



HAL
open science

Validation d'un modèle de croissance des peuplements végétaux non cultivés en milieu viticole méditerranéen

Martin Faucher, Fabrice Vinatier

► To cite this version:

Martin Faucher, Fabrice Vinatier. Validation d'un modèle de croissance des peuplements végétaux non cultivés en milieu viticole méditerranéen. Biodiversité et Ecologie. 2021. <hal-04808804>

HAL Id: hal-04808804

<https://hal.inrae.fr/hal-04808804v1>

Submitted on 28 Nov 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC 4.0 - Attribution - Non-commercial use - International License

Rapport de stage
Validation d'un modèle de croissance des peuplements
végétaux non cultivés en milieu viticole méditerranéen
M2 Modélisation en écologie (MODE), Université de Rennes 1
Martin Faucher



INRAE LISAH

Encadrants :
VINATIER Fabrice
DAGES Cécile
CREVOISIER David

Structure d'accueil :
UMR LISAH, INRAe Montpellier,
2 pl. Pierre Viala
34000 Montpellier

Année 2020/2021

Glossaire

a_i : seuil inférieur de cumul de pluie pour le compartiment i
ASW : quantité d'eau disponible dans le sol
 b_i : seuil supérieur de cumul de pluie pour le compartiment i
 B^0 : quantité d'eau contenue dans la couche superficielle du rang le 1^{er} jour de simulation
 B^1 : quantité d'eau contenue dans la couche superficielle du rang le jour j de simulation
cn1, cn2 et cn3 : curve number du sol nu
 D_i^j : quantité journalière d'eau drainée du compartiment i
 Es^j : évapotranspiration journalière du compartiment 2 causée par le sol nu
 Es_p^j : évaporation potentielle le jour j de simulation.
 ET^j : évapotranspiration journalière du compartiment 1 causée par la végétation
 ETP^j : évapotranspiration de Penman-Monteith journalière
FTSW : fraction transpirable de l'eau dans le sol, égale à ASW/TTSW
 $FTSW_{reg_lai}$: FTSW minimale avant effet sur la croissance du LAI
 $FTSW_{reg_v}$: FTSW minimale avant effet sur la transpiration de la vigne
 j_{dbt} : date de débourrement de la vigne
 j_{germ} : date de germination de la cohorte
 j_{julien} : date du jour simulé
 j_{transp} : date d'arrêt de transpiration de la vigne
 k_h^j : coefficient cultural journalier de la végétation
 k_{max} : coefficient cultural maximal de la vigne
 k_v^j : coefficient cultural journalier de la vigne
 P_i^j : quantité de pluie reçue le jour j par le compartiment i
 ψ_{soil}^j : humidité journalière du sol
 ψ_{min50} : humidité minimale du sol nécessaire pour atteindre 50 % de germination
 p_{IR} : pourcentage de surface d'inter-rang dans le couple vigne/inter-rang
 $P5^j$: somme des pluies reçues par la parcelle entière sur les 5 derniers jours
 R_i^j : quantité d'eau ruissellée le jour j par le compartiment i
 $Sruis_i^j$: seuil journalier de ruissellement pour le compartiment i
 $STDASW_{min}$: écart-type du potentiel hydrique du sol
 ST^j_{kmax} : cumul de température de la vigne nécessaire pour atteindre le coefficient cultural maximal
 ST^j_v : cumul de température de la vigne
 T_i^j : transpiration journalière du compartiment i causée par la vigne
 T_{min} : température de base du sol pour la somme de température nécessaire à la germination
 T^j_{soil} : température journalière du sol
 $Temp^j$: température journalière sur la parcelle
 $Temp^j_b$: température de base de la vigne pour le calcul du cumul de température
TTSW : quantité maximale d'eau disponible dans le sol
 Wi^j_{ETh} : indice de stress hydrique lié à l'évapotranspiration de la végétation
 Wi^j_{LAIh} : indice de stress hydrique lié à la croissance du LAI
 Wi^j_{TV} : indice de stress hydrique lié à la transpiration de la vigne

sp(variable) : la valeur de la variable est la même pour toutes les cohortes d'une espèce

COH(variable) : la valeur de la variable est propre à une cohorte d'une espèce

Table des matières

Introduction	p.1
1. Description du modèle	p.3
1.1 Module hydrologique	p.3
- quantité d'eau dans le sol	p.4
- drainage	p.4
- partage des pluies	p.4
- ruissellement	p.4
- transpiration et évapotranspiration	p.5
1.2 Module végétation	p.8
1.2.1 De la sortie de dormance à l'émergence	p.8
1.2.2 Croissance végétale	p.9
- stockage des informations	p.9
- développement de la végétation	p.10
1.3 Module agronomique	p.11
1.3.1 Traitements appliqués à la parcelle	p.11
2. Paramétrisation du modèle	p.12
3. Matériel et Méthodes	p.13
3.1 Jeux de données utilisés pour la calibration et la validation du modèle	p.13
3.2 Calibration et validation du modèle	p.14
4. Résultats	p.14
4.1 Comportement général du modèle	p.14
4.2 Validation du modèle	p.15
- Espèces représentées	p.15
- jeu de données Walis	p.15
- jeu de données Alignan	p.18
- jeu de données Roujan	p.21
Discussion	p.23

Introduction

Longtemps considérés comme un frein à l'exploitation agricole des parcelles, les couverts végétaux spontanés connaissent un regain d'intérêt depuis le début des années 2000, en réponse aux préoccupations environnementales visant à se défaire des schémas classiques d'agriculture intensive ayant recours à des pratiques potentiellement perturbatrices et/ou destructrices pour les écosystèmes avec des conséquences négatives sur les cultures (Krishna et al., 2003). Ces préoccupations sont indissociables des services écosystémiques, qui peuvent servir de motivation aux acteurs réticents à adopter des pratiques risquant de diminuer leur production agricole. En ce qui concerne les services écosystémiques rendus par un couvert végétal sur une parcelle, un des services écosystémiques les plus documentés est la protection contre les ravageurs de culture, la diversification du paysage étant favorable aux ennemis naturels des ravageurs (Thies & Tschardtke, 1999), ce qui peut mener à une augmentation du contrôle des ravageurs (Thies et al., 2003). Plus directement, le couvert végétal peut augmenter la fertilité du sol pendant les périodes de jachère ou lors de rotations de culture, mais aussi jouer un rôle de stabilisation du sol en limitant l'érosion et le ruissellement (Zhang et al., 2007). En plus de permettre une meilleure disponibilité des nutriments (Ramakrishnan, 1992), la protection des sols permet aussi de maximiser leur potentiel en termes de captation, stockage et accessibilité de l'eau. En effet, la réduction des apports en eau est un enjeu de plus en plus important face à l'augmentation en fréquence et en intensité des sécheresses.

L'agroécologie, définie par Gliessman (2006) comme "la science de l'application de concepts et principes venant de l'écologie à la construction et la gestion de systèmes agricoles durables", peut fournir un appui théorique ainsi que des solutions pratiques à la recherche de la maximisation des services écosystémiques.

Dans ce contexte, l'écohydrologie est une discipline qui pour étudier les plans d'eau et déterminer le débit moyen d'un cours d'eau, la richesse en nutriments de l'eau, ou encore le parcours de l'eau, étudie l'interaction entre la croissance des couverts végétaux et les flux d'eau. L'avantage pour la végétation d'avoir un accès facilité à l'eau est évident, tandis que la végétation peut favoriser le retour de l'eau du sol dans l'atmosphère (Chapin et al., 2002). A l'échelle d'une parcelle, la répartition de la végétation est un facteur déterminant des gradients d'humidité du sol (Potts et al., 2010) et d'infiltration (Thompson et al., 2010). En retour, ces mêmes gradients ont un effet sur la répartition et la croissance de la végétation (Breshears & Barnes, 1999).

Les couverts végétaux retrouvés dans les agroécosystèmes sont donc soumis à des apports et des contraintes de l'environnement potentiellement différents entre les couverts monospécifiques et les couverts végétaux constitués de plusieurs espèces en association, mais les mêmes interactions peuvent être retrouvées. Dans le cadre de la transition agroécologique, la modélisation mécaniste peut s'avérer utile pour étudier l'impact des pratiques sur un système grâce à une simulation précise des mécanismes en jeu.

Parmi les modèles mécanistes développés pour simuler le lien entre la végétation et l'eau, le modèle SWAT (Soil Water Assessment Tool, Arnold et al., 1998, 1999) est un exemple de modèle spatialement explicite prenant en compte la végétation pour simuler le débit, le contenu en sédiments ou en nutriments d'un cours d'eau. SWAT a été utilisé pour modéliser les effets de différents services écosystémiques, que ce soit l'amélioration de la qualité de l'eau (Cools et al., 2011), la régulation des crues (Golden et al., 2014), ou encore le stockage du carbone (Post et al., 2008). Avec une place plus importante de la végétation, le modèle Walis (Celette et al., 2011) a été développé pour simuler l'évolution de la quantité d'eau disponible dans le sol dans une parcelle de vigne dont les rangées sont enherbées.

Ces deux modèles mécanistes, bien que robustes en ce qui concerne la modélisation des interactions entre la végétation et l'eau, ne prennent pas ou peu en compte l'effet de l'intervention humaine sur le système. Pourtant, la présence ou le développement d'un couvert végétal dans un agrosystème est fortement lié aux pratiques culturales (Fracchiola et al., 2015). De manière générale, peu de modèles comportent une réelle prise en compte des pratiques culturales sur le développement de l'espèce végétale simulée (Bergez et al., 2010). Le modèle Alomysys, développé pour modéliser la croissance du vulpin des champs (*Alopecurus myosuroides* Huds.), et comportant un module dédié à la simulation du devenir des graines après un labour fait figure d'exception (Colbach et al., 2006).

Un autre critère essentiel à la modélisation d'un couvert végétal dans un agrosystème est la prise en compte des différentes espèces présentes et de leurs caractéristiques propres influant sur leur germination, leur émergence, et leur croissance. La prise en compte des spécificités propres à chaque espèce se heurte à la volonté de construire un modèle parcimonieux pour faciliter la paramétrisation du modèle et éviter de contraindre son domaine d'application. Si certains modèles permettent de simuler l'association de deux espèces (ex : association plante/arbre, Malézieux et al., 2009 ; association de deux céréales, Dunan et al., 1994), peu de modèles multispécifiques à plus de 2 espèces existent. Un des rares modèles multispécifiques existant est le modèle Florsys, développé pour simuler la croissance d'un couvert végétal multispécifique d'espèces végétales non cultivées, et qui reprend les formalismes du modèle Alomysys pour simuler l'effet du labour sur la banque de graines du sol (Gardarin et al., 2012).

Le milieu méditerranéen, parce qu'il est caractérisé par une semi-aridité et des reliefs, est une zone géographique de choix pour étudier les services écosystémiques de la végétation spontanée retrouvée dans les milieux interstitiels, tels que les fossés, les bordures de parcelles, ou encore les inter-rangs. Au sein des parcelles agricoles méditerranéennes, le cas des vignes du sud de la France rassemble à la fois le souci d'approvisionnement en eau, avec des périodes de sécheresse pouvant être importantes, et la volonté de réduire la consommation de pesticides, à la fois pour la qualité du vin mais aussi pour celle des sols et des ressources en eau des environs. En 2005, il a été estimé que

la viticulture représentait 4 % de la surface agricole utile française, mais représentait à elle seule 20 % de la consommation de pesticides en agriculture (Aubertot et al., 2005).

Afin de réduire l'utilisation de pesticides sur les parcelles de vignes françaises méditerranéennes, le projet MIPP (Modélisation Intégrée des Pesticides dans les Paysages) a été mis en place. Il vise à construire un modèle composé de plusieurs sous-modèles (ou simulateurs) dédiés à la simulation d'un phénomène précis sur une parcelle de vigne (dispersion de l'eau irriguée, ruissellement sur la parcelle, croissance végétale,...). Le projet MIPP mise sur les services écosystémiques rendus par la végétation associée pour réduire l'utilisation de pesticides tout en évitant que la végétation qui se développe entre les rangs de vigne et dans les fossés de bordure de vigne diminue la disponibilité en eau dans le sol au détriment de la vigne. Au sein de ce projet, l'objectif du stage était donc de calibrer et valider un modèle de croissance végétal multispécifique afin d'aboutir à une première version pouvant être utilisée seule ou être intégrée au reste des simulateurs développés dans le cadre du projet MIPP.

1. Description du modèle

Le modèle fonctionne sur un pas de temps journalier, à l'échelle d'une parcelle ou d'un élément interstitiel (fossés, bordure enherbée). Le modèle est constitué de 51 fonctions codées en C++ 3.20 afin de raccourcir le temps de simulation. Les fonctions sont ensuite utilisées dans un script R qui va produire les résultats de la simulation. L'utilisation de fonctions C++ dans R nécessite la librairie Rcpp (v.1.0.6 ; Eddelbuettel & Balamutta, 2018).

Le modèle simule la croissance végétale par cohortes d'individus de la même espèce regroupés selon leur date de germination. Deux modalités de simulation sont disponibles : la simulation de la végétation présente dans les inter-rangs de vigne, en association avec une simulation simple de la croissance de la vigne, et la simulation de la végétation présente dans les fossés de bordures de vigne, qui ne prend pas en compte la croissance de la vigne pour simuler la croissance végétale.

1.1. Module hydrologique

Les équations associés au bilan hydrique de la parcelle simulée sont tirées du modèle hydrologique Walis (Celette et al., 2010). Walis simule les variations de la quantité d'eau mobilisable dans le sol dans un système composé de l'atmosphère, de la vigne, et du sol. Walis simule un cas de figure contenant un rang de vigne et un inter-rang voisin. Le rang de vigne est considéré désherbé en permanence. Walis compartimente le sol en deux : le compartiment 1, contenant les racines de la vigne et de la végétation de l'inter-rang, et le compartiment 2, situé sous le rang de vigne et le compartiment 1, contenant uniquement les racines de la vigne. L'eau contenue dans le compartiment 1 peut être drainée dans le compartiment 2, et l'eau du compartiment 2 peut être drainée en profondeur.

Notre modèle doit aussi permettre de modéliser la croissance de la végétation dans les fossés de bordure de vigne, auxquels cas certaines équations ont été modifiées.

- quantité d'eau dans le sol

La quantité d'eau dans le sol mobilisable par la végétation de l'inter-rang est comprise entre 0 et la quantité d'eau maximale mobilisable dans le compartiment 1 ($TTSW_1$). Elle dépend de la quantité d'eau mobilisable le jour précédent (ASW_1^{j-1}), de la différence entre la pluie reçue sur le compartiment 1 (P_1^j) et le ruissellement ($Ruiss_1^j$), du drainage de l'eau (D_1^j) entre le compartiment 1 et le compartiment 2, de l'évapotranspiration du couvert végétal (ET_1^j) et de la transpiration de la vigne (T_1^j). Elle peut s'écrire :

$$(1) \quad ASW_1^j = \min(TTSW_1, \max(0, ASW_1^{j-1} + (P_1^j - Ruiss_1^j) - D_1^j - ET_1^j - T_1^j))$$

La quantité d'eau dans le sol mobilisable dans le compartiment 2 est comprise entre 0 et la quantité d'eau maximale mobilisable dans le compartiment ($TTSW_2$). Elle dépend de la quantité d'eau mobilisable le jour précédent (ASW_2^{j-1}), de la différence entre la pluie reçue sur le compartiment (P_2^j) et le ruissellement ($Ruiss_2^j$), du drainage de l'eau (D_1^j) entre le compartiment 1 et le compartiment 2 et entre le compartiment 2 et le sol plus profond (D_2^j), de l'évaporation du sol nu (Es^j) et de la transpiration de la vigne (T_1^j). Elle peut s'écrire :

$$(2) \quad ASW_2^j = \min(TTSW_2, \max(0, ASW_2^{j-1} + (P_2^j - Ruiss_2^j) + D_1^j - D_2^j - Es^j - T_1^j))$$

Il est important de noter que la quantité d'eau mobilisable dans le compartiment 2 n'est pas la quantité d'eau mobilisable par la vigne.

- drainage

Le drainage survient lorsque la quantité d'eau disponible dans un compartiment dépasse la capacité maximale ($TTSW$). Dans Walis, il est donc défini ainsi :

$$(3) \quad D_i^j = \max(0, ASW_i^{j-1} + P_i^j - Ruiss_i^j - TTSW_i)$$

- partage des pluies

La pluie reçue par un compartiment (P_i^j) dépend de la proportion p_{IR} d'inter-rang dans la surface totale du couple vigne/inter-rang, soit :

$$(4) \quad \begin{aligned} P_1^j &= p_{IR} * P^j \\ P_2^j &= (1 - p_{IR}) * P^j \end{aligned}$$

Quand on souhaite modéliser la situation d'un fossé, p_{IR} est fixé à 1.

- ruissellement

Dans Walis, le calcul du ruissellement se fait selon la méthode dite du « *curve number* », mise au point par le ministère de l'agriculture des Etats-Unis en 1972. Pendant un épisode de pluie, le

ruissellement débute à partir d'un seuil de précipitation qui dépend des caractéristiques du sol – représentées par le *curve number* – et des précipitations sur les 5 derniers jours. Une fois ce seuil atteint, la quantité d'eau ruissellée va dépendre du *curve number* et des précipitations du jour. En pratique, on distingue pour chaque parcelle 3 *curve numbers*, caractérisant la parcelle en situation sèche, en situation intermédiaire et en situation de saturation en eau. Walis distingue le ruissellement sur le rang et sur l'inter-rang, avec des valeurs de *curve number* différentes associées. La situation de la parcelle est déterminée par des valeurs seuils a_i et b_i du cumul de pluie pour les deux compartiments. $cn1_i$ correspond au *curve number* pour le compartiment en situation sèche, $cn2_i$ au *curve number* du compartiment en situation intermédiaire et $cn3_i$ au *curve number* du compartiment en situation de saturation en eau. Les valeurs seuils de cumul de pluie sont propres à chaque compartiment, en revanche le cumul de pluie $P5^j$ est calculé à partir de la pluie reçue par les deux compartiments.

$$(5) \quad Sruis_i^j = \begin{cases} 254 \cdot \left(\frac{100}{cn1_i} - 1 \right) & \text{si } P5^j < a_i \\ 254 \cdot \left(\frac{100}{cn2_i} - 1 \right) & \text{si } b_i \leq P5^j \leq a_i \\ 254 \cdot \left(\frac{100}{cn3_i} - 1 \right) & \text{si } P5^j > b_i \end{cases}$$

Les *curve number* 1 et 3 sont le plus souvent déduits du *curve number* 2, soit :

$$(6) \quad \begin{aligned} cn1_i &= \frac{4.2 * cn2_i}{10 - 0.058 * cn2_i} \\ cn3_i &= \frac{23 * cn2_i}{10 + 0.13 * cn2_i} \end{aligned}$$

Comme pour le calcul des valeurs seuil du ruissellement, le ruissellement sur chaque compartiment est calculé à partir de la pluviométrie sur toute la parcelle. Tant que la quantité de pluie reçue par l'ensemble de la parcelle ne dépasse pas 20 % de la valeur seuil du compartiment, le ruissellement est nul pour ce compartiment.

$$(7) \quad \begin{aligned} R_1^j &= \begin{cases} \left(\frac{P^j - 0.2 \cdot Sruis_1^j}{P^j + 0.8 \cdot Sruis_1^j} \right)^2 \cdot p_{ir} & \text{si } P^j > 0.2 \cdot Sruis_1^j \\ 0 & \text{si } P^j \leq 0.2 \cdot Sruis_1^j \end{cases} \\ R_2^j &= \begin{cases} \left(\frac{P^j - 0.2 \cdot Sruis_2^j}{P^j + 0.8 \cdot Sruis_2^j} \right)^2 \cdot p_{ir} & \text{si } P^j > 0.2 \cdot Sruis_2^j \\ 0 & \text{si } P^j \leq 0.2 \cdot Sruis_2^j \end{cases} \end{aligned}$$

- transpiration et évapotranspiration

Les valeurs de transpiration, d'évaporation et d'évapotranspiration seront déduites de l'évapotranspiration de référence calculée selon le formalisme de Monteith (1965), notée ETP. Les valeurs journalières de l'ETP font partie des données d'entrée du modèle.

Avant le débourrement (i.e. l'ouverture des bourgeons, noté j_{dbt}) et après que les feuilles sont tombées (noté j_{transp}), la vigne ne transpire pas, le coefficient cultural k_v^j est nul. A partir du débourrement, le coefficient cultural augmente progressivement jusqu'à atteindre un seuil k_{max} déterminé par un cumul de températures journalières, noté $ST_{k_{max}}$. Dans notre modèle, ce cumul est fixé à 600 °C.jour. 15 jours avant le jour de l'arrêt de la transpiration j_{transp} marqué par la chute de toutes les feuilles, le coefficient cultural décroît linéairement jusqu'à atteindre 0 (Celette, 2007).

$$(8) \quad k_v^j = \begin{cases} 0 & \text{si } (j < j_{dbt}) \\ k_{max} \cdot \frac{ST_v^j}{ST_{k_{max}}} & \text{si } (j_{dbt} \leq j < j_{transp} - 15) \text{ et } (ST_v^j < ST_{k_{max}}) \\ k_{max} & \text{si } (j_{dbt} \leq j < j_{transp} - 15) \text{ et } (ST_v^j \geq ST_{k_{max}}) \\ k_{max} \cdot \left(1 - \frac{j_{transp} - j}{15}\right) & \text{si } (j_{transp} - 15 \leq j < j_{transp}) \\ 0 & \text{si } (j \geq j_{transp}) \end{cases}$$

Le calcul du temps thermique ST_v^j ne commence qu'à partir du jour de débourrement et s'arrête au jour d'arrêt de la transpiration. Durant cette période, ST_v^j se calcule :

$$(9) \quad ST_v^j = \sum_{j_{dbt}}^j \max(0, Temp^j - Temp_{b,v})$$

$Temp_{b,v}$ correspond à la température de base de la vigne (10°C dans Lebon et al., 2003).

Pour le calcul de la transpiration de la vigne, on considère que l'eau du sol devient limitante quand la fraction transpirable d'eau du sol pour la vigne ($FTSW_v$) est inférieure au seuil de déclenchement du stress hydrique $FTSW_{reg,v}$. La transpiration va alors décroître linéairement selon le ratio $FTSW_v$ sur $FTSW_{reg,v}$ (Lebon et al., 2003).

$$(10) \quad T^j = k_v^j * ETP^j * WI_{T_v}^j$$

avec $WI_{T_v}^j = \min\left(1, \frac{FTSW_v^{j-1}}{FTSW_{reg,v}}\right)$

$WI_{T_v}^j$ est un facteur de stress hydrique sur la transpiration de la vigne au jour j.

L'eau transpirée par la vigne est répartie entre les deux compartiments, selon l'eau disponible dans chaque compartiment.

$$(11) \quad T_1^j = \frac{ASW_1^{j-1}}{ASW_1^{j-1} + ASW_2^{j-1}} * T^j$$

$$T_2^j = \frac{ASW_2^{j-1}}{ASW_1^{j-1} + ASW_2^{j-1}} * T^j$$

T_1^j et T_2^j l'eau transpirée au jour j provenant des compartiments 1 et 2 respectivement.

ASW_1^{j-1} et ASW_2^{j-1} l'eau disponible au jour j-1 dans les compartiments 1 et 2.

T^j l'eau transpirée par la vigne au jour j.

La modélisation des aspects hydriques du couvert végétal suit un formalisme similaire, basé sur les travaux de Cros et al., (2003) et Duru et al., (2009). La croissance du LAI va dépendre d'un indice WI_{LAIh}^j représentant le stress hydrique, qui prend en compte la fraction d'eau transpirable dans le compartiment 1 ($FTSW_1^j$) et le seuil de FTSW en dessous duquel la croissance du LAI est perturbée ($FTSW_{reglai}$) (Volaire & Lelièvre, 2001).

$$(12) \quad WI_{LAIh}^j = \min\left(1, \frac{FTSW_1^j - 0.1}{FTSW_{reglai} - 0.1}\right)$$

En retour, la végétation va affecter le bilan hydrique par évapotranspiration, qui va dépendre de l'ETP, du p_{IR} , du coefficient cultural journalier de la vigne k_v^j , du coefficient cultural global de la végétation k_h^j et d'un indice de stress hydrique WI_{ETH}^j .

$$(13) \quad ET_1^j = ETP^j * p_{IR} * (1 - k_v^j) * k_h^j * WI_{ETH}^j$$

Le coefficient cultural de l'enherbement k_h^j peut être calculé à partir du LAI_{TOT} du couvert végétal, du coefficient d'extinction ϵ (fixé à 0,6 dans la littérature) et du coefficient cultural maximal du couvert végétal k_{max} (fixé à 0,95 dans notre modèle).

$$(14) \quad k_h^j = k_{max} * (1 - e^{-\epsilon * LAI_{TOT}^j})$$

L'indice de stress hydrique WI_{ETH}^j représente l'impact d'un manque d'eau sur l'évapotranspiration et dépend de la fraction d'eau transpirable dans le compartiment 1 et d'une valeur seuil $FTSW_{regtrans}$.

$$(15) \quad WI_{ETH}^j = \min\left(1, \frac{FTSW_1^j}{FTSW_{regtrans}}\right)$$

L'évaporation du sol sous le rang est basée sur la modélisation de Ritchie (1972, reprise dans Brisson & Perrier, 1991 ; Brisson et al., 1992). Ce modèle considère que l'évaporation dépend d'une couche de sol d'épaisseur U qui se remplit lors des pluies et s'évapore au fil de la demande climatique. Si l'eau dans la couche devient limitante, on entre dans une deuxième phase d'évaporation.

Si l'eau dans la couche U n'est pas limitante, c'est-à-dire que la somme de l'évaporation réelle entre le dernier jour de pluie et le jour actuel est inférieure à U , on considère que l'évaporation du sol est égale à son évaporation potentielle, déduite du modèle de Riou pour un sol nu (Riou et al., 1994). Lorsque l'eau dans la couche U devient limitante, on déduit l'évaporation d'une équation proposée par Brisson & Perrier (1991).

Walis est basé sur cette modélisation mais l'utilisation est différente. Le calcul repose sur la quantité d'eau restante après évaporation plutôt que sur le cumul d'eau évaporée. L'approche de Walis a plusieurs hypothèses :

- la couche superficielle est remplie le premier jour
- la couche superficielle a une contenance maximale de $(1 - p_{IR}) * U$

- la couche ne peut se vider que par évaporation, il n'y pas de drainage
- la couche ne se remplit que grâce aux pluies et ne peut pas déborder (i.e. pas de ruissellement)

$$\begin{aligned}
 B^0 &= (1 - p_{IR}) * U \\
 B^1 &= \max(0, \min((1 - p_{IR}) * U, B^{j-1} + P_1^j - Es^j)) \\
 (16) \quad Si \ Es_p^j < B^j, \ Es^j &= Es_p^j = (1 - p_{IR}) * (1 - k_v^j) * ETP^j \\
 Sinon, \ Es^j &= B^{j-1} + \sqrt{2 * b * Es_p^j + b^2} - \sqrt{2 * b * Es_p^{j-1} + b^2} \\
 avec \ Es_p^j &= Es_p^{j-1} + E_p^j - B^{j-1}
 \end{aligned}$$

B^0 la quantité d'eau contenue dans la couche superficielle du rang le premier jour de simulation

B^1 la quantité d'eau contenue dans la couche superficielle du rang le jour j de simulation

Es^j évaporation réelle du sol le jour j de simulation.

Es_p^j évaporation potentielle le jour j de simulation.

b constante caractérisant le sol du rang sur la parcelle.

Enfin, le modèle de croissance végétale doit pouvoir simuler le développement de la végétation dans un fossé, ce qui implique de simuler le niveau d'eau journalier dans le fossé, noté $WaterLevel^j$.

$$(17) \quad WaterLevel^j = \min(ditch_{depth}, \max(0, WaterLevel^{j-1} + P^j - ETP^j - D_{ditch}^j))$$

$ditch_{depth}$ est la profondeur du fossé, donc le niveau d'eau maximal, P^j la pluie totale sur la parcelle, ETP^j l'évaporation potentielle, et D_{ditch}^j le drainage du fossé au sol situé sous le lit du fossé, calculé comme le drainage du compartiment 1 au compartiment 2 (cf équation n°3).

1.2. Module végétation

1.2.1 De la sortie de dormance à l'émergence

A partir du stock initial de graines fixé par l'utilisateur, le modèle calcule chaque jour le nombre de graines pouvant potentiellement sortir de dormance, sur la base d'un nombre de graines « potentielles » égal à l'inverse de la surface recouverte par un plant (en m², Fig. 1). Outre la prise en compte de la période de floraison de l'espèce considérée, ce nombre est déterminé par la tolérance de chaque espèce simulée à différents facteurs, tels que l'humidité, la perturbation liée à l'activité agricole, ou encore des fortes chaleurs. En cas de traitement dans les deux mois précédant le jour du calcul, ce nombre est fixé à 0 sauf en cas de résistance au traitement observée expérimentalement.

Les graines « potentielles » sont converties en graines « non dormantes » lorsque la dormance est levée. La sortie de dormance dépend de la période de floraison de l'espèce considérée (printemps, noté 1, automne, noté 2, ou bien les deux, noté 3), les différentes périodes au cours de l'année sont séparées par le 1^{er} jour de printemps et le 1^{er} jour de l'été. En fonction de la période de floraison de l'espèce, la sortie de dormance peut aussi dépendre d'un cumul de pluie. Enfin, la sortie de dormance n'est pas possible lorsqu'un traitement chimique préventif a été appliqué moins de 145 jours avant le jour actuellement simulé.

A partir du nombre de graines « non dormantes », le nombre de graines qui va effectivement germer est défini à partir du concept de temps hydrothermal développé par Gummerson (1986), qui consiste à prendre en compte le cumul de potentiel hydrique du sol en plus du cumul de température pour déterminer la durée de la germination. Le temps hydrothermal HT revient donc à réaliser la somme des différences entre les températures du sol T_{soil}^j et les potentiels hydriques ψ_{soil}^j observés et leurs valeurs seuils respectives T_{min} et ψ_{min50} . Le temps hydrothermal et la température de base peuvent être considérés constants pour une même espèce au cours du temps, tandis que le potentiel hydrique minimum est normalement distribué (Paré, 2011 ; Meyer et al., 2000), ce qui permet de définir l'équation suivante (équation n°18; Bradford, 1990), avec gt la proportion de graines germées, le probit étant l'inverse d'une fonction cumulative normale.

$$(18) \text{probit}_{gt} = \frac{\sum_{j_{germ}}^j \psi_{soil}^j - \psi_{min50}}{j_{julien} - j_{germ}} * \frac{HT}{\sum_{j_{germ}}^j T_{soil}^j - T_{min}} \frac{1}{STDASW_{min}}$$

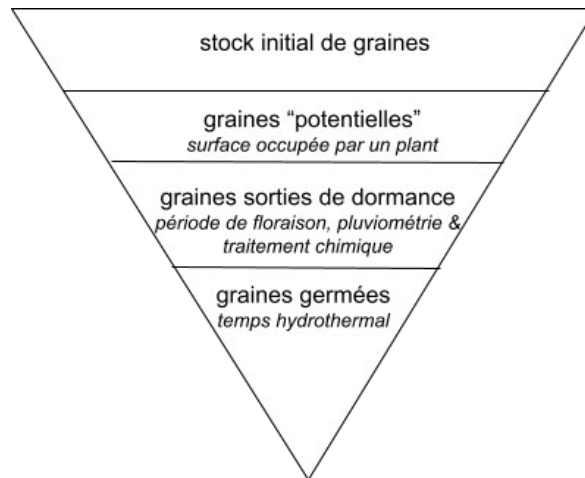


Figure 1 Fonctionnement du module de germination représentant les 4 « états » possibles des graines dans le modèle. Les critères de passage de chaque état sont en italique.

1.2.2 Croissance végétale

- stockage des informations

Deux des principales variables du modèle sont spVAR et COH. spVAR est une liste stockant les informations de chaque espèce dans un vecteur. spVAR est mis à jour à chaque pas de temps. spVAR contient des informations sur la banque de graines, l'état de dormance (binaire), le nombre de graines pouvant sortir de dormance, le nombre de graines sorties de dormance, le nombre de graines pouvant germer et le nombre de graines ayant germé, ainsi que le dernier jour où des graines de l'espèce ont germé. spVAR contient aussi des informations sur les sommes de potentiel hydrique et de température du sol, associées au temps hydrothermal nécessaire à la germination. Enfin, spVAR va aussi contenir la valeur de Wi_{LA1h}^j (équation n°12).

COH est une liste contenant une liste pour chaque espèce simulée, qui à son tour contient des vecteurs stockant les informations de chaque cohorte d'espèce qui s'est développée. Pour chaque cohorte, on stocke le nombre d'individus, leur stade de développement, le cumul de température depuis l'émergence de la cohorte (STTpc), le LAI, la croissance du LAI (GLAI), sa décroissance (SLAI) et sa sénescence maximale (LAI_{senmax}), différentes masses sèches (feuilles, tissus verts, tissus non chlorophylliens, et litière), le pourcentage de couverture végétale (FVC) et la hauteur de la cohorte.

- développement de la végétation

La simulation du cycle de vie des plantes est composée de trois stades : le stade végétatif, la floraison et la sénescence. Le passage d'un stade à un autre se fait en fonction du cumul de température STTpc, selon des paliers fixés par l'utilisateur dans le tableau de données d'entrée.

Le calcul du LAI, de sa croissance et de sa diminution sont tirés de la notice du modèle Walis (Celette et al., 2011), qui reprend des relations établies par Duru et al., (2009) et Cros (2003). Le GLAI dépend de la masse sèche préexistante de la cohorte, de la température journalière moyenne, de l'indice de stress hydrique WI_{LAH}^j , d'un indice de nutrition azoté NNI et d'un coefficient de croissance du LAI noté LAI_{rate}. Duru et al., (2008) et Cros et al., (2003) ont déterminé la valeur du LAI_{rate} expérimentalement, nous avons choisi de déterminer les valeurs spécifiques à partir de trois valeurs mesurées dans la littérature : le taux de croissance relatif (RGR), le rapport masse foliaire/masse totale (LWR), et la *specific leaf area* (SLA). Selon Duru et al., (2008), l'effet de la température journalière moyenne sur la croissance n'évolue plus au-delà de 18°C, ce qui correspond à l'estimation de la température journalière moyenne lors d'une température journalière maximale de 25°C, qui est la valeur pour laquelle le seuil a été observé (Robson, 1973).

$$(19) \ COH(GLAI^j) = sp(LAI_{rate}) * COH(DW_{leaf}^j) * 1,71 * 10^{-3} \\ [*min(18.0, max(0.0, Temp^j))^2 * sp(WI_{LAH}^j) * sp(NNI)]$$

La sénescence foliaire dépend de la sénescence maximale possible (LAI_{senmax}), et du rapport entre la température journalière et la valeur de cumul de température à partir de laquelle la sénescence débute (LLS_{min}). Tant que le seuil de températures cumulées LLS_{min} n'est pas franchi, LAI_{senmax} est égal à 0.

$$(20) \ COH(SLAI^j) = COH(LAI_{senmax}^j) * \frac{min(18.0, max(0.0, Temp^j))}{COH(LLS_{min})}$$

Finalement, pour chaque cohorte de chaque espèce présente, le LAI journalier sera égal au LAI du jour précédent, auquel on ajoute le GLAI et retire le SLAI.

$$(21) \ COH(LAI^j) = COH(LAI^{j-1}) + COH(GLAI^j) - COH(SLAI^j)$$

A partir du LAI journalier, on détermine la masse sèche foliaire (DW_{leaf}), la masse sèche des tissus chlorophylliens (DW_{greenstem}), la masse sèche des tissus non-vert (DW_{drystem}), ainsi que la masse sèche de litière produite par la sénescence foliaire.

$$\begin{aligned}
COH(DW_{leaf}^j) &= \frac{COH(LAI^j)}{sp(LAR)} & COH(DW_{litter}^j) &= \frac{COH(SLAI^j)}{sp(LAR)} \\
&\text{Avant le début de la sénescence :} \\
(22) \quad COH(DW_{greenstem}^j) &= \frac{COH(DW_{leaf}^j)}{sp(LSR)} \\
&\text{Après le début de la sénescence :} \\
COH(DW_{drystem}^j) &= COH(DW_{drystem}^{j-1}) + COH(DW_{greenstem}^j)
\end{aligned}$$

La couverture végétale est déterminée à partir d'une relation exponentielle avec le LAI multiplié par un coefficient LAI_{FVC} documenté dans la littérature (Kattge et al., 2020).

$$(23) \quad COH(FVC^j) = 1 - e^{-sp(LAI_{FVC}) * COH(LAI^j)}$$

La hauteur de la cohorte est calculée à partir de la masse sèche globale DW multipliée par deux coefficients, DW_H1 et DW_H2, déterminés expérimentalement et extraits de la base de données TRY (Kattge et al., 2020) pour les espèces retenues dans le modèle.

$$(24) \quad COH(H^j) = (sp(DW_{H1}) * DW^j)^{DW_{H2}}$$

Pour caractériser le couvert végétal dans sa totalité, on calcule aussi une valeur de FVC totale (FVC_{TOT}) ainsi qu'une valeur de LAI totale (LAI_{TOT}). La couverture végétale totale est estimée par la somme des couvertures végétales des cohortes de toutes les espèces présentes multipliée par le nombre d'individus de la cohorte et la surface couverte par un individu de l'espèce à laquelle appartient la cohorte.

$$(25) \quad FVC_{TOT}^j = \sum_{sp} \sum_{COH} COH(FVC^j) * COH(NB_{germ}) * sp(groundcover)$$

Le LAI total est calculé de manière identique, en remplaçant la valeur du FVC pour chaque cohorte par celle du LAI.

$$(26) \quad LAI_{TOT} = \sum_{sp} \sum_{COH} COH(LAI^j) * COH(NB_{germ}) * sp(groundcover)$$

1.3. Module agronomique

1.3.1 Traitements appliqués à la parcelle

Le modèle permet de prendre en compte 6 types de traitement : le brûlis, la tonte, le désherbage chimique, le curage et le labour. Le brûlis et le curage sont des traitements uniquement applicables aux fossés, le labour est uniquement applicable à l'inter-rang de vigne.

Le brûlis est modélisé par destruction complète de toutes les masses sèches et la production de cendres, dont la quantité est déterminée par la somme des masses sèches brûlées multipliée par un coefficient de conversion en cendres.

Lors d'un événement de tonte, seules les cohortes dont la hauteur dépasse la hauteur de tonte seront affectées. Leur hauteur sera fixé à la hauteur de tonte, qui sera utilisée pour recalculer la

masse sèche de feuille (équation 27), ce qui permettra d'obtenir les valeurs de LAI et des autres masses sèches à partir de l'équation 22.

$$(27) \quad COH(H^j) = H_{tonte}$$

$$si H = (DW_{H1} * DW_{leaf})^{DW_{H2}} \quad alors \quad COH(DW_{leaf}) = \frac{H^{1/DW_{H2}}}{DW_{H1}}$$

Le désherbage chimique peut être simulé de deux manières différentes, pour prendre en compte soit l'effet d'un traitement de pré-levée, soit un traitement post-émergence. Le traitement pré-levée va simplement consister à retarder la date à partir de laquelle la germination est possible. Cette date est initialement fixée à la date de début de la simulation, puis est fixée à 145 jours après l'application du traitement. La durée de retard de germination est fixée par l'utilisateur. Le traitement post-émergence va réduire le LAI d'un coefficient noté *reductionLAI*, et forcer le GLAI à 0 pour le jour d'application. La diminution du LAI est répercutée sur la masse sèche des feuilles et des tissus verts, selon les relations allométriques ci-dessus (équation n°22).

Le curage d'un fossé est une opération consistant à araser une bande de terre de quelques centimètres via un tractopelle sur le fossé pour arracher la végétation présente et mettre le sol à nu, les masses sèches seront aussi toutes remises à zéro ainsi que la quantité de cendres et les valeurs associées aux masses sèches (i.e. FVC, LAI, hauteur).

Le labour est modélisé par une remise à zéro des sommes de température et d'humidité du sol, ainsi que par un forçage de la dormance pour toutes les espèces.

2. Paramétrisation du modèle

Le modèle de croissance végétale nécessite 4 jeux de données : un tableau contenant les données climatiques journalières (température moyenne, quantité de pluie, et évapotranspiration potentielle de Penman-Monteith), qui va fixer la durée de la simulation ; un tableau contenant les informations relatives à la croissance de la vigne (coefficient cultural, date de débourrement, ...) ; un tableau caractérisant les compartiments du sol (profondeur, quantité maximale d'eau transpirable, proportion d'inter-rang sur la parcelle, ...), et un tableau contenant les informations spécifiques aux espèces végétales (ex : saison de floraison, durée de vie des feuilles en degrés-jour, surface recouverte par un plant, ...). Pour les trois premiers tableaux, les informations dépendent du contexte de simulation et proviennent majoritairement de l'utilisateur. Le tableau d'informations spécifiques (ensuite désigné par *spFIX*), est construit autant que possible sur des données extraites de la littérature, la plupart ayant été agrégées dans la base de données TRY (Kattge et al., 2020). Lorsque la valeur d'un paramètre n'était pas disponible pour l'espèce, la valeur pour le genre a été prise, si il n'y avait pas de valeur pour le genre, la valeur pour la famille a été recherchée, et si aucune valeur n'a été trouvée à ce niveau, une valeur moyenne du paramètre était retenue pour cette espèce.

Le chargement des informations contenues dans les différents jeux de données est contenu dans un script annexe à celui contenant le modèle. Les valeurs des paramètres qui ne sont pas définis dans un des 4 jeux de données (ex : la durée d'efficacité du traitement pré-émergence, les dates de début du printemps et du début de l'été en jours depuis le 1^{er} janvier, ...) sont fixées dans ce script. Ce script permet aussi de décider de simuler la végétation dans le couple vigne/inter-rang ou le

fossé. Les traitements à appliquer au cours de la simulation sont extraits d'un fichier texte renseignant le type de traitement, sa date et les paramètres associés dans certains cas (ex : hauteur de tonte, molécule désherbante utilisée). Ce script contient une fonction permettant d'observer les résultats du modèle faisant appel à la librairie xts (v.0.12.1 ; Ryan & Ulrich, 2020) afin de pouvoir observer des séries temporelles et la librairie dygraphs (v.1.1.1.6. ; Vanderkam et al., 2018) qui permet de produire des graphiques permettant de visualiser une période de temps précise au sein des données simulées.

Le choix des espèces simulées par le modèle s'est effectué en fonction de relevés de végétation réalisés dans des vignes du bassin méditerranéen (Fried et al., 2019 ; Rudi et al., 2018 ; Paré, 2011), en s'appuyant aussi sur la flore de Julve (1998) pour compléter nos informations, notamment pour conserver des espèces caractéristiques du milieu mais absentes lors des campagnes d'observation, souvent réalisées à la même période de l'année. Les espèces les plus fréquentes et/ou les plus dominantes ont été retenues, ainsi que des espèces retrouvées après un traitement particulier. Au final, 37 espèces ont été retenues pour la modalité vigne/inter-rang et 31 pour la modalité fossé. Au final, 37 espèces ont été retenues pour la modalité vigne/inter-rang et 31 pour la modalité fossé.

Ensuite, des conditions différentes pouvant entraîner des assemblages de végétation différents et en suivant la théorie selon laquelle le fonctionnement d'un écosystème est déterminé par ses espèces dominantes, nous avons cherché à optimiser le modèle en retirant chaque espèce tour à tour afin d'observer l'adéquation avec les données expérimentales.

3. Matériel et Méthodes

3.1. Jeux de données utilisés pour la calibration et la validation du modèle

3 jeux de données ont été utilisés pour valider le modèle, correspondant à trois situations différentes. Un premier jeu de données, extrait de la notice du modèle Walis, comporte des informations sur la fraction d'eau transpirable du sol entre le 1^{er} juin 2000 et le 17 décembre 2006 à Puisserguier, une commune au nord-est de Montpellier, pour une parcelle desherbée (Walis-1) et une parcelle enherbée (Walis-2). Le second jeu de données a été récolté entre avril 2015 et mai 2016 dans des fossés entourant des parcelles de vignes de la commune d'Alignan, au sud-ouest de Montpellier. Ce jeu de données contient des informations sur le couvert végétal et la hauteur de la végétation, pour 5 modalités : un fossé soumis à des opérations de désherbage (Alignan-1), un fossé soumis à des opérations de curage (Alignan-2), un fossé soumis à des opérations de tonte (Alignan-3), un fossé soumis à des opérations de brûlis (Alignan-4), et un fossé contrôle (Alignan-C). Les données sont extraites d'un article réalisé à partir de ces données (Dollinger et al., 2017). Le dernier jeu de données provient d'une récolte réalisée entre avril 2019 et juin 2019 par Victor Giffone lors d'un stage de fin d'études sur des parcelles de vigne aux alentours de Roujan (Giffone, 2019). Les relevés de hauteur moyenne de la végétation ont été extraits pour 3 parcelles présentées dans le rapport choisies pour les traitements appliqués sur celles-ci : une première parcelle sur laquelle un labour et un désherbage chimique ont été effectués (Roujan-1), une seconde sur laquelle seul un labour a été effectué au cours du relevé (Roujan-2), et une troisième sur laquelle la végétation a été fauchée (Roujan-3).

Tableau 1 Récapitulatif des 3 jeux de données utilisés pour la validation du modèle

Localisation	Période étudiée	Variable(s) mesurée(s)	Parcelles
Puisserguier	06/2000 - 12/2006	fraction d'eau transpirable dans le sol (FTSW)	Walis-1 (désherbage régulier) Walis-2 (pas de désherbage)
Alignan	04/2015-05/2016	pourcentage de couverture végétale, hauteur maximale de la végétation	Alignan-1 (opérations de désherbage) Alignan-2 (opérations de curage) Alignan-3 (opérations de tonte) Alignan-4 (opérations de brûlis) Alignan-C (pas de traitement)
Roujan	04/2019-06/2019	hauteur moyenne de la végétation	Roujan-1 (opérations de labour et de désherbage) Roujan-2 (opération de labour) Roujan-3 (opération de tonte)

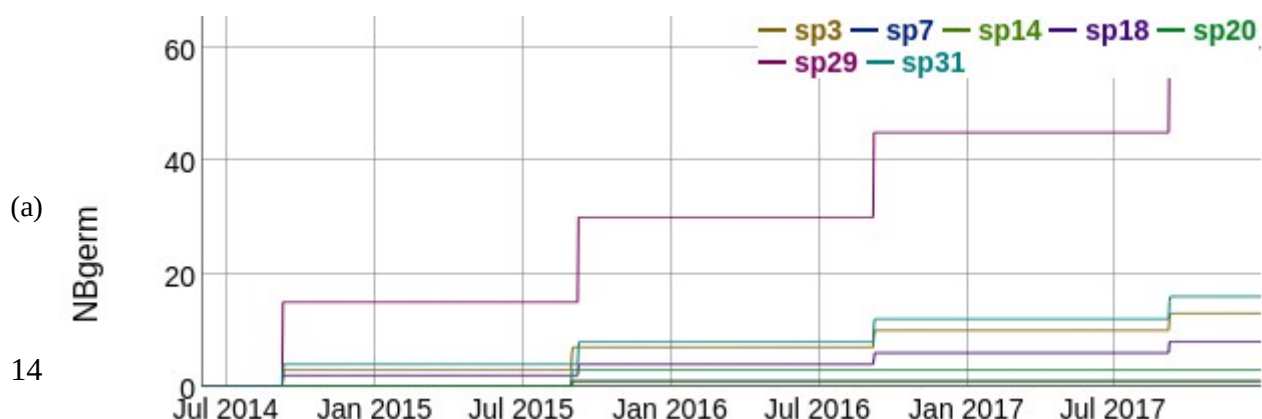
3.2. Calibration et validation du modèle

Pour la validation du modèle, nous avons choisi de nous intéresser au nombre de simulations pour lesquelles la racine de la somme au carré des écarts (RMSE) entre les valeurs mesurées sur le terrain et les valeurs simulées pour les jours de mesure était inférieure à 20, seuil en dessous duquel nous considérons que la dynamique du couvert végétal est suffisamment reproduite par notre modèle. Une optimisation des résultats du modèle a été réalisée pour tous les jeux de données grâce à une itération testant l'effet sur le RMSE du retrait de chaque espèce tour à tour, l'espèce étant retirée du tableau d'entrée en cas de RMSE réduit. Nous avons choisi de démarrer les simulations environ 6 mois avant la date à laquelle le premier relevé a été fait pour chaque modalité, afin de permettre à une végétation de se développer dans nos simulations avant de commencer la comparaison avec les données expérimentales.

4. Résultats

4.1. Comportement général du modèle

Les simulations du modèle réalisées sans comparaison avec des données expérimentales montrent que sur une trentaine d'espèces potentiellement présentes, moins d'une dizaine d'entre elles va se développer, pour la modalité vigne/inter-rang (Fig. 2a) comme pour la modalité fossé (Fig. 2b). En absence de traitement appliqué, les premières espèces qui se développent restent tout au long de la simulation, et aucune nouvelle espèce ne se développe. Pour les simulations basiques du couple vigne/inter-rang, la quantité d'eau dans le sol varie cycliquement au fil des années, le point le plus bas étant atteint pendant l'été.



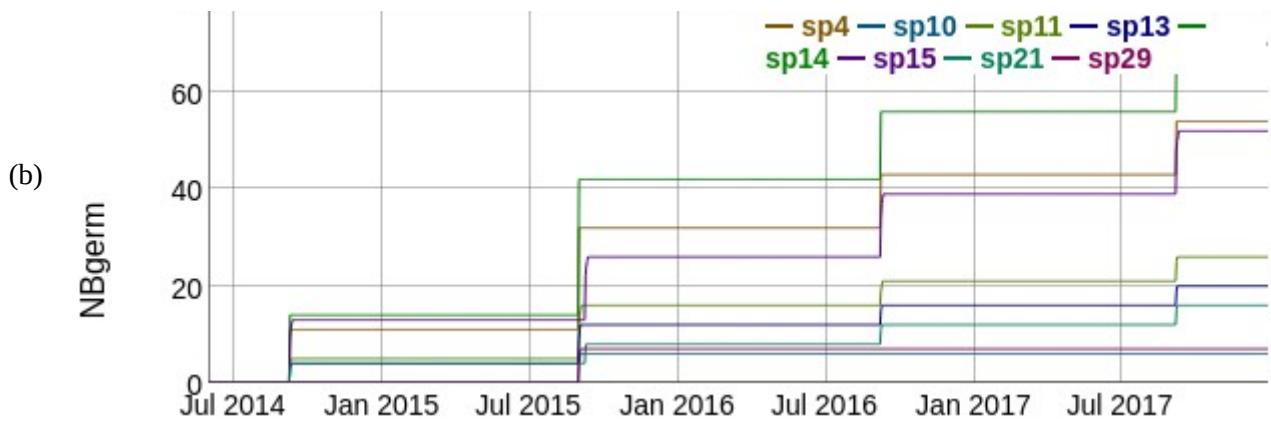


Figure 2 Evolution du nombre de graines ayant germé (NBgerm) depuis le début de la simulation, de juillet 2014 à août 2018, pour la modalité vigne/inter-rang (a) et pour la modalité fossé (b)

Pour les simulations du couple vigne/inter-rang sans traitements appliqués sur la parcelle, la quantité d'eau dans le sol varie cycliquement au fil des années, le point le plus bas étant généralement atteint pendant l'été.



Figure 3 Evolution de la fraction journalière d'eau transpirable du juillet 2014 à août 2018 dans les deux compartiments pour la modalité vigne/inter-rang (a), et dans le compartiment 1 pour la modalité fossé (b)

Le LAI moyen de chaque espèce présente dans la simulation du couple vigne/inter-rang varie cycliquement au cours des années, avec des valeurs maximales atteintes pendant l'été (Fig. 4a). Ce comportement est retrouvé dans la simulation du fossé avec des valeurs de LAI légèrement supérieures à celles de la simulation du couple vigne/inter-rang (Fig. 4b).

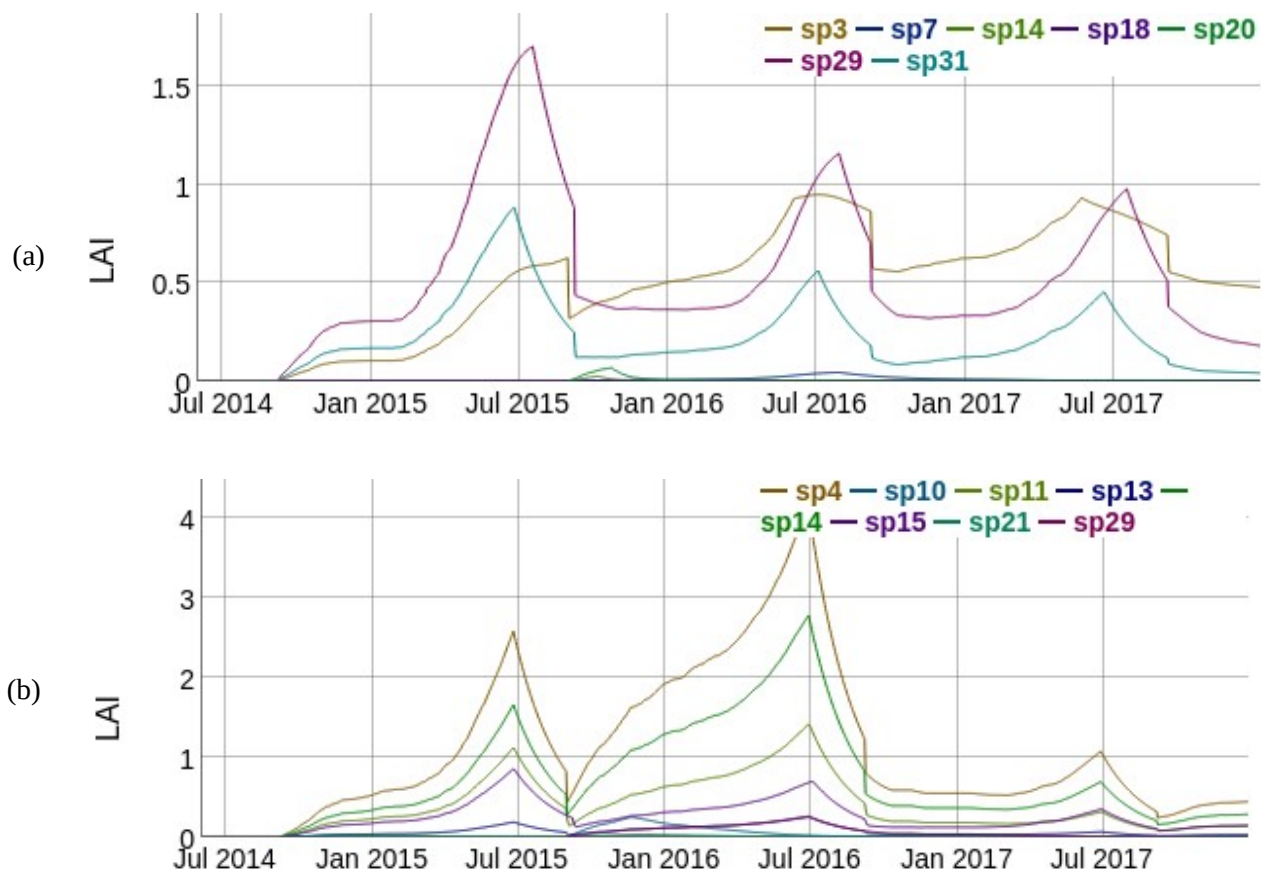


Figure 4 Evolution du LAI moyen pour les espèces végétales ayant germé lors d'une simulation réalisée à partir de données météo enregistrées entre 2014 et 2017, pour la modalité vigne/inter-rang (a) et la modalité fossé (b)

Les masses sèches foliaires et de tissus verts ne dépassent pas 2 grammes par m^2 pendant toute la période entre le désherbage et la tonte, puis augmentent rapidement après la tonte jusqu'à dépasser 4 g/m^2 . Grâce à l'augmentation de la masse sèche de tissus verts, la masse sèche de tissus non verts dépasse 10 g/m^2 aux alentours de mi-juin 2002 puis décroît jusqu'à atteindre 8 g/m^2 avant le brûlis, qui ramène toutes les masses sèches sauf celle des cendres à 0 g/m^2 . Après le brûlis, les masses sèches restent inférieures à 2 g/m^2 jusqu'à avril 2004 environ puis les masses sèches foliaires et de tissus verts augmentent rapidement et en août 2004 atteignent respectivement 5 g/m^2 et 10 g/m^2 environ. La masse sèche de tissus verts est ensuite totalement convertie en tissus non-verts et ne dépasse plus 2 g/m^2 jusqu'à la fin de la simulation (Fig. 5).

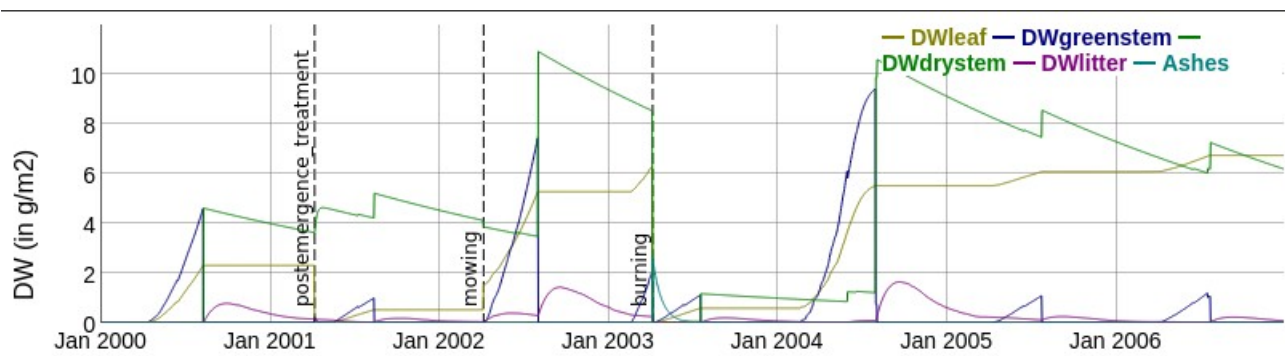


Figure 5 Masses sèches totales (en g/m²) au cours d’une simulation de la végétation d’un fossé entre janvier 2000 et décembre 2006. Les lignes pointillées verticales représentent des traitements, respectivement un désherbage chimique le 08/04/2001, une tonte le 08/04/2002 et un brûlis le 08/04/2003

4.2 Validation du modèle

- Espèces représentées

A l’exception de deux espèces, les espèces retenues pour simuler la modalité fossé et celles retenues pour la modalité vigne/inter-rang ne sont pas les mêmes, ce qui a nécessité de rassembler des informations sur 66 espèces au total. Pour les données potentiellement disponibles dans la base de données TRY (Kattge et al., 2020), cela représentait plus de 500 valeurs à récupérer. Dans ce total, environ 40% des valeurs ont pu être trouvées à l’échelle de l’espèce, et 20% à l’échelle du genre (Tab. 2).

Tableau 2 Nombre total d’espèces utilisées par le modèle, nombre de familles concernées et proportions des valeurs utilisées provenant de la base de données TRY (Kattge et al., 2020) pour 3 niveaux de classification : espèce, genre, et famille

Nombre d’espèces	Nombre de familles	Données extraites la base de données TRY (en %)		
		Espèce	Genre	Famille
66	25	39.5	20.4	7.2

- jeu de données Walis

La simulation réalisée selon les conditions de la parcelle Walis-1 produit une évolution de la fraction transpirable d’eau dans le sol qui suit la même tendance que la FTSW mesurée sur la parcelle. Au début de la simulation, le modèle simule des valeurs de FTSW supérieures à celles observées sur Walis-1, puis les valeurs se rapprochent au fil de la simulation (Fig. 6). Le RMSE est égal à 0,214.

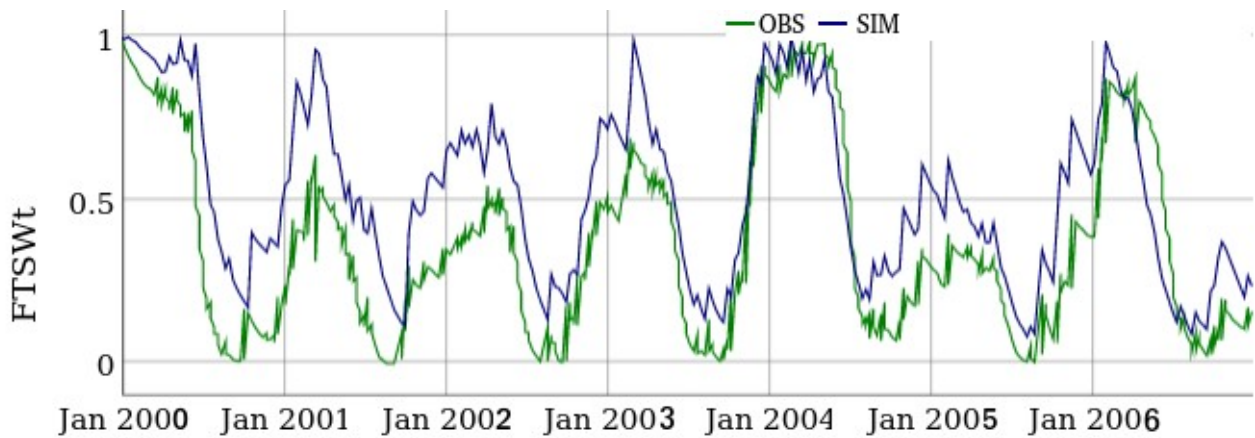


Figure 6 Comparaison FTSW totale simulée par le modèle (SIM, en bleu) aux données de la parcelle Walis-1 (OBS, en vert) pour une parcelle de vigne désherbée située à Puisserguier, entre 2000 et 2006.

La simulation réalisée selon les conditions de la parcelle Walis-2 produit une évolution de la fraction transpirable d'eau dans le sol similaire à celle observée sur la parcelle, à l'exception des mois de janvier 2004 et 2006, où les valeurs simulées sont très inférieures aux valeurs mesurées (Fig. 7). Le RMSE est égal à 0,206.

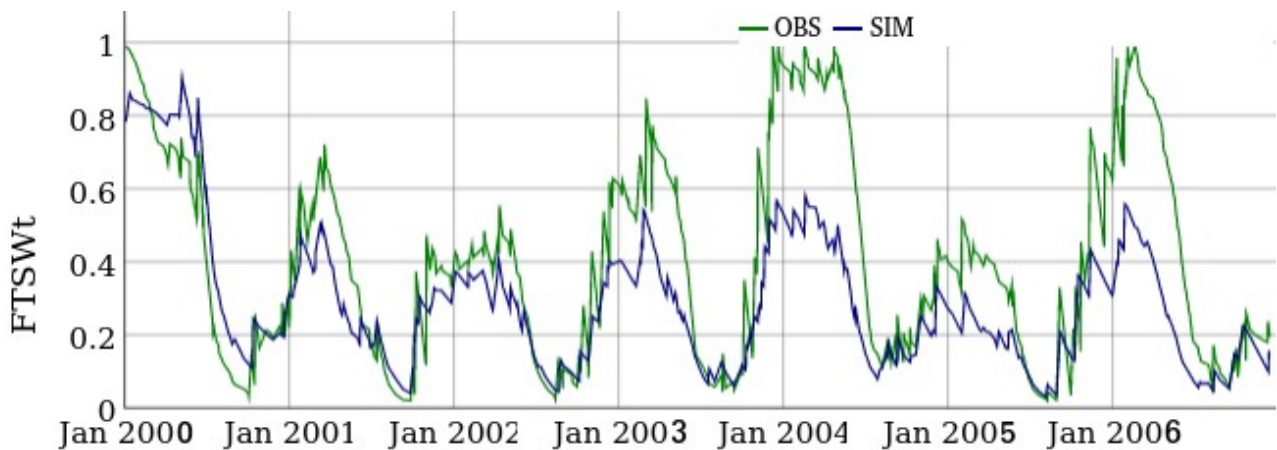


Figure 7 Comparaison FTSW de la parcelle Walis-2 (OBS, en vert) et FTSW simulée par le modèle (SIM, en bleu) pour une parcelle de vigne enherbée située à Puisserguier, entre 2000 et 2006. RMSE = 0,206

- jeu de données Alignan

Pour la simulation réalisée à partir des conditions sur la parcelle Alignan-1, le pourcentage de couverture végétale simulé et le pourcentage de couverture végétale mesuré ont une évolution similaire, excepté pendant la période de juillet 2015 à août 2015, les valeurs mesurées dépassant 80 % de couverture végétale tandis que la couverture végétale simulée reste stable autour de 30 % (Fig. 8). Le RMSE entre les valeurs de FVC mesurées et les valeurs de FVC simulées pour les jours de mesure est de 17,23.

Pour la simulation réalisée à partir des conditions sur la parcelle Alignan-2, le pourcentage de couverture végétale simulé et le pourcentage du couverture végétale mesuré ont une évolution similaire, excepté pendant la période de juillet 2015 à octobre 2015 environ, la couverture végétale mesurée approchant les 60 % dès juillet 2015 tandis que la couverture végétale simulée reste comprise entre 20 et 40 % jusqu'à octobre 2015, où elle dépasse 60 % (Fig. 9). Le RMSE entre les valeurs de FVC mesurées et les valeurs de FVC simulées pour les jours de mesure est de 15,06.

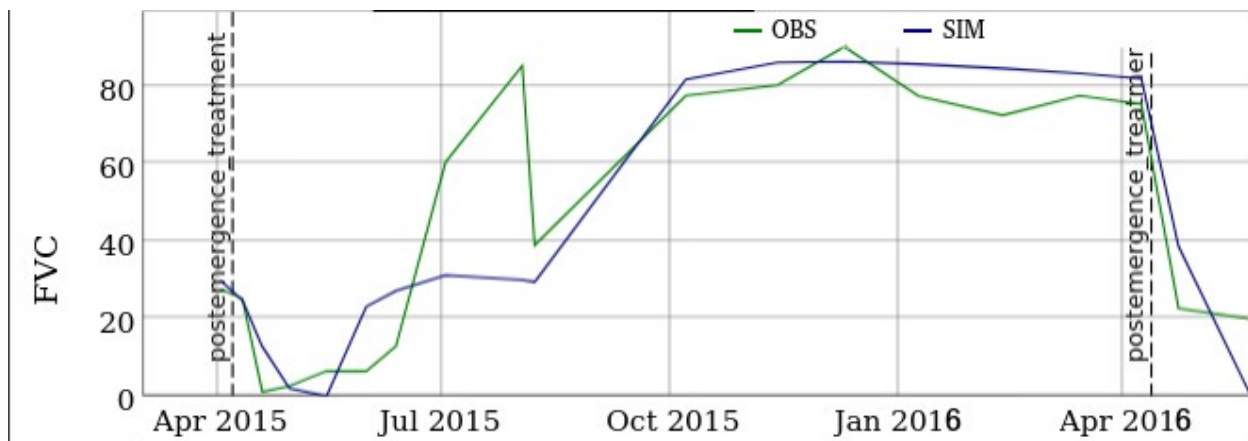


Figure 8 Comparaison du couvert végétal total mesuré (OBS, en vert) et du couvert végétal total simulé par le modèle (SIM, en bleu) sur la période de réalisation des mesures, d’avril 2015 à mai 2016, pour la parcelle Alignan-1. Les lignes verticales pointillées représentent l’application d’herbicides sur la parcelle, respectivement le 08/04/2015 pour le 1^{er} traitement et le 13/04/2016 pour le 2^e traitement.

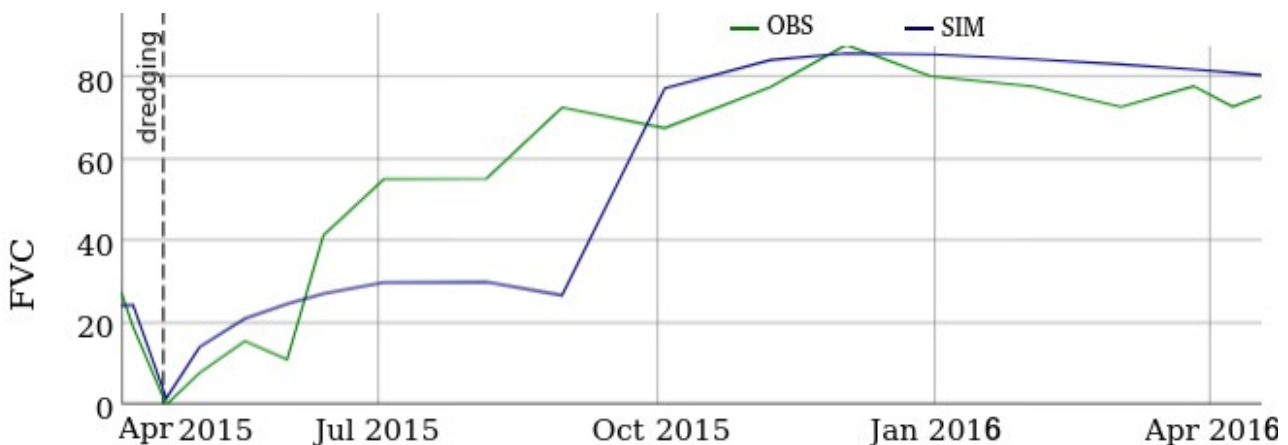


Figure 9 Comparaison du couvert végétal total mesuré (OBS, en vert) et du couvert végétal total simulé par le modèle (SIM, en bleu) sur la période de réalisation des mesures, d’avril 2015 à mai 2016, pour la parcelle Alignan-2. La ligne verticale pointillée représente le curage du fossé sur la parcelle, réalisé le 23/04/2015.

Pour la simulation réalisée à partir des conditions sur la parcelle Alignan-3, le pourcentage de couverture végétale simulé et le pourcentage de la couverture végétale mesuré ont une évolution similaire à partir de la deuxième tonte de la végétation avec des valeurs proches à partir d’octobre 2015, le 07/09/2015 (Fig. 10). Avant la 2^e tonte, le pourcentage simulé de couverture végétale se situe autour de 20 %, tandis que le pourcentage de couverture végétale observée dépasse 40 % avant la première tonte, tombe à zéro puis réaugmente entre la première et la deuxième tonte jusqu’à atteindre environ 80 % de couverture végétale. Le RMSE entre les valeurs de FVC mesurées et les valeurs de FVC simulées pour les jours de mesure est de 17,42.

Pour la simulation réalisée à partir des conditions sur la parcelle Alignan-4, le pourcentage de couverture végétale simulé reste égal à 0 après le 1^{er} brûlis jusqu’au début d’août 2015, tandis que la couverture végétale mesurée dépasse 20 % dès mai 2015 (Fig. 11). Après le 2^e brûlis, les valeurs de couverture végétale simulée restent égales à 0 jusqu’à la fin de la période observée tandis que la couverture végétale mesurée croît jusqu’à dépasser 40 % lors de la dernière mesure. Le RMSE entre les valeurs de FVC mesurées et les valeurs de FVC simulées pour les jours de mesure est de 23,44.

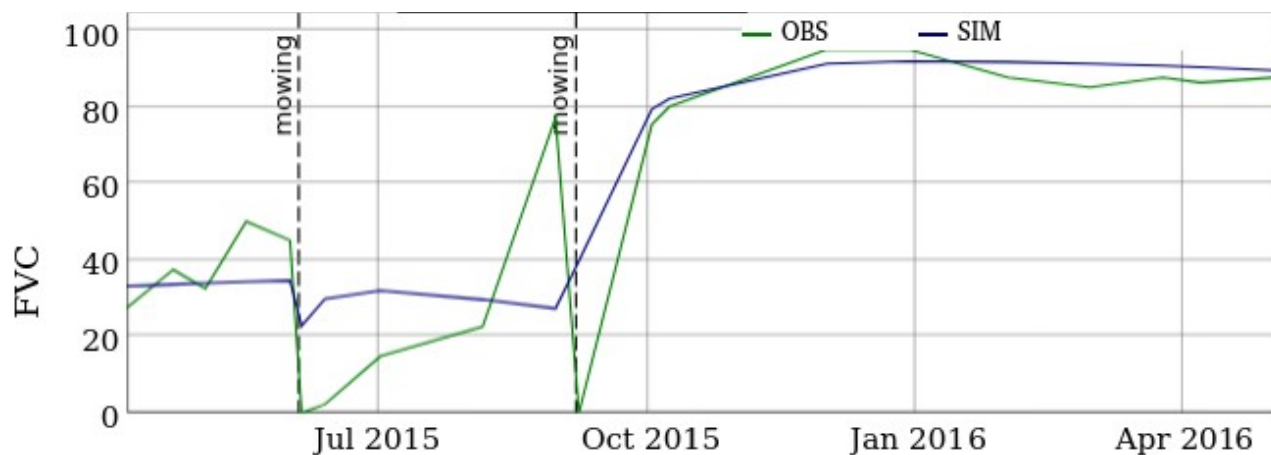


Figure 10 Comparaison du couvert végétal total mesuré (OBS, en vert) et du couvert végétal total simulé par le modèle (SIM, en bleu) sur la période de réalisation des mesures, d'avril 2015 à mai 2016, pour la parcelle Alignan-3. Les lignes verticales pointillées représentent les opérations de tonte sur la parcelle, respectivement le 04/06/2015 pour la 1ère et le 07/09/2015 pour la 2^e tonte.

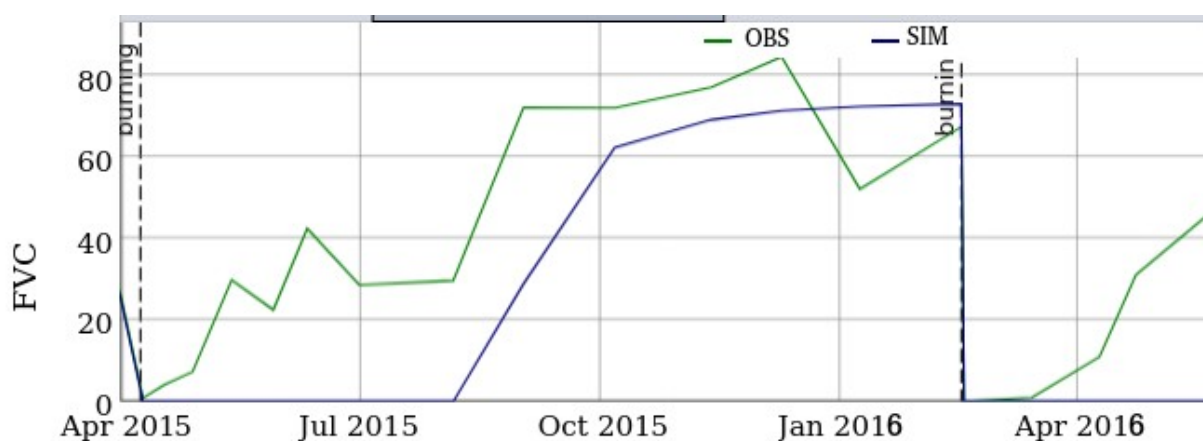


Figure 11 Comparaison du couvert végétal total mesuré (OBS, en vert) et du couvert végétal total simulé par le modèle (SIM, en bleu) sur la période de réalisation des mesures, d'avril 2015 à mai 2016, pour la parcelle Alignan-4. Les lignes verticales pointillées représentent la réalisation de brûlis sur la parcelle, respectivement le 08/04/2015 pour la 1ère et le 17/02/2016 pour le 2^e brûlis.

Pour la simulation réalisée à partir des conditions sur la parcelle Alignan-C, les mesures de couverture végétale sont comprises entre 20 et 40 % entre avril 2015 et juillet 2015, les valeurs simulées étant environ égales à 40 %. A partir d'août 2015, les valeurs simulées et les valeurs mesurées augmentent, les valeurs mesurées étant supérieures aux valeurs simulées d'environ 20 % (Fig. 12). Le RMSE entre les valeurs de FVC mesurées et les valeurs de FVC simulées pour les jours de mesure est de 20,19.

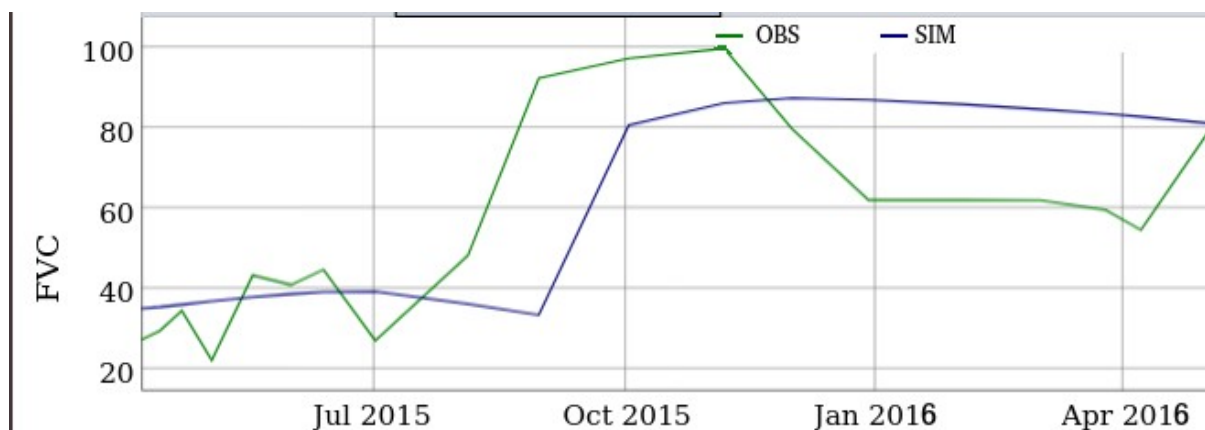


Figure 12 Comparaison du couvert végétal total mesuré (OBS, en vert) et du couvert végétal total simulé par le modèle (SIM, en bleu) sur la période de réalisation des mesures, d'avril 2015 à mai 2016, pour la parcelle Alignan-C.

- jeu de données Roujan

Pour la simulation réalisée à partir des conditions sur la parcelle Roujan-1, le modèle simule une hauteur moyenne de végétation nulle pendant la quasi-totalité de la période de comparaison avec les données mesurées. Au tout début de la période, la hauteur moyenne simulée est de 5 cm environ et diminue jusqu'à 0 lors de l'opération de labour de l'inter-rang et ne réaugmente pas jusqu'à la fin de la période de comparaison des données. Après le labour, la hauteur moyenne de végétation mesurée réaugmente jusqu'à atteindre environ 15 cm à la fin du mois d'avril 2019, puis retombe à 0 jusqu'à la fin des mesures après l'application du traitement herbicide post-émergence (Fig. 13). Le RMSE entre les valeurs de hauteur moyenne de végétation simulées et les valeurs mesurées est de 5,47.

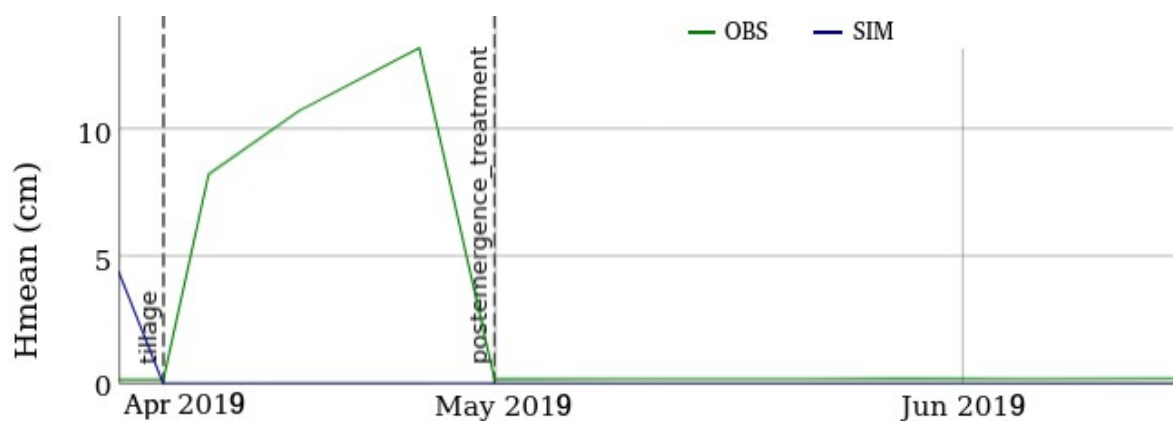


Figure 13 Comparaison de la hauteur moyenne du couvert végétal mesurée (OBS, en vert) et de la hauteur moyenne du couvert végétal simulé par le modèle (SIM, en bleu) sur la période de réalisation des mesures, d'avril 2019 à juillet 2019, pour la parcelle Roujan-1. Les lignes pointillées verticales représentent des traitements appliqués à la parcelle, respectivement un labour (tillage) le 09/04/2019 et un traitement herbicide post-émergence (postemergence treatment) le 01/05/2019.

Pour la simulation réalisée à partir des conditions sur la parcelle Roujan-2, la hauteur moyenne simulée de la végétation est égale à 5 cm du début de la période de comparaison jusqu'au labour de l'inter-rang, tandis que la hauteur moyenne mesurée est comprise entre 10 et 15 cm environ. Après le labour, la hauteur moyenne simulée de la végétation reste à 0 jusqu'à la fin de la période de comparaison des données, alors que la hauteur de végétation mesurée réaugmente à partir de la moitié de mai 2019 jusqu'à atteindre plus de 20 cm à la fin de la période de mesure (Fig. 14). Le

RMSE entre les valeurs de hauteur moyenne de végétation simulées et les valeurs mesurées est de 11,76.

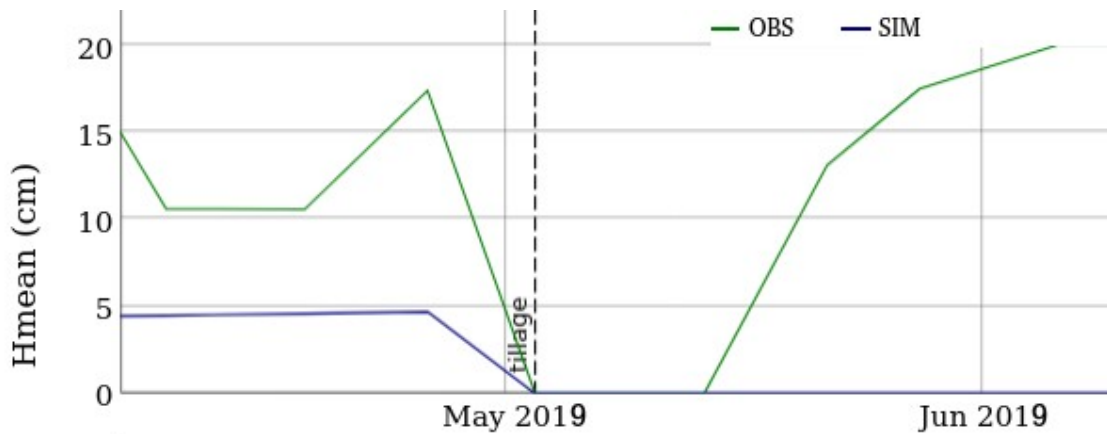


Figure 14 Comparaison de la hauteur moyenne du couvert végétal mesurée (OBS, en vert) et de la hauteur moyenne du couvert végétal simulé par le modèle (SIM, en bleu) sur la période de réalisation des mesures, d'avril 2019 à juillet 2019, pour la parcelle Roujan-2. La ligne pointillée verticale représente un événement de labour sur la parcelle (tillage) le 03/05/2019.

Pour la simulation réalisée à partir des conditions sur la parcelle Roujan-3, la hauteur moyenne simulée de la végétation est supérieure à 8 cm du début de la période de mesure jusqu'à la date de tonte où elle diminue jusqu'à être inférieure à 2 cm. Pendant cette période, les mesures de la hauteur moyenne de la végétation traduisent une augmentation de la hauteur moyenne rapide jusqu'à atteindre plus de 10 cm au milieu du mois d'avril 2019, pour ensuite redescendre jusqu'à 0 cm lors de la tonte. Après la tonte, le modèle simule une reprise lente avec une augmentation régulière jusqu'à atteindre moins de 4 cm environ à la fin de la période de mesure. Les mesures de la hauteur moyenne de la végétation ne sont différentes de 0 qu'à partir de la mi-mai 2019, où la hauteur moyenne mesurée est de 4 cm, puis dépassent 8 cm lors de la dernière mesure fin juin 2019 (Fig. 15). Le RMSE entre les valeurs de hauteur moyenne de végétation simulées et les valeurs mesurées est de 3,31.

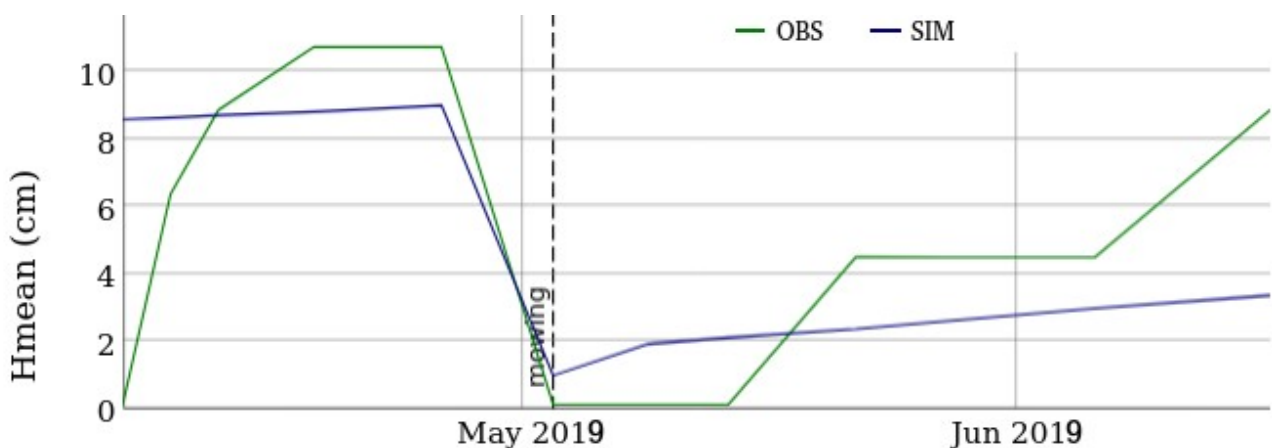


Figure 15 Comparaison de la hauteur moyenne du couvert végétal mesurée (OBS, en vert) et de la hauteur moyenne du couvert végétal simulé par le modèle (SIM, en bleu) sur la période de réalisation des mesures, d'avril 2019 à juillet 2019, pour la parcelle Roujan-3. La ligne pointillée verticale représente un événement de tonte sur la parcelle (mowing) le 03/05/2019.

Discussion

Notre objectif était de développer et valider un modèle de croissance végétale multispécifique qui simulerait les variations de la quantité d'eau au cours du temps en plus de la croissance des espèces végétales présentes, dans deux situations observables sur les parcelles de vignes méditerranéennes : l'inter-rang de vigne et le fossé de bordure de vigne. La volonté d'obtenir un modèle mécaniste multispécifique a nécessité de rechercher une quantité importante d'informations sur les espèces végétales typiques des linéaires agricoles que nous souhaitons représenter. Pour les espèces les plus communes, la collecte de données n'a pas posé de problèmes particuliers, en revanche certaines données ont été plus difficiles voire impossible à obtenir pour les espèces méditerranéennes typiques, en particulier pour les espèces de fossés agricoles. De plus, le choix de simuler la croissance végétale à partir du LAI et du LAI_{rate} développé par Cros et al. (2003), ou encore d'estimer la hauteur à l'aide des coefficients DW_H1 et DW_H2 implique d'avoir des informations à notre connaissance peu mesurées dans la littérature scientifique. Malgré ces difficultés, nous avons estimé que cette méthode de simulation de la croissance végétale était préférable à la méthode plus répandue de Monteith (Monteith, 1977), et ce pour plusieurs raisons. Premièrement, l'équation de Monteith utilise le rayonnement solaire pour calculer le taux de croissance journalier de la plante, or le rayonnement est une donnée qui n'est pas toujours disponible (Muneer et al., 2007), ce qui ne nous convenait pas car le modèle a pour vocation d'être utilisable sur le plus grand nombre de parcelles possible. Deuxièmement, l'équation de Monteith repose en partie sur l'équation de Monsi-Saeki (1953) pour calculer le rayonnement solaire intercepté par la canopée, mais ce calcul n'est valable que lorsque la canopée est suffisamment homogène (Brisson et al., 2003), ce qui n'est pas toujours le cas dans nos simulations. Enfin, bien que notre méthode de calcul de la croissance végétale pose le même problème, le formalisme de Monteith nécessite de connaître l'efficacité d'utilisation du rayonnement ainsi que le coefficient d'extinction de l'espèce simulée, qui sont deux paramètres peu disponibles pour les espèces de notre modèle.

Le jeu de données Walis a permis d'évaluer l'efficacité de prédiction du modèle sur sa partie hydrique. Bien que la majorité des formalismes du modèle aient été repris de la construction du modèle Walis, la prise en compte de plusieurs espèces végétales, le calcul du partitionnement de la masse sèche dans plusieurs parties de la plante et la simulation de cohortes d'individus représentent des modifications suffisantes pour justifier de s'assurer de la cohérence des résultats. De fait, une partie de la différence entre les données simulées et celles mesurées sur les parcelles Walis-1 et Walis-2 peut être attribuée à l'ajout de modules générant de l'incertitude, même pour la parcelle Walis-1 qui est desherbée. Une autre source d'incertitude vient du fait que les simulations ont utilisé une date de débourrement de la vigne identique sur les 6 années simulées tandis qu'en réalité cette date était différente chaque année.

Le jeu de données Alignan était le mieux documenté, ce qui est dû au fait qu'il provient d'une campagne de relevés réalisés par le LISAH ayant fait l'objet de plusieurs publications (Dollinger et al., 2017, Vinatier et al., 2018, Rudi et al., 2020). Sur les 5 parcelles, 3 simulations ont produit un résultat suffisamment proche des données expérimentales pour que le RMSE soit inférieur au seuil de 20 que nous avons fixé : la parcelle Alignan-1, qui a subi deux opérations de désherbage chimique, la parcelle Alignan-2, qui a subi un curage, et la parcelle Alignan-3, qui a subi 2 tontes.

Pour ce qui est de la parcelle Alignan-4, il semblerait que la reprise de la végétation soit favorisée par les cendres générées par le brûlis et l'espace libéré. La présence de plantes pyrophytes sur la parcelle pourrait expliquer les valeurs mesurées et la différence avec la simulation car bien que cette caractéristique soit prise en compte dans les données d'espèces en entrée du modèle, les informations permettant de déterminer cette caractéristique sont rares.

Enfin, les résultats de la simulation de la parcelle Alignan-C pourraient signifier qu'en dehors des perturbations liées à l'intervention humaine sur la parcelle, le modèle ne simule pas bien les variations à court terme liées à des phénomènes biologiques qui ne sont pas pris en compte dans le modèle, comme par exemple la variation de la quantité d'azote disponible dans le sol, qui est fixe dans notre modèle. La prise en compte de cette variabilité potentielle fait d'ailleurs déjà l'objet d'un stage ayant lieu au sein d'un laboratoire de l'INRAE ayant participé au développement du modèle Walis.

La simulation des parcelles du jeu de données Roujan a permis de tester la capacité du modèle à simuler le couple vigne/inter-rang, et les résultats semblent montrer que le modèle fonctionne bien sur cette modalité. Nous devons malgré tout rester prudents car les données récoltées s'étalent sur un peu plus de deux mois, ce qui en plus d'empêcher d'observer une réelle tendance dans la végétation génère un biais dans le calcul du RMSE. On remarque tout de même que les reprises observées à travers les mesures de hauteur moyenne sont plus rapides que dans les simulations, ce qu'on observe aussi pour la parcelle Alignan-4. Ces jeux de données mettent en lumière l'incapacité du modèle à modéliser une reprise végétale rapide. Le fait que la végétation puisse se développer plus rapidement après certains traitements est relativement simple à incorporer dans le modèle, le problème réside dans la difficulté de paramétrer cette reprise sans basculer dans la sur-paramétrisation. Il est donc nécessaire de développer un formalisme de la reprise végétale qui prendrait en compte les événements stimulant l'émergence de plantes opportunistes afin de généraliser au maximum le phénomène. La stimulation de la croissance végétale pourrait faire partie de chaque fonction simulant un traitement, ce qui permettrait une simulation plus fine, ou alors pourrait faire l'objet d'une fonction à part entière, ce qui perdrait en précision de simulation mais réduirait le nombre de paramètres à déterminer.

Dans son intégralité, ce modèle est voué à être amélioré afin de mieux prendre en compte la dynamique du couvert végétal, et en particulier la reprise végétale après une opération sur la parcelle. Les résultats présentés ne prenaient pas en compte la position de la végétation sur la parcelle, ce qui a un effet sur l'accès à l'eau et aux nutriments (Breshears & Barnes, 1999). La spatialisation des simulations sera effectuée dans le cadre du projet MIPP, qui simulera une parcelle entière découpée en unités spatiales permettant de prendre en compte la pente éventuelle de la parcelle et les différences entre les rangs de vignes en bordure de parcelle et les rangs situés au centre.

Bibliographie

- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Allen, P. M. (1999). CONTINENTAL SCALE SIMULATION OF THE HYDROLOGIC BALANCE1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 35(5), 1037–1051. <https://doi.org/10.1111/J.1752-1688.1999.TB04192.X>
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). LARGE AREA HYDROLOGIC MODELING AND ASSESSMENT PART I: MODEL DEVELOPMENT1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73–89. <https://doi.org/10.1111/J.1752-1688.1998.TB05961.X>
- Asbjornsen, H., Goldsmith, G. R., Alvarado-Barrientos, M. S., Rebel, K., Van Osch, F. P., Rietkerk, M., Chen, J., Gotsch, S., Tobón, C., Geissert, D. R., Gómez-Tagle, A., Vache, K., & Dawson, T. E. (2011). Ecohydrological advances and applications in plant–water relations research: a review. *Journal of Plant Ecology*, 4(1–2), 3–22. <https://doi.org/10.1093/JPE/RTR005>
- Aubertot, J. N., Barbier, J. M., Carpentier, A., Gril, J. J., Guichard, L., Lucas, P., ... & Voltz, M. (2005). Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et en limiter les impacts environnementaux.
- Bergez, J. E., Colbach, N., Crespo, O., Garcia, F., Jeuffroy, M. H., Justes, E., Loyce, C., Munier-Jolain, N., & Sadok, W. (2010). Designing crop management systems by simulation. *European Journal of Agronomy*, 32(1), 3–9. <https://doi.org/10.1016/J.EJA.2009.06.001>
- Bradford, K. J. (1990). A Water Relations Analysis of Seed Germination Rates. *Plant Physiology*, 94(2), 840–849. <https://doi.org/10.1104/PP.94.2.840>
- Breshears, D. D., & Barnes, F. J. (1999). Interrelationships between plant functional types and soil moisture heterogeneity for semiarid landscapes within the grassland/forest continuum: a unified conceptual model. *Landscape Ecology* 1999 14:5, 14(5), 465–478. <https://doi.org/10.1023/A:1008040327508>
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, 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). An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*, 18(3–4), 309–332. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00110-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00110-7)
- Brisson, N., & Perrier, A. (1991). A semiempirical model of bare soil evaporation for crop simulation models. *Water Resources Research*, 27(5), 719–727. <https://doi.org/10.1029/91WR00075>
- Brisson, N., Seguin, B., & Bertuzzi, P. (1992). Agrometeorological soil water balance for crop simulation models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 59(3–4), 267–287. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(92\)90097-N](https://doi.org/10.1016/0168-1923(92)90097-N)
- Celette, F. (2007). Dynamique des fonctionnements hydrique et azot  dans une vigne enherbée sous le climat méditerranéen.
- Celette, F., Ripoche, A., & Gary, C. (2010). WaLIS-A simple model to simulate water partitioning in a crop association: The example of an intercropped vineyard. *Agricultural Water Management*, 97(11), 1749–1759. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.06.008>
- Chapin III, F. S., Matson, P. A., & Vitousek, P. (2011). *Principles of terrestrial ecosystem ecology*. Springer Science & Business Media.
- Cools, J., Broekx, S., Vandenbergh, V., Sels, H., Meynaerts, E., Vercaemst, P., Seuntjens, P., Van Hulle, S., Wustenberghs, H., Bauwens, W., & Huygens, M. (2011). Coupling a hydrological water quality model and an economic optimization model to set up a cost-effective emission reduction scenario for nitrogen. *Environmental Modelling & Software*, 26(1), 44–51. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2010.04.017>
- Cros, M.-J., Duru, M., Garcia, F., & Martin-Clouaire, R. (2003). A biophysical dairy farm model to evaluate rotational grazing management strategies A biophysical dairy farm model to evaluate rotational grazing management strategies A biophysical dairy farm model to evaluate rotational grazing management strategies. *Agronomie, EDP Sciences*, 23(2), 105–122. <https://doi.org/10.1051/agro:2002071i>

- Dollinger, J., Vinatier, F., Voltz, M., Dagès, C., & Bailly, J. S. (2017). Impact of maintenance operations on the seasonal evolution of ditch properties and functions. *Agricultural Water Management*, 193, 191–204. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.08.013>
- Dunan, C. M., Moore, F. D., & Westra, P. (1994). A plant process-economic model for wild oats management decisions in irrigated barley. *Agricultural Systems*, 45(4), 355–368. [https://doi.org/10.1016/0308-521X\(94\)90131-X](https://doi.org/10.1016/0308-521X(94)90131-X)
- Duru, M., Adam, M., Cruz, P., Martin, G., Ansquer, P., Ducourtieux, C., Jouany, C., Theau, J. P., & Viegas, J. (2008). Modelling above-ground herbage mass for a wide range of. 0, 209–225. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.09.015>
- Eddelbuettel, D., & Balamuta, J. J. (2018). Extending R with C++: A Brief Introduction to Rcpp. *The American Statistician*, 72(1), 28–36. <https://doi.org/10.1080/00031305.2017.1375990>
- Fracchiolla, M., Terzi, M., Frabboni, L., Caramia, D., Lasorella, C., Giorgio, D. De, Montemurro, P., & Cazzato, E. (2016). Influence of different soil management practices on ground-flora vegetation in an almond orchard. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 31(4), 300–308. <https://doi.org/10.1017/S1742170515000241>
- Fried, G., Cordeau, S., Metay, A., & Kazakou, E. (2019). Relative importance of environmental factors and farming practices in shaping weed communities structure and composition in French vineyards. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 275(April), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.01.006>
- Gardarin, A., Dürr, C., & Colbach, N. (2012). Modeling the dynamics and emergence of a multispecies weed seed bank with species traits. *Ecological Modelling*, 240, 123–138. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.05.004>
- Gliessman, S. R. (2006). *Agroecology: The Ecology of Sustainable Food Systems*, Second Edition. <https://doi.org/10.1201/B17420>
- Golden, H. E., Lane, C. R., Amatya, D. M., Bandilla, K. W., Raanan Kiperwas, H., Knightes, C. D., & Ssegane, H. (2014). Hydrologic connectivity between geographically isolated wetlands and surface water systems: A review of select modeling methods. *Environmental Modelling & Software*, 53, 190–206. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOF.2013.12.004>
- Gummerson, R. J. (1986). The effect of constant temperatures and osmotic potentials on the germination of sugar beet. *Journal of Experimental Botany*, 37(6), 729–741. <https://doi.org/10.1093/JXB/37.6.729>
- Jackson, R. B., Jobbágy, E. G., & Noretto, M. D. (2009). Ecohydrology in a human-dominated landscape. *Ecohydrology*, 2(3), 383–389. <https://doi.org/10.1002/ECO.81>
- Julve, P. (1998) ff. - Baseflor. Index botanique, écologique et chorologique de la flore de France. Consulté le 01/03/2021. <http://perso.wanadoo.fr/philippe.julve/catminat.htm>
- Kattge, J., Bönsch, G., Díaz, S., Lavorel, S., Prentice, I. C., Leadley, P., Tautenhahn, S., Werner, G. D. A., Aakala, T., Abedi, M., Acosta, A. T. R., Adamidis, G. C., Adamson, K., Aiba, M., Albert, C. H., Alcántara, J. M., Alcázar, C. C., Aleixo, I., Ali, H., ... Wirth, C. (2020). TRY plant trait database – enhanced coverage and open access. *Global Change Biology*, 26(1), 119–188. <https://doi.org/10.1111/gcb.14904>
- Krishna, V.V., Byju, N.G., Tamizheniyam, S., Radcliff, E.B., & Hutchison, W.D. (2003) *Integrated Pest Management in Indian Agriculture: a Developing Economic Perspective*, IPM World Textbook, St. Paul, MN
- Lebon, E., Dumas, V., Pieri, P., & Schultz, H. R. (2003). Modelling the seasonal dynamics of the soil water balance of vineyards. *Functional Plant Biology*, 30(6), 699–710. <https://doi.org/10.1071/FP02222>
- Malézieux, E., Crozat, Y., Dupraz, C., Laurans, M., Makowski, D., Ozier-Lafontaine, H., Rapidel, B., Tourdonnet, S., Valantin-Morison, M., M, E., de Tourdonnet, S., & Valantin-Morison, M. (2009). Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1), 43–62. <https://doi.org/10.1051/agro:2007057>
- Monteith, J. L. (1965). Evaporation and environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 19, 205–234.

- Muneer, T., Younes, S., & Munawwar, S. (2007). Discourses on solar radiation modeling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(4), 551–602. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2005.05.006>
- Pare, N. (2011). Construction d'un modèle couplé pression-impact pour l'expérimentation virtuelle de pratiques culturales à l'échelle de petits bassins versants.
- POST, J., CONRADT, T., SUCKOW, F., KRYSANOVA, V., WECHSUNG, F., & HATTERMANN, F. F. (2008). Integrated assessment of cropland soil carbon sensitivity to recent and future climate in the Elbe River basin. *Hydrological Sciences Journal*, 53(5), 1043–1058. <https://doi.org/10.1623/hysj.53.5.1043>
- Potts, D. L., Scott, R. L., Bayram, S., & Carbonara, J. (2010). Woody plants modulate the temporal dynamics of soil moisture in a semi-arid mesquite savanna. *Ecohydrology*, 3(1), 20–27. <https://doi.org/10.1002/ECO.91>
- Riou, C., Pieri, P., & Le Clech, B. (1994). Water use of grapevines well supplied with water. Simplified expression of transpiration. *Vitis*, 33(3), 109–115.
- Ritchie, J. T. (1972). Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research*, 8(5), 1204–1213. <https://doi.org/10.1029/WR008I005P01204>
- Robson, M. J. (1973). The Effects of Temperature on the Growth of S.170 Tall Fescue (*Festuca arundinacea*). II. Independent Variation of Day and Night Temperatures. *The Journal of Applied Ecology*, 10(1), 93. <https://doi.org/10.2307/2404718>
- Rudi, G., Bailly, J.-S., Caraglio, Y., Dollinger, J., and Vinatier, F.: Influence of maintenance practices on plant community properties interacting with ecosystem functions in an agricultural ditch, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-9922, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-9922>, 2020
- Rudi, G., Bailly, J. S., & Vinatier, F. (2018). Using geomorphological variables to predict the spatial distribution of plant species in agricultural drainage networks. *PLoS ONE*, 13(1), 1–20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191397>
- Thies, C., Steffan-Dewenter, I., & Tschardtke, T. (2003). Effects of landscape context on herbivory and parasitism at different spatial scales. *Oikos*, 101(1), 18–25. <https://doi.org/10.1034/J.1600-0706.2003.12567.X>
- Thies, C., & Tschardtke, T. (1999). Landscape Structure and Biological Control in Agroecosystems. *Science*, 285(5429), 893–895. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.285.5429.893>
- Thompson, S. E., Harman, C. J., Heine, P., & Katul, G. G. (2010). Vegetation-infiltration relationships across climatic and soil type gradients. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 115(G2), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2009JG001134>
- Vanderkam, D., Allaire, JJ., Owen, J., Gromer, D., & Thieurmel, B. (2018). dygraphs: Interface to 'Dygraphs' Interactive Time Series Charting Library. R package version 1.1.1.6. <https://CRAN.R-project.org/package=dygraphs>
- Jeffrey A. Ryan and Joshua M. Ulrich (2020). xts: eXtensible Time Series. R package version 0.12.1. <https://CRAN.R-project.org/package=xts>
- Vinatier, F., Dollinger, J., Rudi, G., Feurer, D., Belaud, G., & Bailly, J. S. (2018). The use of photogrammetry to construct time series of vegetation permeability to water and seed transport in agricultural waterways. *Remote Sensing*, 10(12), 1–20. <https://doi.org/10.3390/rs10122050>
- Volaire, F., & Lelièvre, F. (2001). Drought survival in *Dactylis glomerata* and *Festuca arundinacea* under similar rooting conditions in tubes. *Plant and Soil* 229:2, 229(2), 225–234. <https://doi.org/10.1023/A:1004835116453>
- Zhang, W., Ricketts, T. H., Kremen, C., Carney, K., & Swinton, S. M. (2007). Ecosystem services and dis-services to agriculture. *Ecological Economics*, 64(2), 253–260. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2007.02.024>

Résumé :

La réduction de l'utilisation de pesticides et l'optimisation des apports en eau sont des thématiques récurrentes dans les parcelles agricoles prenant de l'ampleur au fur et à mesure que la pression climatique augmente. Les services écosystémiques rendus par les couverts végétaux des espèces cultivées et de la végétation spontanée font partie des principales propositions de l'agroécologie pour répondre à ces thématiques. Dans ce rapport, un modèle mécaniste pouvant simuler la végétation présente au sein des inter-rangs de vigne ou la végétation retrouvée dans les fossés en bordure de parcelle agricole est présenté. Le modèle s'appuie sur des formalismes connus pour simuler les échanges hydrologiques ainsi que la croissance végétale, et contient des modules développés afin de simuler les principales pratiques culturales. A partir de plusieurs bases de données, les résultats de simulation ont pu être comparés aux valeurs mesurées sur des parcelles soumises aux mêmes conditions et aux mêmes pratiques, ce qui a permis le calcul d'un indicateur de performance. Sur 10 simulations réalisées, 8 ont produit un résultat satisfaisant. La comparaison avec des valeurs mesurées a mis en avant le besoin de modifier certains aspects de nos modules afin de mieux modéliser la reprise végétale observée après certains traitements, la vitesse de reprise étant pour l'instant sous-estimée par le modèle. Finalement, ce modèle est voué à être incorporé à un ensemble de modèles développés pour simuler différents phénomènes à l'échelle d'une parcelle, ce qui permettra de prendre en compte l'effet de la spatialisation sur la croissance végétale.

Mots-clés : agroécologie, modélisation, hydrologie, végétation, services écosystémiques

Abstract :

Reducing pesticide use and optimizing water inputs are recurring themes concerning fields, emphasized by the increasing climatic pressure. Ecosystem services provided by vegetation covers from cultivated and spontaneous species alike are among the main solutions advised by agroecology to both of these themes. A mechanist model developed to simulate vegetation growth in vineyards' inter-ranks or ditches is here described. This model is partly based on known formalisms to account for hydrologic exchanges as well as vegetation growth, and contains modules simulating the main cultural practices encountered on the field. Thanks to multiple databases, our simulations results have been compared to measured data on fields where vegetation grew under the same conditions, resulting in a performance index. Out of 10 simulations, 8 produced satisfying results. The model validation pointed out the necessity of modifying some modules to better simulate vegetation restart after particular treatments, the restarting speed being too slow at the moment. This model is destined to be part of a bigger model simulating several other phenomenons occuring on a field, thus taking into account the spatial effect on vegetation growth.

Keywords : agroecology, modelling, hydrology, vegetation, ecosystem services