

## **Calibration et évaluation du modèle STICS sur les variétés Bintje, Fontane et Charlotte de pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.).**

**Auteur :** Abad, Laëtitia

**Promoteur(s) :** Dumont, Benjamin

**Faculté :** Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

**Diplôme :** Master en bioingénieur : sciences agronomiques, à finalité spécialisée

**Année académique :** 2024-2025

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/24144>

---

### *Avertissement à l'attention des usagers :*

*Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.*

*Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.*

---

**CALIBRATION ET ÉVALUATION DU MODELE  
STICS SUR LES VARIÉTÉS BINTJE, FONTANE  
ET CHARLOTTE DE POMME DE TERRE  
(*SOLANUM TUBEROSUM* L.)**

**Laëtitia ABAD**

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTE EN VUE DE  
L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER BIOINGÉNIEUR EN  
SCIENCES AGRONOMIQUES**

**Année académique 2024-2025**

**Promoteur :  
Professeur Benjamin Dumont**





*Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech.*

*Le présent document n'engage que son auteur.*

**CALIBRATION ET ÉVALUATION DU MODELE  
STICS SUR LES VARIÉTÉS BINTJE, FONTANE  
ET CHARLOTTE DE POMME DE TERRE  
(*SOLANUM TUBEROSUM* L.)**

**Laëtitia ABAD**

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTE EN VUE DE  
L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER BIOINGÉNIEUR EN  
SCIENCES AGRONOMIQUES**

**Année académique 2024-2025**

**Promoteur :  
Professeur Benjamin Dumont**



## **Remerciements**

Avec ces quelques mots, je tiens à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à ce travail.

Je tiens tout particulièrement à remercier Benjamin Dumont pour son encadrement attentif, son expertise et sa disponibilité. Ses conseils et son accompagnement m'ont permis d'approfondir mes connaissances et de progresser tout au long de ce travail.

Je remercie également Christophe Lacroix et Florine Decruyenaere pour leur patience, leurs relectures attentives et leur suivi tout au long de ce mémoire.

Je remercie Feriel Ben Abdallah pour son expertise et tout le CRA-W pour leur accueil et le partage des données.

Je remercie chaleureusement ma famille pour son soutien durant ce parcours. Une pensée particulière revient à ma grand-mère, qui n'a pas eu l'occasion de me voir terminer mes études, mais dont le soutien indéfectible a marqué chacune de mes étapes.

Un grand merci à Anne-Laure Terrier pour son soutien tout le long de mon TFE. Enfin, merci à mon compagnon Mathias de m'avoir soutenue ces dix dernières années.



## Résumé

La pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) est une culture stratégique pour la Belgique, occupant une place centrale dans l'industrie de la transformation industrielle. Autrefois dominante pour la production industrielle de frites, la variété Bintje a progressivement été remplacée par la variété Fontane. En 2023, cette dernière était la variété la plus cultivée en Belgique avec une surface totale de 4.316,9 ha (sous contrat à 75%), tandis que la Bintje représentait une surface de 243,5 ha (sous contrat à 48%) (FIWAP, 2023). Pour le marché du frais, 13,3 ha de pommes de terre Charlotte ont été cultivés cette même année (FIWAP, 2023).

Cependant les changements climatiques soulèvent des incertitudes quant à la stabilité de ses rendements. Dans ce contexte, l'utilisation de modèles de culture constitue un outil pertinent afin d'évaluer et anticiper les performances des différentes variétés de pommes de terre. Ainsi, le modèle STICS (Simulateur mulTidisciplinaire pour les Cultures Standard) permet de simuler les interactions entre le sol, la plante et le climat et d'analyser l'impact de différents scénarios pédoclimatiques. Ce simulateur possède différents fichiers plantes pour plusieurs types de cultures, permettant ainsi de simuler leur croissance en fonction des conditions locales de sol et de climat. Pour les pommes de terre, un seul fichier est disponible ce qui rend son utilisation limitée pour représenter la diversité des variétés de pommes de terre. Ces dernières vont avoir des caractéristiques spécifiques en fonction de leur finalité et des itinéraires techniques différents rendant ce fichier général biaisé.

Les données utilisées dans cette étude proviennent du CRA-W et incluent des observations de biomasse, de rendement et d'absorption d'azote. Une première étape de paramétrisation a permis d'adapter les paramètres généraux de la culture, puis une optimisation des fichiers a été effectuée grâce à l'algorithme Nelder-Mead du package CROptimizR selon une approche par variable. Les résultats ont montré une amélioration significative du fichier dès la paramétrisation. L'optimisation a permis d'affiner la pertinence du fichier principalement sur les variables MASEC (matière sèche totale) et MAFRUIT (matière sèche des tubercules). Les variétés ont montré des stratégies différentes d'allocations et de conversion des assimilats, reflétant leurs usages respectifs. En revanche, la dynamique d'absorption de l'azote a été mal représentée par le modèle. Il est donc nécessaire de poursuivre ces travaux de calibration en explorant d'autres approches d'optimisation plus avancées (méthodes bayésiennes) afin d'améliorer la robustesse du modèle.

Mots-clés : modèle STIC, paramétrisation, calibration, croptimizR, pomme de terre, modélisation des cultures

## Abstract

The potato (*Solanum tuberosum* L.) is a strategic crop for Belgium, occupying a central place in the industrial processing industry. Once dominant in the industrial production of French fries, the Bintje variety has gradually been replaced by the Fontane variety. In 2023, the latter was the most widely grown variety in Belgium with a total area of 4,316.9 ha (75% under contract), while Bintje accounted for an area of 243.5 ha (48% under contract) (FIWAP, 2023). For the fresh market, 13.3 ha of Charlotte potatoes were grown in the same year (FIWAP, 2023).

However, climate change raises uncertainties about the stability of its yields. In this context, the use of crop models is a relevant tool for evaluating and anticipating the performance of different potato varieties. The STICS (Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard) model simulates interactions between soil, plants, and climate and analyzes the impact of different soil and climate scenarios. This simulator has different plant files for several types of crops, allowing their growth to be simulated according to local soil and climate conditions. For potatoes, only one file is available, which limits its use in representing the diversity of potato varieties. These varieties have specific characteristics depending on their intended use and different technical itineraries, making this general file biased.

The data used in this study were obtained from CRA-W and include observations of biomass, yield, and nitrogen uptake. An initial parameterization step was used to adjust the general crop parameters, followed by file optimization using the Nelder-Mead algorithm from the CROptimizR package, based on a variable-by-variable approach. The results showed a significant improvement in the file immediately after parameterization. Optimization refined the relevance of the file, mainly for the MASEC (total dry matter) and MAFRUIT (dry matter of tubers) variables. The varieties showed different strategies for allocating and converting assimilates, reflecting their respective uses. However, the model did not accurately represent nitrogen absorption dynamics. It is therefore necessary to continue this calibration work by exploring other more advanced optimization approaches (Bayesian methods) in order to improve the robustness of the model.

**Keywords:** STIC model, parameterization, calibration, croptimizR, potato, crop modelling.

## Table des matières

<b>1. Introduction</b>	1
<b>2. Etat de l'art</b>	3
2.1 La culture de la pomme de terre	3
2.1.1 Généralités	3
2.1.2 Les variétés Fontane, Bintje et Charlotte	5
2.1.3 Exigences écologiques de la pomme de terre	6
2.1.4 Besoins de la pomme de terre en éléments nutritifs	6
2.1.5 Itinéraire technique	7
2.3 Modélisation des cultures avec le modèle-sol culture STICS	9
2.3.1 Généralités sur STICS	9
2.3.2 Calibration des fichiers plantes avec STICS	10
2.3.2 Calibration et simulation de la pomme de terre avec STICS	11
<b>3. Objectifs du mémoire</b>	12
<b>4. Matériel et méthode</b>	12
4.1 Présentation du modèle STICS	12
4.2 Les données d'entrée du modèle	16
4.2.1 Les observations disponibles	16
4.2.2 Données de sols	16
4.2.3 Données climatiques	17
4.2.4 Itinéraire technique cultural	18
4.2.5 Structure finale	20
4.3 Stratégie de calibration	20
4.3.1 Paramétrisation	20
4.3.2 Calibration	22
4.4 Evaluation des performances	24
<b>5. Résultats</b>	26
5.1 Paramétrisation	26
5.2 Optimisation	28
5.2.1 Variété Bintje	28
5.2.2 Variété Fontane	32
5.2.3 Variété Charlotte	35
<b>6. Discussion</b>	38
6.1. Discussion des résultats obtenus	38
6.1.1 Paramétrisation du modèle	38
6.1.2 Optimisation du modèle	40
6.2. Comparaison des variétés	42

6.3. Limitations du modèle .....	44
6.3.1 Limitations générales .....	44
6.3.2 Limitations relative à l'étude .....	44
<b>7. Conclusion .....</b>	<b>46</b>
<b>8. Bibliographie .....</b>	<b>47</b>
<b>9. Annexes .....</b>	<b>51</b>

## Table des figures

<b>Figure 1.</b> Schéma d'un plan entier de pomme de terre. (FAO, 2009).....	4
<b>Figure 2.</b> Échelle BBCH des stades phénologiques de la pomme de terre ( <i>Solanum tuberosum</i> L.) (Meier, 2001). .....	4
<b>Figure 3.</b> Estimation de la dose d'azote à appliquer en fonction des pertes, des besoins et des sources de fourniture (Arvalis, 2019). .....	8
<b>Figure 4.</b> Schéma du processus d'estimation des paramètres (Buis et al., 2024).....	10
<b>Figure 5.</b> Représentation des clusters (en vert) issus de la base de données de sol et des sites expérimentaux (en rose) dans le référentiel EPSG:31370. ....	17
<b>Figure 6.</b> Représentation des différents fichiers utilisés pour le fonctionnement de STICS et la calibration. ....	20
<b>Figure 7.</b> Comparaison des dynamiques simulées et observées des variables (MASEC, MAFRUIT, QNGRAIN et QNPLANTE) avant et après paramétrisation pour la variété Bintje. ....	27
<b>Figure 8.</b> Comparaison des dynamiques simulées et observées des variables (MASEC, MAFRUIT, QNGRAIN et QNPLANTE) avant et après paramétrisation pour la variété Fontane. ....	27
<b>Figure 9.</b> Comparaison des dynamiques simulées et observées des variables (MASEC, MAFRUIT, QNGRAIN et QNPLANTE) avant et après paramétrisation pour la variété Charlotte. ....	28
<b>Figure 10.</b> Comparaison des scatter plots entre les simulations et les observations, avant et après calibration, pour la variable MASEC de la variété Bintje. ....	30
<b>Figure 11.</b> Comparaison des scatter plots entre les simulations et les observations, avant et après calibration, pour la variable MAFRUIT de la variété Bintje. ....	30
<b>Figure 12.</b> Comparaison des scatter plots entre les simulations et les observations, avant et après calibration, pour la variable QGRAIN de la variété Bintje.....	31
<b>Figure 13.</b> Comparaison des scatter plots entre les simulations et les observations, avant et après calibration, pour la variable QNPLANTE de la variété Bintje. ....	31
<b>Figure 15.</b> Comparaison des scatter plots entre les simulations et les observations, avant et après calibration, pour la variable MAFRUIT de la variété Fontane. ....	34
<b>Figure 16.</b> Comparaison des scatter plots entre les simulations et les observations, avant et après calibration, pour la variable QGRAIN de la variété Fontane.....	34
<b>Figure 17.</b> Comparaison des scatter plots entre les simulations et les observations, avant et après calibration, pour la variable QNPLANTE de la variété Fontane. ....	34
<b>Figure 18.</b> Comparaison des scatter plots entre les simulations et les observations, avant et après calibration, pour la variable MASEC de la variété Charlotte. ....	36
<b>Figure 19.</b> Comparaison des scatter plots entre les simulations et les observations, avant et après calibration, pour la variable MAFRUIT de la variété Charlotte. ....	36
<b>Figure 20.</b> Comparaison des scatter plots entre les simulations et les observations, avant et après calibration, pour la variable QGRAIN de la variété Charlotte.....	37
<b>Figure 21.</b> Comparaison des scatter plots entre les simulations et les observations, avant et après calibration, pour la variable QNPLANTE de la variété Charlotte. ....	37
<b>Figure 22.</b> Exemple de modification des paramètres sensanox, sensrsec et contrdamax sur le site 9 (TEC5), avant et après paramétrisation, pour la variété Fontane.....	39

<b>Figure 23.</b> Différence de densité racinaire entre le profil standard (a) du fichier initial et la densité réelle (b) après paramétrisation dans STICS.....	40
<b>Figure 24.</b> Différence de ZRAC en fonction de la valeur de CROIRAC : (a) CROIRAC = 0.3 (b) CROIRAC : 0.15.....	40
<b>Figure 25.</b> Représentation des simulations du LAI après paramétrisation (a) et après optimisation (b) du site 26 (TEC 2) de la variété Fontane. ....	45

## Table des tableaux

Tableau 1. Correspondance entre les stades physiologiques dans STICS et les codes BBCH. ....	12
Tableau 2. Variables nécessaires à la création du fichier climatique de STICS. ....	18
Tableau 3. Résumé des blocs activé ou désactivé dans le fichier TEC.....	18
Tableau 4. a : erreur moyenne absolue introduite par les estimations des dates pour chaque variété. b : erreur moyenne absolue introduite par les estimations du fractionnement de la fertilisation pour la variété Bintje.....	19
Tableau 5. Synthèse des valeurs originales et adaptées pour la Wallonie dans les études antérieures de Delandmeter (2021) et de Lacroix et al. (2024). ....	21
Tableau 6. Synthèse des valeurs variétales originales et adaptées par des valeurs provenant de l'étude de Morissette et al. (2016) et de Ben Abdallah (2020). ....	22
Tableau 7. Synthèse des valeurs originales, provenant l'études de Delandmeter et al (2021) et de Lacroix et al. (2024) et du CRA-W, adaptées par l'auteur. ....	22
Tableau 8. Présentation des paramètres qui ont été optimisés en fonction de la variable observée et de leur plage de calibration. ....	23
Tableau 9. Présentations des différents sites utilisés lors du calibrage et de l'évaluation en fonction de la variété.....	24
Tableau 10. Indicateurs statistiques de performance du modèle STICS (RMSE, R <sup>2</sup> , EF et ND) avant et après paramétrisation pour les variétés Bintje, Fontane et Charlotte. ....	26
Tableau 11. Présentation de l'évolution des paramètres du fichier plante, avant et après optimisation, pour la variété Bintje.....	29
Tableau 12. Évaluation statistique des variables MASEC, MAFRUIT, QNPLANTE et QNGRAIN, avant et après calibration et évaluation pour la variété Bintje. ....	29
Tableau 13. Présentation de l'évolution des paramètres du fichier plante, avant et après optimisation, pour la variété Fontane.....	32
Tableau 14. Évaluation statistique des variables MASEC, MAFRUIT, QNPLANTE et QNGRAIN, avant et après calibration et évaluation pour la variété Fontane. ....	32
Tableau 15. Évaluation statistique des variables MASEC, MAFRUIT, QNPLANTE et QNGRAIN, avant et après calibration et évaluation pour la variété Bintje, Fontane et Charlotte.....	35
Tableau 16. Évaluation statistique des variables MASEC, MAFRUIT, QNPLANTE et QNGRAIN, avant et après calibration et évaluation pour la variété Charlotte. ....	35

## 1. Introduction

Introduite en Europe entre le XVI<sup>e</sup> et le XVIII<sup>e</sup> siècle, la pomme de terre s'est progressivement imposée comme une culture de choix du fait de sa valeur nutritionnelle et économique. Aujourd'hui, elle constitue la quatrième principale culture vivrière mondiale après le maïs, le blé et le riz (FAO, 2007). Dans l'Union européenne, ce sont 48,3 millions de tonnes qui ont été récoltées sur 1,3 million d'hectares en 2023. L'Allemagne était en tête des productions (11,6 Mt produit sur 258 700 ha), suivie de la France (8,64 Mt sur 200 200 ha), des Pays bas (6,47 Mt sur 152 100 ha), de la Pologne (5,60 Mt sur 184 600 ha) et de la Belgique (4,11 Mt sur 92 300 ha) (Europatat, 2023). La superficie récoltée dans l'Union européenne a fortement diminué (excepté en France et en Belgique), passant de 3,0 millions d'hectares en 2000 à 1,3 million d'hectares en 2023, induisant une diminution de la production de 27,9 millions de tonnes (Eurostat, 2024), et ce, malgré une légère augmentation des rendements (van Loon et al., 2025). La France est le premier exportateur intra-EU avec 30,4 % des exportations totales où, 75% sont dédiées aux pommes de terre de culture principale, 12,2% aux semences, 8% au primeurs et 2,7 % aux féculières (Europatat, 2023). C'est la Belgique qui est le premier importateur à hauteur de 17,8 % des importations mondiales. Parmi celles-ci, 6,9% provenaient de la France (TrendEconomy, 2024). Cela s'explique par le fait que la Belgique est le plus grand producteur de produits transformés à base de pomme de terre et donc le premier exportateur mondial de ces produits transformés (Sawyer et al., 2019). Sa production est passée de 3,3 millions de tonnes de produits transformés en 2010 à 5,3 millions de tonnes en 2019, soit une augmentation de 38% (Janssens et al., 2021). C'est donc pour satisfaire leur besoin en matière première que la Belgique en importe une grande quantité depuis les pays voisins.

En Belgique, la pomme de terre est la deuxième culture la plus importante, derrière les céréales, avec un rendement par hectare le plus élevé au monde. Le facteur clef de ce rendement est le climat océanique qui protège les cultures des extrêmes et qui permet une longue saison de croissance avec des précipitations (Sawyer et al., 2019). En parallèle, les sols sont riches en argile ou argilo-sablonneux, permettant à la pomme de terre de bien s'implanter. Dans ce pays, la filière de la pomme de terre repose sur une structure institutionnelle performante grâce à de nombreux centres de recherches, une organisation internationale, un réseau commercial et logistique très organisé pour l'import-export, etc. (Goffart et Lebrun, 2024). Comparé à d'autres cultures, les agriculteurs ne bénéficient pas d'aides de la PAC (Politique Agricole Commune), induisant une fluctuation des prix selon les années et donc une pression économique. La majorité des ventes se font sous contrat, mais une part non négligeable est sur le marché libre ce qui expose les agriculteurs à des risques, surtout quand les conditions climatiques sont mauvaises.

La Superficie Agricole Utilisée (SAU) en Wallonie a atteint 733 907 ha (44% du territoire) en 2023 (SPW, 2024). Cette année-là, ce sont environ 1,82 Mt de pommes de terre qui ont été produites sur 40 880 ha. Parmi ces terres, environ 39 909 ha ont été dédiés à la production de tubercules (mi-hâtifs et tardifs) et le reste a été réparti entre la production de plants (870 ha) et la production de pommes de terre hâtives (moins de 100 ha) (SPW, 2024). La tendance est à une mécanisation avancée, permettant d'avoir des exploitations plus grandes et spécialisées (Goffart et Lebrun, 2024). Malgré une augmentation de 3,2 % des surfaces cultivées en Belgique, avec une diminution des surfaces dédiées aux pommes de terre hâtives (-5,3%) et une augmentation des pommes de terre de conservation (+4,3%), la demande reste toujours importante (Statbel, 2025). L'augmentation de la production devra donc provenir d'une utilisation plus efficace et durable des terres agricoles existantes. Cela témoigne de l'importance de la filière, notamment pour la transformation en frites, emblème culinaire de la Belgique.



Face à la demande grandissante, la nécessité d'assurer un approvisionnement suffisant devient un enjeu majeur. Néanmoins, le changement climatique rend incertain l'avenir des cultures. Par rapport à l'ère préindustrielle (1850-1900), la Terre s'est réchauffée de 1,1°C (Reghezza-Zitt, 2023). Dans le futur, cette augmentation pourrait atteindre 1,5°C et ce, malgré les efforts de réductions immédiates des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> (Ministère de la Transition écologique, 2022). Selon les scénarios, jusqu'en 2100 la température globale pourrait augmenter de 1.8 à 4 °C (Pliska, 2008). De plus, les phénomènes météorologiques extrêmes auront une fréquence et une intensité plus importantes (GIEC, 2007). Ces changements climatiques sont des paramètres cruciaux pour la production agricole puisque qu'environ 60-73% de l'instabilité des rendements dans les cultures arables sont dues aux variables météorologiques (Gobin, 2010).

Afin de relever ces défis et de garantir une agriculture durable, il a été nécessaire de développer de nouvelles méthodes de production. Pour y arriver, des modèles biophysiques comme STICS (Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard) ont été conçus dans le but simuler le fonctionnement du système sol-plante-climat (Brisson et al., 1998). Ainsi, il est possible de simuler virtuellement différents scénarios en modifiant les paramètres pédologiques, techniques et climatiques, pour améliorer notre compréhension du fonctionnement des systèmes de cultures. Cependant, pour paramétrer de manière fiable un modèle de culture, il est essentiel de disposer de données de qualités, dont l'expérimentation agronomique reste actuellement la source principale.

## 2. Etat de l'art

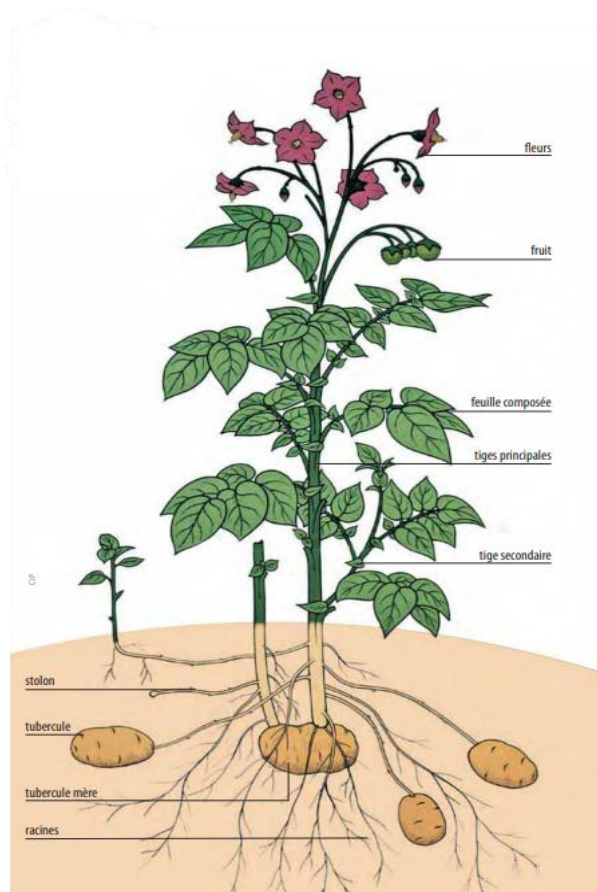
### 2.1 La culture de la pomme de terre

#### 2.1.1 Généralités

La pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) est une angiosperme dicotylédone appartenant à la famille des Solanaceae et au genre *Solanum* regroupant environ mille espèces. Elle appartient aux plantes herbacées et est cultivée comme une culture annuelle. Son origine provient de l'Amérique du Sud, où les tubercules des pommes de terre sauvages avaient un goût amer et une quantité importante d'alcaloïdes toxiques. Parmi les espèces sauvages, on retrouve des formes diploïdes ( $2n = 24$ ) qui seront les premières à être domestiquées dans la région du Titicaca (Rousselle et al., 1996). De nombreux croisements entre ces espèces ont eu lieu, permettant ainsi d'augmenter la variabilité génétique de la pomme de terre. Des événements naturels, tels que la duplication chromosomique, ont permis l'apparition des espèces tétraploïdes ( $4n = 48$  chromosomes) devenues dominantes grâce à leur haut rendement et leur grande diversité génétique. C'est le cas de *Solanum tuberosum* L. qui serait issue du croisement entre *Solanum stenotomum* (24 chromosomes) et *Solanum sparsipilum* (24 chromosomes) (Jaunard, 2010).

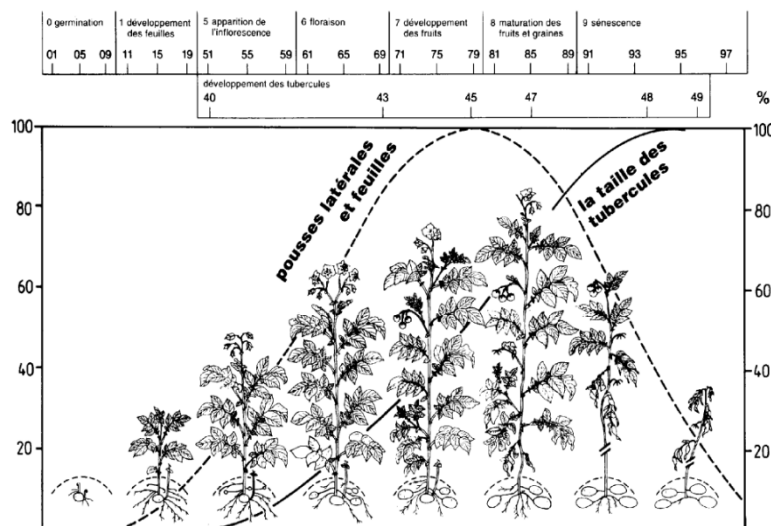
Les fleurs sont autogames et la fécondation croisée est quasiment inexistante puisque les fleurs ne possèdent pas de nectar. La majorité de ces dernières sont stériles, mais si la fécondation a lieu, il est possible d'obtenir des fruits appelés baies et contenant des graines (Rousselle et al., 1996). Ces graines sont peu utilisées pour la reproduction des pommes de terre, mais elles sont nécessaires pour la sélection amélioratrice (Rousselle et al., 1996). Le système racinaire est composé de racines fines, de tiges souterraines, de tubercules et de tubercules-mère desséchés (Jaunard, 2010). Ce sont les stolons qui, avec le temps, vont se renfler à leur extrémité pour devenir des tubercules, organes de réserve de la plante (Figure 1). C'est à la base des tiges aériennes que se trouvent les bourgeons qui peuvent soit devenir des tiges, soit des stolons en fonction de s'ils sont enterrés ou non.

Contrairement à d'autres cultures, la pomme de terre se reproduit par multiplication végétative formant ainsi des clones. Les tubercules sont plantés directement dans terre et grâce à ces bourgeons (ou "yeux"), ils pourront donner naissance à de nouvelles plantes. Cette multiplication végétative permet d'avoir un contrôle sur la génétique des plantes et ses qualités. Afin d'éliminer tous les pathogènes pouvant être transmis à la descendance, les agriculteurs doivent utiliser des "semences certifiées" assurant l'absence de maladie.



**Figure 1.** Schéma d'un plan entier de pomme de terre. (FAO, 2009)

L'échelle BBCH (Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und CHemische Industrie) produite par Hack et al. en 1993 (figure 2), est largement utilisée dans la littérature pour décrire les stades phénologiques de la pomme de terre. Cette échelle utilise un code à deux chiffres où le premier correspond aux stades principaux (échelonné de 0 à 9) et le deuxième correspond au stade secondaire (échelonné de 0 à 9).



**Figure 2.** Échelle BBCH des stades phénologiques de la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) (Meier, 2001).

### 2.1.2 Les variétés Fontane, Bintje et Charlotte

Selon leur usage final, les pommes de terre peuvent être classées en cinq catégories : celles à destination du marché du frais, à la transformation industrielle, les pommes de terre primeur, les pommes de terre à féculs et les pommes de terre de semences.

La variété Charlotte figure dans le top 10 des variétés de consommation à destination du marché du frais en France et en Belgique pour ses qualités culinaires (Goffart et al., 2022). Cependant, les surfaces dédiées au marché du frais en Belgique sont faibles (10% de la production de pomme de terre de consommation) (Goffart et al., 2022). C'est une pomme de terre qui produit entre 14 et 18 tubercules par plants avec une forme longue à oblongue (Schwärzel et Reust, 2007). C'est une variété à chair ferme particulièrement adaptée à la cuisson vapeur grâce à son grain fin. Sa qualité culinaire est dépendante de sa teneur en Matière Sèche (MS) qui doit se situer entre 17 et 20% pour limiter le délitement (Gravouille, 2003). Cette faible teneur en MS reflète une proportion réduite d'amidon qui est responsable du gonflement au contact de l'eau. La teneur en matière sèche est aussi dépendante des conditions culturales car la MS évolue tout le long de la croissance et arrive à son maximum lorsque la plante est à maturité. Les conditions climatiques influencent aussi la teneur en MS : les étés froids et humides entravent son accumulation, tandis que des étés chauds et secs la favorisent (Gravouille, 2003).

Les variétés destinées à l'industrie de la transformation occupent la majorité de la surface totale cultivée en pomme de terre en Belgique, parmi lesquelles figurent la Bintje et la Fontane. La variété Bintje combine une levée rapide et une sénescence lente permettant si les conditions climatiques sont favorables une augmentation de la photosynthèse et favorisant ainsi le transfert d'assimilat vers les tubercules (Blauwer et Eeckhout, 2020). C'est en effet une variété qui tubérise beaucoup avec environ 12-16 tubercules par plant. La variété Fontane possède un nombre de tubercules par plant plus faible variant de 10 à 14 (Schwärzel et Reust, 2007). Elles sont principalement utilisées pour la transformation industrielle en frite puisque leur teneur en MS se situe entre 20-23% (Delaplace et Fauconnier, 2004) ce qui permet d'améliorer le croustillant et de diminuer l'aspect gras des frites (Gravouille, 2007). Il a été déterminé que le PSE (Poids Sous Eau) de la variété Bintje (en moyenne 388g/5kg) et celui de la Fontane (en moyenne 425g/5kg) (Blauwer et Eeckhout, 2020) étaient bons pour la transformation industrielle et que l'indice de brunissement était excellent (Poulet et al., 2008). A l'inverse, si la teneur en matière sèche est excessive, le tubercule peut avoir un noircissement interne et les frites peuvent devenir trop sèches (Gravouille, 2007).

Autrefois, la Bintje était la principale variété industrielle utilisée pour la fabrication de frites, et elle est maintenant remplacée par la Fontane. Autrefois dominante pour la production industrielle de frite, la variété Bintje a progressivement été remplacée par la variété Fontane. En 2023, cette dernière était la variété la plus cultivée en Belgique avec une surface totale de 4.316,9 ha (sous contrat à 75%), tandis que la Bintje représentait une surface de 243,5 ha (sous contrat à 48%) (FIWAP, 2023). Pour le marché du frais, 13,3 ha de pommes de terre Charlotte ont été cultivés cette même année (FIWAP, 2023). De plus, la variété Bintje n'occupe plus que 4% des pommes de terre de conservation en 2023, alors qu'en 2015 elle en occupait 35% (SPF Économie, 2019). A l'inverse, la variété Fontane a suivi la tendance inverse en passant de 23% en 2015 à 57% en 2023 (SPF Économie, 2019). Ce changement peut s'expliquer de différentes manières. Pour la transformation en frites, il est avantageux que les pommes de terre aient une forme oblongue et un calibre supérieur à 50 mm pour éviter les pertes (Delaplace et Fauconnier, 2004). Le rendement pour les tubercules supérieurs à 50 mm est plus grand pour la Fontane

(Poulet et al., 2008) et elle possède une sensibilité meilleure aux coups. En effet, la Bintje possède un rendement pour les tubercules supérieurs à 50 mm de 36 t/ha (Poulet et al., 2008) et va donc produire beaucoup de tubercules mais avec un calibre moyen. De plus, elle possède un pouvoir germinatif naturellement plus élevé que la Fontane puisque sans traitement anti-germinatif les tubercules de la Bintje ont un poids de germe significativement plus important de 5 et 7 mois de stockage (Visse-Manisiaux et al., 2020). Cette germination a un impact négatif sur la qualité physique, gustative et économique de la pomme de terre, rendant cette variété difficile à stocker. Malgré ces défauts, la Bintje est ancrée dans l'histoire Belge et elle possède une texture plus polyvalente lui conférant un usage culinaire diversifié comme la préparation de purée et de gratins. De ce fait, cette variété reste cultivée et navigue entre le secteur du frais et de la transformation.

En Belgique, au cours de ces dernières années, il est possible d'observer une diminution des rendements. Selon les résultats de la Fiwap en 2022, la Bintje avait un rendement moyen sur la 1ère décennie du 21ème siècle de 51,3 t/ha et sur la seconde décennie de 44,0 t/ha. La même tendance est observable pour la Fontane qui n'a pas atteint les rendements maximaux depuis 2017. Le changement climatique influence fortement la culture de pomme de terre (non irriguée) en les empêchant d'exprimer leur plein potentiel.

### **2.1.3 Exigences écologiques de la pomme de terre**

Dans des conditions optimales, la formation du tubercule s'effectue à des températures inférieures à 18°C et la photosynthèse est idéale à 20°C. Le zéro de végétation qui correspond à la température minimale à laquelle la plante peut se développer varie entre 5°C et 7°C selon les variétés. Lorsque les températures sont négatives (-2°C), les tubercules risquent de geler et lorsqu'elles sont trop élevées (29°), la tubérisation est perturbée (Delaplace et Fauconnier, 2008). Ces informations sont généralisées au genre *Solanum tuberosum* L. mais ne reflètent aucunement les spécificités variétales. En effet, l'étude menée en 1975 par Marinus et Bodlaender sur la réponse de certaines variétés de pommes de terre à la température, démontre que les variétés ont des réactions différentes face à celle-ci. Par exemple, ils ont observé que la variété Up-to-Date était très sensible à 27°C, ce qui a induit une augmentation de la taille des tiges et une diminution de la production de tubercule. A l'inverse, la variété Gineke est moins sensible en ce qui concerne la croissance de ces tiges, mais il a tout de même subi une diminution de la production de tubercule.

Les besoins en eau varient de 500 à 700 mm en fonction du climat (Doorenbos et Kassam, 1979). L'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE), qui exprime la capacité de la plante à convertir l'eau disponible en biomasse est élevée pour la pomme de terre, avec des valeurs comprises entre 6 et 12 kg/ha/mm (Djaman et al., 2021). Le stade le plus critique lors d'un déficit en eau est la phase de gonflement des tubercules (Mauro et Ierna, 2025).

### **2.1.4 Besoins de la pomme de terre en éléments nutritifs**

La nutrition azotée (N) est un facteur critique du rendement et de la qualité des tubercules. L'optimum de nutrition azotée est défini comme le niveau de nutrition azotée permettant d'obtenir la maturité de la culture à la date de défanage envisagée (Chambenoit et al., 2002). Les besoins de cette culture varient en fonction de la variété et de la destination (plant, chair ferme, consommation et fécule) en impactant le rendement total, la taille des calibres ainsi que la teneur en matière sèche et en nitrate des tubercules (Arvalis, 2019).

Avant la levée, le tubercule mis en terre absorbe 5 à 10% de la quantité totale absorbée lors de son cycle. Ces besoins sont faibles car la plante puise ses ressources principalement dans le tubercule mère. D'après Westermann (1985, cité par Ben Abdallah, 2020) est pendant les deux mois suivant l'émergence que la culture absorbe l'essentiel de l'azote, de 80% à 90%, pour la formation des tiges et de la masse foliaire. Ensuite, tout le long de la tubérisation et jusqu'au défanage, 5 à 10% de l'azote total sont absorbés. Une carence en azote affecte les propriétés optiques des feuilles par un changement de concentration de certains pigments et métaboliques foliaires (Ben Abdallah, 2020). La proportion d'énergie lumineuse absorbée par la photosynthèse est donc modifiée, ce qui réduit l'accumulation potentielle de biomasse souterraine. A l'inverse, un excès d'azote va augmenter la durée du cycle, ainsi que sa surface foliaire et son nombre de ramifications par tige. De plus, il favorise l'apparition d'un noircissement après cuisson, d'un brunissement à la friture et induit une perte de conservation (Arvalis, 2019).

Le coefficient Apparent d'Utilisation de l'azote (CAU) correspond à la fraction du fertilisant qui sera réellement absorbée par les plantes jusqu'à la récolte. Celui de la pomme de terre est inférieur aux autres cultures et est de l'ordre de 50%. La période de prélèvement intensive de l'azote est brève, car le cycle de la pomme de terre est court et l'enracinement ainsi que la densité des racines est faible (Ben Abdallah, 2020).

Bien que le cycle de la pomme de terre soit court, sa production de biomasse est supérieure à celle des autres cultures ce qui lui confère un besoin élevé en potassium (K). Ce dernier représente ainsi le macronutriment le plus abondant (1,7% de la matière sèche totale) dans la plante, en jouant un rôle fonctionnel (Torabian et al., 2021). En effet, il intervient dans la croissance de plantes, la synthèse de l'amidon, la biochimie, la quantité et qualité des tubercules (Kan et al., 2012). Une carence en potassium induit une diminution du rendement, tandis qu'un apport adéquat permet une augmentation de la taille des tubercules grâce à la facilitation de la translocation des assimilats des feuilles aux tubercules. Le potassium permet d'avoir une faible concentration en sucre réducteur dans le tubercule et permet d'éviter le noircissement lors de la friture.

Le phosphore (P) est le troisième élément le plus limitant après l'azote (N) et le potassium (K). Il est le constituant des phospholipides, des sucres phosphorylés et de l'acide nucléique et intervient dans la photosynthèse, la respiration et le transfert d'énergie (Wandji Simo, 2020). Dans l'étude menée par Jasim et al., (2020) sur la pomme de terre, le rôle du pH du sol est mis en avant comme un facteur essentiel à la disponibilité en phosphore. Les sols ayant un pH inférieur à 6 ont montré des meilleurs rendements comparés aux sols avec un pH supérieur à 6, où même de forts apports n'ont pas amélioré les rendements. Les auteurs estiment que l'absorption totale de phosphore par les différentes variétés de pomme de terre se situe entre 6,6 et 8 kg P ha<sup>-1</sup>. La concentration en P total dans les tissus végétaux varient au cours du cycle : à l'initiation du tubercule elle est comprise entre 0,38 à 0,45 % et à maturité entre 0,14 à 0,17 % (Jasim et al., 2020).

### **2.1.5 Itinéraire technique**

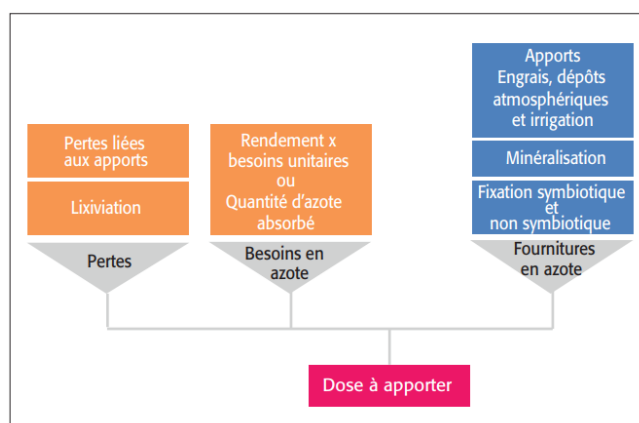
Le cycle de développement de la pomme de terre est court, entre trois à quatre mois. La plantation des pommes de terre s'effectue entre mars et avril afin d'obtenir une floraison entre juillet et août. Pour les pommes de terre à destination de l'industrie de transformation, la plantation ne commence qu'au mois d'avril. La charlotte possède une maturité demi-précoce, tandis que la Bintje et la Fontane ont une

maturité demi-tardive (Poulet et al., 2008). La date de plantation est influencée par les conditions climatiques ainsi que la variété puisque la durée de leur cycle est différente. Les variétés avec une maturité précoce ont un cycle court, d'environ 70 et 90 jours entre la plantation et la récolte, tandis que les demi-précoces à tardive ont un cycle long d'environ 100 à 150 jours (CNIPT, 2023). Cette variabilité génétique implique une adaptation des pratiques agricoles.

Les tubercules sont enterrés à une profondeur qui varie de 5 à 10 cm. Par la suite, les plans seront recouverts par buttage. Il s'avère que le buttage accélère la floraison et la tubérisation favorisant ainsi des rendements élevés (Rioux et Comeau, 1980). De plus, les tubercules de récolte qui sont exposés à la lumière peuvent devenir vert, dû à formation de chlorophylle, indiquant la présence d'un alcaloïde (la solanine) en quantité anormalement haute, toxique pour l'homme (Delaplace et Fauconnier, 2004). Le buttage sert de protection thermique protégeant ainsi les racines et les tubercules des températures basses ou des chocs thermiques. Ces buttes améliorent le drainage du sol tout en préservant son humidité (Roose, 1994).

La pomme de terre est particulièrement sensible à une mauvaise structure du sol en profondeur et aux tassements. En effet, ses racines se développent bien dans des sols meubles puisqu'elles ont un faible pouvoir de pénétration. En Belgique, les sols sont propices à cette culture puisqu'ils sont généralement limoneux et sablo-limoneux avec un pH compris entre 5,0 et 7,0, riches en matière organique, bien drainés et aérés (Goffart et al., 2022).

La dose d'azote apportée à la culture diffère selon plusieurs facteurs qui sont repris en figure 3. Les apports en engrais azoté s'effectuent généralement en une seule fois lors de la plantation car ils sont bénéfiques pour des terres pauvres ou pour les variétés précoces. Le fractionnement quant à lui est avantageux lorsque la plantation s'effectue dans un sol léger et ou filtrant pour éviter les risques de lixiviation.



**Figure 3.** Estimation de la dose d'azote à appliquer en fonction des pertes, des besoins et des sources de fourniture (Arvalis, 2019).

La variété la Bintje est très sensible à certaines maladies et nématodes ce qui implique l'application de traitements spécifiques au cours de la saison (Rolot et al., 2005). La Fontane et la Charlottes sont traitées de la même façon et de manière préventive contre le mildiou en se basant sur des courbes d'infection.

Le défanage, c'est-à-dire le retrait des parties aériennes dans le but de stopper la croissance du tubercule, s'effectue lorsque le calibre et la quantité de MS voulue ont été atteint. La récolte a lieu 2 à 4 semaines après le défanage, ce qui permet aux pommes de terre, et en particulier pour les variétés à peau fine comme la Charlotte, de renforcer leur périderme (Delaplace, 2007). Le défanage sert dans le cas de la Fontaine à stabiliser le taux de matière sèche avant la récolte, puisque c'est un critère clé pour l'industrie de la transformation.

## **2.3 Modélisation des cultures avec le modèle-sol culture STICS**

### **2.3.1 Généralités sur STICS**

STICS (Simulateur mulTidisciplinaire pour les Cultures Standard) est un outil de modélisation de cultures développé en 1914 par l'INRA (Institut National de Recherche Agronomique) en France. C'est un modèle déterministe basé sur les processus qui prend en compte la diversité des systèmes de cultures et le fonctionnement du sol avec une simulation réalisée en pas de temps journalier (Beaudoin et al., 2023). Il utilise donc des variables d'entrée liées au climat, au sol, au système cultural et à sa gestion. Les variables de sorties quant à elles représentent le rendement en termes de qualité (teneur en MS) et de quantité ainsi que les impacts environnementaux liés au carbone dans le sol, aux émissions de CO<sub>2</sub>, au lessivage des nitrates, aux émissions gazeuses d'azotes et au drainage de l'eau.

STICS est organisé en modules de base qui sont composés de sous-modules reflétant des mécanismes spécifiques. Il est possible de diviser ces modules en deux groupes qui traitent respectivement de l'écophysiologie des parties aériennes et du fonctionnement du sol en interaction avec les parties souterraines (Brisson et al., 2003).

Pour les processus liés aux parties aériennes, STICS dispose de trois modules. Premièrement, le module de développement phénologique incluant les stades de germination, de levée, de floraison, de maturation, etc. Ainsi, en fonction des conditions environnementales, il est possible de prévoir à quel moment la plante passe d'un stade phénologique à un autre. Ce processus est nommé ontogenèse et STICS utilise le concept d'UPVT (Unit of Development) pour modéliser ces transitions. Le deuxième module correspond à la croissance aérienne qui va être simulée en fonction de la quantité de matière sèche produite grâce à la photosynthèse. Enfin, le dernier module représente l'élaboration du rendement qui prend en compte la conversion de la biomasse en produits récoltables.

Pour le second groupe, on retrouve le module de croissance racinaire qui simule l'extension racinaire dans le sol afin d'absorber les éléments nécessaires au développement de la plante. Ensuite, le module de bilan hydrique permet de prédire les stress hydriques en modélisant l'équilibre entre l'eau absorbée par les racines, son évaporation ainsi que l'eau apportée par la pluie ou l'irrigation. Le module de bilan azoté quant à lui, permet le suivi de l'azote dans le sol en prenant en compte la fertilisation, les pertes par lixiviation ainsi que l'absorption par la plante. Enfin, le dernier module correspond au transfert de chaleur, d'eau et d'azote. Il permet une simulation des échanges dans les différentes couches du sol.

L'interface sol-plante va donc permettre de simuler les différents échanges entre les groupes et modules lors de la croissance de la plante. STICS utilise un principe général de croissance des cultures qui prend en compte l'interception de la lumière, la conversion de l'énergie en biomasse et enfin l'allocation de la biomasse. Par rapport à d'autres modèles de simulation cultural, STICS possède divers avantages. Il a la capacité de modéliser différentes espèces cultivées couvrant ainsi une large gamme de familles botaniques. Lors de la simulation des différents contextes pédoclimatiques sa marge d'erreur est

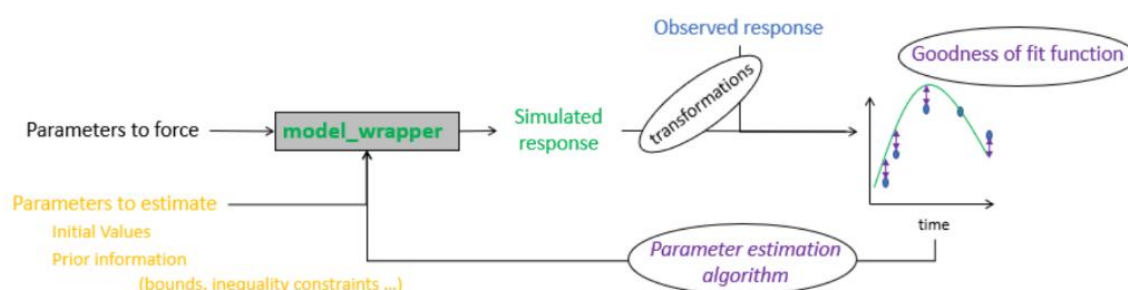


relativement faible démontrant sa grande robustesse. Enfin, il est possible d'ajouter des modules à ceux mentionnés ci-dessus pour compléter la description du système (Beaudoin et al., 2023).

### 2.3.2 Calibration des fichiers plantes avec STICS

STICS modélise la physiologie des cultures à travers différents formalismes et paramètres présents dans les fichiers plantes. Le choix des paramètres à optimiser dépend fortement de leur sensibilité ainsi que des variables observées disponibles. Dans STICS, la moitié des paramètres sont considérés comme variétaux tandis que les autres sont spécifiques (Gawinowski et al., 2025). La calibration a pour objectif d'estimer des paramètres incertains en minimisant les écarts entre les simulations et les observations choisies. Pour y arriver différentes approches sont possibles.

Premièrement, l'utilisateur peut recourir à une approche manuelle qui consiste à paramétrer le fichier plante en le modifiant directement avec des valeurs issues de la littérature. Cette méthode permet de corriger les écarts majeurs de manière itérative afin de contrôler la cohérence physiologique des paramètres. Cependant, elle entraîne une précision limitée due à une démarche d'essai erreurs manuelle. A l'inverse, l'approche automatisée estime les paramètres grâce à un optimisateur qui va piloter le simulateur STICS via un wrapper, comme CROPTIMIZR basé sur des techniques d'estimation mathématiques (figure 4).



**Figure 4.** Schéma du processus d'estimation des paramètres (Buis et al., 2024).

Le package CROPTIMIZR inclut deux algorithmes d'estimations de paramètres : un fréquentiste et un bayésien. La méthode fréquentiste permet de trouver la meilleure combinaison de paramètres minimisant l'erreur entre la simulation et les observations. Cette approche utilise l'algorithme d'optimisation Nelder-Mead Simplex (Nelder et Mead 1965) qui est adapté aux modèles de culture comme STICS de par leur comportement irrégulier et non linéaire. En effet, il ne nécessite pas d'informations sur la pente de la fonction à optimiser contrairement aux méthodes classiques basées sur les dérivés (ex : Gauss-Newton). La méthode bayésienne quant à elle n'estime pas un optimum unique, mais cherche à déterminer la distribution de probabilité conjointe des paramètres. L'avantage de cette méthode réside dans le fait qu'elle ne se base pas uniquement sur les observations, elle utilise aussi les informations a priori issues de la littérature. L'algorithme MCMC multi-chaînes nommé DREAM-zs présent dans cette méthode, échantillonne un jeu de paramètre, vérifie leur convergence et fournit : la corrélation entre les paramètres ainsi que médiane avec les intervalles crédibles pour chaque paramètre. Cette approche quantifie l'incertitude et détecte les équifinalités (plusieurs combinaisons de paramètres qui donnent des performances équivalentes) (Buis et al., 2024).

Après avoir choisi l'approche (manuelle et/ou automatique) et défini les variables observées, il est nécessaire de sélectionner une stratégie de calibration qui peut être, soit par variable, soit globale. La première stratégie structure les paramètres en bloc et les calibre sur une seule variable. Elle favorise l'identification des paramètres et leurs impacts, mais la fiabilité des résultats dépend fortement de l'ordre de calibration choisi. La seconde approche prend en compte simultanément l'ensemble des variables et trouve un compromis entre toutes les sorties. Dans ce cas, il est moins évident de faire le lien entre les paramètres et les sorties. De plus, il est nécessaire de pondérer ou de normaliser les variables pour définir l'ampleur de leur contribution.

### **2.3.2 Calibration et simulation de la pomme de terre avec STICS**

SITCS dispose de plusieurs fichiers plantes basés sur des paramètres pour différentes cultures. En ce qui concerne la pomme de terre, le modèle est généraliste et ne prend pas en compte les spécificités des différentes variétés. Ces dernières vont avoir des caractéristiques spécifiques en fonction de leur finalité et des itinéraires techniques différents rendant ce fichier général biaisé.

Il existe trois niveaux de paramétrisation des fichiers de cultures : la paramétrisation finalisée, la paramétrisation prototype et la paramétrisation en cours. Le fichier plante de la pomme de terre est qualifié comme "paramétrisation prototype", impliquant que les données présentes ont une qualité incertaine. Cela peut être dû à l'utilisation d'une ancienne version de STICS ou bien d'un jeu de données initial trop limité. De ce fait, les performances du modèle pour la culture de pomme de terre n'est pas entièrement validé puisque des écarts entre les simulations et les observations réelles peuvent apparaître. Il est conseillé aux utilisateurs d'améliorer le modèle et de partager leurs résultats pour contribuer à l'amélioration continue du modèle (Beaudoin et al., 2023).

En 2021, Delandmeter dans l'étude sur la modélisation sol-culture des services écosystémiques dans des systèmes de culture-élevage diversifiés et intégrés pour l'adaptation et l'atténuation du changement climatique, a utilisé le modèle STICS pour simuler des rotations longues. Dans ces dernières, la culture de la pomme de terre était incluse mais sans prendre en compte la variété. Le fichier de culture utilisé provenait du Prof. Dumont et a été modifié lors de cette étude. La précision de STICS pour la pomme de terre a été satisfaisante en ce qui concerne la détermination du rendement et du LAI, mais moins performante pour la biomasse. Ainsi, il souligne l'importance d'une calibration fine pour améliorer la précision du modèle, et donc ces prédictions. Dans l'étude menée par Pierre-Hadrien Mortier (2020), le modèle STICS a été utilisé pour simuler les conséquences du changement climatique sur la culture de pomme de terre. Pour cela, le fichier plante a été paramétré en fonction des variétés : Agata et Franceline pour la consommation, Bintje et Magnum pour la transformation. Les paramètres proviennent d'expérimentation de terrain en France dans le cadre de projets ARVALIS. Cependant, aucune analyse n'a été faite pour valider cette paramétrisation et attester de son efficacité. Une étude portant sur la calibration du modèle de la culture de la pomme de terre a été publiée en 2016 par Morissette et al. Dans cet article, les variétés Shepody et Russet Burbank ont été étudiées dans les conditions climatiques de l'est du Canada. Il a été démontré que l'utilisation de courbes de dilution spécifique à chaque variété améliore la performance du modèle.

Il existe très peu d'études sur la calibration de STICS sur la pomme de terre, et encore moins sur les variétés Bintje, Fontane et Charlotte en Belgique. Or, la précision des modèles est fortement dépendante de leur calibration aux conditions locales. En 2023, la pomme de terre représentait 7,9% de la valeur de la production agricole en Belgique, comparé à 3,8% dans l'Union européenne, témoignant de son importance dans l'économie Belge (Eurostat, 2024). Il existe en Belgique une quinzaine d'usines de

transformations, qui génèrent un chiffre d'affaires cumulé supérieur à 4 milliards d'euros (Goffart et Lebrun, 2024). Les variétés Bintje, Fontane et Charlotte comptent parmi les plus populaires dans leurs catégories et sont largement cultivées en Belgique. Cette culture est soumise à différentes contraintes pédoclimatiques avec des sol limoneux sensibles au compactage, à la battance et à l'érosion. D'ici la fin du siècle, les précipitations extrêmes pourraient augmenter de 50 à 70%, ce qui accroîtrait le risque de ruissellement et d'érosion (Brajkovic et al., 2025).

### 3. Objectifs du mémoire

Ce travail vise à adapter et à améliorer le fichier plante STICS dédié à la pomme de terre, en le calibrant pour les variétés Bintje, Fontane, Charlotte dans les conditions pédoclimatiques représentatives de la Wallonie. Les objectifs spécifiques de cette étude sont :

- Calibrer le modèle STICS pour les variétés Bintje, Fontane et Charlotte.
- Evaluer les performances du modèle par rapport à la version générique du fichier pomme de terre livré avec le modèle STICS.

### 4. Matériel et méthode

#### 4.1 Présentation du modèle STICS

##### Développement phénologique :

STICS utilise sa propre échelle phénologique décrite dans le tableau 1. Tout comme l'échelle BBCH, la phase végétative est différenciée de la phase reproductive. Les stades phénologiques simulés sont représentés par des variables sous l'appellation iXXXs, où “i” indique le jour, “XXX” le stade et “s” spécifie qu’il s’agit d’une simulation.

**Tableau 1.** Correspondance entre les stades physiologiques dans STICS et les codes BBCH.

Stades en phase végétative (Leaf Area Index)	Stades en phase reproductive (Harvested organs filling)
IPLT : Plantation des tubercules (BBCH 00)	
IGER : germination après la mise en terre (BBCH 01-03)	
ILEV: Emergence (BBCH 09-10)	
IMAF : Accélération maximale de la croissance foliaire (BBCH 20-39)	ILAT : Phase critique - Début de la tubérisation (BBCH 40)
ILAX: Fin de la croissance LAI - Fin de l'émission de nouvelles feuilles (BBCH 39 - 40)	IDRP : Début du remplissage des tubercules (BBCH 41 - 49)
	IMAT : Maturité physiologique (BBCH 91)
	IREC: Récolte (BBCH 95 - 97)

Selon les données météorologiques, la plante va accumuler quotidiennement des degrés jours qui vont être calculés par STICS afin de passer d’un stade à un autre. STICS utilise la température de la culture et non la température de l’air, ce qui permet de mieux appréhender les stress hydriques et thermiques. La température de la culture est donc calculée via le bilan énergétique de la plante en prenant en compte le rayonnement absorbé, les échanges thermiques (sol, transpiration et air), ainsi que l’état hydrique. Les seuils classiques de développement comme la température minimale (TMIN), la température maximale (TMAX), etc. trouvés dans la littérature, sont définis pour la température de l’air et non la température de la culture. La correspondance entre les seuils classiques et les températures réellement perçue par la plante se fait grâce à des coefficient multiplicateurs comme coeflevamfp, coefamflaxP, etc. (Beaudoin et al., 2023).

## **Modélisation de la croissance**

La disponibilité du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) est un des facteurs les plus importants pour la croissance des cultures. Dans STICS, la croissance correspond à la production de biomasse sèche au niveau des organes aériens qui sont principalement liés à l'activité photosynthétique de la plante (équation 1).

$$\begin{aligned} \text{DLTAMS}(t) = & \text{EBMAX}(t) * \text{RAIN}(t) - \text{COEFBG} * \text{RAIN}(t)^2 * \text{FTEMP}(t) * \text{SWFAC}(t-1) \\ & * \text{INNS}(t-1) * \text{EXOBIOM}(t-1) * \text{FCO2}(t) + \text{DLTAREMOBIL}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

Avec :

- DLTAMS : Taux de croissance de la plante [ $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{jour}^{-1}$ ],
- EBMAX : Efficience maximale d'utilisation du rayonnement (RUE) [ $\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ ],
- RAIN : Rayonnement photosynthétiquement actif intercepté [ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{jour}^{-1}$ ],
- COEFBG : Coefficient correctif de saturation à fort rayonnement,
- FTEMP : Facteur de réduction de la croissance de la biomasse dû à la température [-],
- SWFAC(t-1) : Valeur du stress hydrique de la veille [-],
- INNS(t-1) : Valeur du stress azoté de la veille [-],
- EXOBIOM(t-1) : indice d'asphyxie racinaire, influençant l'efficience d'utilisation du rayonnement et la transpiration [-],
- FCO2 : Effet de la concentration atmosphérique en  $\text{CO}_2$  [-],
- DLTAREMOBIL : Biomasse remobilisée depuis les organes de réserve [ $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{jour}^{-1}$ ]

L'accumulation quotidienne de DLTAMS correspond à MASEC, c'est-à-dire la matière sèche produite au-dessus du sol (hors racines). C'est une définition qui est adaptée aux cultures céréalières pour lesquelles STICS a initialement été conçue. En effet, il considère que les organes reproducteurs (grains et épis) sont inclus dans les parties aériennes. Dans le cas de la pomme de terre, MASEC correspond donc à la biomasse totale sèche [ $\text{t/ha}$ ] en incluant les parties aériennes (MASECVEG) et les tubercules (MAFRUIT) (équation 2).

$$\text{MASEC} = \text{MASECVEG} + \text{MAFRUIT} \quad (2)$$

L'accumulation de la biomasse est simulée à l'aide de EBMAX qui représente la capacité de la plante à convertir le rayonnement intercepté (RAIN) en biomasse. STICS utilise les paramètres EFCROIVEG, EFCROIVEG et EFCROIREPRO pour définir EBMAX, respectivement durant les phases juvéniles, végétative et reproductrice. Lors de la calibration ces trois paramètres ont été travaillés afin de moduler l'efficience d'utilisation du rayonnement et ainsi améliorer la concordance entre les simulations de biomasses observées et simulées.

## **L'élaboration du rendement :**

L'objectif du modèle est de prédire le rendement de la culture en fin de simulation en fonction des fichiers d'entrées. La pomme de terre a été identifiée dans cette étude comme une plante déterminée. Cette hypothèse repose principalement sur sa dynamique de la croissance végétative et reproductrice. Les variétés et surtout celles à destination de l'industrie de la transformation, ont été sélectionnées pour obtenir une tubérisation groupée dans un intervalle de temps court et défini. De plus, peu après le début

de la tubérisation, le développement de nouvelles feuilles cesse naturellement pour rediriger ces ressources vers les tubercules. Ainsi pour ce type de plante, STICS suggère que le nombre et le remplissage des tubercules ne dépendent pas de la croissance des autres organes (équation 3).

$$NBGRAINS(IDRP) = CGRAINP * VITMOY(IDRP) * NBGRMAXV \quad (3)$$

Avec :

- NBGRAIN : le nombre de tubercules [tubercules·m<sup>-2</sup>] à la date de début de remplissage des tubercules (IDRP),
- CGRAINP : pente de la relation entre le nombre de tubercules et le taux de croissance [tubercules·g<sup>-1</sup>·jour<sup>-1</sup>],
- VITMOY : le taux de croissance moyen [g·m<sup>-2</sup>·jour<sup>-1</sup>],
- NBGRMAX : le nombre maximum de tubercules [tubercules·m<sup>-2</sup>]

Dans cette étude, la calibration de CGRAINP a été effectuée pour avoir un ajustement réaliste du rendement. La dynamique de remplissage des tubercules repose sur une fonction linéaire entre IDRP et IMAT (fin du remplissage) avec une pente représentée par VITICARB (équation 4).

$$ICARB(t) = VITIRCARBp * (t - IDRPt + 1) \quad (4)$$

Avec :

- ICARB(t) : proportion de biomasse transférée vers les organes récoltés au jour t
- VITIRCARB : vitesse d'accumulation de matière sèche dans les tubercules [g tubercule · g<sup>-1</sup> plante · jour<sup>-1</sup>]
- IDRP : date de début de remplissage des tubercules [jours juliens]

Un VITIRCARB élevé induit une croissance plus rapide de l'indice de récolte, entraînant une augmentation de la biomasse dans les tubercules. Une calibration de PGRAINMAXI qui correspond au poids sec maximum d'un tubercule et de VITICARB a été effectuée pour simuler à la fois le rythme et le potentiel final du rendement.

### **La nutrition azotée :**

Dans STICS, la quantité d'azote totale absorbée est représenté par la variable QNPLANTE qui, dans le cas de la pomme de terre, représente la quantité totale d'azote absorbé [kg/ha] dans les parties aériennes (QNVEG) et les tubercules (QNGRAIN) (équation 5).

$$QNPLANTE = QNVEG + QNGRAIN \quad (5)$$

Afin de déterminer le [N] critique, STICS utilise la courbe de dilution de l'azote qui illustre le besoin minimal en azote pour obtenir un développement optimal de la plante (sans carence) (équation 6, Ziadi et al., 2015).

$$[Nc] = a * W^{-b} \quad (6)$$

Avec :

- [Nc] : concentration critique en azote en g de N par kg de matière sèche,

- W : biomasse totale en tonne ou Mg de MS par hectare,
- a : concentration en N pour une biomasse de 1 tonne de MS par hectare,
- b : coefficient de dilution de N dans la plante

La courbe varie fortement en fonction des interactions génotype-environnement-pratiques de gestion. De ce fait, la calibration des paramètres a et b dans STICS est essentielle pour obtenir un modèle valide. Il a été déterminé sur base de 50 courbes de dilution critique de l'azote, couvrant 18 cultivars, que les valeurs du paramètre "a" fluctuent de 1,59 à 6,74 et le paramètre "b" de 0,16 à 0,56 (Djaman et al., 2025). Les paramètres de la courbe de dilution critique de l'azote pour la Bintje en Belgique présents dans la thèse produite par Ben Abdallah (2020) ont les paramètres suivants : a = 5,37 et b = 0,46. Ces derniers seront utilisés pour les trois variétés.

L'absorption d'azote par les racines est fonction de la concentration en azote minéral et de la densité racinaire (équation 7).

$$V_{abs}(z,t) = \frac{V_{max1p} * concN(z,t)}{K_{mabs1p} + concN(z,t)} + \frac{V_{max2p} * concN(z,t)}{K_{mabs2p} + concN(z,t)} \quad (7)$$

Avec :

- VABS : capacité d'absorption spécifique [ $\mu\text{mol N h}^{-1} \text{ cm}^{-1}$  de racine]
- $V_{max1p/2p}$  : vitesse maximale d'absorption pour chaque système [ $\mu\text{mol cm}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ],
- $K_{mabs1p/2p}$  : constante de demi-saturation pour chaque système [ $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ],
- concN : concentration molaire d'azote minéral [ $\mu\text{mol l}^{-1}$ ]

A faible concentration, les plantes activent un système à haute affinité (HATS), avec VMAX1P et KMABS1 bas, permettant d'absorber efficacement de faibles quantités. A l'inverse, elles activent un système à faible affinité (LATS), avec VMAX2P et KMABS2 élevé, qui permet d'absorber en plus grande quantité mais de manière moins efficace. Le paramètre VMAX2 va être calibré dans cette étude.

Enfin, l'accumulation d'azote dans les tubercules est stimulée par l'indice de récolte de l'azote (IRAZO) (équation 8).

$$IRAZO(t) = VITIRAZO_p * (t - IDR_{Pt} + 1) \quad (8)$$

Avec :

- IRAZO(t) : proportion d'azote transféré vers les organes récoltés au jour t
- VITIRAZO : vitesse d'accumulation de l'azote dans les tubercules [ $\text{g tubercule} \cdot \text{g}^{-1} \text{ plante} \cdot \text{jour}^{-1}$ ]
- IDR<sub>P</sub> : date de début de remplissage des tubercules [jours juliens]

Le paramètre VITIRAZO sera calibré afin de simuler correctement la quantité d'azote finale dans les tubercules.

## **4.2 Les données d'entrée du modèle**

### **4.2.1 Les observations disponibles**

Les données utilisées pour la calibration et la validation des variétés Bintje, Fontane et Charlotte proviennent de suivis expérimentaux du Centre wallon de Recherches agronomiques (CRA-W).

En cours de saison, des observations de la matière sèche ont été réalisées en cours de culture pour les tubercules et des parties aériennes. De plus, pour certaines expérimentations des variétés Bintje et Charlottes, des informations sur la quantité d'azote absorbée (tubercule et totale) sont disponibles. Enfin, le rendement net pour chaque variété a été utilisé. Il correspond au rendement après calibrage, ce qui permet d'enlever tous les biais introduits par les résidus du champ et de prendre en compte l'ensemble de la production. Certains rendements nets ont été estimés à partir des rendements des calibres supérieurs à 35 mm, en utilisant un coefficient multiplicatif pour chaque variété. Le ratio rendement net /rendement des calibres  $\geq$  à 35 mm a été calculé pour chaque itinéraire technique de toutes les expérimentations par variété, puis la moyenne de ces ratios a été déterminée. L'erreur absolue moyenne associée à ces estimations est de 0,069t/ha pour la Bintje, 0,043t/ha pour la Fontane et 0,087t/ha pour la Charlotte. Cette méthode a donc permis une estimation fiable des rendements en limitant les potentiels biais. Ensuite, les rendements ont été convertis en matière sèche (MS) à l'aide du pourcentage de MS mesuré spécifiquement pour chaque parcelle des différentes expérimentations. Lorsque cette donnée n'était pas disponible, la moyenne calculée pour la variété correspondante a été utilisée. Enfin, les nombres de grains par mètres carrés ont été calculés pour les expérimentations où le comptage et la surface d'expérimentation ont été documentés.

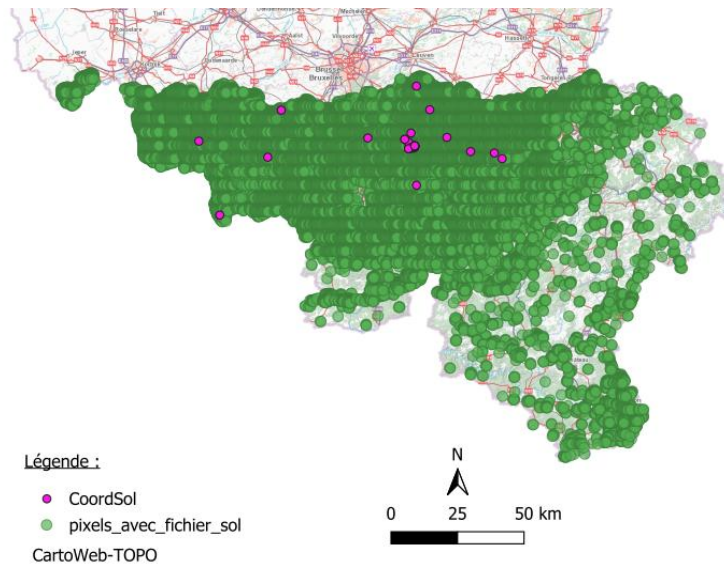
### **4.2.2 Données de sols**

#### **4.2.2.1 La base de données**

La base de données de sol utilisée est celle créée dans le rapport de Diagnostic de vulnérabilités pour augmenter la résilience wallonne à travers l'adaptation aux changements climatiques produit par Lacroix et al. (2024) en collaboration avec le projet NAPERDIV. Les informations présentes proviennent de la base de données sol ISRIC, de la carte de carbone organique total du service public wallon et de la teneur en CaCO<sub>3</sub> provenant de European Soil Data Centre. La base de données a été filtrée pour n'avoir que les sols arables et les couches de sols ont été agrégées pour obtenir une structure standardisée en 5 horizons pédologiques : 0-15cm ,15-30 cm ,30-60 cm ,60-100 cm et 100-200cm. Les propriétés hydriques et physiques du sol non disponibles ont été estimées à l'aide de fonctions de pédotransfert (package eupft2.0 de R). Finalement, chaque sol est répertorié sous un pixel de 250 m × 250 m, ce qui représente 6,25 ha par point.

#### **4.2.2.1 Utilisation du modèle dans un réseau d'essai à l'échelle Wallonne**

Pour la majorité des expérimentations, les coordonnées géographiques des champs étaient disponibles. Lorsque ce n'était pas le cas, les coordonnées du centre du village ont été utilisées comme approximation. Dans le cadre de cette étude, l'objectif était de calibrer et de valider le modèle STICS à partir d'essais agronomiques localisés. Il était donc essentiel de reproduire au mieux les conditions réelles de cultures en obtenant des paramètres de sol qui se rapprochent le plus de ceux des sites expérimentaux. Pour cela, la carte vectorielle des sols arables préalablement clustérisés et les sites expérimentaux ont été importés dans QGIS sous le système de coordonnées EPSG:31370 (figure 5).



**Figure 5.** Représentation des clusters (en vert) issus de la base de données de sol et des sites expérimentaux (en rose) dans le référentiel EPSG:31370.

Grâce au package sf de Rstudio, une recherche spatiale basée sur la distance euclidienne a été réalisée (équation 9).

$$\text{dist} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad (9)$$

Avec :

- dist : la distance euclidienne entre le cluster et le site expérimental,
- $x_j$  et  $y_j$  : les coordonnées du site expérimental (Belgian Lambert 72)
- $x_i$  et  $y_i$  : les coordonnées du cluster (Belgian Lambert 72)

De cette manière les clusters de sol étaient les plus proches des sites expérimentaux ont été déterminés. Finalement, ce sont 19 sols qui ont été sélectionnés, puis rassemblés dans un fichier unique au format STICS sous le nom “sols.xml”.

#### 4.2.3 Données climatiques

Les données climatiques sont issues du site web de Pameseb (Agromet). L’extraction des données s’est réalisée via l’API de PAMSEB selon la procédure renseignée, ce qui a permis d’envoyer des requêtes vers le serveur afin d’obtenir les variables souhaitées pour chaque station à la période correspondante. Ces dernières ont été choisies en fonction de leur proximité par rapport au lieu d’expérimentation ainsi que la complétude de leurs données. La liste des différentes stations choisies en fonction des années sont visibles en annexe 2. STICS nécessite une série de données spécifiques pour simuler avec précision les différents processus de croissance (tableau 2).



**Tableau 2.** Variables nécessaires à la création du fichier climatique de STICS.

Variable	Unité
Station	/
Date	[aaa-mm-jj]
Température minimale	[°C]
Température Mmaximale	[°C]
Radiation solaire	[MJ/m²/j]
Evapotranspiration de la plante	[mm/j]
Précipitations	[mm/j]
Vitesse moyenne du vent	[m/s]
Pression de vapeur saturante	[kPa]
Concentration en CO2	[ppm]

La pression de vapeur saturante a été calculée selon l'équation de Magnus-Tétens (équation 10).

$$P_s = 0.61078 * \left( \frac{17.27 * T}{273.3 + T} \right) \quad (10)$$

Avec  $P_s$  la pression de vapeur saturante en [kPa] et  $T$  la température en [°C]. Cette pression a été calculée pour les températures minimales et maximales, puis leur moyenne a été utilisée. Cette méthode permet d'estimer plus précisément la pression de vapeur saturante journalière moyenne, comme décrit par allens et al. en 1998. Enfin, la concentration en CO2 a été fixée à 390 ppm pour toutes les expérimentations. Le fichier "Gbx\_PE\_sta.xml" et "Gbx\_WS\_sta.xml" ont été utilisés pour toutes les USM afin de déterminer les paramètres fixes de structure respectivement avant la paramétrisation et après. Finalement, les 33 combinaisons de climats et d'années ont été répertoriés sous la forme suivante : "climat\_(numéro de station).(année)".

#### 4.2.4 Itinéraire technique cultural

Plusieurs itinéraires techniques ont été testés au sein de chaque expérimentation. Dans STICS, le fichier technique dispose d'un formalisme spécifique en bloc modulable qu'il appartient à l'utilisateur d'activer ou non (tableau 3).

**Tableau 3.** Résumé des blocs activé ou désactivé dans le fichier TEC.

Formalisme	Activé	Désactivé
Résidus organiques		x
Travail du sol		x
Irrigation		x
Techniques spéciales		x
Modification du sol par compaction-fragmentation		x
Phénologie		x
Semis	x	
Fertilisation	x	
Récolte	x	

Parmi ceux activés, on retrouve le bloc de semis où la date de plantation, la densité de plantation ainsi que la variété ont été spécifiées. La densité de plantation a été calculée pour certaines expérimentations et une moyenne a été faite par variétés lorsqu'elle n'était pas disponible. La profondeur de semis a été fixée à 5 cm, en supposant que le tubercule était au centre de la butte, qui fait en moyenne 10 cm de

hauteur. Les dates des itinéraires culturaux utilisés sont disponibles Annexe 1. Certaines dates étaient indisponibles et ont donc été estimées. Pour le site 58 de la variété Bintje, la date de défanage a été estimée à partir de la durée moyenne entre la date de défanage et d'émergence, tandis que la date de récolte a été estimée en calculant la durée moyenne entre la date de défanage et de récolte. De la même manière, la date de récolte et de défanage (site 7 et 9) de la variété Fontane, ainsi que la date de défanage (site 14 et 37) de la variété Charlotte ont été calculées.

Pour le bloc de fertilisation, chaque apport a été défini grâce à une date (jours julien) liée à une application (kg N/ha) sous forme d'urée. Lors des essais, différentes doses d'azote ont été appliquées et la fertilisation a parfois été fractionnée jusqu'à quatre apports à des dates spécifiques. Pour le fichier Bintje uniquement, certaines dates d'apport ont dû être estimées. Dans ce bloc, STICS utilise la loi de Beer-Lambert pour déterminer l'interception lumineuse en supposant un couvert végétal homogène puisque l'option « planting structure » est désactivée.

Les erreurs moyennes associées à ces estimations sont présentées dans le tableau 4. Étant donné le nombre limité d'estimations par variété et les faibles écarts-moyens observés, le biais introduit peut être considéré comme faible.

**Tableau 4.** a : erreur moyenne absolue introduite par les estimations des dates pour chaque variété. b : erreur moyenne absolue introduite par les estimations du fractionnement de la fertilisation pour la variété Bintje.

	Erreur moyenne absolue (j)			Erreur moyenne absolue (j)		
	Entre la date	Entre la date de		Entre l'apport 1	Entre l'apport 2	Entre l'apport 3
Bintje	8	3	Bintje	10	1	2,5
Fontane	6	6				
Charlotte	/	11				

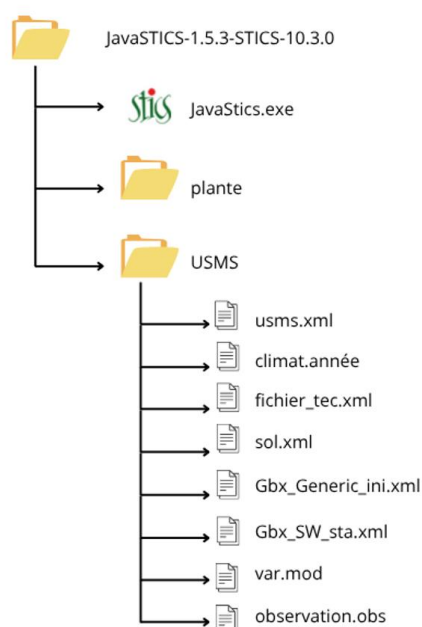
(a)

(b)

STICS considère la période de sénescence, et donc de l'arrêt du développement foliaire actif au stade IMAT. Certaines variétés vont donc selon leur génétique, atteindre ce stade plus rapidement que d'autres. Néanmoins, le plant de pomme de terre va subir un défanage et comme cette intervention n'est pas présente dans le cycle naturel de la plante, STICS n'a pas introduit ce paramètre dans les stades phénologiques. Après le défanage, l'appareil aérien est détruit, induisant un arrêt de la photosynthèse et de l'allocation de matières aux organes. De ce fait, dans le bloc de récolte irecbutoir, qui correspond à la date limite de récolte autorisée, a été fixé à deux jours après le défanage.

### 4.2.5 Structure finale

Pour l'ensemble des expérimentations un unique fichier “Gbx\_Generic\_ini.xml” a été utilisé afin de définir l'état initial du système. Un fichier var.mod a été créé afin d'indiquer les paramètres à faire varier pendant les simulations. L'ensemble des fichiers utilisés pour faire fonctionner STICS et générer les fichiers .txt qui serviront à la calibration ont été regroupés dans la figure 6.



**Figure 6.** Représentation des différents fichiers utilisés pour le fonctionnement de STICS et la calibration.

## 4.3 Stratégie de calibration

### 4.3.1 Paramétrisation

Lors de cette étude, la version 10.3 de STICS a été utilisé. Ce modèle fournit aux utilisateurs un fichier plante spécifique à la pomme de terre sous le nom : proto\_potato\_plt.xml. Une première évaluation graphique a été réalisée pour déterminer ses performances par rapport aux observations de terrain.

Sur cette base, le fichier plante produit par Delandmeter (2021) et modifié par Lacroix et al. (2024), a été utilisé pour les paramètres généraux (tableau 5). Les paramètres innturgmin et ratioturvieI ont été fixés à 0 afin de neutraliser respectivement le stress de turgescence lié à l'INN et l'effet du ratio de durée de vie des feuilles sous stress hydrique. Chez la pomme de terre, un déficit en eau même modéré peut induire une chute rapide de la photosynthèse en raison de sa faible capacité d'osmorégulation (Vos et Oyarzun, 1987). Ce choix a donc permis d'éviter une limitation artificielle de la croissance et une accumulation de stress dans le but de se concentrer uniquement sur certaines contraintes hydriques et azotés : sensresc, sensanox, contrdamax, remobres, envfruit, adil, bdil, innmin et innmax. Cette approche a permis de simplifier l'utilisation du modèle.

**Tableau 5.** Synthèse des valeurs originales et adaptées pour la Wallonie dans les études antérieures de Delandmeter (2021) et de Lacroix et al. (2024).

Paramètres	Valeur initiale	Valeur finale
tdoptdeb	-999	11.7
belong	0.00700	0.00500
nbfeuilplant	-999	3
dlaimin	0	0.05
laicomp	0.304	0.6
innturgmin	0.30	0
ratiodurvieI	0.80	1
remobres	0.20	0.30
envfruit	0.10	0.012
sensanox	0	0.75
sensrsec	0	1
contrdamax	0.30	0.50
Standard root distribution	no	yes
kdisrac	-999	0.00158
aloperirac	-999	0.23
trophic-linked production	no	continuous link
repracpermax	-999	0.34
repracpermin	-999	0.09
krepracperm	-999	1.20
water requirements	crop coefficient	resistance approach
rsmmin	-999	150.36
INNimin	-0.50	0
calculation Nitrogen stress index	INN cumulated	INN instantaneous
dlaimaxbrut	-999	0.0020
innsen	-999	0.55
rapsenturg	-999	1.5
extin	0.58	0.65
slamax	350	450
tigefeuil	0.5	0.3
root density	standard profile	true density
draclong	-999	45.0
debsenrac	-999	1000.00
lvfront	-999	0.150
longsperac	-999	10000.00

Les paramètres optimisés de la variété Shepody dans l'étude de Morissette et al. (2016), ont servi de point de départ pour les variétés Fontane et Charlotte (tableau 6). La variété bintje a été calibré, comme dans la précédente étude, sur les paramètres de défauts de STICS (version 8.41 du logiciel), avec les paramètres de la courbe de dilution critique de l'azote décrit par Ben Abdallah (2020).

**Tableau 6.** Synthèse des valeurs variétales originales et adaptées par des valeurs provenant de l'étude de Morissette et al. (2016) et de Ben Abdallah (2020).

Paramètre	Valeur initiale	Valeur finale		
		Bintje	Fontane	Charlotte
vlaimax	2.2	2.0	2.0	2.0
pentlaimax	5.5	3.0	3.0	3.0
udlaimax	3.0	2.9	2.9	2.9
adil	5.21	5.37	5.37	5.37
bdil	0.56	0.46	0.46	0.46
inngrain1	1	1	0.95	0.95
inngrain2	1	1	1.05	1.05
adilmax	7.21	7.21	7.56	7.56
bdilmax	0.56	0.56	0.42	0.42
stlevamf	150	150	200	200
stamflax	700	700	800	800
stlevdrp	450	450	335	335
stdrpdcs	700	900	900	900
adens	-0.41	-0.41	-0.10	-0.10
bdens	7	7	2	3
stlaxsen	500	2300	2300	2300
slamax	350	500	450	500
stdrpmat	3300	3300	950	950

Les nbgrmin et nbgrmax ont été estimés respectivement à partir des minimums et maximums du nombre de tubercules par m<sup>2</sup> calculés à partir des données du CRA-W (Tableau 7). Enfin, les valeurs liées au racines utilisé dans l'étude l'études de Delandmeter et al (2021) et Lacroix et al. (2024) de ont été ajustés pour mieux refléter à la réalité.

**Tableau 7.** Synthèse des valeurs originales, provenant l'études de Delandmeter et al (2021) et de Lacroix et al. (2024) et du CRA-W, adaptées par l'auteur.

Paramètres	Valeur initiale	Valeur finale		Valeur finale	
		Toutes variétés	Bintje	Fontane	Charlotte
croirac	0.3	0.15	/	/	/
nbgrmin	45	/	26	23	20
nbgrmax	80	/	70	70	47

### 4.3.2 Calibration

Lors de cette étude, la méthode fréquentiste avec l'algorithme d'optimisation Nelder-Mead Simplex ainsi que l'approche variable par variable seront utilisées. Le logiciel Rstudio version 2025.05.1+513 ainsi que les packages SticsRFiles, SticsOnR, SticsRPacks et CROptimizR ont été utilisés. L'algorithme de ce dernier utilise une méthode d'optimisation locale, et la minimisation est répétée plusieurs fois sur différentes valeurs de départ afin de limiter les risques de convergence vers un minimum local (tableau 8). Le nombre de répétitions est défini par l'utilisateur et il est conseillé d'en effectuer entre 5 et 10 pour assurer la robustesse des résultats. Dans cette étude, 7 répétitions ont été retenues. CROptimizR va déterminer lui-même les points de départ de la minimisation sur base des limites introduites pour chaque paramètres (Buis et al., 2024).

**Tableau 8.** Présentation des paramètres qui ont été optimisés en fonction de la variable observée et de leur plage de calibration.

Paramètres	Signification	Variable observée	Plage de calibration
<b>Croissance</b>			
EFCROIJUV	Efficacité maximale d'utilisation du rayonnement pendant la phase juvénile, $g \cdot MJ^{-1}$	MASEC	[1 – 5]
EFCROIVEG	Efficacité maximale d'utilisation du rayonnement pendant la phase végétative, $g \cdot MJ^{-1}$	MASEC	[1 – 5]
EFCROIREPRO	Efficacité maximale d'utilisation du rayonnement pendant la phase de remplissage des tubercules, $g \cdot MJ^{-1}$	MASEC	[1 – 5]
<b>Elaboration du rendement</b>			
CGRAIN	Pente de la relation entre le nombre de tubercules et le taux de croissance, $tubercules \cdot g^{-1}$	MAFRUIT	[0.20 - 0.40]
<b>Paramètres du cultivar</b>			
PGRAINMAXI	Poids sec maximal d'un tubercule individuel (0% d'eau), g	MAFRUIT	[10 - 50]
VITIRCARB	Taux d'augmentation de l'indice de récolte en carbone, $g \text{ tubercule} \cdot g^{-1} \text{ plante} \cdot \text{jour}^{-1}$	MAFRUIT	[0.005 - 0.02]
VITIRAZO	Taux d'augmentation de l'indice de récolte en azote, $g \text{ tubercule} \cdot g^{-1} \text{ plante} \cdot \text{jour}^{-1}$	QNGRAIN	[0.0010 - 0.04]
<b>Absorption d'azote</b>			
VMAX2	Taux maximal d'absorption de l'azote via le système de transport à haute affinité, $\mu mol \cdot cm^{-1} \cdot h^{-1}$	QNPLANTE	[0.0020 - 0.1]

L'optimisation suit le protocole d'étalonnage proposé par Gawinowski et al. (2025). L'absence d'observation concernant la phénologie et le LAI (Leaf Area Index) a conduit à débiter l'optimisation pour les trois variétés avec MASEC. L'objectif était de s'assurer que la production de biomasse totale était valide avant d'entamer une optimisation sur le rendement. MASEC est sensible à l'efficacité d'utilisation du rayonnement solitaire (RUE) ce qui a permis l'optimisation des paramètres EFCROIJUV, EFCROIVEG et EFCROI REPRO. Ensuite, PGRAINMAXI a été optimisé en premier sur la variable MAFRUIT pour fixer la taille des tubercules. Puis, le paramètre CGRAIN et VITIRCARB ont été optimisés pour ajuster respectivement leur efficacité de conversion ainsi que la vitesse de remplissage. Ensuite, VITIRAZO a permis d'ajuster la répartition d'azote vers les tubercules principalement sur la variable QNGRAIN puisqu'il détermine la vitesse d'exportation de l'azote vers les tubercules. Enfin, l'optimisation s'est terminée par la variable QNPLANTE pour le paramètre VMAX2.

Selon les données disponibles, l'optimisation et sa validation ont été effectuées sur les sites présentés en tableau 9. Les observations aberrantes ou avec un antécédant connu de stress ont été retirées ou utilisées pour les évaluations afin d'essayer de tendre vers une situation au potentiel.

**Tableau 9.** Présentations des différents sites utilisés lors du calibrage et de l'évaluation en fonction de la variété.

Variables observées	MASEC et MAFRUIT			QNPLANTE et QNGRAIN		
Variété	Binjtje	Fontane	Charlotte	Binjtje	Fontane	Charlotte
<b>Optimisation</b>	Site 11	Site 1	Site 14	Site 16	Site 3	Site 19
	Site 13	Site 3	Site 15	Site 18		Site 21
	Site 16	Site 4	Site 19	Site 24		Site 25
	Site 18	Site 9	Site 21			
	Site 24	Site 12	Site 25			
	Site 26		Site 37			
	Site 27		Site 60			
	Site 28					
	Site 29					
	Site 30					
	Site 31					
	Site 32					
	Site 33					
	Site 34					
	Site 43					
	Site 44					
	Site 49					
	Site 51					
	Site 52					
	Site 56					
	Site 57					
	Site 59					
<b>Validation</b>	Site 20	Site 7	Site 17	Site 20	Site 7	Site 17
	Site 40	Site 8	Site 22		Site 8	
	Site 58	Site 53				

#### 4.4 Evaluation des performances

Afin d'évaluer les performances du modèle, quatre critères statistiques ont été utilisés.

##### L'erreur quadratique moyenne :

Le RMSE (Roots Mean Square Error) mesure l'écart moyen entre les valeurs simulées et les observations réelles (équation 11).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (11)$$

Avec :

- RMSE : la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne, qui varie de  $[0, +\infty]$ ,
- S : les valeurs simulées,
- O : les valeurs observées,
- n : le nombre d'observations.

Un RMSE faible indique que la différence entre les prédictions STICS et les observations est petite en moyenne. Donc plus le RMSE est faible, plus le modèle est précis.

### **Le facteur d'efficience :**

Le facteur d'efficience (EF) permet de quantifier la qualité des prédictions du modèle en comparant les erreurs du modèle entre les simulations et les observations, à celles que l'on aurait obtenues en utilisant uniquement la moyenne des observations comme prédiction (équation 12).

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (12)$$

Avec :

- EF : l'efficience du modèle, qui varie de  $[-\infty ; 1]$ ,
- S : les valeurs simulées,
- O : les valeurs observées,
- n : le nombre d'observations.

La simulation est satisfaisante quand  $EF > 0.5$  et parfaite lorsqu'il est égal à 1 (Dumont et al., 2014). A l'inverse, une valeur de 0 indique de la prédiction du modèle n'est pas meilleure que celle basée sur la moyenne des observations et pire si elle est négative.

### **Le coefficient de détermination :**

Le coefficient de détermination ( $R^2$ ) permet de déterminer si les simulations reproduisent la tendance générale des observations (équation 13).

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y}) (\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y}) * \sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}})}} \right)^2 \quad (13)$$

Avec :

- $R^2$  : le coefficient de détermination,  $[0, 1]$
- N : le nombre d'observation,
- $Y_i$  : les variables observées,
- $\hat{Y}$  : les variables simulées,
- $\bar{\hat{Y}}$  : la moyenne des variables simulées,
- $\bar{Y}$  : la moyenne des variables observées.

Plus la valeur est proche de 1, plus STICS reproduit fidèlement la tendance générale des observations.

### **La différence normalisée :**

La Différence Normalisée (ND) compare les sommes des observations et des simulations ce qui permet de déterminer l'ampleur du biais introduit (équation 14).

$$|ND| = \left| \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \right| \quad (14)$$



Avec :

- ND : la différence normalisée,
- S : les valeurs simulées,
- O : les valeurs observées,
- n : le nombre d'observations.

Une valeur ND inférieur à 0,1 indique un bon ajustement entre les observations et les simulations, indiquant une bonne justesse du modèle et un biais faible.

## 5. Résultats

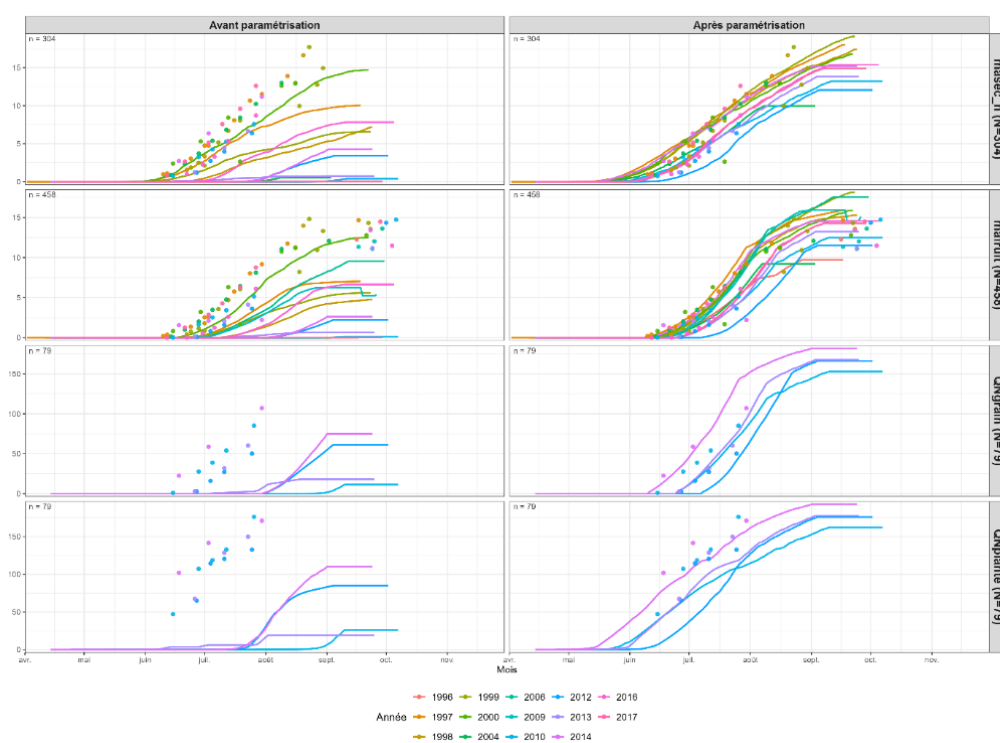
### 5.1 Paramétrisation

Après paramétrisation, les variables observées on subit une analyse statistique pour (tableau 10) afin d'évaluer les performances du modèle.

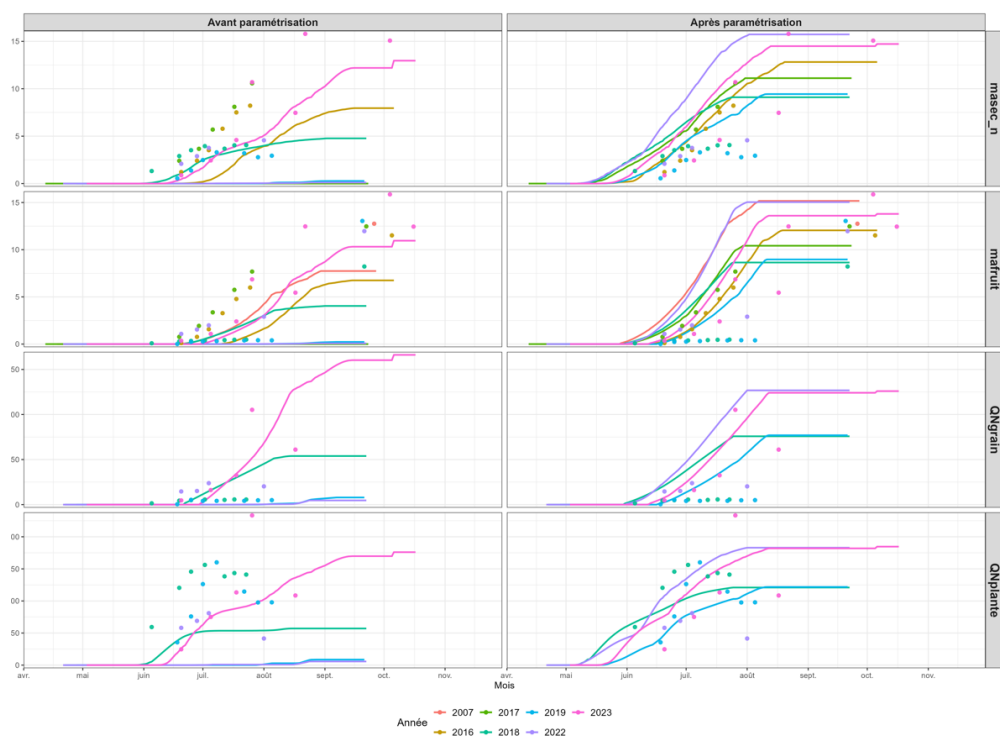
**Tableau 10.** Indicateurs statistiques de performance du modèle STICS (RMSE, R<sup>2</sup>, EF et ND) avant et après paramétrisation pour les variétés Bintje, Fontane et Charlotte.

Variable	Avec les paramètres par défaut				Avec les paramètres optimisés			
	RMSE	R <sup>2</sup>	EF	ND	RMSE	R <sup>2</sup>	EF	ND
<u>Bintje</u>								
MASEC	5.494	0.299	0.455	0,667	2.466	0.733	0.706	0.126
MAFRUIT	6.358	0.384	0.320	0,659	2.791	0.830	0.745	0.093
QNPLANTE	125.412	0.151	6.493	0,973	41.770	0.643	0.168	0.255
QNGRAIN	52.676	0.023	1.843	0,991	17.286	0.825	0.693	0.080
<u>Fontane</u>								
MASEC	4.67241	0.333	-0.793	0.712	4.032	0.433	-0.335	0.533
MAFRUIT	5.09503	0.420	-0.185	0.675	3.329	0.713	0.493	0.332
QNPLANTE	192.85456	0.015	-0.145	0.065	205.048	0.001	-0.295	1.759
QNGRAIN	29.16013	0.447	-0.230	0.24	46.976	0.267	-2.193	1.122
<u>Charlotte</u>								
MASEC	5.141	0.094	-2.202	0.847	1.584	0.731	0.695	0.002
MAFRUIT	5.048	0.209	-0.920	0.808	2.122	0.759	0.660	0.035
QNPLANTE	115.755	0.113	-6.120	0.980	50.557	0.566	- 0.358	0.379
QNGRAIN	47.313	0.047	-1.208	0.996	12.981	0.891	0.833	0.021

Les figures (7 - 9) comparent, avant et après paramétrisation, les simulations STICS des variétés Bintje, Fontane et Charlotte, selon les quatre variables observées : MASEC, MAFRUIT, QNGRAIN ET QNPLANTE. Afin d'améliorer la visibilité, les points présents sur les graphiques représentent la moyenne des observations à une date donnée par expérimentation. De la même manière, l'ensemble des courbes de simulations a été moyennés pour d'obtenir une courbe par site.

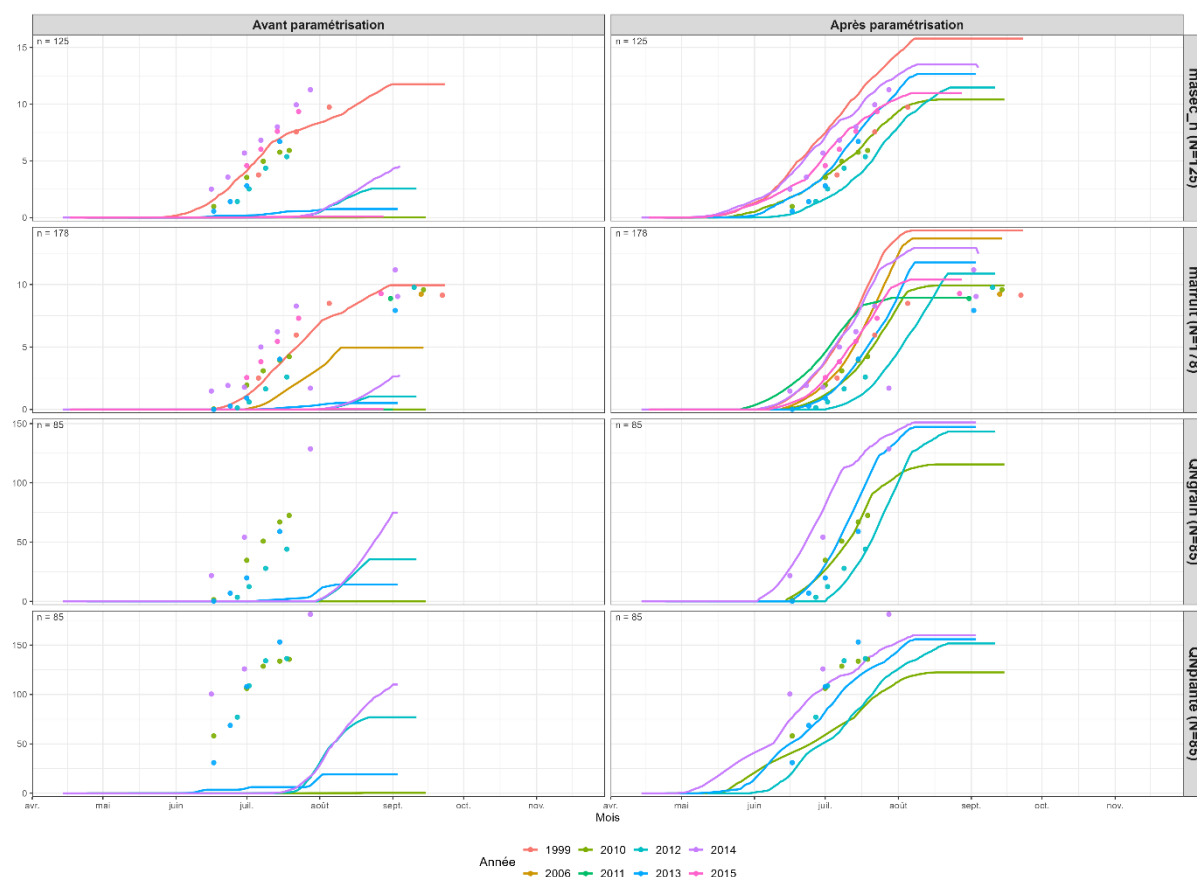


**Figure 7.** Comparaison des dynamiques simulées et observées des variables (MASEC, MAFRUIT, QNGRAIN et QNPLANTE) avant et après paramétrisation pour la variété Bintje.



**Figure 8.** Comparaison des dynamiques simulées et observées des variables (MASEC, MAFRUIT, QNGRAIN et QNPLANTE) avant et après paramétrisation pour la variété Fontane.

NB : Les années 2017 et 2019 sont présentes uniquement pour visualisation graphique, elles ne sont pas répertoriées dans les statistiques car il y a une forte probabilité de stress pouvant induire un biais.



**Figure 9.** Comparaison des dynamiques simulées et observées des variables (MASEC, MAFRUIT, QNGRAIN et QNPLANTE) avant et après paramétrisation pour la variété Charlotte.

## 5.2 Optimisation

### 5.2.1 Variété Bintje

Les évolutions des paramètres après optimisation du fichier plante pour la variété Bintje sont présentés dans le tableau 11.

**Tableau 11.** Présentation de l'évolution des paramètres du fichier plante, avant et après optimisation, pour la variété Bintje.

Paramètres	Bintje	
	Valeur avant optimisation	Valeur après optimisation
EFCROIJUV	2.500	1.847
EFCROIVEG	3.000	2.214
EFCROIREPRO	4.100	4.134
PGRainMAXI	40.000	20.030
CGRain	0.160	0.158
VITIRCARB	0.018	0.020
VITIRAZO	0.020	0.022
VMAX2	0.050	0.100

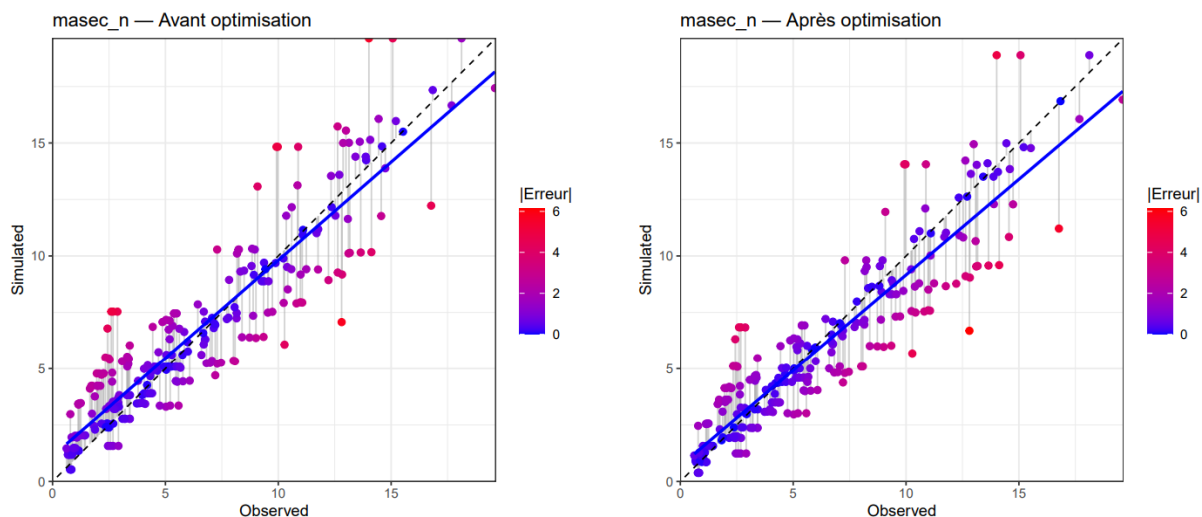
Sur base de ces changements, une étude statistique a été effectuée sur les sites qui ont servi à la calibration et ceux utilisés pour l'évaluation (Tableaux 12).

**Tableau 12.** Évaluation statistique des variables MASEC, MAFRUIT, QNPLANTE et QNGRAIN, avant et après calibration et évaluation pour la variété Bintje.

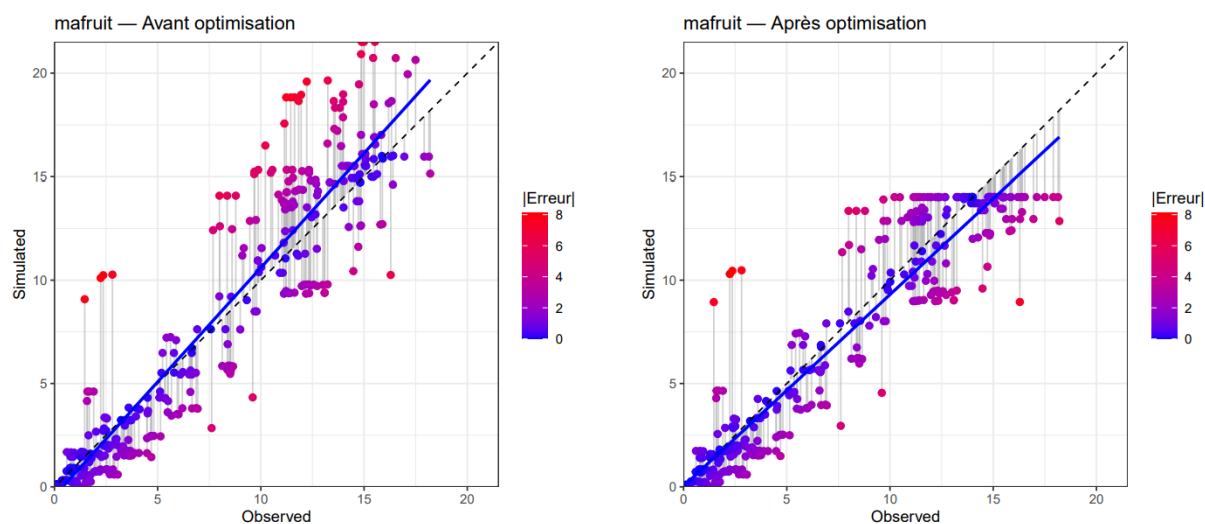
	Bintje					
	Nombre d'observations	Calibration		Nombre d'observations	Evaluation	
		Avant	Après		Avant	Après
	<u>MASEC</u>					
RMSE	260	1.824	1.737	44	1.929	1.729
EF		0.823	0.839		0.821	0.856
R <sup>2</sup>		0.829	0.843		0.882	0.870
ND		0,049	0,041		0,178	0,075
	<u>MAFRUIT</u>					
RMSE	385	2.476	1.976	73	1.820	3.001
EF		0.797	0.871		0.896	0.717
R <sup>2</sup>		0.866	0.881		0.909	0.842
ND		0,043	0,068		0,061	0,08
	<u>QNGRAIN</u>					
RMSE	55	17.275	18.396	24	14.516	13.442
EF		0.694	0.653		0.339	0.433
R <sup>2</sup>		0.825	0.842		0.807	0.806
ND		0,082	0,031		-0,506	-0,416
	<u>QNPLANTE</u>					
RMSE	55	41.935	38.150	24	56.751	54.676
EF		0.162	0.306		-1.341	-1.173
R <sup>2</sup>		0.645	0.669		0.330	0.329
ND		0.257	0.224		-0.436	-0.406

Les résultats pour toutes les variables, avant et après optimisation, sont repris dans les figures 10 - 13. Chaque point représente une observation associée à sa simulation pour une même situation. La courbe bleue représente la droite de régression linéaire calculée liée à la relation moyenne entre les valeurs

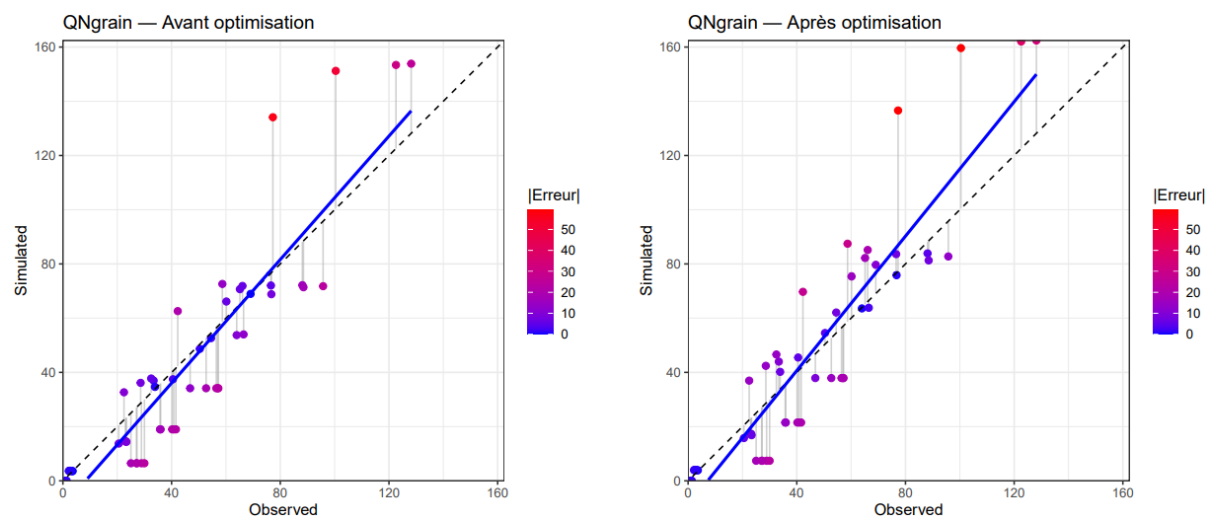
observées et simulées. L'erreur mesure l'écart entre la prédiction du modèle et les observations. Plus l'erreur est proche de 0, plus les points sont proches de la droite [1:1] (simulation parfaite).



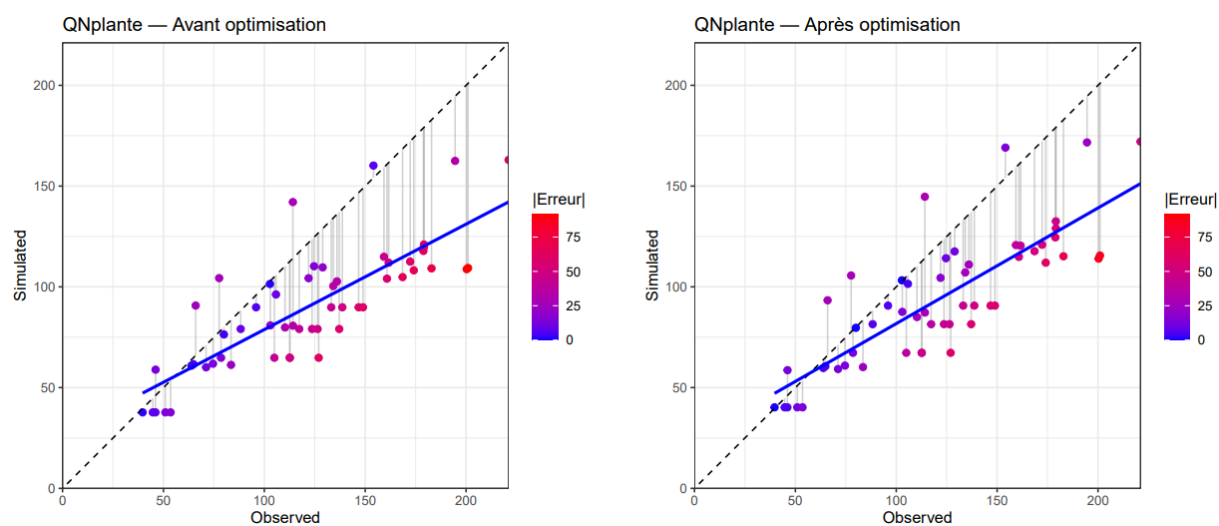
**Figure 10.** Comparaison des scatter plots entre les simulations et les observations, avant et après calibration, pour la variable MASEC de la variété Bintje.



**Figure 11.** Comparaison des scatter plots entre les simulations et les observations, avant et après calibration, pour la variable MAFRUIT de la variété Bintje.



**Figure 12.** Comparaison des scatter plots entre les simulations et les observations, avant et après calibration, pour la variable QNGRAIN de la variété Bintje.



**Figure 13.** Comparaison des scatter plots entre les simulations et les observations, avant et après calibration, pour la variable QNPLANTE de la variété Bintje.

## 5.2.2 Variété Fontane

Après optimisation, les résultats des valeurs définitives des paramètres sont regroupés dans le tableau 13.

**Tableau 13.** Présentation de l'évolution des paramètres du fichier plante, avant et après optimisation, pour la variété Fontane.

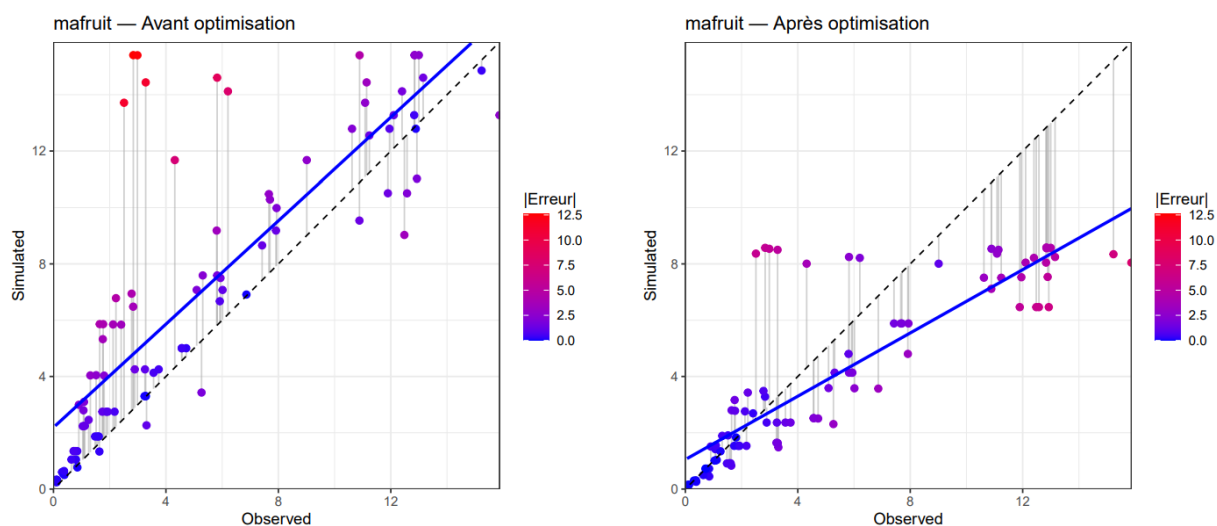
Paramètres	Fontane	
	Valeur avant optimisation	Valeur après optimisation
EFCROIJUV	2.200	4.096
EFCROIVEG	3.800	1.407
EFCROIREPRO	3.400	2.328
PGRainMAXI	50	19.229
CGRain	0.254	0.214
VITIRCARB	0.017	0.015
VITIRAZO	0.011	0.0066
VMAX2	0.07	0.008

L'analyse statistique du jeu de donnée utilisé pour la calibration et la validation ont été répertoriés dans de le tableaux 14.

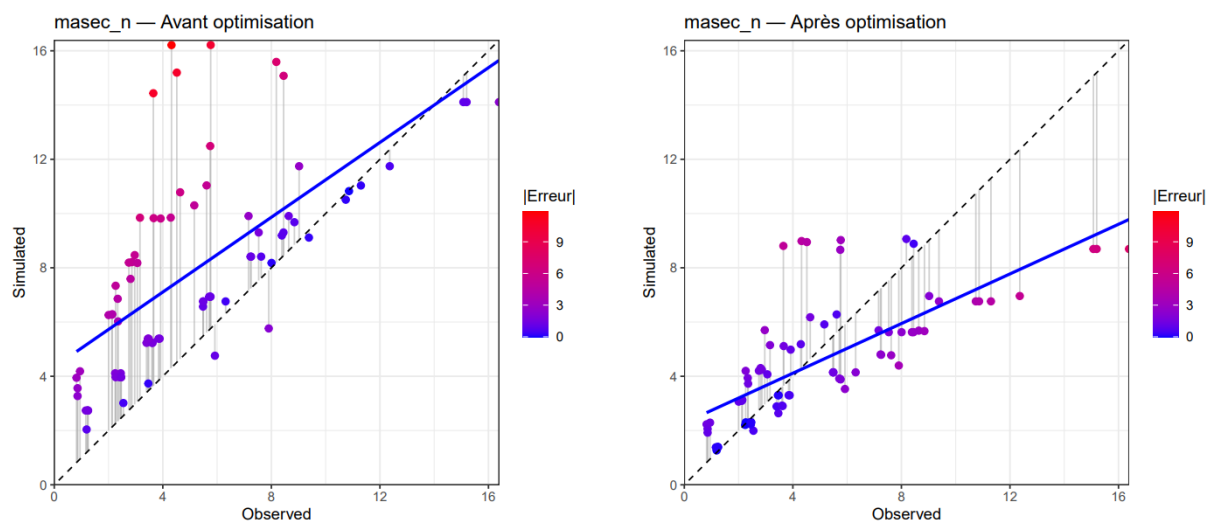
**Tableau 14.** Évaluation statistique des variables MASEC, MAFRUIT, QNPLANTE et QNGRAIN, avant et après calibration et évaluation pour la variété Fontane.

	Fontane					
	Nombre d'observations	Calibration		Nombre d'observations	Evaluation	
		Avant	Après		Avant	Après
	<u>MASEC</u>					
RMSE	96	4.021	2.483	56	3.516	1.671
EF		0.328	0.610		-9.016	-0.278
R <sup>2</sup>		0.436	0.523		0.548	0.648
ND		0.532	0.099		1.087	0.241
	<u>MAFRUIT</u>					
RMSE	77	3.366	2.793	69	4.063	1.014
EF		0.434	0.611		0.178	0.496
R <sup>2</sup>		0.677	0.704		0.556	0.539
ND		0.355	0.227		1.086	0.183
	<u>QNGRAIN</u>					
RMSE	15	31.775	11.295	56	37.889	14.418
EF		-1.008	0.746		-364.5211	-51.632
R <sup>2</sup>		0.929	0.838		0.243	0.233
ND		0.937	0.223		6.998	2.304
	<u>QNPLANTE</u>					
RMSE	15	54.376	29.966	56	38.785	64.352
EF		-0.349	0.590		0.144	-1.355
R <sup>2</sup>		0.845	0.628		0.433	0.340
ND		0.650	0.061		0.195	0.474

Enfin, les scatter plot, avant et après paramétrisation, des sites ayant servi à la calibration sont regroupés en figures 14 - 17.

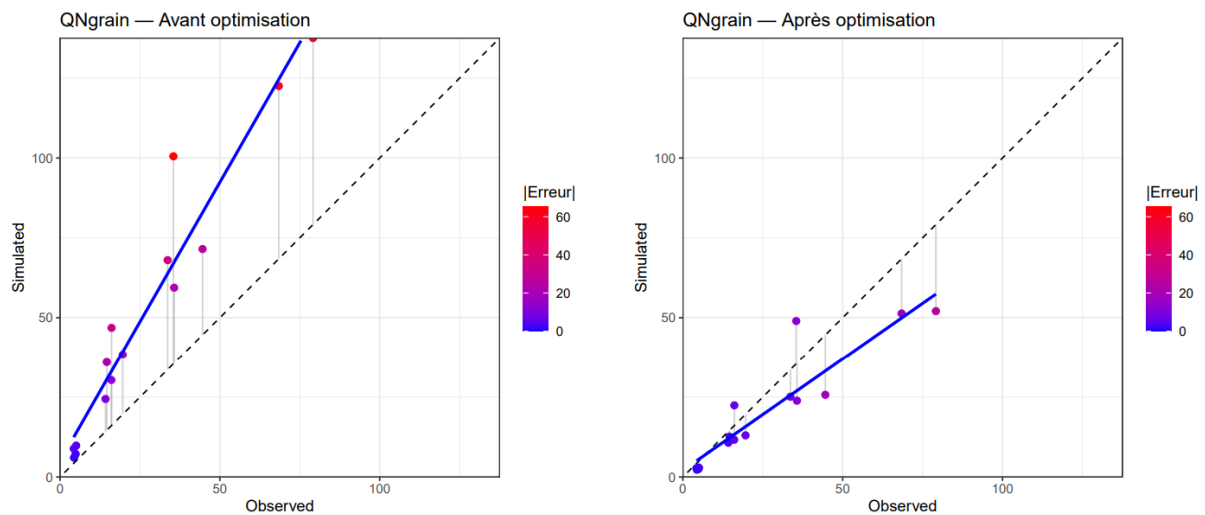


**Figure 14.** Comparaison des scatter plots entre les simulations et les observations, avant et après calibration, pour la variable MASEC de la variété Fontane.

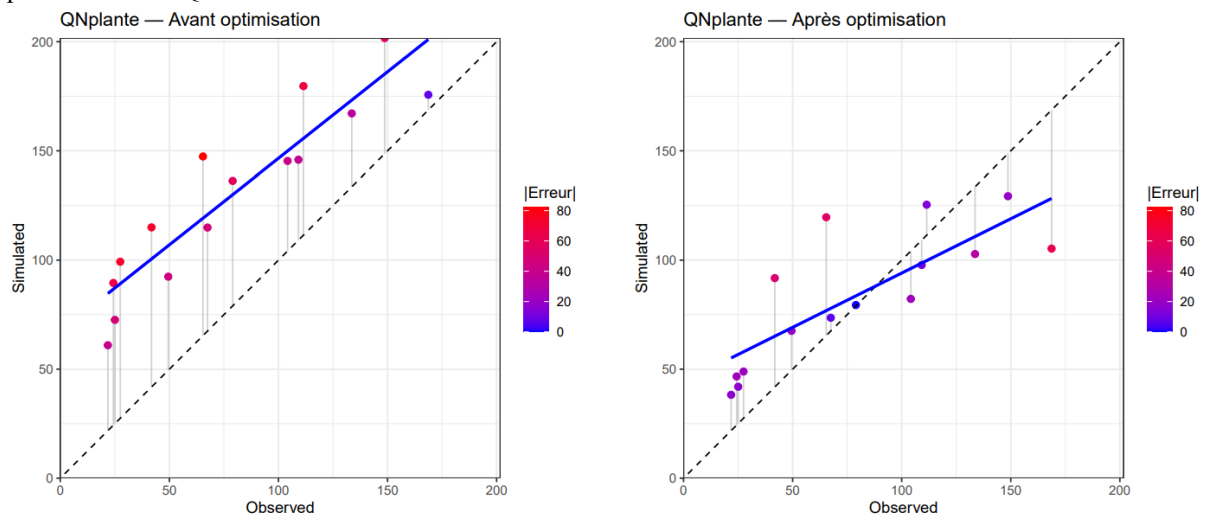




**Figure 15.** Comparaison des scatter plots entre les simulations et les observations, avant et après calibration, pour la variable MAFRUIT de la variété Fontane.



**Figure 16.** Comparaison des scatter plots entre les simulations et les observations, avant et après calibration, pour la variable QGRAIN de la variété Fontane.



**Figure 17.** Comparaison des scatter plots entre les simulations et les observations, avant et après calibration, pour la variable QNPLANTE de la variété Fontane.

### 5.2.3 Variété Charlotte

Après optimisation, une analyse statistique a été réalisée sur les variables observées afin de déterminer les performances du modèle Tableau 15.

**Tableau 15.** Évaluation statistique des variables MASEC, MAFRUIT, QNPLANTE et QNGRAIN, avant et après calibration et évaluation pour la variété Bintje, Fontane et Charlotte.

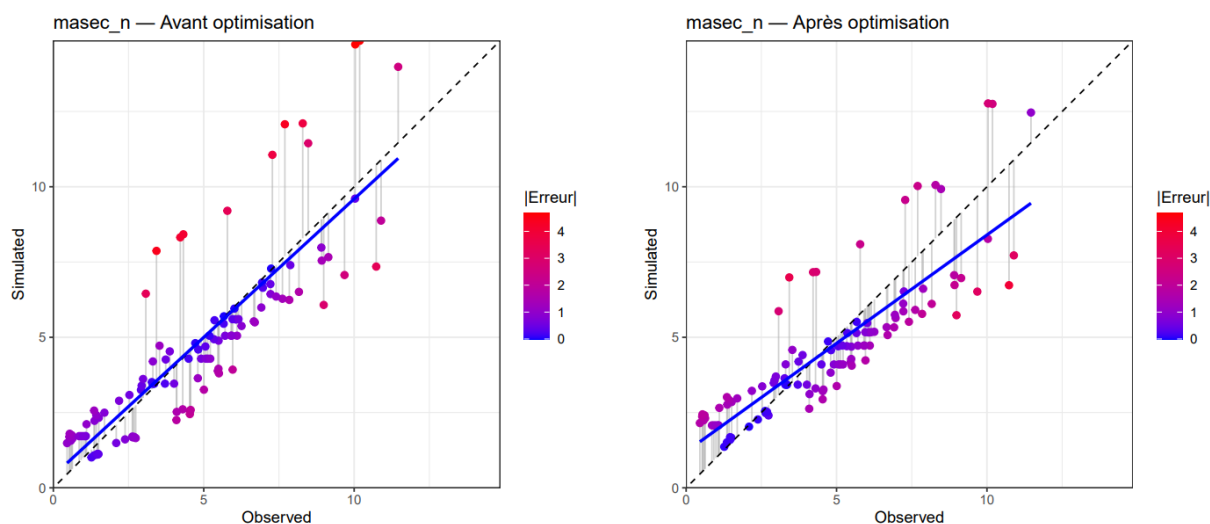
Paramètres	Charlotte	
	Valeur avant optimisation	Valeur après optimisation
EFCROIJUV	2.200	3.092
EFCROIVEG	3.000	4.459
EFCROIREPRO	3.800	3.142
PGRainMAXI	50	19.052
CGRAIN	0.230	0.279
VITIRCARB	0.018	0.018
VITIRAZO	0.025	0.026
VMAX2	0.07	0.1

L'évaluation statistique des performances du modèles pour la variété Charlotte sont regroupé dans le tableau 16.

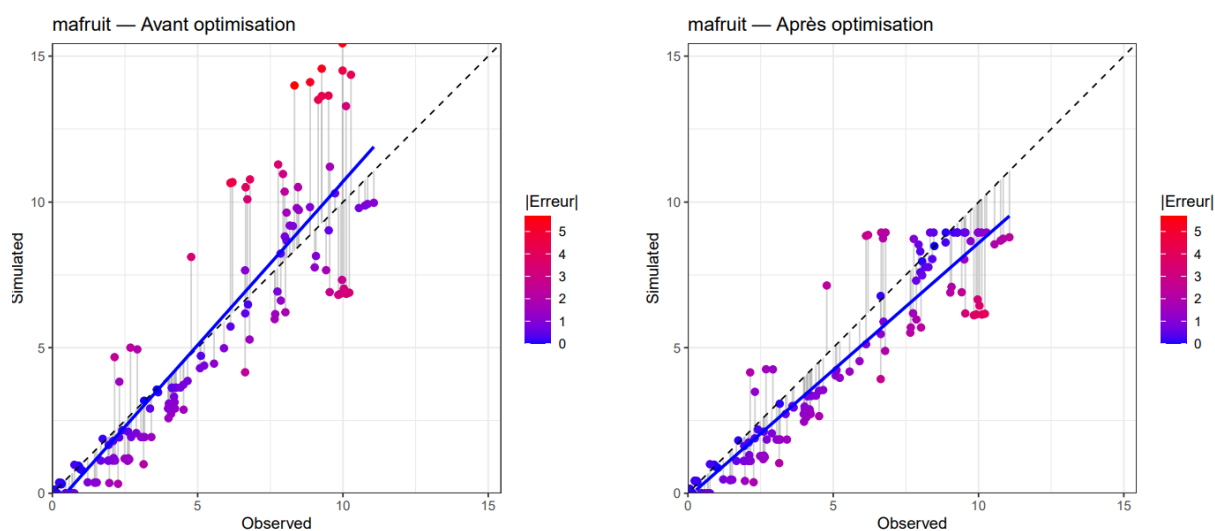
**Tableau 16.** Évaluation statistique des variables MASEC, MAFRUIT, QNPLANTE et QNGRAIN, avant et après calibration et évaluation pour la variété Charlotte.

	Charlotte					
	Nombre d'observations	Calibration		Nombre d'observations	Evaluation	
		Avant	Après		Avant	Après
	MASEC					
RMSE	113	1.639	1.482	12	0.926	1.605
EF		0.636	0.702		0.937	0.811
R²		0.703	0.705		0.995	0.993
ND		0,004	0,156		0,007	0,078
	MAFRUIT					
RMSE	152	1.867	1.388	25	3.271	3.155
EF		0.710	0.839		0.434	0.473
R²		0.820	0.881		0.508	0.473
ND		0,007	0,027		0,165	0,007
	QNGRAIN					
RMSE	73	12.077	10.100	12	17.498	14.319
EF		0.762	0.833		0.859	0.905
R²		0.810	0.863		0.989	0.977
ND		0,109	0,116		0,213	0,177
	QNPLANTE					
RMSE	73	53.119	54.140	12	30.669	34.276
EF		-0.607	-0.670		0.497	0.372
R²		0.527	0.603		0.898	0.896
ND		0.416	0.426		0.201	0.229

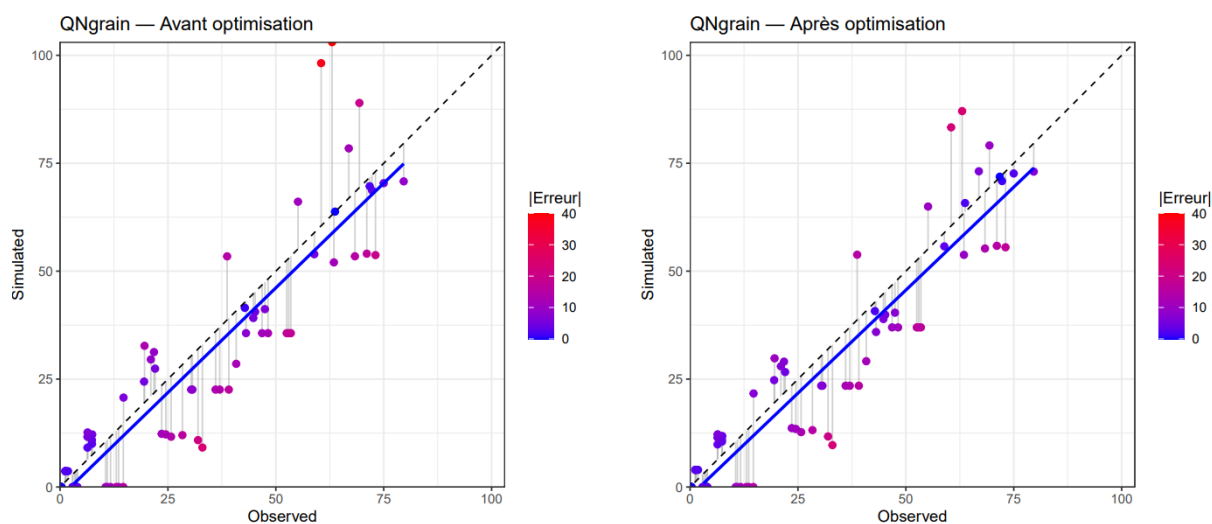
Les représentations graphiques des évolutions de la corrélation entre les observations et les simulations sont regroupées dans les figures 18 - 21.



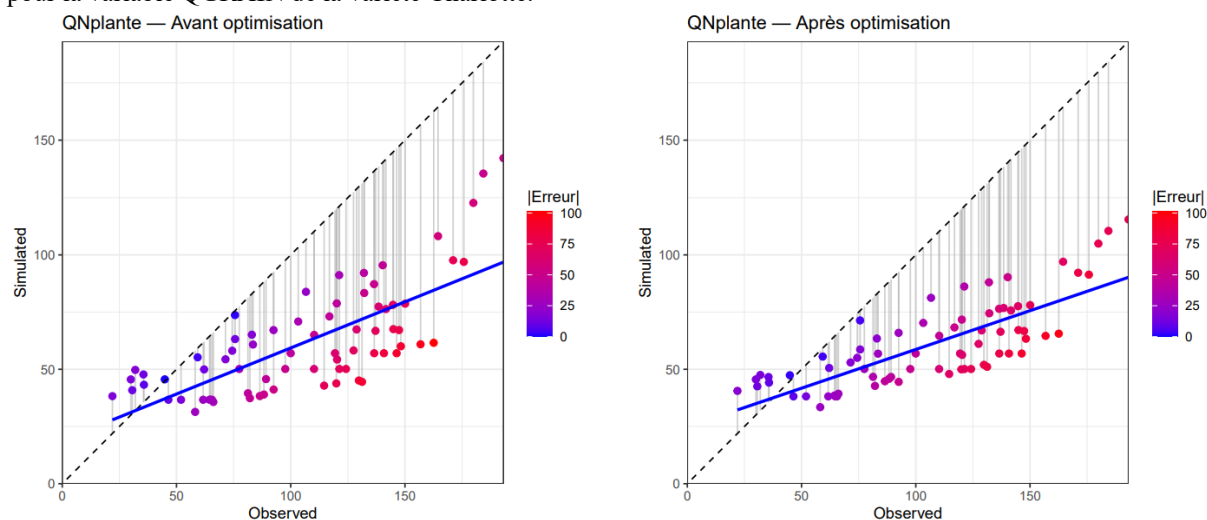
**Figure 18.** Comparaison des scatter plots entre les simulations et les observations, avant et après calibration, pour la variable MASEC de la variété Charlotte.



**Figure 19.** Comparaison des scatter plots entre les simulations et les observations, avant et après calibration, pour la variable MAFRUIT de la variété Charlotte.



**Figure 20.** Comparaison des scatter plots entre les simulations et les observations, avant et après calibration, pour la variable QNGRAIN de la variété Charlotte.



**Figure 21.** Comparaison des scatter plots entre les simulations et les observations, avant et après calibration, pour la variable QNPLANTE de la variété Charlotte.

## 6. Discussion

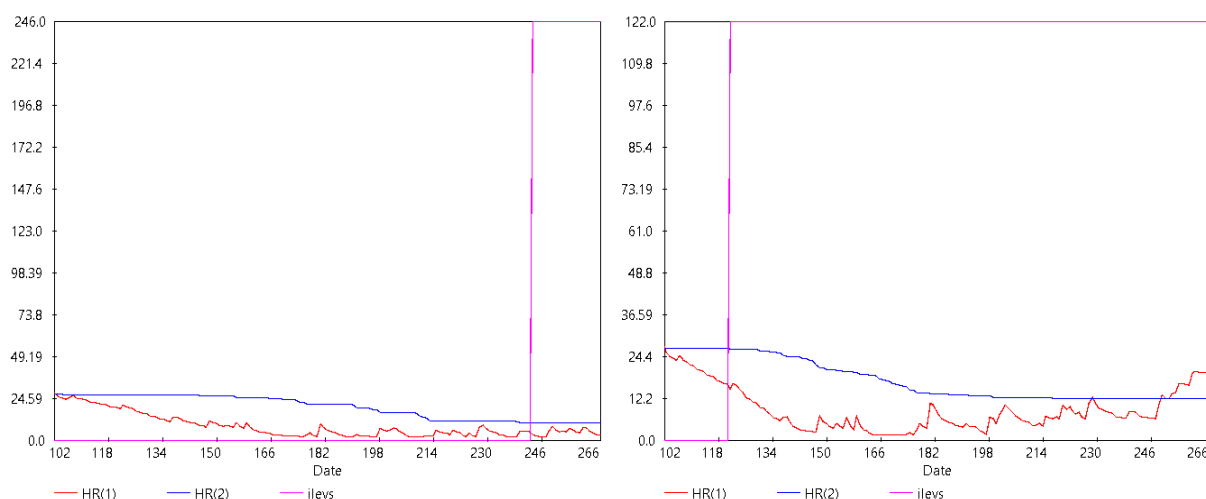
### 6.1. Discussion des résultats obtenus

#### 6.1.1 Paramétrisation du modèle

Avant paramétrisation, le fichier plante présentait une mauvaise concordance entre les simulations et les observations. En effet, les écarts entre eux étaient importants (RMSE élevés) avec une corrélation faible ( $R^2$  faible). En général, le modèle était proche d'un EF de 0 (voire négatif) indiquant que la simulation était moins bonne qu'une estimation par une simple moyenne. Les simulations étaient globalement non satisfaisantes. Après paramétrisations, une amélioration nette de MASEC et MAFRUIT est observable avec des RMSES divisés par 2 (Bintje), voire par 3 (Charlotte). La corrélation et les EF ont augmenté indiquant que le modèle explique mieux la variabilité tout en étant meilleur qu'une estimation par la moyenne. Cependant, ces résultats sont mitigés pour les variables d'azote (QNPLANTE et QNGRAIN), et ce surtout pour la variété Fontane qui subit une forte dégradation. Pour les autres variétés les RMSE sont élevés, cela suggère que le modèle simule mal la dynamique de l'azote. Morissette et al. (2016) arrivent à la même conclusion avec un modèle capable de reproduire correctement la croissance et le rendement, mais l'évolution de l'azote était moins bien simulée.

De manière générale, il est possible d'observer sur les graphiques que la paramétrisation a permis d'avoir des fichiers plante plus fonctionnel que celui fourni par le modèle STICS. La prédiction du modèle a été améliorée grâce à plusieurs étapes. Premièrement, l'obtention de la valeur RSMIN, résistance stomatique minimale (en  $s \cdot m^{-1}$ ), a permis le passage du calcul de l'évapotranspiration potentielle (EPT) selon la méthode de Penman vers celle de Shuttleworth-Wallace. La méthode de Penman repose sur un calcul global de l'EPT, en considérant le sol et le couvert végétal comme un seul système, ce qui ne permet pas la distinction entre la transpiration du couvert et l'évaporation du sol (HU et al., 2017). De ce fait, cette méthode a tendance à surestimer la demande en eau au début de cycle car elle considère que l'intégralité de la surface est occupée par un couvert actif. À l'inverse, la méthode de Shuttleworth-Wallace sépare l'évaporation du sol et la transpiration foliaire qui sont contrôlées respectivement par la résistance de la surface du sol et par la résistance stomatique (Itier et l'Hotel, 1998). Ce changement est donc pertinent pour la culture de pomme de terre puisque son couvert reste ouvert plusieurs semaines après la plantation, ce qui laisse le sol fortement exposé au rayonnement et au vent.

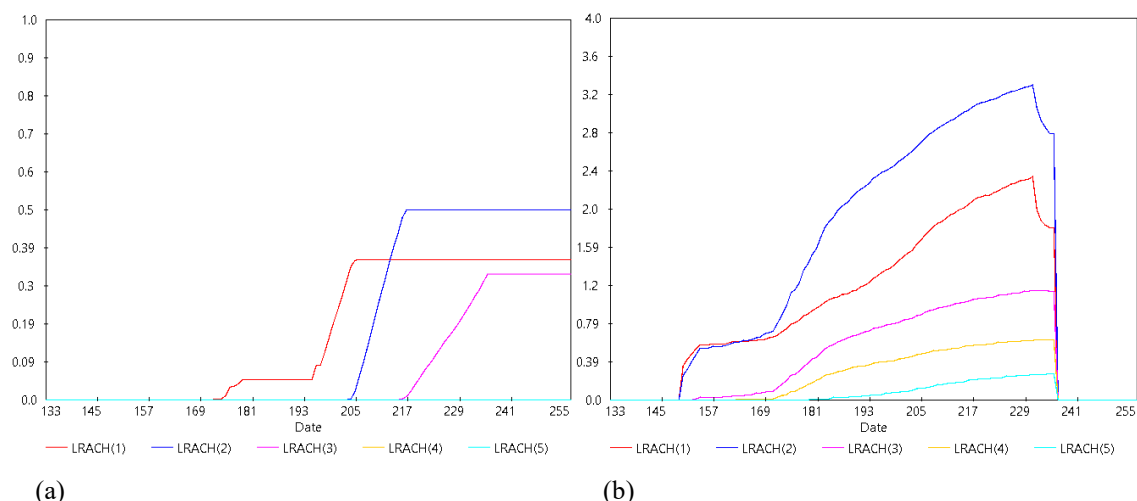
Ensuite, la modification du formalisme des racines a permis d'inciter la levée dans un intervalle de temps acceptable (Tableau X). Le paramètre stoprac, qui correspond au stade phénologie à partir duquel l'allongement des racines s'arrêtent, a été laissé en sénescence. Cela permet de reproduire des dynamiques d'absorption plus réalistes avec les observations. Un arrêt de l'allongement des racines au stade floraison aurait coupé la croissance trop tôt et induit un profil racinaire trop superficiel et plus sensible. Ensuite, la sensibilité à l'anoxie (sensanox) a été fixée avec une valeur modérée ce qui n'empêche pas la levée en sol humide et la sensibilité des racines à la sécheresse (sensrec) a été activée. Ce dernier paramètre a permis au modèle de diminuer de la croissance des racines lors de sécheresses au lieu de décaler la levée.



**Figure 22.** Exemple de modification des paramètres sensanox, sensrsec et contrdamax sur le site 9 (TEC5), avant et après paramétrisation, pour la variété Fontane.

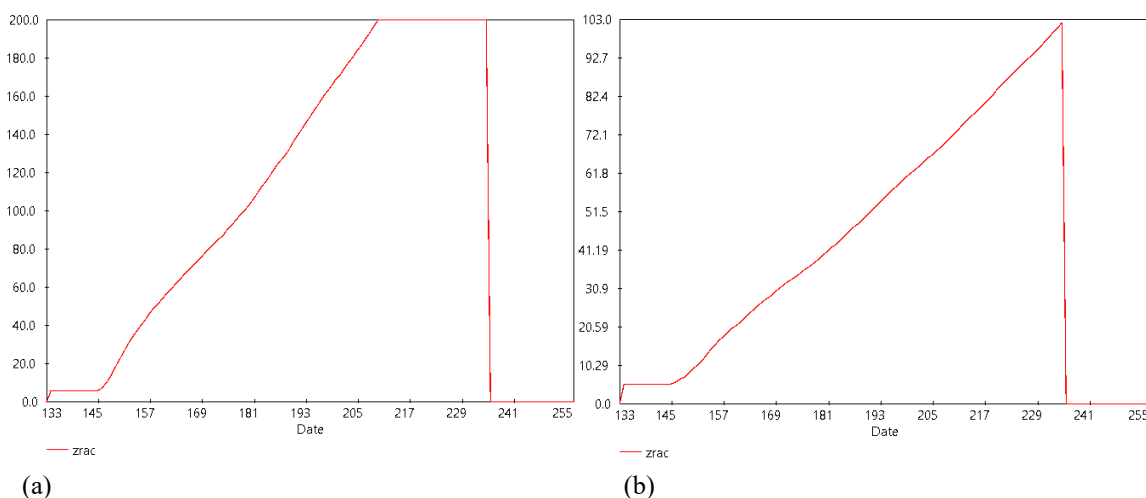
Dans l'étude sur l'intercomparaison de trois modèles de complexité croissante pour l'estimation du rendement de parcelles de pommes de terre de variété Fontane (Cassiers, 2021), un problème similaire sur la quantité d'eau dans le sol et la levée tardive était présent pour la variété Fontane avec le modèle STICS. Les deux points d'attention mentionnés précédemment peuvent être des pistes de résolutions de ce problème. Pour la variété Fontane, les résultats obtenus avec STICS après paramétrisation montrent de meilleures performances que ceux rapportés par Cassiers (2021) avec les modèles Aquacrop et Wofost.

Dans STICS, le front racinaire ( $Z_r(t)$ ), qui correspond à la profondeur maximale des racines au jour  $t$ , est principalement dirigé par le paramètre CROIRAC (coefficient de progression du front racinaire). Dans le fichier plante initial de la version de 10.3, ce paramètre est fixé à 0.09 cm/degrés, ce qui est considéré comme faible pour une pomme de terre. L'augmentation de CROIRAC en profils standard (codedisrac = 1) permet uniquement d'accélérer la descente du front racinaire ( $Z_{RAC}(t)$ ) à une profondeur déterminée. En effet, le profil vertical de densité racinaire, ou  $LRAC(Z)$ , est une fonction sigmoïdale fixée par les paramètres ZLABOUR, ZPENTE et ZPRLIM. Lorsque CROIRAC augmente, la sigmoïde va s'étendre sur une profondeur plus grande tout en gardant la même longueur totale de racine, ce qui dilue leur densité dans les couches supérieures du sol (figure X.b). De ce fait, le passage au calcul de la densité réelle est devenu nécessaire pour conserver la forme du profil racinaire, éviter la dilution en surface et avoir une représentation plus réaliste de l'absorption d'eau et d'azote (figure X.a). Avec la densité réelle (codedisrac = 2), le front racinaire progresse chaque jour à une vitesse définie par CROIRAC, tout en étant modulée par les facteurs de stress et borné par la profondeur maximum. Dans ce cas, STICS ne déforme pas le profil et la longueur totale des racines disponibles au jour ( $t$ ) correspond à la somme des longueurs dans toutes les couches déjà atteintes. Dans cette étude, chaque horizon de sol a une profondeur de 15 cm. Le paramétrage en profil standard représentait des densités racinaires trop faibles dans la zone clés (30-60cm) (Figure X).



**Figure 23.** Différence de densité racinaire entre le profil standard (a) du fichier initial et la densité réelle (b) après paramétrisation dans STICS.

La valeur déterminée par Delandmeter (2021), de 0.3 pour CROIRAC a été utilisée comme base dans cette étude. Ce choix est important car en fonction des apports azotés et des pluies, le nitrate peut descendre jusqu'à plus de 60 cm de profondeur (De Toffoli et al., 2021). L'utilisation d'une valeur CROIRAC de 0.3 a été refusée puisque le front racinaire emmener les racines à des profondeurs irréalistes (plus de 2m) (figure X). Selon Zarzyńska et al. (2017) la majorité de la longueur des racines se trouvent dans les 20 à 60 premiers centimètres du sol, mais certains cultivars ont la capacité d'explorer les horizons 80 – 100 cm avec une faible densité.



**Figure 24.** Différence de ZRAC en fonction de la valeur de CROIRAC : (a) CROIRAC = 0.3 (b) CROIRAC : 0.15.

### 6.1.2 Optimisation du modèle

Après optimisation, les RUE obtenues aux différents stades sont toutes comprises dans la plage 1,3 - 4,3 g /MJ, proposées dans la littérature (Saldaña Villota et al., 2024). Les trois variétés ont des valeurs différentes de celles proposées dans l'article de Morissette et al. (2016). Dans ce dernier, une phase d'optimisation sur la phénologie ainsi que le LAI a été réalisée. La robustesse de leur modèle est donc supérieure avec une gamme plus importante de données pour les différentes variétés.

Lors de ce travail, les paramètres  $\text{nbrgrmin}$  et  $\text{nbrgrmax}$  ont été estimés à partir des données du CRA-W pour une bonne optimisation sur la variable MAFRUIT. En effet, cette dernière résulte de l'interaction entre le nombre de tubercules par  $\text{m}^2$  (dirigé par  $\text{nbrgrmin}$  et  $\text{nbrgrmax}$ ), la matière sèche du tubercule (borné par PGRAINMAXI) et le coefficient d'efficacité de conversion des assimilats (CGRAIN). Une optimisation sans définir au préalable la valeur de  $\text{nbrgrmin}/\text{max}$  peut provoquer des compensations entre les paramètres, des résultats instables, et parfois physiologiquement incorrects. Dans tous les modèles, les nombres minimums et maximums ont été respectivement sous et surestimés rendant le modèle sensible au biais de calibration. Les PGRAINMAXI ont eux aussi fortement diminué après calibration pour refléter des valeurs plus réalistes.

Sur les représentations graphiques après optimisation (MASEC et MAFRUIT), il est possible d'observer pour les trois variétés que le modèle sous-estime les valeurs en s'écartant de la droite [1:1]. Cependant, la dispersion des points a fortement diminué rendant l'accord entre les simulations et les observations globalement plus homogène.

La matière sèche de la variété Bintje a été très bien simulée ( $\text{RMSE} = 1.737$  et ND proche de 1) indiquant que la phénologie et la paramétrisation du LAI sont bien représentatives de la variété. Le test de validation prouve l'efficacité du modèle avec une diminution du RMSE et un EF proche de 1. Pour l'estimation du rendement, il est possible d'observer un plafond où les valeurs simulées ont tendance à stagner autour d'un maximum. La calibration a débuté par l'optimisation des EFCROI puis par PGRAINMAX. Cette séquence a pu avoir comme effet de compenser les écarts entre la biomasse totale et le rendement en diminuant artificiellement le potentiel de croissance. Ainsi, les paramètres suivants, VITIRCARB et CGRAIN, n'ont plus eu la flexibilité nécessaire pour réajuster le rendement. Le test de validation ne montre pas une amélioration de la simulation (augmentation du RMSE), cependant elle reste toujours satisfaisante ( $\text{EF} > 0.5$ ).

Pour la variété Charlotte, il est possible d'observer pour la matière sèche totale, des valeurs ponctuelles élevées pouvant signifier la présence d'un stress lors de l'expérimentation et entraînant des écarts marqués entre les simulations et les observations. Cependant, dans les deux cas, l'optimisation a permis une amélioration de la simulation, les rendant globalement satisfaisantes ( $\text{EF} > 0.5$ ). L'évaluation réalisée sur le rendement confirme cette tendance. L'évaluation sur la biomasse s'avère être très satisfaisante, même si les critères statistiques apparaissent légèrement moins bons qu'avant optimisation, ce qui s'explique par la qualité initiale élevée de la simulation.

La variété Fontane est la moins bien représentée avec une sous-estimation et une dispersion du nuage de points élevé pour la matière sèche et le rendement. Cela peut être causé par une mauvaise représentation initiale du LAI et de la phénologie impactant considérablement les EFCROI qui, de surcroît, ont été calibrés avec des bornes larges. L'optimiseur a donc pu explorer des valeurs extrêmes conduisant à des erreurs de calibration répétées sur la suite de l'optimisation. Comme la simulation est satisfaisante pour MASEC et que la variabilité des observations est expliquée par les simulations à 80%, cela peut aussi montrer que les EFCROI estimés sont corrects et que certaines expérimentations ont subi un stress climatique et/ou biotique non représenté par STICS. Cependant, l'analyse statistique montre une nette amélioration après optimisation pour les sites calibrés et ceux dédiés à l'évaluation avec une diminution du RMSE. Après optimisation, les sites dédiés à l'évaluation n'ont cependant pas réussi à être satisfaisants ( $\text{EF} < 0.5$ ) malgré une nette amélioration.



Enfin, la calibration des paramètres liés à la dynamique de l'azote n'a pas permis d'obtenir de résultats satisfaisants. Malgré une amélioration du modèle avec des RMSE plus faibles, les valeurs des paramètres obtenus montrent que le modèle effectue davantage une compensation interne au détriment d'une cohérence biologique. En effet, certains paramètres comme VMAX2 ont été poussés à la borne maximum ce qui suggère que le modèle force artificiellement l'absorption d'azote pour réduire l'écart avec les observations. Malgré l'ajustement du système racinaire, des paramètres de la cinétique (VMAX/KMABS), de la nitrification du fichier sol, de la demande (ADIL/BDIL) le biais introduit n'a pas changé. De plus, l'utilisation des courbes critiques de l'azote spécifique à la variété Bintje comme conseillé dans Morissette et al. (2016), n'a pas permis d'atteindre un niveau de précision comparable à celui rapporté par Morissette. À ce niveau, les différences entre les variétés n'ont donc pas pu être étudiées. Pour améliorer la modélisation de l'azote, il serait intéressant d'avoir un suivi de sol plus détaillé avec les interactions entre l'eau et l'azote puisqu'ils conditionnent directement le flux de nitrate vers les racines.

## 6.2. Comparaison des variétés

### L'efficacité de conversion du rayonnement intercepté :

STICS calcule la croissance de la biomasse totale à partir du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) intercepté par le couvert. Dans le fichier plante, le PAR intercepté est modélisé selon l'équation de Beer-Lambert qui prend en compte le LAI et le coefficient d'extinction lumineux ( $k$ ). La biomasse produite par jour résulte donc de la multiplication du PAR intercepté, l'EFCROI (RUE potentielle) de la phase en cours et des facteurs de stress. La RUE observée correspond à la prise en compte des paramètres EFCROI et des facteurs de stress. EFCROIJUV couvre la période de la levée (LEV) à l'arrêt de croissance du feuillage (AMF), et est piloté par STLEVAMF (somme de degrés jours depuis l'émergence). Ensuite, sous la direction de STAMFDRP (somme de degrés jours depuis le stade précédent), le plant passe au stade EFCROIPEG jusqu'au début du remplissage des tubercules (DRP). Enfin, EFCROIPEPRO couvre la période du début de remplissage jusqu'au défanage.

Chez la pomme de terre, l'organe de stockage des photosynthétats, ou puits, correspond aux tubercules. La force du puits représente la capacité du tubercule à attirer et utiliser les assimilats produits par photosynthèse au niveau des feuilles. Cette force est notamment déterminée par l'efficacité de conversion du saccharose en amidon dans les tubercules (Basu et al., 1999). Les variétés à destination de l'industrie de la transformation, telles que Bintje et Fontane, ont une force de puits importante dû à la taille de leurs tubercules et à leur pourcentage de matière sèche. Lors de la photosynthèse, les feuilles via le cycle de Calvin, vont produire des sucres qui vont être transportés dans le phloème. Ce dernier devient donc très concentré, induisant une entrée d'eau, et donc une augmentation de sa pression interne. Parallèlement, le tubercule décharge le sucre du phloème pour produire de l'énergie, pour sa croissance et pour le stockage. Dans les tubercules, le sucre est transformé en glucose, puis en ADP-glucose via l'enzyme AGPase. Les amidons synthèses vont quant à eux, transformer les ADP-glucose en amidon et en amylopectine. Les tubercules ayant une force de puits plus importante vont rapidement convertir ces sucres solubles, ce qui abaisse la concentration en sucre libre et maintient un gradient source/puits favorisant l'arrivée continue d'assimilats dans le tubercule (van den Herik et al., 2024). Lorsqu'ils n'ont plus de capacité de stockage, les sucres s'accumulent dans les feuilles, la photosynthèse ralentit (feedback inhibition).

L'étude menée par Oliveira et al. (2016) sur l'explication des différences de rendements entre trois cultivars de pomme de terre, démontre que dans des conditions non limitantes au champ et à interception du rayonnement accumulé comparables, les rendements étaient plus importants pour les variétés possédant une RUE (proche d'être potentielle dans ce cas) élevée. Après optimisation, EFCROIREPRO s'est avéré supérieur pour la variété Fontane de pommes de terre à destination de la transformation, ce qui est cohérent avec leur capacité intrinsèque à convertir le PAR intercepté en biomasse du tubercule et donc leur force de puis supérieure comparé à une variété de table comme la Charlotte.

Cependant, la force de puis est définie par la combinaison de deux paramètres : la génétique et l'environnement. Malgré une génétique permettant une force de puits importante, la Fontane a la plus petite efficacité d'utilisation du rayonnement en phase reproductive. Des facteurs externes climatiques ou abiotiques ont pu faire compenser le modèle vers des valeurs plus basses afin de refléter au mieux les observations de terrain. Dans ce cas, EFCROIREPRO ne représente pas le véritable potentiel de la variété. Cela se confirme avec un EFCROIVEG très bas malgré un EFCROIJUV important, signifiant que la plante produit moins de biomasse qu'attendu. Dans ce cas, plusieurs théories sont possibles. Lors de périodes de sécheresses, afin d'éviter les pertes en eau, les stomates vont se fermer empêchant les échanges gazeux nécessaires à la photosynthèse et donc à la production de biomasse. La surface foliaire (LAI), qui correspond à la surface d'échange avec l'atmosphère, est négativement impactée au stade BBCH 1 (développement des feuilles) et encore plus en BBCH 40 (initiation du tubercule). La plante aura tendance à réduire sa LAI dans l'objectif de diminuer sa surface transpirante. Les maladies foliaires comme le mildiou réduisent la surface foliaire fonctionnelle et STICS traduit cela comme une diminution de l'efficacité de conversion.

Dans l'étude de Atza et al. (2024), la vigueur d'un plant de pomme de terre est définie comme la surface de canopée à la fin de la phase de croissance exponentielle. Cette vigueur était corrélée entre 73% et 90 % entre les sites pour un même lot de semences ce qui confirme l'importance du facteur génétique. L'installation du couvert et l'expansion foliaire semble être plus lente pour la variété Bintje que la Charlotte, reflété par des valeurs plus faibles d'EFCROIJUV et EFCROIVEG, indiquant une efficacité de conversion lumineuse inférieure.

#### Le rendement :

PGRainMAXI représente la masse maximale potentielle par tubercule en gramme de MS. Ce paramètre est directement lié à la génétique de la variété puisqu'il dépend du nombre de cellules formées lors de l'initiation du début du grossissement. La quantité de cellules formées va définir la taille maximale atteignable par le tubercule. La taille des tubercules est conditionnée par l'interaction de PGRainMAXI et VITIRCARB, la vitesse de remplissage des tubercules. CGRAIN quant à lui, correspond au coefficient de conversion des assimilats dans les tubercules.

Ainsi, il est possible de voir des différences variétales marquées. Les variétés Bintje et Fontane ont toutes deux un PGRainMAXI élevé permettant d'avoir de gros tubercules. Le facteur clé différenciant ces deux variétés est leur capacité de conversion de la biomasse (CGRAIN). Pour un même taux de croissance, la Fontane convertit mieux sa biomasse que la Bintje. Cette dernière possède donc un remplissage rapide mais avec une conversion faible, induisant la production de calibres moyens. La Fontane quant à elle aura un remplissage plus long, mais plus efficace, lui permettant d'avoir de gros tubercules. Pour l'industrie de la transformation, la variété Fontane semble donc plus adaptée. La variété Charlotte se distingue par un PGRainMAXI inférieur à celui des variétés industrielles, limitant la taille maximale de ses tubercules. Associé à un CGRAIN élevé, cette variété est capable de produire beaucoup

de tubercules, mais de petites taille (VITIRCARB faible). Les variétés industrielles privilégient des gros tubercules alors que pour les variétés de table il est préférable d'avoir des petits tubercules de tailles régulières.

### **6.3. Limitations du modèle**

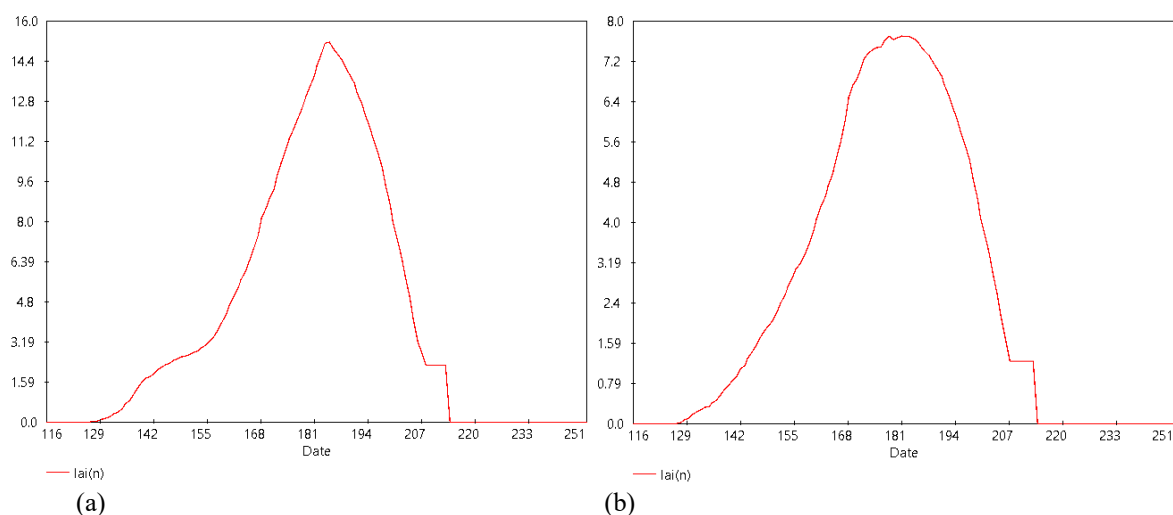
#### **6.3.1 Limitations générales**

STICS considère un sol plat et homogène, or, des buttes sont formées pour la culture de pommes de terre. En début de cycle, la forme des buttes favorise une exposition au rayonnement solaire plus importante, ce qui implique une évaporation de l'eau plus élevée par rapport aux simulations du modèle. De ce fait, il sous-estime le stress hydrique perçu par la plante. Ensuite, l'eau de pluie peut ruisseler vers les sillons, induisant une surestimation de l'eau disponible. Enfin, les températures du sol sont plus élevées dans les buttes, ce qui peut fausser l'estimation de la levée et le développement racinaire. Il peut donc y avoir une décorrélation entre le stress simulé et le stress réel subi par les plantes. STICS ne prend pas en compte certains facteurs influençant la levée comme la qualité du tubercule, les maladies ou la prégermination, qui peuvent introduire une hétérogénéité de la levée. Ensuite, les besoins en phosphore (P) et en potassium (K) qui sont primordiaux pour la culture de la pomme de terre ne sont pas modélisés. Une carence en K peut réduire le transfert des assimilés vers le tubercule et STICS va attribuer cet écart de rendement à d'autres paramètres. Une carence en P entraînera un enracinement limité qui ne sera pas modélisé.

Ensuite, le rendement est simulé en tonnes de matières sèches et STICS considère que les tubercules sont homogènes. Or, les tubercules sont classés par calibres et leur taille diffère selon les variétés. En effet, les itinéraires techniques diffèrent en fonction de l'usage final de la pomme de terre. Pour la Charlotte (pomme de terre de table), le défanage est précoce afin d'obtenir le calibre visé et maintenir une teneur en MS modérée compatible avec une chair ferme. À l'inverse, pour les variétés de transformation, le défanage est retardé dans le but d'atteindre une taille et un pourcentage de MS supérieur. Le Comité National Interprofessionnel de la pomme de terre (CNIP) indique que les variétés à chair ferme (hors grenailles) peuvent avoir un calibre de maximum de 55 mm, tandis que pour l'allégation frite le calibre attendu se situe entre 50 et 75mm (Zemmer, 2019). Si une variété produit naturellement beaucoup de tubercules et qu'ils sont très hétérogènes, STICS compensera certains paramètres spécifiques de la variété comme la vitesse de remplissage des tubercules (VITIRCARB) ou le poids maximum du tubercule (PGRAINMAXI) pour coller au mieux au rendement total. Ainsi, la dynamique simulée est correcte, mais la valeur du paramètre n'est physiologiquement pas réaliste.

#### **6.3.2 Limitations relative à l'étude**

A la fin de la paramétrisation, les valeurs de LAI étaient extrêmement grandes atteignant parfois les 15 (figure X). Ces mêmes valeurs extrêmes sont observables dans l'étude de Cassiers (2021) pour la variété Fontane. La forme des courbes se rapprochait fortement de celles de Russet Burbank obtenues dans l'étude de Morissette et al. (2016), mais avec des valeurs plus élevées. Sachant qu'au-delà d'un LAI de 3 il y a peu de gain supplémentaire sur l'interception lumineuse, l'optimisation a été faite sur ces valeurs (Firman et Allen, 1989). Après optimisation, les valeurs de LAI ont baissé montrant l'effet significatif de la modification des différents EFCROI (figure X). De ce fait, lors de futures calibrations, il serait intéressant de se pencher sur les observations de LAI disponibles grâce par exemple aux taux de couverture de la culture.



**Figure 25.** Représentation des simulations du LAI après paramétrisation (a) et après optimisation (b) du site 26 (TEC 2) de la variété Fontane.

Lors de cette étude, un tri de la base de données a été réalisé afin d'exclure les expérimentations présentant des signes évidents de stress important (températures et sécheresse) ou affectées par des contraintes biotiques comme le mildiou. Ce tri a donc laissé certaines expérimentations ayant subi des stress modérés susceptibles d'influencer la calibration. Une alternative aurait été de réaliser la calibration en deux temps. Premièrement, de travailler en situation au potentiel, c'est-à-dire en conditions non limitantes afin de calibrer le fichier plante sans contraintes. Certains paramètres structurels compensent le stress par une valeur plus ou moins élevée, induisant un biais. Une fois le potentiel figé, il est possible de calibrer sur des situations limitantes les paramètres d'accès aux ressources et de réponse au stress.

Enfin, l'utilisation de la calibration par variable a globalement sous-estimé les observations. Dans ce cas, le biais introduit s'explique par la minimisation de l'erreur qui est réalisée localement. Une telle démarche permet d'améliorer l'optimisation ponctuellement sur quelques paramètres, au détriment de la cohérence globale du modèle et de sa capacité à reproduire simultanément l'ensemble des processus.

## 7. Conclusion

L'objectif de ce travail a été de calibrer et d'évaluer le modèle STICS à l'échelle de la Wallonie pour trois variétés de pommes de terre, en mettant en place une démarche de paramétrisation et d'optimisation.

La première étape, consistant à paramétriser le modèle, à montrer que le fichier plante fourni par STICS pour la culture de pomme de terre ne parvenait pas à reproduire correctement les variables observées pour les variétés Bintje, Fontane et Charlotte. Les écarts entre les simulations et les observations étaient importants, induisant des RMSE élevés et des  $R^2$  faibles. La modification de la structure racinaire a constitué une amélioration majeure pour le modèle en représentant plus fidèlement son exploration.

La seconde étape, centrée sur l'optimisation des paramètres, a permis de réduire les erreurs de simulation pour les variables de biomasse totale (MASEC) et de rendement (MAFRUIT) avec une amélioration nette pour les variétés Bintje et Charlotte. Cependant, ces résultats sont plus mitigés concernant l'absorption d'azote, confirmant les limites déjà soulignées dans la littérature. L'optimisation séquentielle a certes permis d'améliorer certaines variables, mais elle a introduit un biais global limitant la cohérence d'ensemble. L'analyse des différences variétales a permis de mettre en évidence des stratégies distinctes avec la variété Fontane qui s'avère être plus adaptée à l'industrie de la transformation et la variété Charlotte qui produit beaucoup de tubercules homogènes.

Ces résultats montrent l'intérêt de calibrer le modèle STICS au niveau variétal et dans des conditions pédoclimatiques locales. À l'avenir, l'intégration de nouvelles données (phénologie et LAI) et l'utilisation d'une méthode bayésienne pour estimer conjointement plusieurs paramètres permettraient de mieux capturer leurs interactions et d'améliorer la robustesse et la transférabilité du modèle.

## 8. Bibliographie

- Allen R., Pereira L., Raes D. & Smith M., 1998. *Évapotranspiration des cultures - Lignes directrices pour le calcul des besoins en eau des cultures - Document 56 de la FAO sur l'irrigation et le drainage*, Rome.
- Arrouze M., 2023. La pomme de terre : variétés de chair ferme et plants, Fiches « Filière & Cartographie » Projet ClimEauFil (adaptation des filières régionales au changement climatique), Agro-Transfert Ressources & Territoires, Estrées-Mons (Hauts-de-France), France.
- Arvalis, 2019. Fertilisation de la pomme de terre, Paris, France.  
[https://www.arvalis.fr/sites/default/files/imported\\_files/pdt\\_ferti\\_plaquette\\_2019\\_01\\_21\\_v8700864572317011956.pdf](https://www.arvalis.fr/sites/default/files/imported_files/pdt_ferti_plaquette_2019_01_21_v8700864572317011956.pdf), (23/06/2025).
- Atza E., Klooster R., Hofstra F., Werff F. van der, Doorn H. van & Budko N., 2024. Predicting potato plant vigor from the seed tuber properties.
- Basu P.S., Sharma A., Garg I.D. & Sukumaran N.P., 1999. Le puits de tubercule modifie la réponse photosynthétique de la pomme de terre soumise à un stress hydrique 1. *Environmental and Experimental Botany* **42**(1), 25–39, DOI:10.1016/S0098-8472(99)00017-9.
- Beaudoin N., Lecharpentier P., Ripoché-Wachter D., Strullu L., Mary B., Léonard J., Launay M. & Justes E. (Eds.), 2023. *STICS soil-crop model: Conceptual framework, equations and uses*, éditions Quae.
- Ben Abdallah F., 2020. La fluorescence chlorophyllienne associée aux composés phénoliques des feuilles pour évaluer le statut azoté de la biomasse de la pomme de terre (Thèse de doctorat).
- Blauwer V.D. & Eeckhout I., 2020. Rendement et qualité des variétés mi-hâtives et tardives en Flandre - 2020.
- Brajkovic J., Fettweis X., Noël B., Vyver H.V.D., Ghilain N., Archambeau P., Piroton M. & Doutreloup S., 2025. Increased intensity and frequency of extreme precipitation events in Belgium as simulated by the regional climate model MAR. *Journal of Hydrology: Regional Studies* **59**, 102399, DOI:10.1016/j.ejrh.2025.102399.
- Brisson N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoché D., Zimmer D., Sierra J., Bertuzzi P., Burger P., Bussi re F., Cabidoche Y.M., Cellier P., Debaeke P., Gaudill re J.P., H nault C., Maraux F., Seguin B. & Sinoquet H., 2003. Un aper u du modèle de culture stics. *European Journal of Agronomy, Modelling Cropping Systems: Science, Software and Applications* **18**(3), 309–332, DOI:10.1016/S1161-0301(02)00110-7.
- Brisson N., Mary B., Ripoché D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Nicoullaud B., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Durr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machet J.-M., Meynard J.M. & Del colle R., 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. 1. Theory and parameterization applied to wheat and corn.
- Buis S., Lecharpentier P., Vezy R. & Giner M., 2024. CROPTIMIZR : un package pour estimer les paramètres des modèles de cultures.
- Cassiers A., 2021. Intercomparaison de trois modèles de complexité croissante pour l'estimation du rendement de parcelles de pommes de terre de variété Fontane.
- Chambeno t C., Laurent F., Machet J.-M. & Scheurer O., 2002. *Fertilisation azotée de la pomme de terre: Guide pratique*, Editions Quae, 132.
- CNIPT, 2023. Guide de gestion du rayon de pommes de terre, Comité National Interprofessionnel de la Pomme de Terre (CNIPT), Paris, France.
- De Toffoli M., Khalidi M., Imbrecht O. & Lambert R., 2021. ÉVALUATION DE L'INTERET D'UN APPORT DE DIGESTAT EN ETE OU AU PRINTEMPS.
- Delandmeter M., 2021. Soil-crop modelling of ecosystem services in diversified and integrated crop-livestock systems for climate change adaptation and mitigation.
- Delaplace P., 2007. Caractérisation physiologique et biochimique du processus de vieillissement du tubercule de pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.).
- Delaplace P. & Fauconnier M., 2004. Valorisation industrielle de la pomme de terre en Région wallonne. *Troupeaux et Cultures des Tropiques* 51–56.

- Delaplace P. & Fauconnier M.-L., 2008. Méthodes de mesure de l'âge physiologique des tubercules semences de pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*
- Djaman K., Irmak S., Koudahe K. & Allen S., 2021. Irrigation Management in Potato (*Solanum tuberosum* L.) Production: A Review. *Sustainability* **13**(3), 1504, DOI:10.3390/su13031504.
- Djaman K., Koudahe K., Essah S. & Shanwad U.K., 2025. Critical Nitrogen Dilution Curves for Nitrogen Management in Potato (*Solanum tuberosum* L.): A Minireview. *Am. J. Potato Res.* **102**(2), 107–118, DOI:10.1007/s12230-025-09984-8.
- Doorenbos J. & Kassam A., 1979. *FAO Irrigation and Drainage Paper 33*, Yield Response to Water.
- Dumont B., Leemans V., Mansouri M., Bodson B., Destain J.-P. & Destain M.-F., 2014. Parameter identification of the STICS crop model, using an accelerated formal MCMC approach. *Environmental Modelling & Software* **52**, 121–135, DOI:10.1016/j.envsoft.2013.10.022.
- Europatat, 2023. Le secteur européen de la pomme de terre | Europatat. <https://europatat.eu/activities/the-eu-potato-sector/>, (23/06/2025).
- Eurostat, 2024. The EU potato sector - statistics on production, prices and trade. [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=The\\_EU\\_potato\\_sector\\_-\\_statistics\\_on\\_production,\\_prices\\_and\\_trade](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=The_EU_potato_sector_-_statistics_on_production,_prices_and_trade), (23/06/2025).
- FAO, 2009. Le monde de la pomme de terre.
- Firman D.M. & Allen E.J., 1989. Relationship between light interception, ground cover and leaf area index in potatoes. *J. Agric. Sci.* **113**(3), 355–359, DOI:10.1017/S0021859600070040.
- FIWAP, 2022. Rendements et qualités 2022 – Résultats des essais variétaux, FIWAP, Gembloux, Belgique.
- FIWAP, 2023. Stocks belges de pommes de terre – Situation au 1er novembre 2023.
- Gawinowski M., Aubry M., Buis S., Garcia C., Deswarte J.-C., Bancal M.-O. & Launay M., 2025. Selecting crop variables and parameters for the calibration of a new cultivar in a crop model: A case study of winter wheat for STICS. *European Journal of Agronomy* **168**, 127677, DOI:10.1016/j.eja.2025.127677.
- GIEC, 2007. Foire aux questions – Contribution du Groupe de travail I au Quatrième Rapport d'évaluation du GIEC.
- Gobin A., 2010. Modelling climate impacts on crop yields in Belgium. *Climate research (Open Access for articles 4 years old and older)* **44**, 55, DOI:10.3354/cr00925.
- Goffart J.-P., Haverkort A., Storey M., Haase N., Martin M., Lebrun P., Ryckmans D., Florins D. & Demeulemeester K., 2022. Potato Production in Northwestern Europe (Germany, France, the Netherlands, United Kingdom, Belgium): Characteristics, Issues, Challenges and Opportunities. *Potato Res.* **65**(3), 503–547, DOI:10.1007/s11540-021-09535-8.
- Goffart J.-P. & Lebrun P., 2024. La production et la valorisation de la pomme de terre en Europe du Nord-ouest en Belgique en Wallonie.
- Gravouelle J., 2007. Pomme de terre – Adapter l'itinéraire à l'utilisation culinaire. *Perspectives Agricoles*.
- Gravouelle J.-M., 2003. Les variétés de pomme de terre de consommation “à chair ferme” connaissent un succès vif ces dernières années car elles répondent bien aux exigences de segmentation du marché en matière de conditionnements et d'usages culinaires. Toutefois, les caractéristiques agronomiques et d'utilisation de chaque variété dépendent aussi des facteurs culturels qui doivent être maîtrisés. *CULTURES*.
- Guillaume S., Bergez J.-E., Wallach D. & Justes E., 2011. Methodological comparison of calibration procedures for durum wheat parameters in the STICS model. *European Journal of Agronomy* **35**(3), 115–126, DOI:10.1016/j.eja.2011.05.003.
- Hu Z., Wu G., Zhang L., Li S., Zhu X., Zheng H., Zhang L., Sun X. & Yu G., 2017. Modeling and Partitioning of Regional Evapotranspiration Using a Satellite-Driven Water-Carbon Coupling Model. *Remote Sensing* **9**(1), 54, DOI:10.3390/rs9010054.
- Itier B. & L'Hotel J., 1998. Parameterisation of the Shuttleworth-Wallace model to estimate daily maximum transpiration for use in crop models. *Ecological Modelling* DOI:10.1016/S0304-3800(97)00215-9.
- Janssens P., Elsen F., Odeurs W., Coussement T. & Bries J., 2014. Irrigation need and expected future water availability for potato production in Belgium.
- Janssens S.R.M., Jongeneel R.A. & Smit A.B., 2021. The EU frozen potato product sector: a policy

- impact assessment for four key-producing Member States, Wageningen Economic Research, The Hague.
- Jasim A., Sharma L.K., Zaeen A., Bali S.K., Buzza A. & Alyokhin A., 2020. Potato Phosphorus Response in Soils with High Value of Phosphorus. *Agriculture* **10**(7), 264, DOI:10.3390/agriculture10070264.
- JAUNARD D., 2010. Contribution à l'évaluation et à la caractérisation de variétés de pommes de terre (*Solanum* sp.) des régions semi-arides des Andes boliviennes (TFE).
- Khan M.Z., Akhtar M., Mahmood-ul-Hassan M., Mahmood M. & Safdar D., 2012. POTATO TUBER YIELD AND QUALITY AS AFFECTED BY RATES AND SOURCES OF POTASSIUM FERTILIZER. *Journal of Plant Nutrition - J PLANT NUTR* **35**, 664–677, DOI:10.1080/01904167.2012.653072.
- Kotchi S.O., 2004. DÉTECTION DU STRESS HYDRIQUE PAR THERMOGRAPHIE INFRAROUGE: Application à la culture de la pomme de terre.
- Lacroix C., Bindelle J. & Dumon B., 2024. Diagnostic de vulnérabilités pour augmenter la résilience wallonne à travers l'adaptation aux changements climatiques (Rapport méthodologique), AWAC.
- Marinus J. & Bodlaender K.B.A., 1975. Response of some potato varieties to temperature. *Potato Res* **18**(2), 189–204, DOI:10.1007/BF02361722.
- Mauro R.P. & Ierna A., 2025. Tuber Growth and Nutritional Traits in Deficit Irrigated Potatoes. *Agronomy* **15**(5), 1019, DOI:10.3390/agronomy15051019.
- Meier U., 2001. *Stades phénologiques des plantes mono- et dicotylédones : BBCH Monographie*, Quedlinburg, Allemagne.
- Ministère de la Transition écologique, 2022. Ce que dit le GIEC – 6<sup>e</sup> rapport d'évaluation : Volet 2 – Impacts, adaptation et vulnérabilité.
- Morissette R., Jégo G., Bélanger G., Cambouris A.N., Nyiraneza J. & Zebarth B.J., 2016. Simulating Potato Growth and Nitrogen Uptake in Eastern Canada with the STICS Model. *Agronomy Journal* **108**(5), 1853–1868, DOI:10.2134/agronj2016.02.0112.
- Mortier P.-H., 2020. Simulation des conséquences du changement climatique sur l'évolution des stress abiotiques et de la production de pommes de terre, à l'aide du modèle STICS.
- Oliveira J.S., Brown H.E., Gash A. & Moot D.J., 2016. An Explanation of Yield Differences in Three Potato Cultivars. *Agronomy Journal* **108**(4), 1434–1446, DOI:10.2134/agronj2015.0486.
- Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), 2009. La pomme de terre dans le monde : production et consommation, Rome.
- Pliska T., 2008. Soil degradation threatens food security (InfoResources Focus No. 1/08).
- Poulet V., Florins D., Somerhausen E., Lebrun P., Vandemeulebroecke K., Ducattillon C. & Soete A., 2008. VARIÉTÉS DE POMMES DE TERRE.
- Reghezza-Zitt M., 2023. Sociétés humaines et territoires dans un climat qui change. Du réchauffement climatique global aux politiques climatiques.
- Rioux R. & Comeau J.E., 1980. INFLUENCE DES SYSTÈMES DE CULTURE SUR LA CROISSANCE ET LE RENDEMENT DES POMMES DE TERRE. *Can. J. Plant Sci.* **60**(2), 591–598, DOI:10.4141/cjps80-085.
- Rolot J.L., Michelante D. & Dupuis B., 2005. BILAN DES RECHERCHES MENEES SUR LE MILDIOU DE LA POMME DE TERRE AU COURS DES ANNEES 2000 à 2005, CRA-W.
- Roose E., 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES).
- Rousselle P., Robert Y. & Crosnier J.-C., 1996. *La pomme de terre: Production, amélioration, ennemis et maladies, utilisations*, Editions Quae, 676.
- Saldaña Villota T.M. & Cotes Torres J.M., 2024. Fluctuations in Radiation Use Efficiency Throughout the Growth Cycle in Diploid Potato Crop. *American Journal of Potato Research* **101**, DOI:10.1007/s12230-023-09938-y.
- Salehi-Soghadi Z., Islam M.S., Manschadi A.M. & Kaul H.-P., 2023. Transpiration Efficiency of Some Potato Genotypes under Drought. *Agronomy* **13**(4), 996, DOI:10.3390/agronomy13040996.
- Sawyer G., Oligschläger C. & Khabarov N., 2019. Growing Potatoes in Belgium (SEBS Case Study Report No. SeBS-CR-006), Sentinels Benefits Study (SeBS).



- Schwärzel R. & Reust W., 2007. Liste suisse des variétés de pommes de terre 2009. . *Victoria*.
- Shi X. & Bloom A., 2021. Photorespiration: The Futile Cycle? *Plants* **10**(5), 908, DOI:10.3390/plants10050908.
- SPF Économie, 2019. Analyse du fonctionnement du marché de la filière de la pomme de terre en Belgique (Partie III du Rapport annuel 2019 de l'Observatoire des prix), Service public fédéral Économie, Bruxelles, Belgique.
- SPW, 2024a. Pomme de terre : produits, charges et marge brute. *Etat de l'Agriculture Wallonne*. [https://etat-agriculture.wallonie.be/contents/indicatorsheets/EAW-C\\_III\\_b\\_8.html](https://etat-agriculture.wallonie.be/contents/indicatorsheets/EAW-C_III_b_8.html), (23/06/2025).
- SPW, 2024b. Productions végétales. *Etat de l'Agriculture Wallonne*. , (23/06/2025).
- SPW, 2024c. Superficie Agricole Utilisée. *Etat de l'Agriculture Wallonne*. <https://etat-agriculture.wallonie.be/contents/indicatorsheets/EAW-1.html>, (23/06/2025).
- Statbel, June-23-2025. Chiffres clés de l'agriculture 2024 | Statbel. <https://statbel.fgov.be/fr/nouvelles/chiffres-cles-de-lagriculture-2024>, (23/06/2025).
- Tang R., Niu S., Zhang G., Chen G., Haroon M., Yang Q., Rajora O.P. & Li X.-Q., 2018. Physiological and growth responses of potato cultivars to heat stress. *Botany* **96**(12), 897–912, DOI:10.1139/cjb-2018-0125.
- Torabian S., Farhangi-Abriz S., Qin R., Noulas C., Sathuvalli V., Charlton B. & Loka D.A., 2021. Potassium: A Vital Macronutrient in Potato Production—A Review. *Agronomy* **11**(3), 543, DOI:10.3390/agronomy11030543.
- TrendEconomy, 2024. Potatoes | Imports and Exports | 2023. [https://trendeconomy.com/data/commodity\\_h2/0701](https://trendeconomy.com/data/commodity_h2/0701), (23/06/2025).
- van den Herik B., Bergonzi S., Li Y., Bachem C.W. & ten Tusscher K.H., 2024. A coordinated switch in sucrose and callose metabolism enables enhanced symplastic unloading in potato tubers. *Quant Plant Biol* **5**, e4, DOI:10.1017/qpb.2024.4.
- van Loon M.P., Alimagham S., Abuley I.K., Boogaard H., Boguszewska-Mańkowska D., Ruiz de Galarreta J.I., Geling E.H., Kryvobok O., Kryvoshein O., Landeras G., Okuda N., Parisi B., Trawczyński C., Zarzyńska K. & van Ittersum M.K., 2025. Insights into the potential of potato production across Europe. *Crop and Environment* **4**(2), 97–106, DOI:10.1016/j.crope.2025.03.002.
- Visse-Manisau M., Tallant M., Curty F., Schwaerzel R., Brostaux Y. & Dupuis B., 2020. Stockage des variétés de pommes de terre industrielles: l'après CIPC DOI:10.34776/AFS11-175.
- Vos J. & Oyarzún P.J., 1987. Photosynthesis and stomatal conductance of potato leaves—effects of leaf age, irradiance, and leaf water potential. *Photosynth Res* **11**(3), 253–264, DOI:10.1007/BF00055065.
- Wandji Simo S., 2022. Etude de l'effet des différentes sources d'éléments nutritifs sur les performances agroéconomiques de la pomme de terre dans les hauts plateaux de l'Ouest Cameroun.
- Zarzyńska K., Boguszewska-Mańkowska D. & Nosalewicz A., 2017. Differences in size and architecture of the potato cultivars root system and their tolerance to drought stress. *Plant Soil Environ*. **63**(4), 159–164, DOI:10.17221/4/2017-PSE.
- Zemmer C., 2019. Calibres des pommes de terre à l'état frais destinées à la vente au consommateur, Comité national interprofessionnel de la pomme de terre (CNIPT), Paris.
- Zhang P., Yang X., Manevski K., Li S., Wei Z., Andersen M.N. & Liu F., 2022. Physiological and Growth Responses of Potato (*Solanum Tuberosum* L.) to Air Temperature and Relative Humidity under Soil Water Deficits. *Plants* **11**(9), 1126, DOI:10.3390/plants11091126.
- Ziadi N., Bélanger G., Cambouris A.N. & Zebarth B.J., 2015. Outils de diagnostic pour augmenter l'efficacité de l'utilisation de l'azote : le sol, la plante ou les deux? *Annales de l'INRAT* Volume 88(2 ème Numéro Spécial Centenaire), 49–62.

## 9. Annexes

### Annexe 1 :

**Tableau a :** Date des itinéraires techniques de la variété Bintje (les dates en gras ont été estimées)

Site ID	Année	Plantation	Emergence	Défanage	Récolte
11	2017	17/04/2017	24/05/2017	06/09/2017	28/09/2017
13	2016	06/05/2016	02/06/2016	09/09/2016	04/10/2016
16	2014	15/04/2014	21/05/2014	31/08/2014	23/09/2014
18	2013	25/04/2013	07/06/2013	02/09/2013	24/09/2013
20	2012	13/05/2012	05/06/2012	03/09/2012	01/10/2012
24	2010	26/04/2010	27/05/2010	09/09/2010	06/10/2010
26	2004	21/04/2004	24/05/2004	06/08/2004	02/09/2004
27	2000	/	/	/	/
28	2000	/	/	/	/
29	2000	/	/	/	/
30	1999	/	/	/	/
31	1999	/	/	/	/
32	1999	/	/	/	/
33	1999	/	/	/	/
34	1999	/	/	/	/
40	1998	/	/	/	/
43	1997	/	/	/	/
44	1997	/	/	/	/
49	1998	23/04/1998	25/05/1998	04/09/1998	23/09/1998
51	1997	03/04/1997	20/05/1997	21/08/1997	17/09/1997
52	1996	12/04/1996	01/06/1996	27/08/1996	16/09/1996
56	2009	24/04/2009	27/05/2009	30/08/2009	24/09/2009
57	2009	24/04/2009	27/05/2009	30/08/2009	25/09/2009
58	2009	24/04/2009	22/05/2009	<b>25/08/2009</b>	<b>17/09/2009</b>
59	2006	28/04/2006	09/06/2006	11/09/2006	29/09/2006

**Tableau b :** Date des itinéraires techniques de la variété Fontane (les dates en gras ont été estimées)

Site ID	Année	Plantation	Emergence	Défanage	Récolte
1	2022	22/04/2022	28/05/2022	23/08/2022	21/09/2022
3	2023	05/05/2023	27/05/2023	12/09/2023	16/10/2023
4	2023	04/05/2023	27/05/2023	14/09/2023	04/10/2023
7	2018	23/04/2018	18/05/2018	31/08/2018	<b>21/09/2018</b>
8	2019	29/04/2019	30/05/2019	06/09/2019	20/09/2019
9	2017	13/04/2017	24/05/2017	<b>01/09/2017</b>	22/09/2017
12	2016	07/05/2016	30/05/2016	14/09/2016	05/10/2016
53	2007	19/04/2007	29/05/2007	29/08/2007	26/09/2007

**Tableau c :** Date des itinéraires techniques de la variété Charlotte (les dates en gras ont été estimées)

Site ID	Année	Plantation	Emergence	Défanage	Récolte
14	2015	18/04/2015	30/05/2015	<b>05/08/2015</b>	27/08/2015
15	2014	15/04/2014	28/05/2014	31/08/2014	03/09/2014
17	2014	15/04/2014	18/05/2014	31/08/2014	02/09/2014
19	2013	25/04/2013	05/06/2013	07/08/2013	02/09/2013
21	2012	13/05/2012	05/06/2012	21/08/2012	10/09/2012
22	2011	19/04/2011	24/05/2011	29/07/2011	31/08/2011
25	2010	26/04/2010	05/06/2010	19/08/2010	14/09/2010
37	1999	24/04/1999	/	<b>01/09/2015</b>	22/09/1999
60	2006	27/04/2006	01/06/2006	09/08/2006	13/09/2006

## Annexe 2 : Liste des stations météorologiques utilisées

Nom	Identifiant
Gembloux	49
Sombrefe	27
Upigny	47
Couthuin	32
Leuze	26
Floriffoux	19
Casteau	36
Esplechin	38