

Simulation de la croissance de l'herbe et des rendements des pâturages avec ModVege

Alexandre Bittar¹, Marco Meisser¹, Eric Mosimann^{1,3} et Pierluigi Calanca²

¹Agroscope, 1260 Nyon, Suisse

²Agroscope, 8046 Zurich, Suisse

³Parc Jura vaudois, 1188 St-George

Renseignements: Pierluigi Calanca, e-mail: pierluigi.calanca@agroscope.admin.ch



Les données de croissance, qui ont servi à évaluer l'aptitude du modèle à simuler la croissance de l'herbe, proviennent d'un réseau de prairies soumises à différentes conditions d'alimentation en eau. (Photo: Agroscope)

Introduction

Ces dernières années, la production fourragère a été plusieurs fois malmenée par des événements climatiques extrêmes tels que la sécheresse de 2015, qui a causé des pertes importantes, surtout dans le Jura. Face aux caprices de la météo et à la nécessité d'optimiser la gestion des pâturages, les outils d'aide à la décision deviennent de plus en plus importants. De nombreuses initiatives ont été prises dans ce sens à l'étranger. En France, par exemple, le système ISOP (Suivi Objectif des Prairies) fournit de manière opérationnelle des estimations de rendement des prairies à l'échelle régionale sur la base de simulations faites avec le modèle STICS-Prairies (Ruget

et al. 2006). La Suisse ne dispose pas encore d'une telle plateforme utile à la gestion des surfaces herbagères. L'appréciation de la croissance de l'herbe est au cœur de tout système de gestion des pâturages. Le choix d'un modèle de simulation doit tenir compte de plusieurs critères: prise en compte des fondements biologiques et physiques qui sous-tendent les relations entre les plantes et le sol; complexité mathématique réduite au strict nécessaire; accès aisé aux paramètres et aux données; facilité d'application dans un contexte opérationnel. Un modèle tel que STICS (Brisson et al. 2008) offre des avantages au niveau conceptuel, mais reste exigeant

pour l'utilisateur du fait de la complexité de son application. C'est pour cette raison qu'en évaluant la possibilité de développer un système d'aide à la décision pour la Suisse, le choix s'est orienté vers un modèle avec une structure plus simple. ModVege, un modèle développé à l'INRA par Jouven *et al.* (2006a et 2006b), correspond à ces critères. Il décrit avec un minimum d'équations la croissance de l'herbe pour quatre types fonctionnels de prairies, allant des prairies précoces permettant une forte accumulation de biomasse sur pied, à des prairies à phénologie tardive moins productives (Cruz *et al.* 2002). La version standard du modèle a été testée (Calanca *et al.* 2016) en utilisant les données provenant d'un réseau de parcelles entretenues par Agroscope (Mosimann 2005; Mosimann *et al.* 2012). Ce travail s'est poursuivi par une analyse de performance en comparant les résultats simulés avec les données mesurées sur le terrain. Cet article décrit succinctement les résultats obtenus et les améliorations réalisées. Enfin, la mise en place d'une plateforme d'analyses et de prévision de la pousse de l'herbe est proposée.

Fonctionnement de ModVege

Un aperçu de la structure du modèle est présenté en figure 1. Le modèle fait intervenir différents paramètres permettant de caractériser le type de végétation et le sol (humidité et état de fertilité), ainsi que des variables d'entrée parmi lesquelles on compte les données météorologiques journalières et les pratiques de gestion. La croissance est simulée sur un pas de temps journalier en considérant les variations de biomasse de quatre compartiments structurels: feuilles et gaines vertes, tiges et fleurs vertes, feuilles et gaines mortes, tiges et fleurs mortes. La biomasse des compartiments verts est obtenue en calculant la différence entre la croissance et la sénescence, en utilisant une fonction empirique pour définir la phase de croissance reproductive.

La croissance potentielle dépend du rayonnement et de la surface foliaire. De plus, la simulation fait intervenir diverses contraintes liées au climat, au bilan hydrique et à la fertilité du sol. Pour le stress hydrique, nous avons remplacé l'approche employée par Jouven *et al.* (2006a) par celle d'Allen *et al.* (1998), qui définit un niveau critique d'humidité du sol en fonction de l'évapotranspiration potentielle, au-dessous duquel la croissance est de plus en plus réduite. La perte de biomasse résulte de la sénescence et de l'abscission, la sénescence étant exprimée en fonction de la biomasse actuelle, de la température et de l'âge du couvert.

Une des principales limitations de ModVege réside dans le fait que seule la croissance de la biomasse aérienne

Résumé ■ La prévision de la croissance de l'herbe pourrait s'avérer très utile pour piloter les pâturages ou décider du meilleur moment de récolte des prairies de fauche. Le modèle ModVege a été testé et amélioré à l'aide d'un jeu 125 situations (prairie × année × gestion) collectées sur des surfaces herbagères en Suisse. Les comparaisons entre les valeurs simulées et mesurées montrent des résultats relativement fiables dans une majorité de situations. Les problèmes rencontrés surviennent lors des périodes de sécheresse prolongée. A moyen terme, il est prévu de diffuser des simulations sur la plateforme Agrometeo.

est simulée. La dynamique entre les horizons aérien et racinaire, tout comme les effets saisonniers de cette dynamique, ne sont pas pris en compte par le modèle. Ces relations sont importantes car elles peuvent influencer la réserve hydrique et la disponibilité en éléments nutritifs dans le sol.

Simulations

ModVege a été testé avec des mesures de rendement réalisées dans le Jura entre 2014 et 2016 (Vuffray *et al.* 2017; Bossuyt *et al.* 2018), à partir d'un ensemble de 125 situations (prairie × année × gestion). Ces données proviennent d'essais qui avaient pour but de quantifier l'effet des pratiques agricoles (dates et fréquence des coupes) sur la croissance de prairies temporaires et permanentes, dans différentes conditions d'approvisionnement en eau. Les possibilités et limites du modèle sont illustrées à l'aide de quelques exemples ci-après. Les caractéristiques botaniques et du sol des différentes prairies ont été prises en considération lors de la simulation numérique de chaque essai.

Tableau 1 | Moyennes de trois indices de performance du modèle ± écart-type. Les simulations portent sur la courbe de croissance de l'herbe (kg MS ha⁻¹ j⁻¹). PP: prairies permanentes; PT: prairies temporaires.

Fréquence des coupes (mode d'utilisation)	Type de prairie	r (Spearman)	NSC	WIA
7–8 coupes/an (pâturages)	PP	0,83 ± 0,08	0,72 ± 0,17	0,76 ± 0,08
	PT	0,64 ± 0,32	0,74 ± 0,14	0,75 ± 0,08
4–5 coupes/an (prairies de fauche)	PP	0,76 ± 0,15	0,06 ± 1,10	0,66 ± 0,18
	PT	0,72 ± 0,18	-0,53 ± 1,36	0,56 ± 0,20

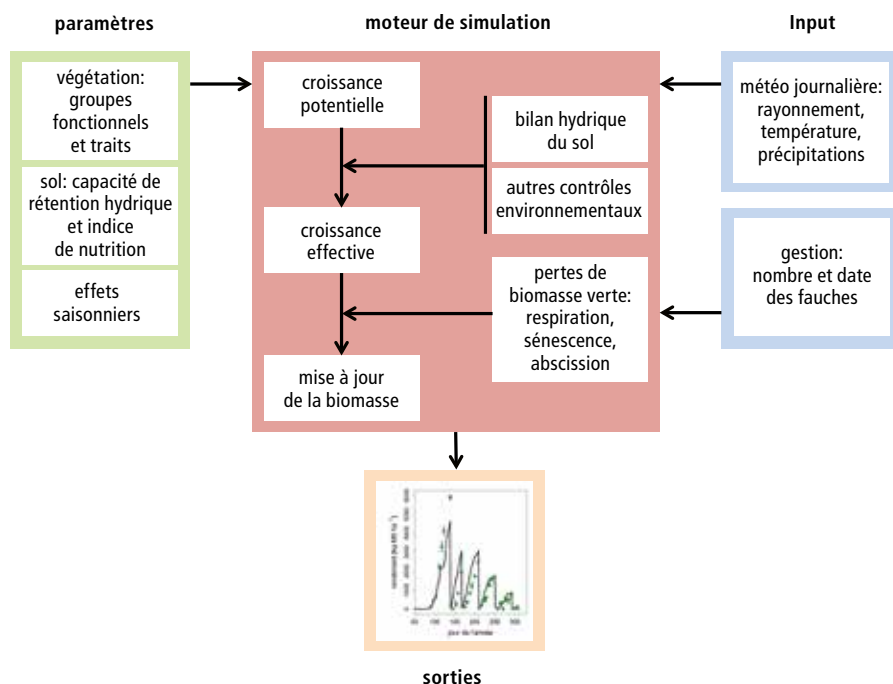


Figure 1 | Schéma de fonctionnement de ModVege, avec la spécification des paramètres (sur la gauche), les entrées météo et gestion (sur la droite), le moteur de simulation (au milieu) et les sorties (en bas).

Trois indices statistiques ont été utilisés pour mesurer la qualité des simulations numériques: le coefficient de corrélation de Spearman (r ; Hedderich et Sachs 2016); le score de Nash-Sutcliffe (Nash-Sutcliffe Score Coefficient, NSC; Nash et Sutcliffe 1970); et le coefficient d'accord de Willmott (Willmott Index of Agreement, WIA; Willmott 1984 et Willmott *et al.* 2012). Sans entrer dans les détails, le premier indice donne une appréciation de la correspondance entre valeurs mesurées et valeurs simulées, quand les valeurs sont classées par ordre de rang; le deuxième fournit une appréciation de l'écart entre mesures et valeurs simulées par rapport à l'écart des mesures autour de leur moyenne; le troisième enfin reflète l'écart absolu moyen entre mesures et valeurs simulées. La simulation du modèle peut être considérée comme satisfaisante si $r > 0,6$, $NSC > 0,5$ et $WIA > 0,6$ (Jamieson *et al.* 1991).

Résultats

Fréquence d'utilisation et type de prairies

A l'exception du NSC pour la gestion «fauche», les valeurs de r , NSC et WIA présentées dans le tableau 1 soulignent la fiabilité du modèle; l'importance des écarts type reflète la qualité des simulations (pour les simulations de fauche, l'écart relatif moyen des rendements annuels en 2016 était de 6 % pour les prairies perma-

nentes contre 13 % pour les prairies temporaires). Les résultats montrent que la qualité des simulations varie selon les situations, plus particulièrement suivant la fréquence d'utilisation et le type de prairies (prairies permanentes *versus* prairies temporaires).

Les résultats du tableau 1 sont d'autant plus satisfaisants que la fréquence d'utilisation est élevée. Avec sept à huit coupes/année (type «pâturage»), l'adéquation entre les mesures de terrain et les simulations est en général meilleure qu'avec quatre à cinq utilisations (type «prairie de fauche»), surtout par rapport à l'indice NSC. Cependant, il faut tenir compte du fait que le nombre d'échantillons disponible par site/année est par définition plus faible pour la gestion «fauche» (quatre à cinq coupes par an) que pour la gestion «pâturage» (environ huit utilisations par an), ce qui rend les statistiques moins robustes dans le premier cas.

Concernant le type de prairies, le tableau 1 montre que la performance du modèle est légèrement meilleure pour les prairies permanentes que pour les prairies temporaires. Ces résultats sont attendus, dans la mesure où le modèle a été développé pour des prairies permanentes utilisées de manière intensive (Jouven *et al.* 2006a).

Situations de sécheresse

Calanca *et al.* (2016) ont souligné qu'en conditions de sécheresse prolongée, ModVege ne simule pas bien la

croissance. Pour illustrer le problème, deux simulations ont été réalisées, l'une sur le site de Bière en 2016 (prairie permanente, cinq coupes/an, bon indice de nutrition azoté, capacité de rétention en eau de 150mm) et l'autre sur le site de Carrouge en 2015 (prairie temporaire, quatre coupes/an, indice de nutrition azoté plus faible, capacité de rétention en eau de 125mm). Dans l'ouest du pays, les précipitations estivales ont été inférieures à la moyenne pour les deux années, mais le déficit a été bien plus marqué en 2015 qu'en 2016.

La simulation du bilan hydrique du sol pour Bière confirme qu'en 2016 les précipitations ont suffi à compenser les pertes par évapotranspiration jusqu'à fin juin (fig. 2A et 2B, jour 180). Pendant les mois de juillet et août, la réserve utile a été continuellement proche du niveau critique, sans que cela ait significativement affecté la croissance. Ce n'est qu'en septembre que le stress hydrique est devenu important. Dans cette situation, le modèle surestime l'effet du stress hydrique sur la croissance (fig. 2D). Toutefois, comme la coupe examinée correspondait à la quatrième pousse, peu productive, cela n'a pas eu de répercussions sur la simulation de la biomasse sur pied (fig. 2C). Les indices de performance indiquent dans ce cas une appréciation très positive de ModVege (fig. 2C et 2D, en haut à droite).

La situation était complètement différente en 2015 à Carrouge. Les faibles précipitations du mois de mai ont provoqué une forte diminution de la réserve utile en eau déjà en fin de printemps (fig. 3A et 3B). En juin et en juillet (jours 150 à 220), la réserve utile a été constamment au-dessous du niveau critique. Cette phase de sécheresse faisait suite à la deuxième fauche (fig. 3C), un moment plus déterminant pour la croissance. ModVege ne considère que les parties aériennes du couvert, en particulier l'indice foliaire, qui était très faible à ce moment-là. Ainsi, le modèle simule un arrêt de croissance de juillet à août (fig. 3D). Au moment de la troisième fauche, le rendement calculé est presque nul, alors que les mesures de terrain se situaient autour de 1500kg MS ha⁻¹ (fig. 3D). De façon logique, les indices de performance sont moins satisfaisants dans cette situation-là.

Perspectives

Ce travail confirme que ModVege est approprié pour simuler la croissance et les rendements des prairies et pâturages suisses. L'ensemble du jeu de données utilisées a donné des indices de performance plutôt satisfaisants (tabl. 1). Bien entendu, la connaissance des caractéristiques botaniques, du sol et de la gestion sont néces-

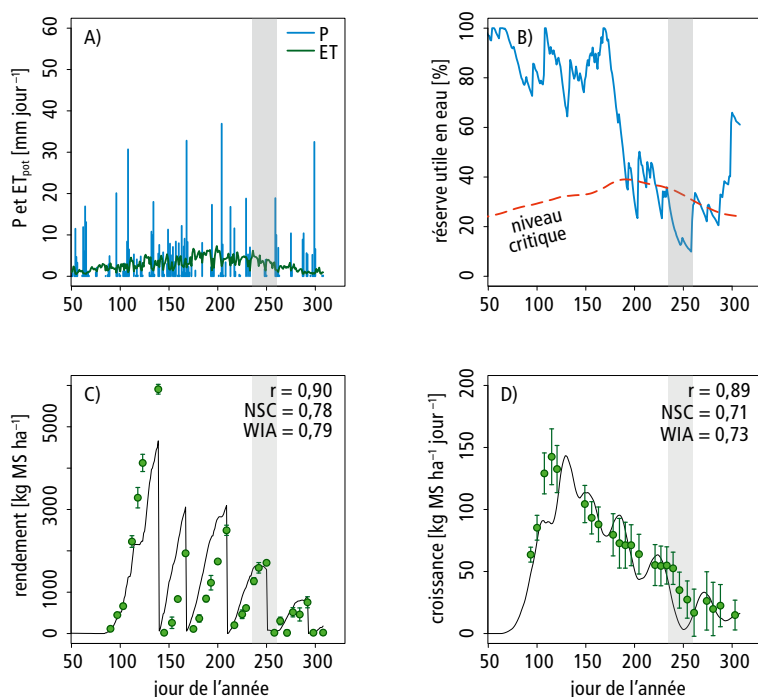


Figure 2 | Évolution saisonnière de: A) précipitation (P) et évapotranspiration potentielle (ET_{pot}), B) réserve utile en eau simulée par rapport à son niveau critique, C) valeurs observées (points avec barres d'erreur) et simulées (ligne) de la biomasse sur pied, et D) valeurs observées (points avec barres d'erreur) et simulées (ligne) de la croissance journalière pour le site de Bière, 2016. La bande grise met en évidence la période pendant laquelle le modèle simule du stress hydrique.

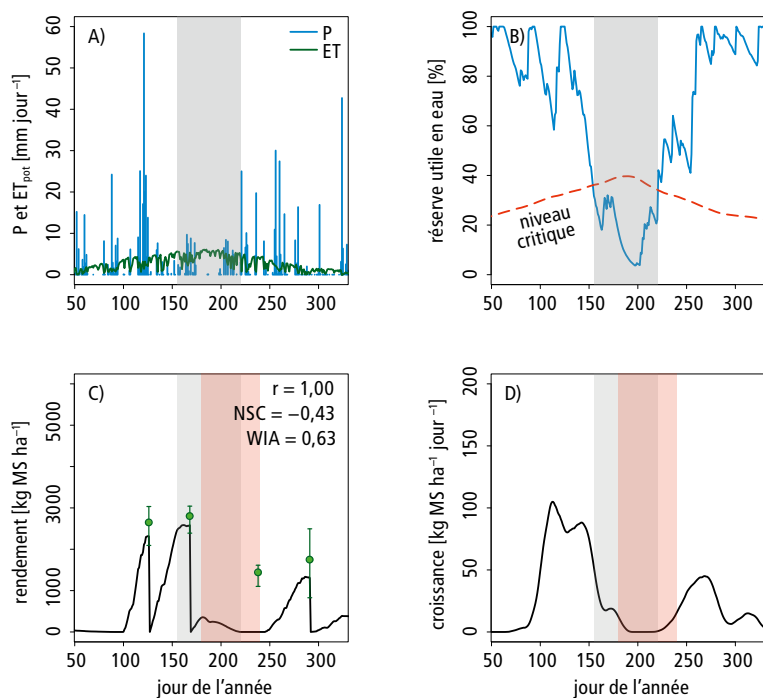


Figure 3 | Comme dans la figure 2, mais pour la simulation de Carrouge, 2015. De plus, la bande rouge montre la période pendant laquelle il n'y a plus de croissance dans la simulation.

saires pour mettre en place le modèle et garantir des résultats fiables.

Les difficultés liées à la représentation du stress hydrique et de ses effets sur la croissance ne peuvent pas, à notre avis, être résolues uniquement avec des changements de paramétrage, ou de la formule mathématique exprimant le stress hydrique en fonction de la disponibilité en eau dans le sol (Calanca *et al.* 2016). Il faudrait plutôt revoir l'approche elle-même, sur la base de nouvelles connaissances relatives à la physiologie des prairies.

Divers progrès ont été réalisés sur les fonctionnalités de ModVege. Le calcul de la phénologie et la simulation de la couche de neige en hiver et au printemps (afin d'étendre le domaine d'application aux régions situées en altitude) font partie des améliorations. Nous avons en outre introduit un traitement systématique de la propagation d'erreurs, permettant de quantifier les incertitudes liées au paramétrage et aux entrées. En vue d'une application opérationnelle du modèle, nous avons aussi envisagé d'intégrer des prévisions météo et donc de prédire avec quelques semaines d'avance la croissance de l'herbe. L'utilisation de prévisions à court terme est déjà un élément intégré à d'autres outils d'aide à la décision (voir la plateforme <http://www.agrometeo.ch>).

Conclusions

Même en tenant compte des limitations actuelles, le système d'analyse et de prévision de la croissance de l'herbe basé sur ModVege peut offrir des informations utiles aux producteurs pour mieux planifier la gestion des pâturages. C'est pour cette raison que des efforts sont en cours pour développer une interface sur la plateforme Agrometeo.

Mais c'est finalement en collaboration avec les producteurs que l'utilité d'un tel système d'aide à la décision pourra être confirmée, et que des démarches d'amélioration continue du modèle pourront être mises en place. Actuellement, les travaux se poursuivent pour mettre en relation les données climatiques, la valeur nutritive, la composition botanique et le développement phénologique; l'idée étant d'intégrer ces différents paramètres dans un outil aussi large que possible. Dans cette perspective, la modélisation de la croissance constitue une première étape importante. ■

Riassunto**Simulazione della crescita dell'erba e delle rese dei pascoli con ModVege**

La previsione della crescita dell'erba potrebbe avverarsi molto utile per gestire i pascoli o decidere del momento migliore per il raccolto dei prati da sfalcio. Il modello ModVege è stato testato e migliorato in base a un campione di 125 situazioni (prato × anno × gestione) raccolto in Svizzera. I confronti tra i valori simulati e quelli misurati evidenziano risultati relativamente affidabili nella maggior parte dei casi. I problemi riscontrati insorgono durante i periodi di siccità prolungata. A medio termine si prevede di diffondere le simulazioni sulla piattaforma Agrometeo.

Summary**Simulation of grass growth and pasture yields with ModVege**

Predicting grass growth could be very useful for the management of pastures, or deciding the best time to harvest hay meadows. The ModVege model was tested and improved using a set of 125 situations (meadow × year × management) collected from grassland areas in Switzerland. Comparisons between simulated and measured data show relatively reliable outputs in a majority of situations. However, the results were less satisfying during periods of prolonged drought. In the medium term, it is planned to disseminate the simulations via the Agrometeo platform.

Key words: grassland management, grass growth, simulation model, decision support system.

Bibliographie

- Allen R. G., Pereira L. S., Raes D. & M. Smith, 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. In: FAO Irrigation and Drainage n° 56. Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations, Rome, 300 p.
- Bossuyt N., Wirthner J., Dussoulier C., Frund D., Meisser M., Ampuero Kragten S. & Mosimann E., 2018. Quand faut-il faucher les prairies intensives? *Recherche Agronomique Suisse* 9 (1), 12–19.
- Brisson N., Launay M., Mary B. & N. Beaudoin (eds.), 2008. Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model. Editions Quæ, INRA, Versailles Cedex, 297 p.
- Calanca P., Deléglise C., Martin R., Carrère P. & Mosimann E., 2016. Testing the ability of a simple grassland model to simulate the seasonal effects of drought on herbage growth. *Field Crops Research* 187, 12–23.
- Cruz P., Duru M., Therond O., Theau J. P., Ducourtieux C., Jouany C., Al Haj Khaled R. & Ansquer P., 2002. Une nouvelle approche pour caractériser les prairies naturelles et leur valeur d'usage. *Fourrages* 172, 335–354.
- Hedderich J. & Sachs L., (2016). *Angewandte Statistik: Methodensammlung mit R. 15., überarbeitete und erweiterte Auflage.* Springer Spektrum, Berlin & Heidelberg, 968 p.
- Jamieson P. D., Porter J. R. & Wilson D. R., 1991. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Research* 27, 337–350.
- Jouven M., Carrère P. & Baumont R., 2006a. Model predicting dynamics of biomass, structure and digestibility of herbage in managed permanent pastures. 1. Model description. *Grass Forage Science* 61, 112–124.
- Jouven M., Carrère P. & Baumont R., 2006b. Model predicting dynamics of biomass, structure and digestibility of herbage in managed permanent pastures. 2. Model evaluation. *Grass Forage Science* 61, 125–133.
- Mosimann E., 2005. Caractéristiques des pâturages pour vaches laitières dans l'ouest de la Suisse. *Revue suisse d'Agriculture* 37 (3), 99–106.
- Mosimann E., Meisser M., Deléglise C. & Jeangros B., 2012. Potentiel fourrager des pâturages du Jura. *Recherche Agronomique Suisse* 3, 516–523.
- Nash, J. E. & J. V. Sutcliffe, 1970. River flow forecasting through conceptual models part I -A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10 (3), 282–290.
- Ruget F., Novak S. & Granger S., 2006. Adaptation du modèle STICS à la prairie. Mise en œuvre dans le système ISOP (Informations et Suivi Objectif des Prairies) pour l'estimation de la production fourragère française. *Fourrages* 186, 241–256.
- Vuffray Z., Deléglise C., Schori F., Glauser W., Calanca P., Meisser M., Frund D., Stévenin L., Bittar A. & Mosimann E., 2017. Typologie de production des pâturages. *Recherche Agronomique Suisse* 8 (11+12), 428–437.
- Willmott C. J., 1981. On the validation of models. *Physical Geography* 2, 184–194.
- Willmott C. J., Robeson S. M. & Matsuura K., 2012. A refined index of model performance. *International Journal of Climatology* 32, 2088–2094.