVS 0.0	DVS 1.0	DVS 2.0	DVS 4.39	DVS 6.7
SLATB	Surface foliaire spécifique [- ; ha kg <sup>(1)</sup> ]	Surface verte	0.0029	0.0018	0.0029	0.0027	0.0023
AMAXTB	Max. Taux d'assimilation du CO <sub>2</sub> par les feuilles [- ; kg ha <sup>(1)</sup> h <sup>(1)</sup> ]	assimilation	34.84	37.13	55.73	49.64	30.49
FRTB	Fraction de biomasse sèche totale des tiges et des racines [- ; kg kg <sup>(1)</sup> ]	partitionnement	0.360	0.302	0.308	0.048	0.048
FSTB	Fraction de Dm hors-sol par rapport aux tiges [- ; kg kg <sup>(1)</sup> ]		0.500	0.370	0.217	0.195	0.178
FOTB	Fraction de Dm hors sol à l'organe de stockage [- ; kg kg <sup>(1)</sup> ]		0.000	0.000	0.283	0.719	0.679
NMAXLV_TB	Concentration maximale de N dans les feuilles [kg N kg <sup>(1)</sup> ]		0.0200	0.0150	0.0137	0.0133	0.0127
PMAXLV_TB	Concentration maximale de P dans les feuilles [kg P kg <sup>(1)</sup> (biomasse sèche)]	utilisation des nutriments	0.0023	0.0032	0.0051	0.0032	0.0020
KMAXLV_TB	Concentration maximale de K dans les feuilles [kg K kg <sup>(1)</sup> (biomasse sèche)]		0.0438	0.0365	0.0540	0.0497	0.0318

1800, 1500, 1300, 1100, 900, 700, 500, 300, 200, 150, 100, 70, 30, et 0 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> (1), ont été réglés avec un temps d'attente minimum de 120 s, et un temps d'attente maximum de 300 s pour atteindre un état stable avant l'enregistrement. Ces mesures ont ensuite été utilisées pour ajuster une courbe de réponse à la lumière (Prioul et Chartier, 1977) afin de dériver les paramètres du modèle Amax et EFF (voir tableau 2 et S2A).

Les mesures destructives du poids sec et des teneurs en N, phosphore (P) et

de potassium (K) des racines, des tiges, des feuilles et des fruits.

L'échantillonnage a été réalisé 5 fois (de la transplantation à la récolte) au cours de la saison 2021 et 3 fois (du début de la fructification à la récolte) au cours des saisons 2019 et 2020. À chaque échantillonnage, nous avons récolté tous les fruits formés d'une longueur d'au moins 2 cm. Dans chaque parcelle par traitement, 4 plantes ont été échantillonnées en mélange et séchées à l'étuve à 100 °C pendant la première heure et à 75 °C.

Les échantillons ont été pesés jusqu'à ce qu'ils atteignent une masse constante. Après avoir été pesés, les échantillons ont été finement broyés et environ 0,500 g par échantillon a été digéré avec du

5 ml de HNO<sub>3</sub> et 3 ml de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dans un système de réaction accéléré par micro-ondes (CEM, Matthews, NC, USA) pour les analyses de concentration NPK.

La teneur totale en N a été déterminée à l'aide de la méthode micro-Kjedahl (Bremner, 1996). Les concentrations totales de P et de K ont été déterminées à l'aide d'un spectromètre d'émission optique à plasma inductif (ICP-OES) (OPTIMA 3300 DV, PerkinElmer, USA). Les mesures de la surface foliaire ont été effectuées 5 fois (de la transplantation à la récolte) en 2021 à l'aide d'un appareil portable de mesure de la surface foliaire (YMJ-A, TOP-Cloud-agri, Hangzhou, CHN). Trois répétitions par traitement ont été effectuées. Pour les 4 premières mesures, toutes les feuilles d'une plante ont été prélevées, scannées et la surface foliaire a été additionnée. Cependant, en raison de l'augmentation explosive du nombre de feuilles, la surface foliaire par plante au moment de la récolte a été dérivée des rapports surface foliaire/poids frais des feuilles pour trois mesures de sous-échantillons (chacun avec un poids frais de 5 ± 0,5 g).

Les données expérimentales utilisées pour paramétrer/calibrer et tester le modèle dans cette étude provenaient de deux traitements d'engrais : CK et DMPP. Le traitement DMPP a été choisi car il a montré la productivité la plus élevée et peut réduire efficacement la lixiviation de l'azote et l'émission de N<sub>2</sub>O en inhibant l'oxydation de l'ammoniac, en particulier dans les zones pluvieuses (Zerulla et al., 2001). Les autres traitements d'engrais n'ont pas différé de manière significative du DMPP en termes de matière sèche des fruits sur trois ans, de sorte que tous peuvent être considérés comme non limités en termes d'éléments nutritifs.

### 2.3. Paramétrage, calibrage et validation du modèle

WOFOST distingue deux types de paramètres dans le fichier de culture : (1) les paramètres scalaires, qui ne changent pas avec le stade de développement (DVS) ou les conditions environnementales, et (2) les paramètres tabulaires, qui utilisent des paires des valeurs en fonction de l'évolution du statut (de Wit et al., 2020). En ce qui concerne le taux d'assimilation du

Pour le fichier des cultures, nous avons obtenu les valeurs des paramètres associés à la phénologie, à la surface verte, à l'assimilation du CO<sub>2</sub>, au partitionnement et à l'utilisation des nutriments à partir d'observations sur le terrain, tandis que les quelques paramètres restants ont été estimés à partir de la littérature dans la mesure du possible (tableau 1 ; tableau 2 ; annexe 2, tableau S2A et B). Nous avons utilisé les données mesurées pendant la saison 2021 pour calibrer le modèle. Les résultats du modèle ont été comparés aux observations en termes de production aérienne totale (TAGP), de poids sec total des feuilles, d'humidité de l'air et d'humidité de l'eau, ainsi que d'humidité de l'air et de l'eau.



(TWLV), poids sec total des organes de stockage (TWSO), poids sec total des tiges (TWST) ; quantité d'azote/phosphore/potassium dans les feuilles (N/P/KamountLV), les tiges (N/P/KamountST), les fruits (ou organe de stockage : N/P/KamountSO), et les racines (N/P/KamountRT) ; et indice de surface foliaire (LAI) à chaque échantillonnage (annexe 4, tableau S6). Pour minimiser les différences entre les simulations et les observations, plusieurs paramètres estimés (par exemple, la surface foliaire spécifique, SLA, le coefficient d'extinction de la lumière visible diffuse, KDIF) ont été ajustés pour se situer dans la plage d'incertitude mesurée, ou dans une autre plage raisonnable. En plus du fichier de culture, *WOFOST* demande à nouveau le fichier de sol et le fichier de site pour calculer l'équilibre journalier de l'eau et des nutriments dans le sol. Ces fichiers fournissent des informations essentielles au modèle sur l'emplacement et les caractéristiques du sol du champ modélisé (Boogaard et al., 2014). A notre connaissance, les principales caractéristiques physiques du sol relatives à la rétention d'eau, à la conductivité hydraulique et à l'aptitude au travail du sol, ainsi que les informations de base sur l'état initial de l'humidité du sol et la disponibilité initiale des éléments nutritifs du sol, ont été paramétrées séparément dans le fichier du sol (annexe 2, tableau S3) et le fichier de site (annexe 2, tableau S4).

Le *WOFOST-Chili* calibré a ensuite été testé en utilisant l'expérience sur site des années 2019 et 2020. Les données météorologiques enregistrées pour les années 2019 et 2020, ainsi que les informations relatives à la gestion agricole (par exemple, la date du repiquage, de la récolte et de la fertilisation), ont été utilisées pour effectuer les simulations dans l'exploitation. Contrairement à l'expérience sur le terrain de l'année 2021, nous n'avons effectué que trois échantillonnages par saison en 2019 et 2020, de sorte que les comparaisons entre les observations et les simulations ont été limitées à la période suivant la fructification (tableau 3).

## 2.4. Évaluation des performances du modèle

Nous avons évalué la performance du modèle *WOFOST-Chili* en utilisant principalement le coefficient de détermination ( $R^2$ ) et l'erreur quadratique moyenne relative (rRMSE). Le  $R^2$  a été classé comme insatisfaisant ( $R^2 \leq 0,6$ ), satisfaisant ( $0,6 < R^2 \leq 0,7$ ), bon ( $0,7 < R^2 \leq 0,8$ ) et très bon ( $R^2 > 0,8$ ) (Bosi et al., 2020). En outre, chaque  $R^2$  a été associé à une valeur  $P$  de test  $t$  pour indiquer la similarité entre les données observées et les données simulées. La similarité a été classée lorsque  $P_{(t)} < 0,05$ . Une valeur de zéro pour rRMSE signifie que le modèle prédit les observations avec une précision parfaite. Une valeur de  $\leq 0,70$  pour rRMSE est considérée comme acceptable pour la performance du modèle (Moriasi et al., 2007). Nous avons également assisté l'évaluation du modèle *WOFOST-Chili* avec le coefficient d'efficacité du modèle de Nash-Sutcliffe (NSE) et l'indice d'accord de Willmott (d). Des informations détaillées sont fournies à l'annexe 4 (annexe 4, tableau S5).

## 2.5. Analyse de sensibilité

Nous avons effectué une analyse de sensibilité systématique afin d'identifier les paramètres à fort impact pour l'incertitude du modèle. Nous nous sommes d'abord référés aux recommandations des experts et à la littérature pour formuler une série de paramètres potentiels significatifs d'un point de vue agrobiologique et leur fourchette de variation raisonnable, puis nous avons procédé à de multiples analyses de sensibilité. Les paramètres AMAXB, SLATB, KDIFB, EFTB, CVO, FLTB ont été assortis d'une fourchette de fluctuation de  $\pm 5\%$ , car ils sont facilement influencés par la température et le rayonnement entre les différentes années de croissance. Dans la production en plein champ, l'état initial des plantes est plus difficile à contrôler, c'est pourquoi nous avons donné une plus grande marge de fluctuation ( $\pm 25\%$ ) à la biomasse initiale (IB), qui a été définie comme une combinaison du paramètre poids sec total initial de la culture (TDWI) et de l'indice de surface foliaire au moment du repiquage (LAIEM). Compte tenu de la variance d'enregistrement du stade de développement des plantes, nous avons varié de  $\pm 1$  jour pour calculer la somme des températures du repiquage à l'anthèse (TSUM1).

## 3. Résultats

### 3.1. Observations sur le terrain du poids sec et de l'absorption de nutriments par les composants de la plante

Le traitement DMPP représentait un potentiel de croissance, car il présentait la matière sèche de fruits la plus élevée ( $3456 \text{ kg ha}^{-1}$ ) parmi les six traitements en 2021, même si elle n'était pas significativement plus élevée que le deuxième traitement SCR le plus productif ( $3049 \text{ kg ha}^{-1}$ ) (annexe 3, tableau S3). La matière sèche des fruits du DMPP était la plus élevée au cours de la période de récolte 2021 et était significativement plus élevée que celle du CK en 2019 et 2020 (tableau 3 ; annexe 3, tableau S3). À l'exception du poids sec des feuilles et de la quantité d'azote des feuilles en 2021, le DMPP était significativement plus élevé que le CK en ce qui concerne le poids sec des tiges, des feuilles et des racines et la quantité d'azote (tableau 3). En ce qui concerne l'absorption de P et de K, qui n'a été mesurée qu'en 2021, le DMPP était significativement plus élevé que le CK en termes de quantité de P et de K dans les fruits et de quantité de K dans les feuilles, tandis que la quantité de P dans les feuilles n'était pas significativement différente de celle du CK (annexe 3, tableau S3). Une raison potentielle de la différence non significative de poids sec des feuilles entre le DMPP et le CK au cours de la période de récolte 2021 peut être liée à la découverte d'un nombre inattendu de feuilles tombées que nous n'avons pas pris en compte dans la mesure du poids sec des feuilles (annexe 3, tableau S4). Cela pourrait également être la cause de la quantité insignifiante de N et de P foliaire trouvée dans le DMPP.

**Tableau 3**

Moyenne observée de la matière sèche (MS) et de la quantité d'azote assimilée dans les feuilles, les tiges, les fruits et les racines pour chacune des années 2019 à 2021.

	2019		2020		2021	
( $\text{kg ha}^{-1}(\pm)$ )	CK	DMPP	CK	DMPP	CK	DMPP
Tige DM	359 ± 115	1036 ± 68**	510 ± 239	1177 ± 189*	620 ± 194	1282 ± 417**
Feuille DM	158 ± 44	923 ± 88**	372 ± 106	1451 ± 290**	432 ± 16	1322 ± 103
DM des fruits	925 ± 207	3713 ± 208**	1074 ± 72	3831 ± 197**	965 ± 132	3456 ± 231*
DM racine	111 ± 12	244 ± 46**	129 ± 23	247 ± 38*	145 ± 59	202 ± 8**
( $\text{g N kg}^{-1}(\pm)$ )						
Tige N%	3.0 ± 0.6	16.0 ± 0.7**	4.1 ± 1.1	14.9 ± 1.4**	5.9 ± 0.5	13.2 ± 1.3*
Feuille N	5.1 ± 0.8	41.8 ± 2.2**	12.2 ± 1.9	64.9 ± 4.1**	15.3 ± 1.4	68.0 ± 2.6
Fruit N	12.7 ± 0.9	82.2 ± 3.9**	21.9 ± 1.2	101.2 ± 6.7**	19.8 ± 2.6	101.1 ± 6.0**
Racine N	1.2 ± 0.2	3.4 ± 0.3**	1.3 ± 0.2	3.0 ± 0.2**	1.7 ± 0.4	3.2 ± 0.1**

Les comparaisons statistiques sont effectuées indépendamment pour chaque année. Les tests de signification ont été effectués par le test  $t$  des échantillons indépendants, \* signifie  $P < 0,05$ , \*\* signifie  $P < 0,01$ . Les résultats du test  $t$  de la MS des racines, de l'azote des feuilles et de l'azote des fruits en 2019 n'ont pas passé le test de Levene pour l'égalité des variances, nous avons donc utilisé le test de signification de l'ANOVA de Welch à la place. Les valeurs calculées sont basées sur les moyennes observées de la MS échantillonnée à la fin de la saison de croissance, c'est-à-dire 4 répétitions pour chaque année.

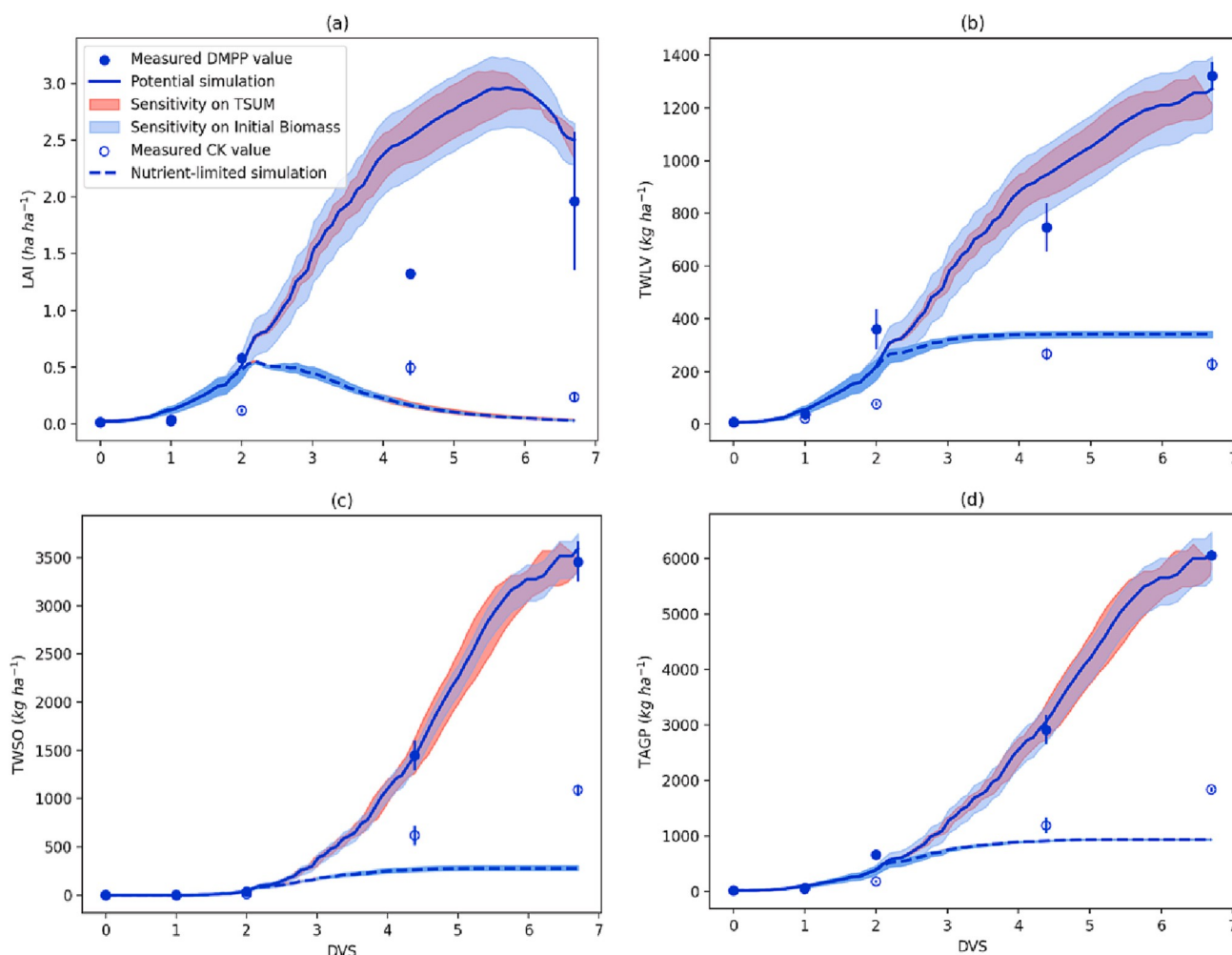
Les fonds verts indiquent une croissance potentielle, tandis que les fonds gris indiquent une croissance limitée par les nutriments.

### 3.2. Simulations potentielles calibrées de la production de matière sèche et de l'absorption d'éléments nutritifs par le chili

La figure 2 et le tableau 4 montrent que les valeurs prédites sont en bon accord avec les données observées pour les caractères liés à la matière sèche évalués dans cette étude. Les valeurs élevées de  $R^2$  (0,78-1,00) et de  $P_{(t)}$  (0,57-0,99) indiquent une bonne adéquation et une différence non significative entre les valeurs observées et prédites. La précision élevée est également confirmée par la rRMSE. Le poids sec potentiel des fruits (TWSO) et la production totale hors sol (TAGP) sont bien simulés avec une rRMSE de 0,06 et 0,07 respectivement. Le poids sec des feuilles (TWLV) a montré une rRMSE de 0,23, tandis que l'indice de surface foliaire simulé (LAI) (rRMSE = 0,76) a la plus mauvaise concordance avec les observations (Fig. 2). La prédiction du poids sec des fruits (TWSO) est la plus précise de toutes les variables de biomasse, avec un biais (135 kg ha<sup>-1</sup>) à la récolte finale inférieur à l'écart-type observé (SD ±231 kg ha<sup>-1</sup>). Le modèle reproduit également très bien les valeurs observées de la production totale aérienne (TAGP), avec une surestimation de seulement +1,1 % (52 kg ha<sup>-1</sup>) à la récolte, bien qu'il y ait une tendance à la sous-estimation au stade du début de la fructification. La prédiction du poids sec des feuilles (TWLV) est moins précise que TWSO et TAGP, avec une sous-estimation de -21 % au stade du début de la fructification et une surestimation de +32 % au stade de la mi-fructification.

Cette fluctuation se traduit par une bonne concordance lors de la récolte finale, avec un biais plus faible (50 kg ha<sup>-1</sup>) que l'écart type observé (SD ±51 kg ha<sup>-1</sup>). Le LAI est le moins bien prédit, car la courbe simulée atteint son maximum après le stade mi-fructification et diminue ensuite progressivement. Le LAI simulé est presque deux fois plus élevé que la mesure au stade mi-fructification et présente une surestimation de +28 % à la récolte finale.

La figure 3 et le tableau 4 montrent que les prévisions d'absorption de NPK sont précises en ce qui concerne la valeur  $R^2$  (0,78-0,99) et  $P_{(t)}$  (0,60-0,97). En termes de rRMSE, cependant, la simulation du modèle d'absorption des nutriments est généralement inférieure à la simulation de la matière sèche, avec la quantité de N dans les fruits (rRMSE = 0,29) et les feuilles (rRMSE = 0,46), la quantité de P dans les fruits (rRMSE = 0,39) et les feuilles (rRMSE = 0,43), et la quantité de K dans les fruits (rRMSE = 0,46) et les feuilles (rRMSE = 0,30) (tableau 4). Les courbes simulées de la quantité de NPK dans les feuilles montrent une tendance à la hausse due à l'absorption des nutriments, puis une tendance à la baisse due à la translocation des nutriments. La translocation la plus précoce des nutriments des feuilles vers les fruits se produit dans la quantité de P des feuilles avant le stade de la mi-fructification, suivie par la quantité de K des feuilles, puis par la quantité de N des feuilles autour de la récolte. En revanche, les courbes simulées de la quantité de NPK dans les fruits augmentent continuellement (Fig. 3.). Notre modèle sous-estime la quantité de NPK dans les feuilles au début de la fructification (N : -20% ; P : -4% ; K : -6%), la surestime à la mi-fructification (N : +33% ; P : +37% ; K : +33%), et la sous-estime à la fin de la fructification (N : +33% ; P : +37% ; K : +33%).



**Fig. 2.** Valeurs simulées par le modèle et observées de (a) l'indice de surface foliaire (LAI), (b) du poids sec total des feuilles (TWLV), (c) du poids sec total des fruits (TWSO), et (d) de la production aérienne totale (TAGP) pour l'étalonnage du modèle (2021) et leurs analyses de sensibilité, dans des conditions potentielles et limitées en nutriments. L'axe des x représente les stades de développement du piment, depuis la transplantation (DVS = 0), l'anthèse (DVS = 1), le début de la fructification (DVS = 2), le milieu de la fructification (DVS = 4,39), jusqu'au pic de la fructification/récolte (DVS = 6,7). Les lignes continues représentent des simulations potentielles (PP) et les lignes pointillées des simulations limitées en nutriments (NL). La sensibilité à la biomasse initiale au repiquage ( $\pm 25\%$ ) est illustrée dans les zones ombrées en bleu clair, tandis que les zones ombrées en rouge représentent les variations à  $\pm 1$  jour de la somme des températures du repiquage à l'anthèse (TSUM1). Les données de terrain concernant le traitement par engrais contre la dénitrification (DMPP) sont représentées par des points pleins, tandis que le traitement sans engrais (CK) est représenté par des cercles. Les barres d'erreur indiquent l'écart-type (ET) des valeurs observées. (Pour l'interprétation des références aux couleurs dans la légende de cette figure, le lecteur est prié de se référer à la version web de cet article).

**Tableau 4**

Calibration de *WOFOST-Chili* (jeu de données 2021) et validation (jeux de données 2019 et 2020) pour la simulation potentielle (PP, arrière-plan vert) et la simulation limitée en nutriments (NL, arrière-plan gris). Les chiffres rouges indiquent une performance insatisfaisante du modèle.

pp simulation	(R) <sup>(2)k</sup>			rRMSE <sup>k</sup>			NL simulation	(R) <sup>(2)k</sup>			rRMSE <sup>k</sup>		
	C2021	V2020	V2019	C2021	V2020	V2019		C2021	V2020	V2019	C2021	V2020	V2019
TWLV	0.95	0.99	0.74	0.23	0.10	0.19	0.90	1.00	<u>0.00</u>	<b>0.74</b>	0.32	0.69	
TWSO	1.00	0.96	1.00	0.06	0.23	0.46	0.90	0.65	0.89	<b>1.16</b>	<b>0.94</b>	<b>0.92</b>	
TAGP	1.00	0.96	0.99	0.07	0.19	0.30	0.88	0.80	0.92	0.67	0.61	0.60	
NamountST	0.90	0.65	0.81	0.32	0.24	0.40	0.01	1.00	<u>0.79</u>	<b>1.15</b>	<b>1.08</b>	0.64	
NamountLV	0.82	0.96	0.62	0.46	0.16	0.17	0.04	0.89	0.94	<b>1.26</b>	<b>0.92</b>	0.53	
NamountSO	0.96	1.00	0.98	0.29	0.30	0.47	0.78	0.78	0.91	<b>1.11</b>	<b>0.85</b>	0.53	
NamountRT	0.96	0.84	0.72	0.39	0.44	0.40	0.05	<u>0.99</u>	<u>0.48</u>	<b>1.26</b>	<b>0.87</b>	<b>0.85</b>	
	C2021			C2021			C2021			C2021			
LAI	0.91			0.76			0.00			1.			
PamountST	0.97			0.29			0.88			0.29			
PamountLV	0.78			0.43			<b>0.47</b>			0.65			
PamountSO	0.99			0.39			0.88			<b>0.97</b>			
PamountRT	0.91			0.33			0.80			<b>0.79</b>			
KamountST	0.96			0.36			0.92			0.58			
KamountLV	0.91			0.30			0.75			0.50			
KamountSO	0.94			0.46			0.89			<b>1.00</b>			
KamountRT	0.98			<b>0.89</b>			0.90			0.54			

① Coefficient de détermination :  $R^2 = \frac{[\sum (O_i - \text{Omean})(P_i - \text{Pmean})]^2}{\sum (O_i - \text{Omean})^2 \sum (P_i - \text{Pmean})^2}$ ; a été classé comme insatisfaisant ( $R^2 \leq 0.6$ ),

satisfaisant ( $0.6 < R^2 \leq 0.7$ ), bon ( $0.7 < R^2 \leq 0.8$ ) et très bon ( $R^2 > 0.8$ ). Si la valeur de  $R^2$  ne passait pas le T. TEST, elle était classée comme  $P_i \leq 0.05$  et soulignée.

$$rRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - \text{Omean})^2}}{\text{Omean}}$$

② Erreur quadratique moyenne relative :  $rRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - \text{Omean})^2}}{\text{Omean}}$  Les résultats de l'étude ont été classés comme suit : précision parfaite ( $rRMSE = 0$ ), acceptable ( $rRMSE \leq 0.70$ ).

ST, LV, SO, RT sont les abréviations pour les tiges, les feuilles, les organes de stockage (fruits) et les racines.

La quantité de NPK simulée dans les fruits a été réduite à nouveau lors de la récolte finale (N : -29% ; P : -26% ; K : -20%). La quantité de NPK simulée dans les fruits est sous-estimée au stade de la mi-fructification (N :

-44% ; P : -24% ; K : -32%). Lors de la récolte finale, la quantité de P dans les fruits est sous-estimée de -19% et la quantité de K dans les fruits est surestimée de +17%, alors que la quantité de N dans les fruits est parfaitement prédite (Fig. 3 ; Annexe 4, Tableau S6). En général, à part une faible performance du modèle sur la quantité de K dans les racines ( $rRMSE = 0.89$ ) (Annexe 4, Fig. S3), *WOFOST-Chili* montre une bonne performance sur les résultats du modèle pertinents pour les simulations d'absorption des nutriments (Tableau 4).

Les simulations potentielles sont sensibles à un ajustement de  $\pm 5\%$  de AMAXTB, EFFTB, CVL, FLTB, KDIFTB et SLATB (Annexe 5, Fig. S5-).

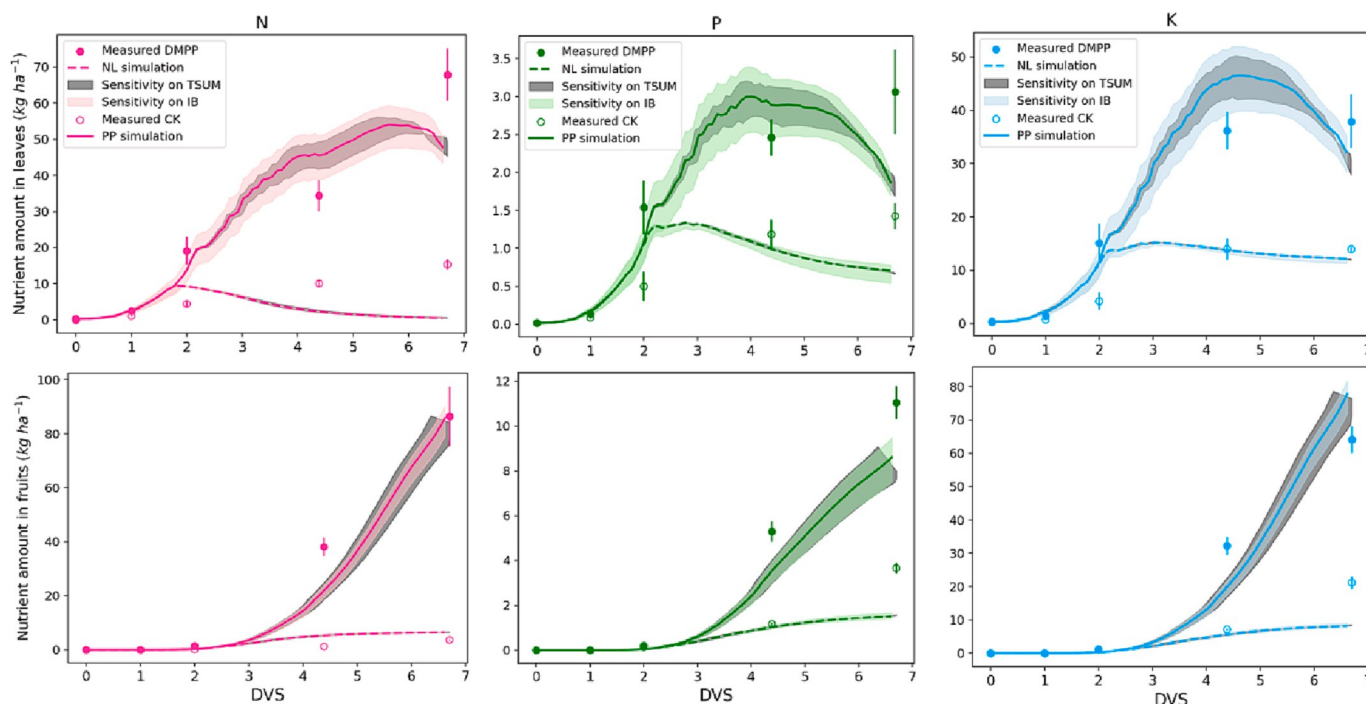
S16), mais sont plus sensibles lorsque l'on ajuste TSUM1 et IB (Fig. 2 & 3). Par rapport aux simulations de croissance des fruits, les simulations de croissance potentielle des feuilles se sont révélées plus sensibles aux changements de paramètres. En 2021, lors de l'ajustement d'un IB de  $\pm 25\%$ , les simulations potentielles de LAI, TWLV et les fluctuations de la quantité de NPK des feuilles à la récolte finale réagissent chacune approximativement de -10 % à +5 %.

-10 % à +5 %. Le même ajustement a eu moins d'influence sur les simulations potentielles des quantités de NPK pour le TWSO et les fruits, avec environ (-7%), +5% à la récolte. En ajustant le TSUM1 avec les observations de -12 °C d (un jour avant) et +15 °C d (un jour après), les simulations de croissance potentielle des feuilles sont affectées d'environ -6% à +7%. De même, l'influence sur les simulations de croissance des fruits est moindre, avec (-3%, 1%) (Fig. 2 & 3). Dans l'ensemble, l'analyse de sensibilité a élargi les

Dans l'ensemble, l'analyse de sensibilité a élargi les fourchettes des résultats potentiels des simulations, ce qui signifie que davantage de valeurs observées se situent à l'intérieur des fourchettes de sensibilité.

### 3.3. Comparaison des simulations calibrées limitées en nutriments avec les observations dans le cadre du traitement CK

Le modèle *WOFOST-Chili* peut simuler à la fois des conditions potentielles (PP) et des conditions limitées en nutriments (NL). Nous comparons les simulations NL avec les observations sous le traitement CK (pas d'engrais) dans le champ dans les Fig. 2 et 3 (lignes pointillées) et à nouveau dans le Tableau 4. Pour les caractères liés à la biomasse, les valeurs  $R^2(0.88-0.90)$  indiquent une très bonne concordance entre les valeurs prédites et observées, et le test  $t$  indique une similarité ( $P_{(0)} > 0.35$ ) entre les valeurs prédites et observées pour toutes les variables de la biomasse. La performance du modèle n'est bonne que pour le TAGP ( $rRMSE = 0.67$ ) en termes de valeurs  $rRMSE$ , mais la TWLV ( $rRMSE = 0.74$ ) et la TWSO ( $rRMSE = 1.16$ ) sont moins acceptables (tableau 4). En outre, nos résultats indiquent une simulation LAI relativement médiocre puisque la valeur  $R^2(0.00)$  et la valeur  $rRMSE(1.38)$  se situent en dehors de la plage standard des performances acceptables du modèle ( $R^2 > 0.60$  ;  $rRMSE \leq 0.70$ ) (tableau 4). En général, la configuration NL surestime la VLT après le stade de l'anthèse, mais sous-estime l'OST après le stade du début de la fructification, ce qui se traduit par une surestimation de +131 % pour la VLT et une sous-estimation de -70 % pour l'OST à la récolte (annexe 4, tableau S6). En raison d'une plus grande proportion de TWSO, la méthode NL



**Fig. 3.** Quantités d'azote (à gauche), de phosphore (au milieu) et de potassium (à droite) simulées par le modèle et observées dans les feuilles (en haut) et les fruits (en bas) pour la calibration du modèle (2021), dans des conditions potentielles (PP, lignes continues) et limitées en nutriments (NL, lignes pointillées). L'analyse de sensibilité sur la biomasse initiale ( $\pm 25\%$ ) est représentée par la zone de couleur claire, tandis que la zone gris foncé représente les fluctuations à  $\pm 1$  jour de la somme des températures de la transplantation à l'anthesis (TSUM1).

La configuration de l'indice de croissance de la plante sous-estime également le TAGP (-57%) à la récolte. Le pic de la courbe LAI simulée se produit prématurément, entraînant une surestimation au stade du début de la fructification (+293%) et une sous-estimation aux stades de la mi-fructification (-55%) et de la récolte finale (-73%) (Fig. 2).

Selon les indices statistiques, les valeurs  $R^2$  sont  $>0,75$  (bonne à très bonne performance du modèle) pour huit des douze variables pertinentes pour l'absorption des nutriments. Les valeurs élevées de  $P_{(0,20-0,88)}$  indiquent des différences non significatives entre les valeurs observées et prédites de toutes les variables d'absorption des nutriments. La plupart des rRMSE sont  $>0,70$  (performance de modèle non acceptable), sauf pour les simulations PamountLV et KamountLV. La configuration NL surestime les quantités de nutriments dans les feuilles avant le stade du début de la fructification et prédit la translocation des nutriments dans les feuilles trop tôt. Ainsi, la surestimation de NamountLV (+136%), PamountLV (+282%) et KamountLV (+418%) au moment de la transplantation devient une sous-estimation de NamountLV (-97%), PamountLV (-49%) et KamountLV (-13%) au moment de la récolte. La configuration NL simule une augmentation de la quantité de NPK dans les fruits, mais les quantités simulées de P et de K dans les fruits sont toutes deux sous-estimées d'environ -60%, tandis que la NamountSO est surestimée de +72% à la récolte (Fig. 3, Tableau 4).

Dans l'ensemble, la performance du modèle dans des conditions limitées en nutriments n'est pas aussi bonne que dans des conditions potentielles.

n'est pas aussi bonne que dans les conditions potentielles. Le fait de considérer l'analyse de sensibilité dans les conditions NL ne change pas notre jugement sur la performance du modèle (Fig. 2 & 3), dans ce cas la carence en nutriments est supposée avoir la priorité sur l'influence de tout autre paramètre lié à l'environnement sur les simulations de croissance des plantes.

### 3.4. Validations du modèle dans des configurations à la fois potentielles et limitées en nutriments

Afin de vérifier si WOFOST-Chili fonctionne bien les autres années, nous l'avons validé en utilisant des données de terrain collectées aux stades de début de fructification, de mi-fructification et de pic de fructification final en 2019 et 2020. Les résultats validés indiquent une bonne concordance avec les valeurs mesurées dans la configuration PP pour les deux années (Fig. 4 et Tableau 4 ; Annexe 4, Fig. S4). Les simulations du modèle sur la croissance des feuilles sont tout à fait satisfaisantes, avec TWLV (rRMSE = 0,10) et

NamoutLV (rRMSE = 0,16) en 2020, et TWLV (rRMSE = 0,19) et NamoutLV (rRMSE = 0,17) en 2019. Les simulations du modèle sur la croissance des fruits sont également acceptables, avec TWSO (rRMSE = 0,23) et NamoutSO (rRMSE = 0,30) en 2020, et TWSO (rRMSE = 0,46) et NamoutSO (rRMSE = 0,47) en 2019. Comme pour les résultats calibrés, la performance du modèle est plus faible dans la configuration NL que dans la configuration PP, avec TWLV (rRMSE = 0,32), TWSO (rRMSE = 0,94), NamoutLV (rRMSE = 0,92) et NamoutSO (rRMSE = 0,85) en 2020, et TWLV (rRMSE = 0,69), TWSO (rRMSE = 0,92), NamoutLV (rRMSE = 0,53), et NamoutSO (rRMSE = 0,53) en 2019.

Lors de la validation de la configuration PP, le modèle sous-estime la TWLV au stade mi-fructification (-27%) en 2019 et au stade début-fructification (-22%) en 2020. La NamoutLV est également sous-estimée à la mi-fructification (-23%) en 2019 et à la récolte finale (-17%) en 2020. La sous-estimation la plus grave se produit dans les simulations de fruits, avec -32% (2019) et -14% (2020) dans TWSO et -31% (2019) et -21% (2020) dans NamoutSO à la récolte finale (figure 4 ; annexe 4, tableau S6).

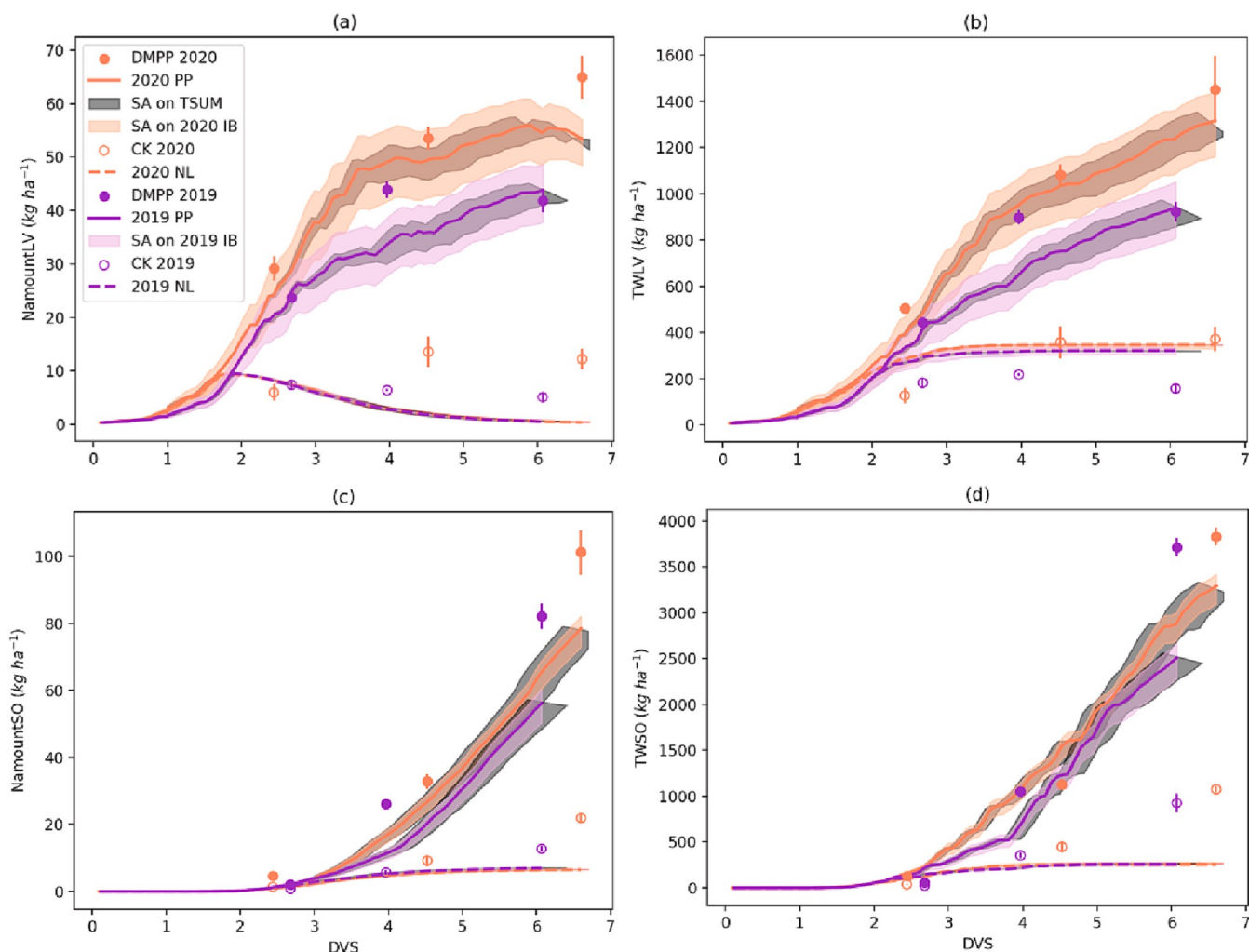
Lors de la validation de la configuration NL, le modèle surestime la VLT au stade du début de la fructification (+67%) en 2020, et au stade de la mi-fructification (+46%) et de la récolte finale (+116%) en 2019. Le poids sec des fruits est fortement sous-estimé, à -71% (2019) et -76% (2020) à la récolte finale (Fig. 4). Comme pour les simulations d'absorption d'azote, le pic de la quantité d'azote dans les feuilles apparaît trop tôt, ce qui entraîne une surestimation (+2% en 2019, +69% en 2020) au moment de la récolte finale ; +69% en 2020) au stade du début de la fructification et des sous-estimations au stade de la mi-fructification (-55% en 2019 ; -84% en 2020) et de la récolte finale (-89% en 2019 ; -97% en 2020). La quantité d'azote dans les fruits est sous-estimée au moment de la récolte finale (-45 %) en 2019 et au moment de la mi-fructification (-35 %) et de la récolte finale (-70 %) en 2020 (figure 4 ; annexe 4, tableau S6).

Les simulations dans le cadre de la configuration PP se révèlent sensibles à une variation de  $\pm$

Ajustement de 5 % pour AMAXTB, EFTTB, CVL, FLTB, KDIFTB et SLATB.

Les fourchettes les plus influentes sur la production aérienne totale finale sont (-12%, +9%) pour FLTB (Annexe 5, Fig. S8), (-12%, +8%) pour SLATB (annexe 5, figure S10) et la fourchette la moins influente est (-4 %, +3 %) pour l'AMAXTB (annexe 5, figure S5). En outre, un changement important lors de la récolte finale est constaté par un ajustement de  $\pm 25$  % de l'IB, ce qui entraîne des fluctuations simulées pour TWLV (-14 %, +13 %), TWSO (-9 %, +8 %), NamoutLV (-13 %, +8 %) et NamoutLV (-13 %, +8 %).





**Fig. 4.** Valeurs simulées par le modèle et observées de (a) la teneur en azote des feuilles (NamountLV), (b) le poids sec total des feuilles (TWLV), (c) la teneur en azote des fruits (NamountSO), et (d) le poids sec total des fruits (TWSO) pour la validation du modèle (2019 & 2020). La couleur violette représente les résultats de la validation en 2019 et la couleur orange pour 2020. Les barres d'erreur indiquent l'écart-type des valeurs observées. (Pour l'interprétation des références aux couleurs dans la légende de cette figure, le lecteur est renvoyé à la version web de cet article).

+12%), et NamountSO (-11%, +7%) (Fig. 4). En ajustant le TSUM1 avec les observations de -12 °C d (un jour à l'avance) et + 15 °C d (un jour décalé), les NamountLV et NamountSO simulés réagissent jusqu'à (-4%, 4%) et (-2%, +2%) (Fig. 4). Comme pour les résultats des tests de sensibilité pour la calibration du modèle (Fig. 2 ; Fig. 3), aucun changement évident n'est perçu dans la configuration NL (Fig. 4). Dans l'ensemble, l'analyse de sensibilité sur la validation du modèle confirme l'importance des paramètres sélectionnés sur la prédiction du modèle, ce qui prouve notre hypothèse historique selon laquelle les incertitudes du modèle entre les différentes années sont inévitables. Cela fournit également des indications sur les domaines dans lesquels nous devrions déployer des efforts pour réduire ces variations.

#### 4. Discussion

##### 4.1. Fiabilité du modèle pour les simulations relatives à la biomasse

Comparé à d'autres modèles existants pour le poivron, *WOFOST-Chili* s'est avéré aussi performant pour la production totale hors-sol et la MS des fruits. *Le VegSyst* a montré une très bonne performance sur la production de matière sèche (DMP) pour un cultivar de poivron conventionnel en 2006, avec un rRMSE = 0,09 et un indice d'accord de Wilmott d = 0,99 (Gime'nez et al., 2013). *WOFOST-Chili* montre une performance de modèle aussi bonne que *VegSyst*, avec rRMSE = 0,07 et d = 1,00. La matière sèche des fruits simulée à cinq niveaux différents d'engrais azoté de *CROPGRO-Bellpepper* calibré à la maturité se situait tous à moins d'un

de l'écart-type de leurs valeurs observées. De même, *WOFOST-Chili* présente un biais plus faible entre les valeurs simulées et observées lors de la récolte finale (135 kg ha<sup>-1</sup>) que l'écart-type observé (SD ±231 kg ha<sup>-1</sup>). Par rapport aux variables du modèle *WOFOST-Chili* liées à la biomasse, le résultat simulé le moins fiable est celui de la simulation de l'indice LAI.

La dynamique du LAI simulé est conforme à la réalité, augmentant rapidement après l'anthèse, surtout en cas de fertilisation, alors que le pic du LAI dans le cas du traitement sans fertilisation apparaît plus tôt en raison de la sénescence prématurée des feuilles (Yue et al., 2022). De manière inattendue, bien que la tendance du LAI simulé corresponde à la réalité, les valeurs réelles du LAI simulé étaient plus élevées que ce que nous avons observé. Cependant, nous pensons que la raison principale est que nous avons sous-mesuré le LAI réel. Nous avons d'abord utilisé le compteur foliaire portable YMJ-A pour mesurer et agréger le LA de chaque feuille prélevée sur une seule plante, puis nous avons divisé ce chiffre par la surface de sol occupée par cette plante, répliqué le processus sur trois plantes et pris la moyenne. En principe, cette valeur estimée du LAI ignore les inégalités entre les plantes et les ombres des branches et des feuilles (Fangyi et al., 2021). En outre, nous avons constaté que l'équipement YMJ-A ne convient pas aux feuilles de piment petites et irrégulières. Il convient mieux aux feuilles plates et étroites qui sont riches en couches cireuses et qui ne rétrécissent pas facilement pendant les mesures, comme les feuilles de maïs. En outre, nos mesures LA ont eu lieu pendant l'été chaud. Les feuilles de chili sont particulièrement sujettes à la perte d'eau, au flétrissement, au rétrécissement et même à la déchirure, ce qui peut facilement entraîner une sous-estimation du LA. En remplacement, la feuille de bureau couramment utilisée

Le mesureur de surface LI-3000 est recommandé, car il permet de mesurer rapidement un lot de feuilles avant que la perte d'eau et le flétrissement n'entraînent des erreurs de mesure. En outre, nous avons comparé nos données de LAI à celles de 3 autres cultivars de piments, estimées dans leur cas à l'aide de la méthode de pesée au poinçon, et tous ont trouvé un LAI maximal plus important que notre LAI observé  $p_k = 2,00 : ^\circ\text{Qianla No. 10}^{\circ} (4,17) > ^\circ\text{Qianjiao No. 5}^{\circ} (3,37) > ^\circ\text{Zhongjiao No. 6}^{\circ} (2,61)$  (Yue et al., 2022). Les méthodes de l'image, de la grille et de la pesée de l'échantillon de papier prennent plus de temps, mais sont généralement plus précises que la méthode de l'instrument pour mesurer le LA (Fangyi et al., 2021). Ces comparaisons suggèrent fortement que la valeur du LAI observée sur le terrain est inférieure à ce qu'elle devrait être.

Nos analyses de sensibilité suggèrent que l'incertitude du modèle de *WOFOST-Chili* provient de certaines variables initialisées (IB) et de paramètres sensibles au climat (TSUM1, TSUM2, IB, AMAXTB, EFFTB, CVL, FLTB, KDIFTB et SLATB). La performance plus faible du modèle à partir de l'analyse de sensibilité pour les mêmes paramètres pour les deux autres années de validation démontre également que l'incertitude du modèle de *WOFOST-Chili* est associée aux réponses du modèle aux entrées météorologiques. Une autre raison de l'imprécision de la simulation du LAI peut être trouvée dans le mécanisme codé dans le modèle de culture. Des surestimations du LAI ont également été constatées dans d'autres études *WOFOST* sur le riz (Mukherjee et al., 2011 ; Roetter et al., 1998 ; Shekhar et al., 2008 ; Zhu et al., 2018), le tournesol (Todorovic et al., 2009) et le blé (Castaneda-Vera et al., 2015). *WOFOST* calcule le LAI en deux étapes : croissance exponentielle limitée par les puits et croissance linéaire limitée par les sources. Dans la première étape, le LAI est déterminé par la température accumulée effective ( $^{\circ}\text{C d}$ ) et le taux maximum de LAI par degré jour ( $\text{ha ha}^{-1} (^{\circ})$ ). Dans la deuxième étape, cependant, le LAI est déterminé par le poids quotidien des feuilles et le SLA. En fait, *WOFOST* gère de manière complexe la phase de LAI limitée par la source, en tenant compte de la sénescence des feuilles, de l'auto-ombrage et de la surface verte supplémentaire des tiges fonctionnelles et des organes de stockage qui absorbent le rayonnement (de Wit et al., 2020). Selon Castaneda-Vera et al. (2015), plus la complexité de l'approche informatique utilisée pour simuler un processus de culture spécifique est élevée, plus son incertitude sera grande. Ceci est raisonnable car les calculs complexes utilisent normalement plus de paramètres et, par conséquent, ont des relations internes au modèle plus complexes. Nous supposons donc que la logistique mathématique complexe des simulations LAI limitées à la source dans *WOFOST* peut réduire la précision de la prédiction dans une certaine mesure. Une tendance actuelle de la recherche est d'utiliser les données LAI dérivées des satellites pour aider à l'auto-correction des paramètres sensibles, puis d'effectuer la prédiction du modèle. Une étude exemplaire sur le soja a optimisé les paramètres de la capacité du champ, de la profondeur du sol, de l'azote transloqué des feuilles aux graines et du LAI initial sur la base des données LAI dérivées des satellites, et a amélioré avec succès la précision de la prédiction (Gasol et al., 2021). Ainsi, l'assimilation de données pourrait être une solution pour surmonter les limites des modèles de culture basés sur les processus simulant le LAI, tels que *WOFOST-Chili*.

Nous avons constaté que la précision de simulation de TWLV n'est pas aussi bonne que celle de TWSO et TAGP (Fig. 2). Cela peut s'expliquer par le fait que de fortes précipitations se sont produites en 2021 à 40 ddt (jours après la transplantation) pendant la phase de développement des stades précoce à moyen de la fructification (33-60 ddt, voir Annexe 1, Fig. S2). Les vents forts et la pluie sur le site ont probablement provoqué la chute des feuilles. Comme nous n'avons pas tenu compte des feuilles tombées dans la mesure du poids sec des feuilles, le poids sec des feuilles observé au stade mi-fruit (60 ddt) était inférieur à la valeur simulée (Fig. 2). Dans *WOFOST*, le TWLV est calculé en additionnant le poids sec des feuilles mortes et des nouvelles feuilles, et ce dernier est calculé en multipliant la biomasse aérienne par le facteur de répartition des feuilles (FRLV). Sans compter les feuilles mortes, le FRLV est sous-estimé, ce qui fait que la TWLV est plus faible que prévu. Nous avons également effectué une analyse de sensibilité en nous concentrant sur les paramètres potentiellement influents, tels que TSUM1 et AMAXTB, sur la simulation de la VLT. Nos résultats confirment le principe selon lequel une anthèse plus tardive (TSUM1 plus élevé) et une efficacité photosynthétique plus élevée (AMAXTB plus élevé) entraîneraient une TWLV plus élevée. Pour augmenter la précision du modèle, nous suggérons d'utiliser des mesures de feuilles mortes pour calibrer le taux de mortalité dû au stress hydrique, à l'auto-ombrage et au vieillissement au lieu d'utiliser des hypothèses.

#### 4.2. Fiabilité du modèle pour les simulations d'absorption des nutriments

Dans cette étude, nous avons constaté que les simulations de matière sèche étaient plus précises que les simulations d'absorption d'éléments nutritifs. Un phénomène similaire est également observé dans d'autres études de modèles de culture. Par exemple, dans le modèle *STICS-chickpea*, les RMSE des simulations calibrées/validées du rendement en grains à différents niveaux d'application d'azote étaient N30 : 0,401/0,073 ; N60 : 0,154/0,223 ; et N100 : 0,013/0,16, alors que la production d'azote au-dessus du sol était de N30 : 48,86/13,24 ; N60 : 30,81/4,03 ; et N100 : 12,67/

11,72 (Kherif et al., 2022). Apparemment, *STICS-chickpea* a également obtenu de meilleurs résultats pour les simulations de matière sèche que pour les simulations d'absorption d'azote. Nous avons également constaté que dans le modèle *VegSyst-Outdoors*, la simulation de la production de matière sèche d'une culture d'épinards de printemps (RMSE = 0,25) était plus performante que la simulation de l'absorption d'azote (RMSE = 20,96) (Gimenez et al., 2019).

Dans *WOFOST*, l'absorption dynamique des nutriments est calculée selon Shibu et al. (2010). L'absorption d'éléments nutritifs est déterminée par la demande des cultures, mais dépend également de la quantité d'éléments nutritifs disponibles que le sol peut fournir. Les processus tels que le flux de masse et la diffusion ne sont pas simulés. Au lieu de cela, l'absorption des nutriments est simplement estimée dans une approche de "comptabilité". Le total des nutriments absorbés, provenant à la fois de l'apport indigène du sol et de la fertilisation, est ensuite réparti entre les différents organes proportionnellement à leurs besoins. À un certain stade de développement (souvent après l'anthèse), les éléments nutritifs transitent des feuilles et des tiges vers les organes de stockage. Le piment étant une culture indéterminée, une partie des nutriments présents dans les feuilles devra encore soutenir la croissance des feuilles après l'anthèse et la fructification, au lieu d'être entièrement transférée dans les fruits. Pour améliorer encore les simulations d'absorption des nutriments dans *WOFOST-Chili*, de nouveaux algorithmes permettant de prédire le début de la translocation des nutriments pourraient être nécessaires. Contrairement à la dynamique des nutriments, les simulations de matière sèche utilisent des processus dynamiques plus détaillés et organisés (par exemple, le processus d'accumulation de la biomasse a été mis en relation avec la température/DVS). Nous avons également mesuré plus de paramètres (intermédiaires) de la photosynthèse (par exemple, AMAX, EFF) que de processus de nutriments, ce qui explique la meilleure performance de *WOFOST-Chili* sur les variables liées à la biomasse.

Nous tentons d'expliquer la variation annuelle des simulations d'absorption des nutriments par des facteurs environnementaux. Zhou et al. (2017) ont conclu que les variations de la température moyenne journalière et du rayonnement affectent le taux de croissance du maïs et la durée du remplissage des grains, ce qui peut entraîner une modification du taux d'absorption de l'azote. Comme prévu, le rayonnement plus faible et le plus grand nombre de jours de pluie en 2019 ont entraîné des valeurs simulées de quantité de nutriments dans le chili plus faibles qu'en 2020 et 2021. Cependant, *WOFOST-Chili* ne tient pas compte de la possibilité que la partie inférieure de la canopée du piment absorbe mieux la lumière diffuse pour faire face à ces conditions défavorables. Par conséquent, un écart plus important entre les quantités de nutriments simulées et observées a été constaté en 2019. Une autre raison objective est que les paramètres sensibles à la température et au rayonnement (par exemple, SLA) pourraient varier d'une année à l'autre, mais n'ont été calibrés qu'avec les données de mesure ponctuelles de 2021.

#### 4.3. Fiabilité du modèle dans une configuration limitée par les nutriments

Dans cette étude, comme dans d'autres études de modèles, nous avons trouvé de meilleurs résultats de simulation dans la configuration PP que dans la configuration NL. Une étude *AquaCrop* sur le maïs a montré que l'incertitude la plus faible concernant le rendement estimé se produisait en cas de stress hydrique et azoté minimal (Guo et al., 2020). Une autre étude du modèle de maïs *HYDRUS-2D* a reconnu différents niveaux de précision de prédiction de l'absorption d'azote sous différentes fertilisations d'azote (Ranjbar et al., 2022). Une étude de *STICS-chickpea* a également montré que l'absorption d'azote par la biomasse aérienne était moins bien simulée en cas de faible application d'azote (30 kg N  $\text{ha}^{-1} (^{\circ})$ ) qu'en cas d'application modérée (60 kg N  $\text{ha}^{-1} (^{\circ})$ ) et élevée (100 kg N  $\text{ha}^{-1} (^{\circ})$ ). (Kherif et al., 2022).

Il n'est pas surprenant que la configuration de croissance potentielle soit plus performante puisqu'elle est toujours le point de départ de la construction d'un nouveau modèle de culture. *WOFOST* apporte un nouveau concept de "stress nutritif" lors du développement de la configuration NL. Il part du principe que les effets du stress nutritif peuvent être modélisés en multipliant les coefficients de stress liés aux nutriments sur le taux d'assimilation, la répartition de la matière sèche dans les feuilles,

et le taux d'extension des feuilles. Dans *WOFOST-Chili*, les coefficients de stress nutritionnel (par exemple,  $NLAI\_NPK$ ,  $NLUE\_NPK$ ) sont représentés par des valeurs uniques. Inspiré par un modèle dynamique de LAI du piment sous différents niveaux d'azote établi par Yue et al. (2022), les paramètres mesurables intermédiaires (par exemple, les taux d'augmentation et de diminution du LAI) sont liés à différents niveaux d'approvisionnement en nutriments. Si nous pouvions décrire les coefficients de stress nutritif en fonction des changements dynamiques de la DVS, puis relier la DVS aux niveaux de fer-engrais ou à d'autres facteurs environnementaux potentiellement influents tels que la température, nous pourrions réduire l'incertitude du modèle dans la configuration NL.

#### 4.4. Perspectives d'avenir pour *WOFOST-chili*

Notre étude montre qu'il est possible d'utiliser *WOFOST* pour simuler la croissance et le développement du piment sans trop changer la structure du modèle générique. Nous fournissons des solutions en adaptant les stades de développement définis par l'utilisateur afin d'imiter la croissance depuis la transplantation jusqu'à la fructification, puis jusqu'à la maturité. Cette nouvelle méthode pourrait servir de référence pour étendre l'application des modèles de culture conçus à l'origine pour les céréales aux légumes et à d'autres cultures non céréalières, ce qui contribuera à combler les lacunes dans les domaines de recherche de ces modèles de culture basés sur les processus.

En étant capable de suivre les réactions d'absorption des nutriments avec et sans application d'engrais, *WOFOST-Chili* aiderait à calculer le lessivage potentiel du sol vers les systèmes d'eau, ce qui est précieux pour guider les stratégies d'engrais durables. Le modèle actuel ne simule que la réponse des cultures à deux états extrêmes d'application d'engrais (conditions optimales et conditions de carence en éléments nutritifs), alors que des simulations avec davantage de gradients d'engrais pourraient être approfondies à l'avenir. Pour mieux modéliser la réponse de l'engrais au rendement sec et à l'absorption d'éléments nutritifs, nous demandons également une description dynamique affinée des flux d'éléments nutritifs dans le module du sol pour évaluer l'effet de stratégies d'engrais élargies, telles que l'utilisation de nouveaux produits d'engrais (par exemple, les engrais organiques, les produits de dénitrification et les engrais à libération contrôlée lente).

En raison des coûts élevés des analyses NPK en laboratoire, l'analyse du sol et la technologie de fertilisation par formules ne sont pas toujours réalistes dans de nombreuses régions. Heureusement, avec la disponibilité d'instruments moins coûteux pour la mesure immédiate de l'état de l'azote dans les cultures, tels que le SPAD® (Minolta), l'Hydro N-Tester® (Yara), le N-sensor® (Yara) et le  $\text{GPN}$  (Grande Paroisse) (Naud et al., 2008), il devient possible de tester les simulations d'absorption d'éléments nutritifs à plus grande échelle. Cela permettra d'accélérer l'amélioration du modèle. Etant donné que le modèle générique original de *WOFOST* a été conçu pour les cultures céréalières, *WOFOST-Chili* présente certaines limites. Le processus de translocation des nutriments devrait être encore amélioré pour correspondre à la croissance simultanée des feuilles et des fruits après l'anthèse. Il est également essentiel de tester le modèle sur d'autres sites, avec d'autres conditions climatiques et d'autres périodes de plantation. L'évaluation de la transférabilité du modèle a suggéré que les recherches futures devraient se concentrer sur les stades initiaux du développement des cultures, et en particulier sur les paramètres sensibles au climat lors de l'expansion des cultures.

*WOFOST-Chili* à différentes années de croissance.

De manière plus générale, le changement climatique étant susceptible d'avoir un impact négatif sur la production de piments, *WOFOST-Chili* pourrait s'avérer utile pour fournir des options d'adaptation. Par exemple, il pourrait être utilisé pour guider l'ajustement des dates de semis et de récolte, ou même pour guider la réaffectation des zones de culture appropriées. Il pourrait également être utilisé pour évaluer des stratégies alternatives de fertilisation et d'irrigation, ou pour guider le développement de nouveaux cultivars de chili. Sur la base des résultats du modèle, *WOFOST-Chili* peut aider à garantir la capacité de production de piments d'une manière efficace en termes de ressources dans le cadre du changement climatique, contribuant ainsi aux objectifs de développement durable de la faim zéro (SDG2) et de l'action climatique (SDG13).

## 5. Conclusion

Nous avons adapté une nouvelle version de *WOFOST-Chili* à partir du modèle générique *WOFOST* pour simuler le développement, la production de matière sèche et l'absorption de nutriments des piments. Cette nouvelle version de *WOFOST-Chili* a été testée.

en utilisant les données originales des essais sur le terrain sur trois années consécutives. En outre, nous avons effectué une analyse de sensibilité systématique et augmenté la robustesse de *WOFOST-Chili*. Nos résultats indiquent que *WOFOST-Chili* simule de manière fiable la croissance potentielle sur trois années de croissance, comme le montrent les valeurs  $rRMSE$  de 0,10-0,23 pour le poids sec des feuilles, 0,06-0,46 pour les fruits, 0,07-0,30 pour la biomasse aérienne totale. *WOFOST-Chili* a également prédit avec précision les quantités de N/P/K dans les feuilles ( $rRMSE = 0,16-0,46$ ) et les fruits ( $rRMSE = 0,29-0,47$ ). En outre, *WOFOST-Chili* s'est avéré capable de distinguer les simulations dans des conditions potentielles et limitées en nutriments. Pour améliorer encore les simulations d'absorption des nutriments dans *WOFOST-Chili*, de nouveaux algorithmes permettant de prédire le début de la translocation des nutriments pourraient être nécessaires. En conclusion, notre étude donne un aperçu de l'extension de l'application des modèles de culture conçus à l'origine pour les céréales aux légumes non-Gramineae sans changements substantiels de la structure du modèle générique. Notre étude peut contribuer à une gestion efficace des engrais dans la production de légumes de plein champ dans le contexte du changement climatique, afin d'atteindre l'ODD 2 (sécurité alimentaire) et l'ODD 13 (action pour le climat).

## Déclaration de contribution des auteurs du CRediT

**Ruoling Tang** : Investigation, Méthodologie, Logiciel, Rédaction - version originale. **Iwan Supit** : Supervision, Logiciel, Rédaction - révision et édition. **Ronald Hutjes** : Supervision, Rédaction - révision et édition, Conceptualisation. **Fen Zhang** : Investigation. **Xiaozhong Wang** : Rédaction - révision et édition. **Xuanjing Chen** : Supervision, Rédaction - révision et édition. **Fusuo Zhang** : Acquisition de fonds. **Xinping Chen** : Supervision, Ressources, Conceptualisation.

## Déclaration d'intérêts concurrents

Les auteurs déclarent qu'ils n'ont pas d'intérêts financiers concurrents connus ou de relations personnelles qui auraient pu sembler influencer le travail présenté dans cet article.

## Disponibilité des données

Les données seront disponibles sur demande.

## Remerciements

Ce travail a été soutenu par la Fondation nationale des sciences naturelles de Chine (NSFC, subventions n° U20A2047 et 42107056). Nous remercions également Bryan Marinelli (Université de Wageningen) pour son aide à la révision linguistique, qui a grandement amélioré la clarté et la lisibilité du manuscrit.

## Annexe A. Données supplémentaires

Les données supplémentaires de cet article sont disponibles en ligne à l'adresse suivante : <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103688>.

## Références

- Baenas, N., Belović, M., Ilic, N., Moreno, D.A., García-Viguera, C., 2019. Utilisation industrielle des produits dérivés du poivre (*Capsicum annum* L.) : a v a n t a g e s technologiques et biologiques. *Food Chem.* 274, 872-885. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.047>.
- Boogaard, H., De Wit, A., te Roller, J., Van Diepen, C., Ro'tter, R., Cabrera, J., van Laar, H., 2014. Centre de contrôle WOFOST 2.1 et WOFOST 7.1. 7. Guide de l'utilisateur pour le centre de contrôle WOFOST 2.1 et le modèle de simulation de croissance des cultures WOFOST 7.1.7. Alterra Wageningen University & Research Centre, Wageningen, p. 133. <http://www.wur.nl/web/file?uuiid=5c0873c3-8c07-4ddf-85a3-dd98bdb38781&owner=b875561e-c6d9-442d-b599-58e9d13cb80d>.
- Boote, K.J., Hoogenboom, G., Jones, J.W., Ingram, K.T., 2008. Modeling Nitrogen Fixation and its Relationship to Nitrogen Uptake in the CROPGRO Model, Quantifying and Understanding Plant Nitrogen Uptake for Systems Modeling. CRC Press, pp. 13-46. <https://doi.org/10.1201/9781420052978>.
- Boote, K.J., Jones, J.W., Hoogenboom, G., 2018. Simulation de la croissance des cultures : CROPGRO Model, Agricultural Systems Modeling and Simulation. CRC Press, pp. 651-692. <https://doi.org/10.1201/9781482269765>.



- Bosi, C., Sentelhas, P.C., Pezzopane, J.R.M., Santos, P.M., 2020. Paramétrage du modèle CROPGRO-fourrage pérenne pour simuler la croissance de l'herbe à palissade Piata<sup>™</sup> en monoculture et dans un système sylvo-pastoral. *Agric. Syst.* 177, 102724 <https://doi.org/10.1016/j.agry.2019.102724>.
- Bremner, J.M., 1996. Nitrogen-total. Méthodes d'analyse des sols : partie 3. Chemical methods 5, 1085-1121. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c37>.
- Cammarano, D., Jamshidi, S., Hoogenboom, G., Ruane, A.C., Niyogi, D., Ronga, D., 2022. Processing tomato production is expected to decrease by 2050 due to the projected increase in temperature. *Nature Food* 3, 437-444. <https://doi.org/10.1038/s43016-022-00560-5>.
- Castaneda-Vera, A., Lefelara, P.A., A'lvaro-Fuentes, J., Cantero-Martínez, C., Mínguez, M., 2015. Sélection de modèles de culture pour la prise de décision dans l'assurance du blé. *Eur. J. Agron.* 68, 97-116. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.04.008>.
- de Wit, A.J.W., Boogaard, H.L., Supit, I., van den Berg, M., 2020. Description du système WOFOST 7.2, modèle de systèmes de culture. (rev. 1.1 ed.). Wageningen Environmental Research. <https://edepot.wur.nl/522204>.
- Di Paola, A., Valentini, R., Santini, M., 2016. Une vue d'ensemble des modèles de croissance et de rendement des cultures disponibles pour les études et les évaluations dans l'agriculture. *J. Sci. Food Agric.* 96, 709-714. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7359>.
- Diao, M., Dai, J., Luo, W., Yuan, C., Bu, C., Xian, K., Zhang, S., Xu, R., 2009. Model for simulation of growth and yield of greenhouse sweet pepper (Modèle de simulation de la croissance et du rendement du poivron sous serre). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 25, 241-246. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2009.10.044>.
- Doltra, J., Munoz, P., 2010. Simulation of nitrogen leaching from a fertigated crop rotation in a Mediterranean climate using the EU-Rotate<sub>N</sub> and Hydrus-2D models. *Agric. Water Manag.* 97, 277-285. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.09.019>.
- Fangyi, L., Huang, H., Chunyun, G., 2021. Review on measurement of crop leaf area (Revue sur la mesure de la surface foliaire des cultures). *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)* 47, 274-282. <https://doi.org/10.13331/j.cnki.jhau.2021.03.005>.
- FAOSTAT, 2020. Cultures et produits de l'élevage.
- Gallardo, M., Fernández, M.D., Giménez, C., Padilla, F.M., Thompson, R.B., 2016. Modèle VegSys révisé pour calculer la production de matière sèche, l'absorption critique d'azote et l'ETc de plusieurs espèces de légumes cultivées dans des serres méditerranéennes. *Agric. Syst.* 146, 30-43. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2016.03.014>.
- Gaso, D.V., de Wit, A., Berger, A.G., Kooistra, L., 2021. Predicting within-field soybean yield variability by coupling Sentinel-2 leaf area index with a crop growth model. *Agric. For. Meteorol.* 308, 108553 <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108553>.
- Gijzen, H., 1994. Développement d'un modèle de simulation pour la transpiration et l'absorption d'eau et d'un modèle de croissance intégrale. *Rapport AB-DLO* 18, 90.
- Giménez, C., Gallardo, M., Martínez-Gaitián, C., Stöckle, C., Thompson, R., Granados, M., 2013. VegSys, un modèle de simulation de la croissance quotidienne des cultures, de l'absorption d'azote et de l'évapotranspiration pour les cultures de poivrons à utiliser dans un système d'aide à la décision à la ferme. *Irrig. Sci.* 31, 465-477. <https://doi.org/10.1007/s00271-011-0312-2>.
- Giménez, C., Thompson, R., Prieto, M., Suárez-Rey, E., Padilla, F., Gallardo, M., 2019. Adaptation du modèle VegSys aux conditions extérieures pour les légumes feuilles et la tomate de transformation. *Agric. Syst.* 171, 51-64.
- Guo, D., Zhao, R., Xing, X., Ma, X., 2020. Global sensitivity and uncertainty analysis of the AquaCrop model for maize under different irrigation and fertilizer management conditions. *Arch. Agron. Soil Sci.* 66, 1115-1133. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1657845>.
- Kadigi, J.L., Richardson, J.W., Mutabazi, K.D., Philip, D., Mourice, S.K., Mbungu, W., Bizimana, J.-C., Sieber, S., 2020. The effect of nitrogen-fertilizer and optimal plant population on the profitability of maize plots in the Wami River sub-basin, Tanzania: a bio-economic simulation approach. *Agric. Syst.* 185, 102948 <https://doi.org/10.1016/j.agry.2020.102948>.
- Kaur, M., Verma, B.R., Zhou, L., Lak, H.M., Kaur, S., Sammour, Y.M., Kapadia, S.R., Grimm, R.A., Griffin, B.P., Xu, B., 2022. Association of pepper intake with all-cause and specific cause mortality - a systematic review and meta-analysis. *Am J Prev Cardiol* 9, 100301. <https://doi.org/10.1016/j.ajpc.2021.100301>.
- Khaitov, B., Umurzokov, M., Cho, K.-M., Lee, Y.-J., Park, K.W., Sung, J., 2019. Importance and production of piment ; tolérance à la chaleur et utilisation efficace des nutriments dans des conditions de changement climatique. *Korean Journal of Agricultural Science* 46, 769-779. <https://doi.org/10.7744/kjoas.20190059>.
- Kherif, O., Seghouani, M., Justes, E., Plaza-Bonilla, D., Bouhenache, A., Zemmouri, B., Dokukin, P., Latati, M., 2022. Le premier étalonnage et l'évaluation du modèle sol-culture STICS sur un système de culture intercalaire à base de pois chiche dans des conditions méditerranéennes. *Eur. J. Agron.* 133, 126449 <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126449>.
- Liu, H., Yang, H., Zheng, J., Jia, D., Wang, J., Li, Y., Huang, G., 2012. Irrigation scheduling strategies based on soil matrix potential on yield and fruit quality of mulched-drip irrigated chili pepper in Northwest China. *Agric. Water Manag.* 115, 232-241. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.09.009>.
- Liu, Z., Ying, H., Chen, M., Bai, J., Xue, Y., Yin, Y., Batchelor, W.D., Yang, Y., Bai, Z., Du, M., 2021. L'optimisation de la production de maïs et de soja en Chine peut garantir la suffisance alimentaire tout en réduisant les empreintes d'azote et de carbone. *Nature Food* 2, 426-433. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00300-1>.
- Lu, C., Tian, H., 2017. Utilisation mondiale d'engrais azotés et phosphorés pour la production agricole au cours des cinquante dernières années : points chauds décalés et déséquilibre des nutriments. *Earth System Science Data* 9, 181-192. <https://doi.org/10.5194/essd-9-181-2017>.
- Marcelis, L., 1994. A simulation model for dry matter partitioning in cucumber. *Ann. Bot.* 74, 43-52. <https://doi.org/10.1006/anbo.1994.1092>.
- Marcelis, L., De Groot, C., Del Amor, F., Elings, A., Heinen, M., De Visser, P., 2003. Crop Nutrient Requirements and Management in Protected Cultivation (Besoins en nutriments des cultures et gestion dans les cultures protégées).
- Marcelis, L., Brajeul, E., Elings, A., Garate, A., Heuvelink, E., De Visser, P., 2004. Modelling nutrient uptake of sweet pepper, international conference on sustainable greenhouse systems.
- greenhouse systems. *Greensys* 691, 285-292. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.691.33>.
- Meier, U., 1997. Stades de croissance des plantes mono- et dicotylédones. Blackwell Wissenschafts-Verlag. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201300311612>.
- Mendez, M.M., 2000. Development and Use of a Pepper Growth Simulation Model (Développement et utilisation d'un modèle de simulation de la croissance du poivron). Université de Porto Rico, Mayaguez (Porto Rico).
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE* 50, 885-900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>.
- Mukherjee, J., Singh, L., Singh, G., Bal, S., Singh, H., Kaur, P., 2011. Comparative evaluation of WOFOST and ORYZA2000 models in simulating growth and development of rice (ORYZA sativa L.) in Punjab. *Journal of Agrometeorology* 13, 86-91. <https://doi.org/10.54386/jam.v13i2.1347>.
- Naud, C., Makowski, D., Jeuffroy, M.-H., 2008. Est-il utile de combiner des mesures prises pendant la saison de croissance avec un modèle dynamique pour prédire le statut azoté du blé d'hiver ? *Eur. J. Agron.* 28, 291-300. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.08.005>.
- Øvsthus, I., Thorup-Kristensen, K., Seljåsen, R., Riley, H., Dorisch, P., Breland, T.A., 2021. Calibration du modèle EU-Rotate<sub>N</sub> avec la minéralisation mesurée de C et N à partir d'engrais potentiels et évaluation de sa prédiction des données de culture et de sol à partir d'un essai de champ de légumes. *Eur. J. Agron.* 129, 126336. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126336>.
- Prioul, J., Chartier, P., 1977. Répartition des composantes de transfert et de carboxylation de la résistance intracellulaire à la fixation photosynthétique du CO<sub>2</sub> : analyse critique des méthodes utilisées. *Ann. Bot.* 41, 789-800. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a085354>.
- Producepay, 2021. Chili Pepper Production Zones in Mexico. <https://producepay.com/chili-pepper-production-zones-in-mexico>.
- Ranjbar, A., Rahimikhoob, A., Ebrahimi, H., Varavipour, M., 2022. Simulation de l'absorption d'azote et de la matière sèche pour l'estimation de l'indice de nutrition azotée pendant la période de croissance du maïs. *J. Plant Nutr.* 45, 920-936. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1994603>.
- Reddy, A., Tiwari, K., 2018. Évaluation du modèle CROPGRO-Bellpepper sous différents niveaux d'azote par fertigation. *International Journal of Agricultural Engineering* 11, 101-107. <https://doi.org/10.15740/HAS/IJAE/11.1/101-107>.
- Roetter, R., Hoanh, C.T., Teng, P.S., 1998. A systems approach to analyzing land use options for sustainable rural development in South and Southeast Asia. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.287570>.
- Salo, T.J., Palosuo, T., Kersebaum, K.C., Nendel, C., Angulo, C., Ewert, F., Bindi, M., Calanca, P., Klein, T., Moriondo, M., 2016. Comparaison des performances de 11 modèles de simulation de culture dans la prédiction de la réponse du rendement à la fertilisation azotée. *J. Agric. Sci.* 154, 1218-1240. <https://doi.org/10.1017/S0021859615001124>.
- Saqib, M., Anjum, M.A., 2021. Applications of decision support system : a case study of solanaceous vegetables. *Phyton* 90, 331. <https://doi.org/10.32604/phyton.2021.011685>.
- Shekhar, C., Singh, D., Singh, R., Rao, V., 2008. Prediction of wheat growth and yield using WOFOST model (Prévision de la croissance et du rendement du blé à l'aide du modèle WOFOST). *Journal of Agrometeorology* 400 (Special issue-Part 2), 402. <https://www.agrimetassociation.org/journal-view/journal-of-agrometeorology>.
- Shibu, M.E., Lefelara, P.A., van Keulen, H., Aggarwal, P.K., 2010. LINTUL3, a simulation model for nitrogen-limited situations : application to rice. *Eur. J. Agron.* 32, 255-271. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.01.003>.
- Stan, T., Munteanu, N., Teliban, G.-C., Cojocaru, A., Stoleru, V., 2021. Fertilization management improves the yield and Capsaicinoid content of chili peppers. *Agriculture* 11, 181. <https://doi.org/10.3390/agriculture11020181>.
- Tahir, N., Li, J., Ma, Y., Ullah, A., Zhu, P., Peng, C., Hussain, B., Danish, S., 2021. 20 years nitrogen dynamics study by using APSIM nitrogen model simulation for sustainable management in Jilin China. *Sci. Rep.* 11, 1-21. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96386-5>.
- Tei, F., De Neve, S., de Haan, J., Kristensen, H.L., 2020. Nitrogen management of vegetable crops. *Agric. Water Manag.* 240, 106316 <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106316>.
- Timsina, J., Dutta, S., Devkota, K.P., Chakraborty, S., Neupane, R.K., Bisht, S., Amgain, L.P., Singh, V.K., Islam, S., Majumdar, K., 2021. Amélioration de la gestion des éléments nutritifs dans les céréales à l'aide d'un expert en éléments nutritifs et d'outils d'apprentissage automatique : productivité, rentabilité et efficacité de l'utilisation des éléments nutritifs. *Agric. Syst.* 192, 103181 <https://doi.org/10.1016/j.agry.2021.103181>.
- Todorovic, M., Albrizio, R., Zivotic, L., Saab, M.T.A., Stöckle, C., Steduto, P., 2009. Évaluation des modèles AquaCrop, CropSyst et WOFOST dans la simulation de la croissance du tournesol sous différents régimes hydriques. *Agron. J.* 101, 509-521. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0166s>.
- Wang, X., Liu, B., Wu, G., Sun, Y., Guo, X., Jin, Z., Xu, W., Zhao, Y., Zhang, F., Zou, C., Chen, X., 2018. Coûts environnementaux et potentiel d'atténuation dans le système de production de poivrons sous serre en plastique en Chine : une analyse du cycle de vie. *Agric. Syst.* 167, 186-194. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2018.09.013>.
- Yue, Y., Li, R., Feng, E., Li, L., Peng, S., Sun, C., 2022. Dynamic simulation of leaf area index of pepper under different nitrogen levels (Simulation dynamique de l'indice de surface foliaire du poivron sous différents niveaux d'azote). *Journal of China Agricultural University* 27, 157-168. <https://doi.org/10.3390/agronomy8090172>.
- Zerulla, W., Barth, T., Dressel, J., Erhardt, K., Horschler von Locquenghien, K., Pasda, G., Rüdtele, M., Wissemeyer, A., 2001. Le phosphate de 3,4-diméthylpyrazole (DMPP) - un nouvel inhibiteur de nitrification pour l'agriculture et l'horticulture.



- inhibiteur de nitrification pour l'agriculture et l'horticulture. *Biol. Fertil. Soils* 34, 79-84. <https://doi.org/10.1007/s003740100380>.
- Zhou, B., Yue, Y., Sun, X., Ding, Z., Ma, W., Zhao, M., 2017. Réponses du poids des grains de maïs à la variation des conditions météorologiques associée à la date de semis. *The Crop Journal* 5, 43-51. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2016.07.002>.
- Zhu, J., Zeng, W., Ma, T., Lei, G., Zha, Y., Fang, Y., Wu, J., Huang, J., 2018. Test et amélioration du modèle WOFOST pour la simulation du tournesol sur les sols salins de Mongolie intérieure, Chine. *Agronomy* 8, 172. <https://doi.org/10.3390/agronomy8090172>.