

LA MODÉLISATION DE L'ÉPIAISON DES GRAMINÉES FOURRAGÈRES : UN MODÈLE VERNALO-PHOTO-THERMIQUE

Mise en situation

La modélisation des stades phénologiques des fourrages permet une bonne anticipation des périodes de récoltes pour les agriculteurs. Mais comment modéliser le développement d'une culture déjà implantée ? Cette étude propose un modèle prenant en compte la vernalisation pour ne pas initier les calculs à une date calendaire au printemps.

Résumé

Des modélisations ont été réalisées pour déterminer la date de l'épiaison des années suivant celle du semis de cinq graminées fourragères (ray-grass anglais, ray-grass italien, ray-grass hybride, fétuque élevée, dactyle) à partir des observations réalisées lors des essais pour l'inscription des variétés au catalogue français. Le modèle vernalo-photo-thermique est constitué d'un facteur d'efficacité de vernalisation, augmentant progressivement au cours de l'hiver, d'un facteur d'efficacité photopériodique, variant avec la durée du jour, et de la température moyenne journalière, modulée par des températures cardinales et les deux facteurs d'efficacité précédents. Le modèle a une précision de prédiction de l'ordre de 5 à 10 jours en fonction des espèces et des précocités.

Summary

The modeling of heading in forage grasses: A vernal-photo-thermal model

Modelisation had been made to predict the heading date the years following the sowing of five forage grasses (rye grass, Italian rye grass, hybrid ryegrass, tall fescue, orchard grass). The vernalo-photo-thermal model uses a vernalization effect, decreasing during the winter, a photoperiodic effect, varying with the length of the day, and the daily mean temperature, altered by cardinal temperatures and the two aforementioned effects. The precision of the model is about 5 to 7 days, depending on the species and on the precocity of the variety.

Auteurs

P. Larsonneau¹, A. Uijtewaal¹,
D. Leclercq²

¹ ARVALIS - Institut du végétal, Station Inter-Instituts, 6 Chemin de la Cote Vieille, F-31450 Baziège, France ²GEVES

Auteur correspondant: p.larsonneau@arvalis.fr

Mots clés

Ray-grass anglais, ray-grass italien, ray-grass hybride, fétuque élevée, dactyle, modélisation, épiaison, graminées fourragères, vernalisation, photopériode.

Key words

Perennial ryegrass, Italian ryegrass, hybrid ryegrass, tall fescue, orchardgrass, modeling, heading, forage grasses, vernalization, photoperiod.

Références de l'article

P. LARSONNEAU, A. UIJTTEWAAL, D. LECLERCQ, (2024). La modélisation de l'épiaison des graminées fourragères : Un modèle vernalo-photo-thermique, *Fourrages* 259, 21-29.

Introduction

Les espèces fourragères sont très largement utilisées pour l'alimentation des ruminants, représentant plus de 60% de la ration des bovins (Devun & Guinot, 2012) et plus de 80% de la ration des ovins (Jousseins *et al.*, 2014). Les prairies temporaires constituent en France près de 10% de la SAU (Huyghe *et al.*, 2015), et sont également des éléments paysagers ayant un impact positif sur la biodiversité et un rôle de puits de carbone (Klumpp et Carrere, 2015). Les prairies temporaires sont souvent des prairies multi-spécifiques, composées d'un mélange de graminées et de légumineuses.

Les stades phénologiques sont de bons indicateurs de la valeur nutritive et de l'ingestibilité des fourrages. Leur digestibilité et teneur en protéines évoluent avec l'apparition des différents stades phénologiques (Lemaire & Belanger, 2020). Les évolutions de ces indicateurs s'expliquent principalement par une diminution du ratio feuille/tige avec le développement de la culture, les feuilles ayant une meilleure valeur nutritive (Arzani *et al.*, 2004).

Il est important pour un éleveur de pouvoir connaître le stade phénologique de ses prairies pour gérer au mieux l'alimentation de son troupeau. Il peut ainsi affiner la prévision des périodes de récolte pour déterminer le compromis rendement/protéine/énergie qu'il souhaite afin de répondre au mieux aux besoins de ses animaux.

Il existe aujourd'hui relativement peu de modèles pour la phénologie des graminées pérennes et a fortiori pour les graminées fourragères (Rouet *et al.*, 2021). Diverses approches sont utilisées pour estimer l'épiaison des cultures fourragères actuellement, soit en utilisant des sommes de températures (Ansquer *et al.*, 2009; Frank & Hofmann, 1989; Griffith & Nelson, 2005; Theau & Zerourou, 2008) ou des dates calendaires par variété (www.herbe-book.org).

Cette étude porte sur les ray-grass anglais (*Lolium perenne* L.), Italien (*Lolium multiflorum* L.) et hybride (*Lolium xhybridum*), la fétuque élevée (*Festuca arundinacea*) et le dactyle (*Dactylis glomerata*). Ces espèces sont présentes dans la majorité des prairies temporaires françaises (AGRESTE, 2022). L'objectif de cette étude était de pouvoir concevoir un modèle de prédiction du stade début épiaison pour ces espèces fourragères, puisque les prévisions de stade se font aujourd'hui à partir d'une date fixe, 1er janvier (Griffith & Nelson, 2005) ou 1er février (Ansquer *et al.*, 2009; Theau & Zerourou, 2008), sans prendre en compte la vernalisation. La vernalisation est une période d'accumulation de températures froides, dans une fourchette de températures variables pour chaque espèce. Ce modèle doit permettre aux éleveurs de prévoir les dates de récoltes des fourrages leur permettant ainsi d'obtenir le compromis entre quantité et qualité qu'ils souhaitent. Pour répondre à cette question, un modèle de somme de température photo-vernalo-thermique (SPTV) a été testé sur plusieurs espèces et ses performances ont été évaluées. L'effet des groupes de précocité par espèce a été étudié afin d'évaluer la pertinence de faire des sous-modèles quand les groupes de précocité existent.

Matériels et méthodes

Afin de déterminer les paramètres du modèle sur les différentes espèces, ainsi que les performances de ce dernier, une base de données a été constituée par le GEVES (Groupe d'Étude et de Contrôle des Variétés Et des Semences) à partir de plusieurs sites d'expérimentation à travers la France (2.1) utilisés dans le cadre de l'inscription des variétés au catalogue Français. Les données météo ont pu être acquises à proximité des différents sites (Origine des données : ARVALIS - Météo-France- Réseau national agroclimatique INRAE), puis ces données ont été traitées selon certains formalismes afin de prédire le stade début épiaison (2.2). Enfin, les performances des différents modèles ont pu être évaluées (2.3).

Sites expérimentaux et base de données

Une base de données a pu être construite pour chaque espèce, regroupant des observations faites sur des plantes les années suivantes de celle de l'implantation, en majorité la première année d'exploitation. Les données se basent sur le réseau national d'expérimentation du GEVES, pour l'évaluation et l'inscription des variétés fourragères. Les sites expérimentaux sont répartis dans toute la France, dans des climats océaniques (Lusignan), océaniques dégradés (Erdre en Anjou), montagnards (Theix), semi-continental (Aiserey) et méditerranéen (Montpellier). Les latitudes des sites expérimentaux sont comprises entre 50.45°N et 43.65°N. Pour le ray-grass anglais (*Lolium perenne* L.), des sous-groupes ont été créés en fonction de la classification de précocité des différentes variétés. Cette valeur de précocité est celle déterminée par le GEVES (Tableau 1)

Chaque site possède 3 à 4 micro-parcelles par variété présente. Le stade début épiaison (Z51 sur l'échelle de Zadoks) correspond à l'émergence de 10 épis au mètre linéaire. Les observations sont faites trois fois par semaine sur chaque micro parcelle à partir de la montaison (Z41 sur l'échelle de Zadoks). Les résultats sont précis à plus ou moins un jour au jugé des observateurs. Les dates d'épiaisons retenues par variété, site et année sont moyennées sur l'ensemble des micro-parcelles par la suite. Les données utilisées pour le paramétrage du modèle sont celles des deux années suivant le semis, la majorité d'entre elles proviennent de l'année suivante de celle du semis, entre 70% et 90% en fonction des espèces.

Les ensembles de données ont été partitionnés en un ensemble d'entraînement pour les modèles et un ensemble d'évaluation. Les données employées pour le paramétrage proviennent des années antérieures à 2018. Ces sous-ensembles de données représentent entre 30 et 50% de l'ensemble initial. De ce fait, l'évaluation est réalisée sur des années qui n'ont pas été prises en compte lors du paramétrage, ce qui permet de simuler les performances du modèle sur de nouvelles années.

TABLEAU 1 : Description des différents jeux de données d'entraînement, le nombre de points correspond au nombre de combinaisons uniques Cultivar x Site x Année

TABLE 1: Description of the different training datasets, the number of points corresponds to the number of unique combinations of Cultivar x Site x Year

Espèce	Années	Sites	Variétés	Nombre de points
Raygrass anglais Précoce/Demi-précoce	2001/2003-2020	13	10	192
Raygrass anglais Intermédiaire/Demi-tarif	2001/2003/2005-2020	12	83	436
Raygrass anglais Tardif	2001/2003/2005-2020	12	51	299
Raygrass anglais Très tardif	2001/2003/2005-2020	12	34	156
Raygrass hybride	2010-2019	8	72	354
Raygrass italien	2007-2020	12	124	711
Fétuque élevée	2002-2020	12	100	914
Dactyle	2001-2020	12	118	1014

Modalités de calculs de la somme de températures

Les graminées fourragères des régions tempérées, comme les céréales à pailles d'hiver, ont besoin d'une double induction pour leur développement reproducteur (Abel *et al.*, 2018; Duchêne *et al.*, 2021; HEIDE, 1994). La première induction se caractérise par un besoin de vernalisation, et parfois un besoin en jours courts. La seconde période d'induction est quant à elle déterminée par l'augmentation de la photopériode au-delà d'un seuil pendant une certaine période, la durée de cette période est dépendante de l'accumulation des températures journalières. La fin de ces deux phases d'induction consécutives correspond à l'initiation florale, et se remarque par l'apparition du stade double ride, peu avant le stade épi 1 cm (Chynoweth, 2022). Les facteurs d'efficacité photopériodique et de vernalisation, décrits plus bas, cherchent à faire une analogie avec la levée des ces phases d'inductions. Toutefois, en raison de l'absence d'observation du stade épi de 1 cm, il n'est pas possible d'affirmer que ces facteurs reproduisent de manière exacte les phases d'induction.

Nombre de modèles qui existent pour la phénologie des fourrages ne prennent pas en compte la vernalisation, et débutent le calcul de la somme de température à différentes dates, au 1er janvier (Griffith & Nelson, 2005), au 1er février (Ansquer *et al.*, 2009; Theau & Zerourou, 2008), voire le jour suivant 5 jours avec des températures positives après le 15 mars (Frank & Hofmann, 1989). Un modèle prenant en compte la vernalisation et la photopériode a

été développé sur l'agropyre (*Thinopyrum intermedium*) (Duchêne *et al.*, 2021). L'agropyre en tant que graminée pérenne a une phénologie proche des autres graminées fourragères. Ce modèle démarre à l'émergence de la culture, ou bien au moment de la récolte de l'année précédente. Les formalismes de ce modèle, détaillés ci-dessous, reposent sur ceux du modèle STICS (Brisson *et al.*, 2009), et sur celui de Duchêne, notamment pour les calculs des facteurs d'efficacité de photopériode et de vernalisation.

Le modèle qui a été utilisé ici est inspiré d'un modèle de sommes vernalo-photo-thermiques (SPTV) inspiré d'ARCWHEAT (Bogard *et al.*, 2015). Il s'agit d'un modèle où l'accumulation de degrés-jours est modifiée simultanément par l'avancée de la vernalisation et par la sensibilité à la photopériode (Figure 2). La somme de températures cumulée quotidiennement est modulée par trois équations qui permettent de tenir compte de l'évolution du développement par des effets de seuils de température, de vernalisation et de photopériode. Le calcul du modèle SPTV démarre ici au 1er octobre de l'année précédente, comme dans le modèle STICS (Brisson *et al.*, 2009), afin d'initier les calculs à un moment où la vernalisation n'a pas encore pu commencer.

Tout d'abord, la température moyenne quotidienne est calculée selon la formule :

$$T_{j\text{moy}} = \frac{T_{j\text{min}} - T_{j\text{max}}}{2} \quad (1)$$

Avec $T_{j\text{min}}$ et $T_{j\text{max}}$ respectivement la température journalière minimale et maximale.

La température effective quotidienne (TTj) est une modification de la température optimale (Topt) par un facteur d'efficacité thermique (FTj), facteur calculé par des températures cardinales Tmin, le zéro de végétation, Topt, la température optimale de développement de la plante, et Tmax, la température maximale de développement de la plante, ainsi que Tjmoy, la température moyenne du jour :

$$\text{Si } T_{jmoy} < T_{min} \text{ ou si } T_{max} < T_{jmoy} : FT_j = 0 \quad (2)$$

$$\text{Si } T_{min} < T_{jmoy} < T_{opt} : FT_j = \frac{T_{jmoy} - T_{min}}{T_{opt} - T_{min}} \quad (3)$$

$$\text{Si } T_{opt} < T_{jmoy} < T_{max} : FT_j = \frac{T_{max} - T_{jmoy}}{T_{max} - T_{opt}} \quad (4)$$

$$\text{Si } T_{max} < T_{jmoy} : FT_j = 0 \quad (4\text{bis})$$

$$TT_j = FT_j \times T_{opt} \quad (5)$$

L'effet de la vernalisation est modélisé par l'équation (6), où VDDj est la somme des valeurs vernalisantes au jour j. Les valeurs vernalisantes de chaque journée sont calculées de manière analogue à FTj dans les équations (2), (3) et (4) avec T1, T2 et T3 les températures de base, optimales et maximales de vernalisation. Vsat correspond au nombre de jours nécessaires à la plante pour vernaliser. Le facteur d'efficacité de vernalisation FVj commence à 0 et augmente progressivement jusqu'à 1.

$$FV_j = \min \left(1; \frac{VDD_j}{V_{sat}} \right) \quad (6)$$

L'effet de la photopériode est modélisé par le facteur d'efficacité photopériodique (FPj) qui se calcule quotidiennement grâce à la formule suivante :

$$\text{Si } P_j < P_{base} : FP_j = 0 \quad (7)$$

$$\text{Si } P_{base} < P_j < P_{opt} : FP_j = \frac{P - P_{base}}{P_{opt} - P_{base}} \quad (8)$$

$$\text{Si } P_{opt} < P_j : FP_j = 1 \quad (9)$$

Avec Pj la photopériode de la journée, Pbase la photopériode de base de la culture, et Popt la photopériode saturante au-delà de laquelle l'augmentation de la durée du jour n'améliore pas l'efficacité de l'accumulation de température.

Finalement, on assemble les termes calculés précédemment pour obtenir l'équation suivante, où SPTV est la somme de température modulée par les facteurs d'efficacité de vernalisation et de photopériode entre le 1^{er} octobre et l'épiaison de la culture :

$$SPTV = \sum_{j=1\text{er octobre}}^{\text{épiaison}} (TT_j \times FP_j \times FV_j) \quad (10)$$

La figure 1 illustre la proximité des valeurs entre la température moyenne Tjmoy et TTj. Les plus grosses différences, autour du 260e jour après le 1e octobre, sont visibles quand la température moyenne quotidienne dépasse Topt, dans le domaine d'application de l'équation (4). Le léger décalage entre les courbes s'explique par l'utilisation d'une température de base négative.

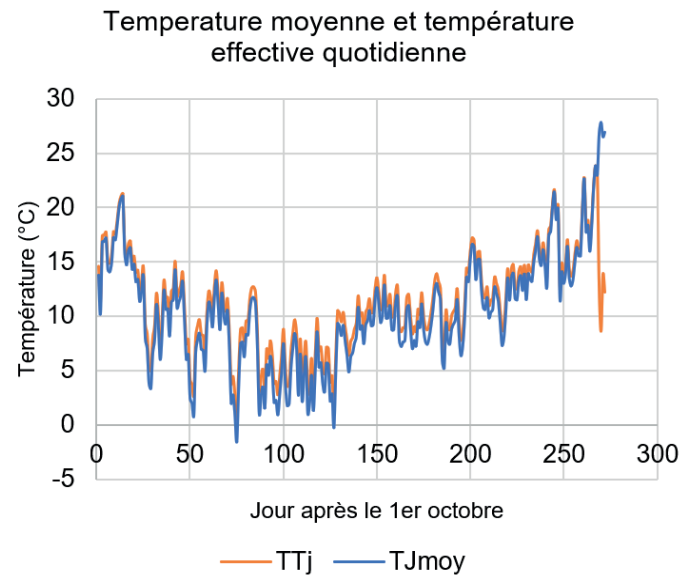


FIGURE 1 : Température effective TT et température moyenne mesurée sur la saison 2019-2020 à Lusignan, Tbase = -1°C, Topt=24°C, Tmax=30°C

FIGURE 1 : Effective Temperature (TT) and Average Measured Temperature for the 2019-2020 Season in Lusignan, with Tbase = -1°C, Topt = 24°C, Tmax = 30°C

La figure 2 montre l'évolution des facteurs d'efficacité du modèle au cours de la saison, et permet d'observer qu'avant la fin de la vernalisation, l'accumulation de températures est très lente, surtout lorsque les températures de cette période sont relativement faibles, en moyenne 7°C. Dans ce cas précis, FV était inférieur à 1 jusqu'au 112e jour après le 1er octobre, soit le 20 janvier. Ainsi, si les deux phases d'inductions sont ici agrégées en un seul facteur, ce graphique montre que le facteur d'efficacité de vernalisation augmente d'abord, puis le facteur d'efficacité photothermique, faisant une analogie avec les mécanismes décrits dans la bibliographie.

Évaluation des performances et optimisation des paramètres des modèles

Pour évaluer les performances des différents modèles, la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est calculée à chaque fois. Cet indicateur renvoie l'écart-type des résidus, l'erreur de prévision moyenne associée au modèle. Il s'exprime ici en jour. La RMSE est calculée selon l'équation (11).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (11)$$

Dans cette équation, n est le nombre d'observations, y_i est la ième valeur de date d'épiaison calendaire observée et ŷ_i est la valeur prédite correspondant à la ième valeur observée.

Ici, la RMSE a été pondérée afin d'éviter un trop fort effet de certains sites ou certaines années surreprésentés dans le

jeu de données. Pour ce faire, un modèle mixte a été utilisé, en considérant le lieu, l'année, et l'interaction entre les deux comme un effet aléatoire. L'intercept du modèle a ensuite été récupéré, étant analogue à l'erreur quadratique moyenne (MSE), puis sa racine carrée a été calculée afin d'obtenir la RMSE. La formule ainsi utilisée est l'équation (14). Y correspond à l'écart au carré entre les valeurs simulées et les valeurs observées.

$$Y = (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (12)$$

$$Y_{ijk} = \alpha + SITE_i + ANNEE_j + SITE \times ANNEE_{ij} + \epsilon_{ijk} \quad (13)$$

Cette équation est un modèle mixte à effet aléatoire, où le seul effet fixe est α, qui correspond à l'estimation de la moyenne de Y, et les effets aléatoires SITE_i, ANNEE_j, SITE x ANNEE_{ij} sont les écarts à cette moyenne expliqués par le site, l'année et l'essai, et suivent une distribution normale. ε_{ijk} représente le résidu, suivant également une distribution normale. La RMSE peut ainsi être obtenue avec une racine carrée :

$$RMSE = \sqrt{\alpha} \quad (14)$$

Pour chaque espèce, et dans le cas du ray-grass anglais chaque classe de précocité, l'optimisation des équations permettant le calcul de la SPTV s'est faite en observant la RMSE des dates calendaires d'épiaison pour différentes valeurs sur les différents

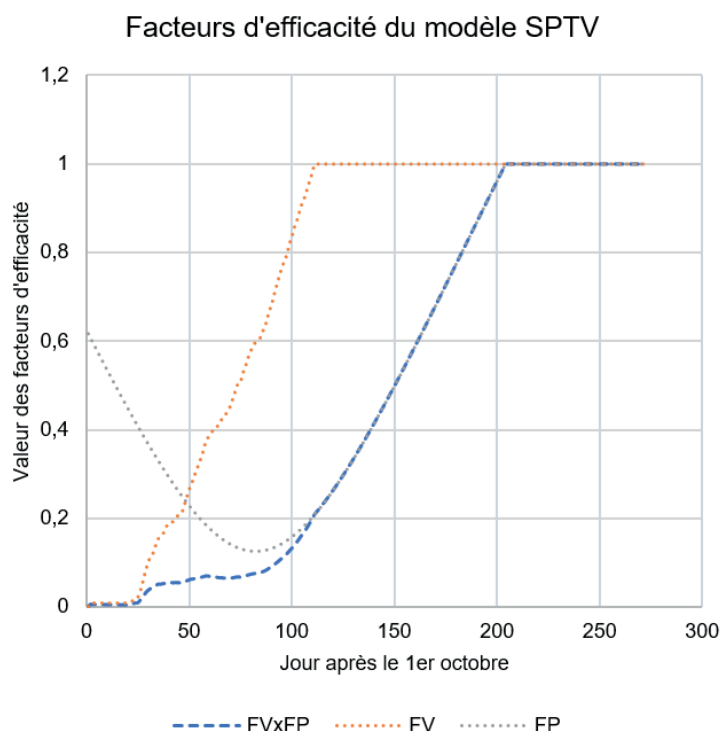


FIGURE 2 : Représentation des composants du modèle SPTV pour le raygrass anglais précoce/ demi-précoce sur la saison 2019-2020 à Lusignan. FP = facteur d'efficacité photopériodique, FV = facteur d'efficacité de vernalisation

FIGURE 2: Representation of the SPTV Model Components for Early/Mid-Early Perennial Ryegrass during the 2019-2020 Season in Lusignan. FP = Photoperiod Efficiency Factor, FV = Vernalization Efficiency Factor

paramètres. La combinaison de paramètres permettant d'obtenir la plus faible valeur de RMSE, et donc la précision du modèle, a été conservé à chaque fois. Seules des valeurs entières ont été testées, des valeurs décimales n'apportant pas de gain de précision significatif pour le modèle, tout en complexifiant fortement l'optimisation. En parallèle, une « RMSEP (RMSE Prédiction) date fixe » est calculée en prenant la date moyenne d'épiaison avant 2018, afin de déterminer si la prévision faite par le modèle apporte une plus-value par rapport à une prévision faite avec une date calendaire fixe pour l'espèce ou le groupe de précocité considéré.

Les paramètres optimisés et non optimisés ainsi que les valeurs explorées sont détaillés dans le tableau 2 ont été inspirées par la bibliographie (Brisson *et al.*, 2009 ; Duchêne *et al.*, 2021). Les valeurs de T_{opt} et T_{max} ont été fixés, comme dans le modèle de Duchêne, leur calibration augmentant la complexité des calculs sans impacter les performances du modèle.

L'optimisation de T_{min} s'est faite à part, en utilisant un modèle de somme de température, sans prise en compte de la photopériode, ni de la vernalisation, inspiré des modèles de la bibliographie. La date de départ des calculs a elle aussi variée, la valeur permettant de trouver la RMSE la plus faible pour la date d'épiaison a été nommé « Date de départ ». Le jeu de données n'a pas été partitionné dans ce cas pour obtenir une RMSEP, puisque ce modèle n'est pas celui détaillé ici.

Les manipulations des bases de données et les optimisations de paramètres ont été réalisées à l'aide du logiciel R (version 4.1.2), avec l'utilisation des bibliothèques internes Arvalis pour l'accès aux données météo et le calcul des sommes de températures. Le calcul du modèle mixte a lui été fait à l'aide du package LME4 (<https://cran.r-project.org/web/packages/lme4/index.html>).

TABLEAU 2 : Plage d'optimisation des paramètres
TABLE 2: Optimization Range of Parameters

Paramètre optimisé	Plage de valeurs
T_{min}	[-2 ;4] °C
P_{base}	[3 ;12] h
P_{opt}	[13 ;24] h
T_2	[4 ;8] °C
T_3	[8 ;14] °C
V_{sat}	[0 ;90] j

Résultats

Détermination de la température de base

Les températures de base T_{base} pour les différentes espèces trouvées en optimisant un modèle de somme de températures sont répertoriées dans le tableau 3.

La plupart des espèces ont un zéro de végétation négatif, à l'exception de la fétuque. Le choix a été fait de conserver un zéro de végétation négatif car ces plantes peuvent continuer d'accumuler du sucre à des températures très basses (Gusta & Wisniewski, 2013). Des valeurs négatives ont déjà été utilisées auparavant sur des espèces fourragères (Mooks *et al.* 2009).

Performance des modèles

À la suite des optimisations, les performances des modèles pour les différentes espèces sont présentées dans le tableau 4.

Les RMSEP obtenues par les modèles varient entre 5.2 j pour le modèle le plus précis (raygrass d'Italie) et 10.4 j pour le moins précis (fétuque élevée). Il est à noter que les effectifs ne sont pas les mêmes à chaque fois (Tableau 1). Les performances du modèle SPTV sont du même ordre de grandeur que celles du modèle moins complexe de somme de températures présentées dans le tableau 3. Les RMSEP date fixe sont systématiquement plus élevées que les RMSEP du modèle.

La figure 3 montre les points simulés et observés des dates d'épiaison des différentes espèces, en fonction de s'il s'agit du jeu de données d'entraînement ou d'évaluation. Le graphique montre une grosse variabilité du modèle pour les espèces les plus précoces. Une importante variabilité est notamment visible pour les prévisions précoces d'épiaison de la fétuque élevée ainsi que pour le raygrass hybride. La répartition des points en ligne horizontale montre la variabilité de l'épiaison pour un site et une année donnée.

TABLEAU 3 : Température de base des principales graminées fourragères. La RMSE pour le ray-grass anglais est la moyenne de la RMSE des différents groupes de précocité

TABLE 3: Base Temperature of Major Forage Grasses. The RMSE for Perennial Ryegrass is the Average RMSE of Different Earliness Groups

Espèce	Température de base	Date de départ	RMSE
Raygrass anglais	-2 °C	01/03	6.2
Raygrass d'Italie	-2 °C	25/02	4.7
Raygrass hybride	-2 °C	25/02	6.3
Dactyle	-2 °C	25/02	7.0
Fétuque élevée	0 °C	15/01	9.2

TABLEAU 4 : Paramètres par classe de précocité et performance du modèle SPTV
 TABLE 4: Parameters by Earliness Class and Performance of the SPTV Model

Espèce	RMSE	RMSEP	RMSEP Date fixe
Raygrass anglais Très Tardif	5.0	6.5	7.1
Raygrass anglais Tardif	5.1	5.8	6.1
Raygrass anglais Intermédiaire / Demi-tardif	6.2	6.3	8.9
Raygrass anglais Précoce / Demi-précoce	6.9	7.6	11.8
Raygrass hybride	5.5	8.1	8.6
Raygrass d'Italie	5.1	5.2	8.2
Fétuque élevée	7.8	10.4	19.2
Dactyle	7.6	5.6	11.1

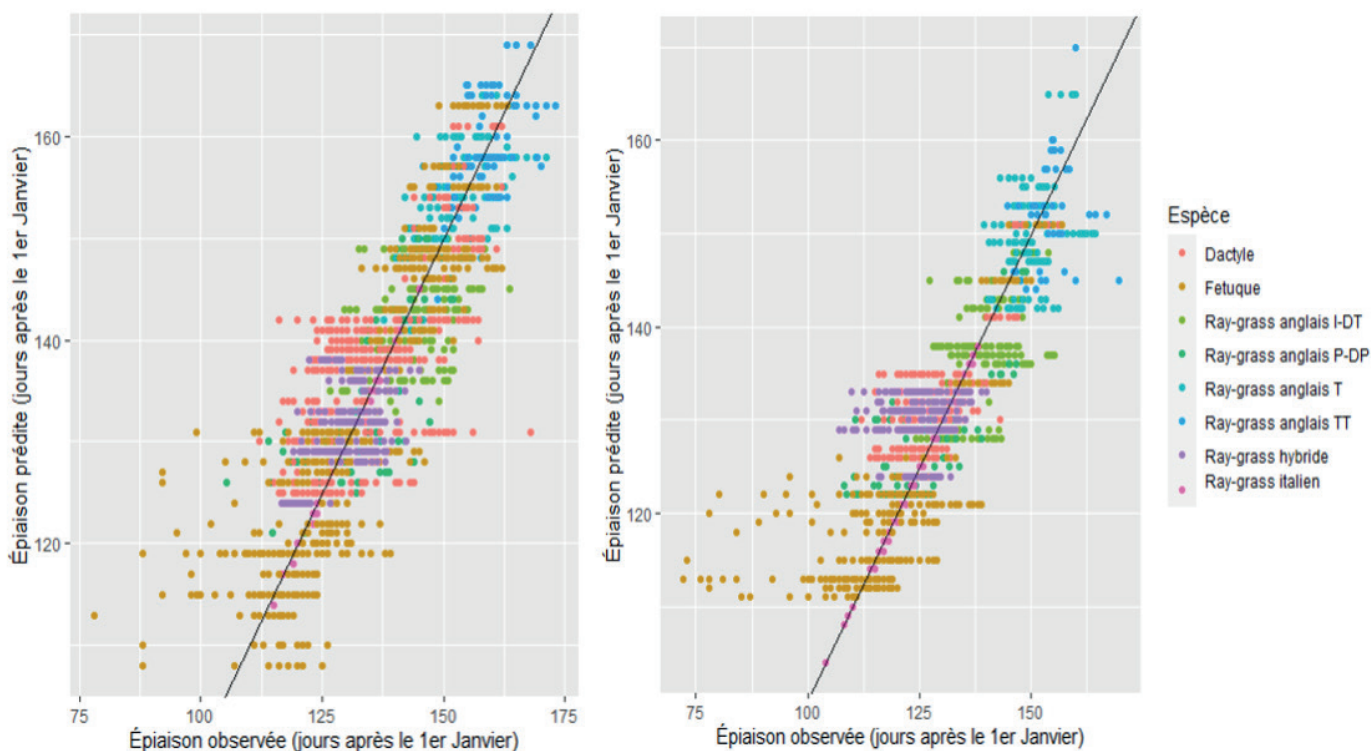


FIGURE 3 : Observation des données d'épiaison prédites et observées, pour les différentes espèces fourragères utilisées. À gauche, les données utilisées pour la calibration du modèle, à droite les données utilisées pour l'évaluation
 FIGURE 3: Observation of Predicted and Observed Heading Data for Different Forage Species. On the Left: Data Used for Model Calibration; On the Right: Data Used for Model Evaluation

Discussion

Performances du modèle et comparaison à d'autres

Les performances de ce modèle SPTV sont comparables à celles d'autres modèles utilisés sur d'autres espèces précédemment évoquées. Dans un modèle de prévision des stades du blé, se basant sur des traits génétiques pour son paramétrage, la RMSE était de 4.7 j (Bogard *et al.*, 2015). Ce modèle est autant, voire plus, performant que le modèle évalué ici. Cela peut s'expliquer par le fait que les essais et donc la quantité de données disponibles pour paramétrer et évaluer ce modèle sont beaucoup plus nombreux pour le blé, et que le matériel génétique des fourrages est différent, et moins bien connu. Par ailleurs, le modèle de Bogard *et al.* débute au semis du blé, ce qui constitue un point de départ plus juste qu'une date calendaire. Le modèle développé sur l'agropyre (Duchêne *et al.*, 2021) quant à lui a une RMSE de 7.7 j, plus haute que la RMSEP moyenne ici, et celui-ci est basé sur une plante à la physiologie plus proche des graminées fourragères. Il est à noter que ce dernier modèle débute au moment de l'émergence de la plante ou de la dernière date de récolte, quand le modèle SPTV ici détaillé débute ses calculs indépendamment de la date de semis, prévoyant l'épiaison sur des prairies déjà installées. Lors de la construction de la base de données, sur certains essais, des amplitudes d'épiaison pour une même variété ont été observées jusqu'à 8 à 10 jours entre micro-parcelles, il y a donc une variabilité forte sur l'arrivée de l'épiaison au sein même d'une parcelle pour une année donnée, visible sur la figure 3.

Les prédictions à date fixe sont systématiquement moins bonnes que celles du modèle SPTV si l'on observe la RMSEP. En revanche, la RMSEP du modèle SPTV est proche de la RMSE obtenue avec un modèle de somme de température plus simple sur toutes les espèces, comme détaillé dans le tableau 3, à l'exception du dactyle pour laquelle le modèle SPTV permet une meilleure prévision du début de l'épiaison. Il est tout de même important de noter que les performances du modèle SPTV ici

Limites du modèle et améliorations

La calibration des modèles s'est faite principalement sur la 1^{re} année d'exploitation (entre 70% et 90% des données disponibles), et il est possible d'émettre des réserves sur les performances de ce modèle sur des prairies plus anciennes. Le modèle a été calibré grâce à des parcelles d'évaluation variétale dont le protocole de conduite agronomique (densité semis, fertilisation...) est homogène entre sites d'essais. La conduite de ces essais est parfois différente des pratiques des éleveurs, en effet, une coupe de déprimage est réalisée sur les parcelles de dactyle, fétuque, ray-grass anglais en sortie d'hiver, dans le but de favoriser le tallage sans impacter la montaison de l'apex. Le stade début épiaison correspond à la sortie de l'épi de la gaine, et ne correspond pas uniquement à du développement (modification de la fonction de certains tissus

de la plante) mais également à de la croissance (accumulation de biomasse par l'allongement des feuilles et du pédoncule). Ainsi, la date du début de l'épiaison peut être impactée par un stress azoté, l'application d'un bon niveau d'azote ayant tendance à réduire l'amplitude d'apparitions des stades phénologiques tardifs (Ansquer *et al.*, 2009), mais cet aspect n'a pas été étudié ici, par manque d'informations et par volonté de conserver un modèle « simple ». Un modèle prenant également en compte un bilan hydrique pourrait être plus performant, et nécessiterait des observations de la physiologie des plantes sur des essais de réponse à l'eau des fourrages. Si des tendances peuvent s'observer sur peu d'essais, il sera nécessaire d'observer l'impact du stress hydrique et/ou azoté sur plusieurs sites et années afin d'évaluer l'impact d'un tel stress sur l'apparition des stades phénologiques. Cependant, les performances des modèles sont relativement bonnes sur les observations tardives, laissant supposer que relativement peu de stress hydrique a été observé sur les essais, et qu'il n'a que peu impacté les prévisions ici.

Si le modèle repose sur des facteurs climatiques, il ne prend en compte aucun facteur pédologique. L'effet de la profondeur de sol ou de l'hydromorphie n'a jamais été décrit sur les cultures fourragères, mais l'anoxie causée par cette dernière pourrait éventuellement avoir un impact sur le développement des cultures. La caractérisation de cet effet nécessiterait des observations de la phénologie des fourragères dans des parcelles proches, et avec une hydromorphie bien caractérisée (Baize & Ducommun, 2014). Cependant, cette caractérisation peut être difficile à faire pour un usager du modèle ne connaissant pas très précisément ses sols. Le modèle pourrait également gagner en précision si des observations du stade épi 1cm étaient effectuées. Cela permettrait de mieux rendre compte de la fin des périodes d'induction (Chynoweth, 2022), et ainsi de prédire plus finement l'apparition des différents stades phénologiques, donc de l'épiaison.

Enfin, le modèle ici ne traite que de la 1^{re} épiaison des espèces, et pas sur les cycles ultérieurs de l'année, faute de données disponibles.

Conclusion

Le modèle SPTV semble pertinent pour prévoir la date du stade épiaison avec une erreur moyenne d'environ 5.2 à 10.4 jours selon l'espèce et le groupe de précocité. Les performances sont de l'ordre de grandeur d'autres modèles analogues sur d'autres espèces, et meilleur qu'une prévision à date fixe, et un travail de caractérisation plus fine de la fertilisation, du statut hydrique, de la pédologie ou de la génétique de ces espèces pourrait éventuellement permettre une prévision plus précise.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abel, S., Byrne, S. L., Asp, T., & Boelt, B. (2018). Predicting anthesis date of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) with growing degree-days at heading. *Grass and Forage Science*, 73(1), 233–238. <https://doi.org/10.1111/gfs.12300>
- Ansquer, P., al Haj Khaled, R., Cruz, P., Theau, J. P., Therond, O., & Duru, M. (2009). Characterizing and predicting plant phenology in species-rich grasslands. *Grass and Forage Science*, 64(1), 57–70. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2008.00670.x>
- Arzani, H., Zohdi, M., Fish, E., Zahedi Amiri, G. H., Nikkhah, A., & Wester, D. (2004). Phenological effects on forage quality of five grass species. *Journal of Range Management*, 57(6), 624–629. <https://doi.org/10.2111/1551-5028>
- Baize, D., & Ducommun, C. (2014). Reconnaître les sols de zones humides. Difficultés d'application des textes réglementaires (Vol. 21).
- Bogard, M., Pierre, J. B., Huguenin-Bizot, B., Hourcade, D., Paux, E., le Bris, X., & Gouache, D. (2015). A simple approach to predict growth stages in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) combining prediction of a crop model and marker based prediction of the deviation to a reference cultivar: A case study in France. *European Journal of Agronomy*, 68, 57–68. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.04.007>
- Brisson, N., Launay, M., Mary, B., & Beaudoin, N. (2009). Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model.
- Chynoweth, R. J. (2022). Phenological development of perennial ryegrass in response to temperature and photoperiod.
- Devun, J., & Guinot, C. (2012). Alimentation des bovins : Rations moyennes et autonomie alimentaire.
- Duchêne, O., Dumont, B., Cattani, D. J., Fagnant, L., Schlautman, B., DeHaan, L. R., Barriball, S., Jungers, J. M., Picasso, V. D., David, C., & Celette, F. (2021). Process-based analysis of *Thinopyrum intermedium* phenological development highlights the importance of dual induction for reproductive growth and agronomic performance. *Agricultural and Forest Meteorology*, 301–302. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108341>
- Frank, A. B., & Hofmann, L. (1989). Relationship among grazing management, growing degree-days, and morphological development for native grasses on the Northern Great Plains. *Journal of Range Management*, 42(3), 199–202. <https://doi.org/10.2307/3899472>
- Griffith, S., & Nelson, M. A. (2005). Tall and fine fescue: relationship between growing degree days, developmental stage, and nitrogen acquisition. www.ocs.orst.edu
- Gusta, L. v., & Wisniewski, M. (2013). Understanding plant cold hardiness: An opinion. *Physiologia Plantarum*, 147(1), 4–14. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2012.01611.x>
- HEIDE, O. M. (1994). Control of flowering and reproduction in temperate grasses. *New Phytologist*, 128(2), 347–362. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1994.tb04019.x>
- Huyghe, C., Peeters, A., de Vlieghe, A., & de Vlieghe La, A. (2015). La prairie en France et en Europe Colloque présentant les méthodes et résultats du projet Climagie (métaprogramme ACCAF). <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01233899>
- Jousseins, C., Tchakérian, E., de Boissieu, C., Morin, E., & Turini, T. (2014). Alimentation des ovins : rations moyennes et niveaux d'autonomie alimentaire.
- Klump, K., & Carrere, P. (2015). Le stockage de carbone des prairies permanentes et temporaires, le lien au 4 pour 1 000.
- Lemaire, G., & Belanger, G. (2020). Allometries in plants as drivers of forage nutritive value: A review. In *Agriculture (Switzerland)* (Vol. 10, Issue 1). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/agriculture10010005>
- Monks, D., Sadatasilan, K., Moot, D. (2009). "Cardinal temperatures and thermal time requirements for germination of annual and perennial temperate pasture species" *Agronomy New Zealand* 39: 95–110.
- Rouet, S., Barillot, R., Leclercq, D., Bernicot, M. H., Combes, D., Escobar-Gutiérrez, A., & Durand, J. L. (2021). Interactions Between Environment and Genetic Diversity in Perennial Grass Phenology: A Review of Processes at Plant Scale and Modeling. In *Frontiers in Plant Science* (Vol. 12). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.672156>
- Theau, J.-P., & Zerourou, A. (2008). Herbâge, une méthode de calcul des sommes de températures pour la gestion des prairies.