

Comprendre et prédire la phénologie du soja pour adapter la culture à de nouveaux environnements climatiques

Schoving C.¹, Alric F.², Berger M.³, Chambert C.⁴, Champolivier L.⁴, Colombet C.¹, Gras A.⁵, Jeanson P.², Labalette F.⁶, Marchand D.¹, Stöckle C.O.⁷, Debaeke P.¹, Maury P.¹

¹ AGIR, Université de Toulouse, INRA, F-31320 Castanet-Tolosan

² EURALIS SEMENCES, F-31700 Mondonville

³ Université de Toulouse, INPT El Purpan, F-31300 Toulouse

⁴ Terres Inovia – Institut technique des oléagineux, des protéagineux et du chanvre, F-75378 Paris

⁵ RAGT 2n SAS, F-12033 Rodez

⁶ Terres Univia – Interprofession des huiles et protéines végétales, F-75378 Paris

⁷ Biological Systems Engineering, Washington State University, Pullman, WA, United States

Correspondance : pierre.maury@ensat.fr

Résumé

L'exploration de nouvelles stratégies agronomiques (semis très précoce, expansion de la culture à des latitudes plus élevées, double culture) pour augmenter la production de soja en Europe dans un contexte de changement climatique impose de prévoir la phénologie de la culture dans des environnements thermiques et photopériodiques variés. Dans cet objectif, le modèle (Simple Phenology) de prédiction de la phénologie du soja a été calibré et évalué à partir de données expérimentales. Pour la calibration, deux expériences ont été réalisées avec 10 génotypes contrastés (groupes de maturité 000 à II) : 1- suivi phénologique de plantes en pots sur la plateforme Heliaphen-INRA Toulouse avec 6 dates de semis, 2- réponse de la germination à la température en conditions contrôlées. L'évaluation du modèle a été réalisée à partir d'essais multi-locaux menés dans le cadre du projet SOJAMIP 2012-15 ainsi qu'à l'INRA Toulouse en 2017 et 2018. Les températures cardinales de germination (Tmin, Topt et Tmax) sont proches de 0, 30 et 40°C ; avec des différences significatives de sensibilité des variétés à la photopériode. Le modèle calibré avec un paramétrage variétal a montré une RMSE de ~ 6 jours pour la prédiction du cycle cultural (i.e. stade cotylédons à maturité physiologique). Coupler l'expérimentation et la modélisation agronomique permettra de positionner le cycle cultural de variétés de soja dans de nouveaux environnements.

Mots-clés : Changement climatique, Date de semis, Interactions génotype x environnement, *Glycine max*, Phénotypage variétal, Photopériode.

Abstract: Understanding and predicting soybean phenology for crop adaptation to new climatic conditions

Developing new cropping strategies (very early sowing, crop expansion at higher latitudes, double cropping) to improve soybean production in Europe under climate change needs a good prediction of phenology in different temperature and photoperiod conditions. For this aim, a soybean phenology model was calibrated and evaluated using experimental data. Two experiments were carried out with 10 contrasting genotypes (maturity group 000 to II): 1- Phenological monitoring of plants in pots on the Heliaphen platform with 6 sowing dates (INRA Toulouse). 2- Response of seed germination to temperature in controlled conditions. Multilocal trials carried out as part of the SOJAMIP 2012-15 project and at INRA Toulouse in 2017 and 2018, were used to evaluate the phenology predicted by Simple

Phenology (SP) model. Cardinal temperatures (minimal, optimal and maximal) of germination were close to 0, 30 and 40°C, respectively; with significant differences for photoperiod sensitivity among varieties. The calibrated model with varietal parameters showed an RMSE of less than 6 days for the prediction of crop cycle duration (i.e. cotyledons stage to physiological maturity). Combining experimentation and agronomic modeling will make it possible to predict phenology of soybean genotypes in new environments.

Keywords: Climate change, Planting date, Genotype x environment interactions, *Glycine max*, Varietal phenotyping, Photoperiod

Introduction

L'Union européenne (UE-28) importe un peu plus de 40 millions de tonnes de soja annuellement pour l'alimentation animale et humaine (FAOSTAT, 2018). Les importations proviennent majoritairement d'Argentine (tourteaux) et du Brésil (graines) générant des coûts environnementaux importants au niveau global en raison de la culture intensive et massive du soja et de la déforestation que cela implique. La production de soja dans l'UE-28 a fortement progressé au cours de ces 5 dernières années, mais celle-ci reste encore très insuffisante avec 2.8 millions de tonnes produites en 2018, principalement par l'Italie, la France et la Roumanie.

Le soja possède pourtant des qualités justifiant son intégration dans des systèmes agroécologiques. Il s'agit d'une plante légumineuse ne nécessitant pas d'engrais azoté, conduite avec peu de traitements phytosanitaires, présentant un bilan de gaz à effet de serre très avantageux et fournissant des graines riches en protéines (38-42 % de la matière sèche) (Preissel et al., 2015). Cette culture présente de réels atouts agro-environnementaux dans le cadre d'une agriculture durable comme en atteste la forte proportion de soja cultivée en agriculture biologique en France (18 %) (Jouffret et al., 2015; Terres Univia, 2018). Une relance durable de la production de soja en France (objectif de la filière de doubler les surfaces d'ici 2025 avec 250 000 ha) nécessite à la fois d'améliorer les performances de la culture au sein de ses aires traditionnelles de production (Sud-Ouest et Est de la France) dans des systèmes de production diversifiés (avec irrigation plus ou moins restrictive ou en sec ; en semis très précoce ou non), mais également de l'introduire différemment dans la succession (par exemple en «double culture») et dans de nouvelles zones de production plus septentrionales à des fins de diversification et de rupture des rotations de type « hiver » (notamment pour répondre au plan Ecophyto2). Cependant, le principal frein à la culture du soja reste le manque d'eau (Merrien, 1994 ; Sojamip, 2012), en particulier pour les systèmes de culture du Sud de l'Europe confrontés à des sécheresses plus longues et plus fréquentes et à la pression grandissante sur l'utilisation des ressources en eau pour l'irrigation. Par contre, l'augmentation des températures pendant la saison de croissance du soja est une opportunité pour le développement de cette culture dans les régions septentrionales de l'Europe (IPCC, 2014).

En effet, le caractère thermophile du soja pourrait être un avantage dans ce contexte d'augmentation des températures pour allonger la période de culture et cultiver cette légumineuse d'origine tropicale à des latitudes plus élevées. Cependant, il sera nécessaire de positionner son cycle cultural dans une gamme de températures supérieure à un certain seuil, pour éviter des récoltes trop tardives ou un stress « froid » en début de cycle (Mahieu et Brinkman, 1990 ; Maury et al., 2015). Par ailleurs, le soja est une plante de jours courts, sensible à la photopériode. En effet, la durée du jour régule l'apparition de la floraison (Caffaro et al., 1988 ; Hadley et al., 1984) et la durée des phases de développement (Kantolic et Slafer, 2001 ; Nico et al., 2015 ; Raper et Thomas, 1978). La sensibilité de la plante à la photopériode est également à prendre en compte si l'on souhaite étendre l'aire de culture du soja à des

latitudes plus élevées, ou modifier sensiblement les dates de semis habituelles. Les modifications de dates de semis ont déjà été largement testées outre Atlantique, mais principalement avec des variétés tardives qui ne sont pas cultivables en Europe (Hu et Wiatrak, 2012 ; Salmeron et al., 2014). On sait néanmoins qu'un semis tardif aura tendance à limiter le rendement du fait d'un raccourcissement de la phase de remplissage des graines. Le semis très précoce et l'utilisation de variétés adaptées pourraient représenter des approches prometteuses pour la culture du soja dans des systèmes contraints par l'eau. Il est attendu de cette pratique une esquivance partielle des périodes les plus contraignantes sur le plan thermique et hydrique autorisant ainsi des économies d'eau d'irrigation (Maury et al., 2015). Trois stratégies d'adaptation de la culture au changement climatique sont actuellement explorées dans le cadre du projet Sojamip 2020 : (i) le semis précoce pour esquivancer la sécheresse, (ii) l'exploration de nouvelles zones de culture plus au Nord et (iii) la double culture imposant un semis plus tardif du soja suite à la récolte d'une céréale d'hiver. **Dans cet objectif, il est nécessaire de comprendre et prévoir les effets de la température et de la photopériode sur la phénologie du soja pour la gamme de variétés actuellement cultivées en Europe.**

La démarche mise en œuvre (Figure 1) repose sur trois piliers : (i) l'analyse de processus physiologiques clés en conditions contrôlées et le phénotypage variétal (i.e. la réponse de la phénologie à la température et à la photopériode pour une large gamme variétale), (ii) l'évaluation des interactions génotype-environnement-conduite culturale (IGEC) pour des variétés de référence au champ avec différentes dates de semis et conduites hydriques, et (iii) la modélisation dynamique des IGEC.

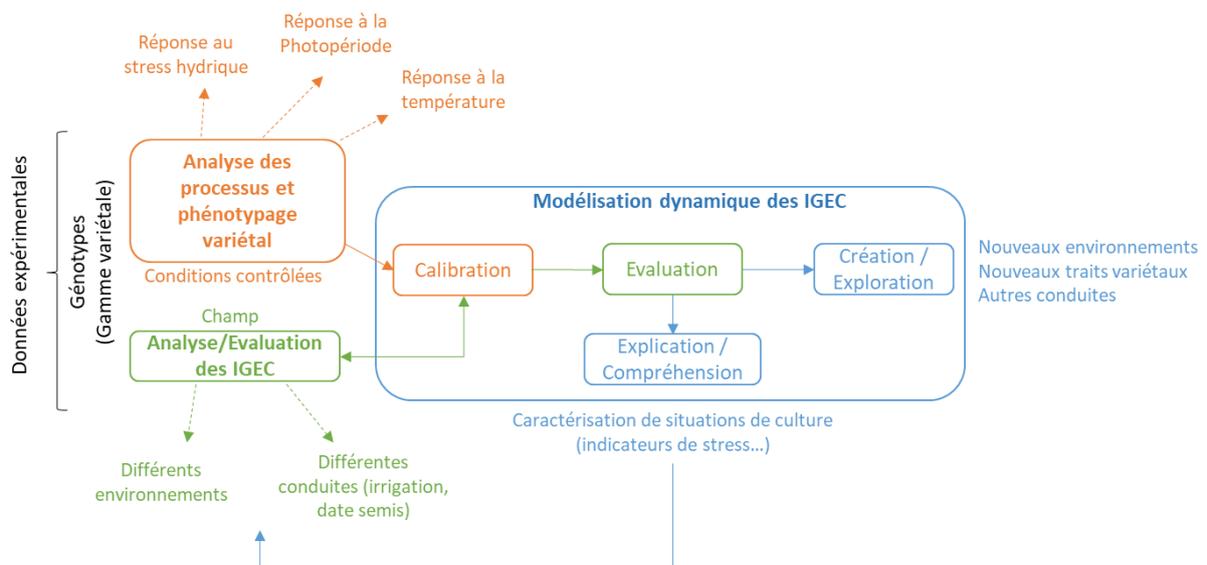


Figure 1 : Schéma général de la démarche d'analyse et de modélisation des interactions génotype-environnement-conduite (IGEC). Cette démarche peut s'appliquer à différents processus écophysiologiques mais sera utilisée ici pour étudier la phénologie. Le phénotypage des variétés en conditions contrôlées et au champ (données expérimentales) sert à calibrer puis évaluer des modèles de culture plus ou moins complexes. Dans cette étude, les données issues des expérimentations en conditions contrôlées, les plus précises, serviront de base de calibration ; l'évaluation du modèle sera réalisée à l'aide d'un jeu de données « champ ». Le modèle ainsi calibré et évalué servira à donner des clés de lecture des données expérimentales et permettra l'exploration de nouvelles conditions culturales.

1. Analyse de la réponse de la phénologie à la température et à la photopériode : caractérisation des types variétaux de soja

L'objectif ici est de caractériser 1- les températures cardinales (minimale, optimale et maximale) qui gouvernent la phénologie d'une gamme de variétés de soja et 2- la réponse de la phénologie des variétés à différentes photopériodes, et différentes interactions photopériodes-températures.

Chez le soja, la littérature fait état de températures optimales de développement comprises entre 22 et 32°C (Boote, 2011 ; Boote et al., 1998 ; Grimm et al., 1993 ; Parent et Tardieu, 2012 ; Setiyono et al., 2007), pouvant varier au cours du cycle cultural. Les températures dites minimales, en dessous de laquelle le soja ne se développe pas se situent dans une gamme assez large allant de 2.5 à 13.2°C selon les sources (Covell et al., 1986 ; Grimm et al., 1993 ; Salem et al., 2007 ; Setiyono et al., 2007 ; Sinclair et al., 2005). Les effets de températures maximales autour de 40°C ont été peu étudiés.

En concertation avec les partenaires du projet Sojamip 2020, nous avons retenu 10 variétés contrastées en termes de groupes de maturité (000 – très précoce à II – tardif), de types de croissance (semi-déterminé à indéterminé) et de morphologie (forme des feuilles, port). La gamme de groupes de maturité retenue est représentative des variétés cultivées en Europe (Kurasch et al., 2017). Ces variétés sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques des variétés utilisées dans l'étude. Isidor, Santana et E cudor ont été cultivées dès le début du projet Sojamip en 2010.

Variété	Obtenteur	Groupe de maturité	Type de croissance	Type de feuille
KLAXON	RAGT 2N	000(0)	indéterminé	ovale pointue
RGT SHOUNA	RAGT 2N	000	semi-indéterminé	ovale pointue
SULTANA	RAGT 2N	000	indéterminé	ovale pointue
ES MENTOR	EURALIS SEMENCES	00	semi-indéterminé	ovale arrondie
SIGALIA	RAGT 2N	00	semi-indéterminé à indéterminé	ovale arrondie
ES PALLADOR	EURALIS SEMENCES	I	indéterminé	lancéolée
ISIDOR	EURALIS SEMENCES	I	semi-déterminé	grande et arrondie
SANTANA	RAGT 2N	I/II	indéterminé	ovale arrondie
BLANCAS	CAUSSADE SEMENCES	II	indéterminé	ovale arrondie
ECUDOR	EURALIS SEMENCES	II	indéterminé	grande et arrondie

1.1 Réponse de la germination à la température

D'après les travaux de Parent *et al.* (2010), on peut postuler que les températures cardinales sont les mêmes quel que soit le processus de développement pour une espèce donnée. C'est pourquoi, en raison de sa simplicité d'étude, nous avons retenu le processus de germination pour accéder à la détermination des températures cardinales pour 10 variétés: dix températures de germination ont été étudiées, allant de 3 à 43 °C. Pour ce faire, 100 graines de chaque variété ont été placées dans des boîtes de Pétri entre deux papiers filtres humidifiés, répartis en 4 blocs (4 * 25 graines) et placés dans un incubateur thermorégulé. Les graines germées ont été comptées 2 à 3 fois par jour et retirées de la boîte. A partir de ces observations, il a été possible de réaliser successivement des ajustements de Gompertz représentant le taux de germination en fonction du temps, puis des ajustements de Yin pour formaliser la réponse de la vitesse de germination à la température (Figure 2) (Tribouillois et al., 2016 ; Yin et al., 2003). Cette dernière étape permet de déterminer les températures cardinales de

développement du soja : T_{min} , température minimale ; T_{opt} , température optimale ; et T_{max} , température maximale. Les valeurs moyennes obtenues toutes variétés confondues sont respectivement : 0, 29.9 et 40.6 °C. Ces températures sont conformes aux valeurs citées dans la littérature (T_{opt} entre 22 et 32°C et T_{max} aux alentours de 40°C). Concernant la température minimale, des valeurs plus élevées (4°C) ont été reportées par Covell et al. (1986) sur la base d'un formalisme linéaire de réponse de la germination à la température. Le formalisme non linéaire que nous avons retenu permet d'obtenir un ajustement de qualité (R^2 de l'ordre de 0.92), en particulier aux basses températures (Figure 2). Nos résultats montrent que la température optimale de germination est significativement différente selon les variétés de soja. Selon Parent et Tardieu (2012), celle-ci ne dépendrait que de l'espèce cultivée ; cependant, si ces auteurs ne signalent pas de différences intra-spécifiques majeures pour le maïs, le blé et le riz, leur étude n'intègre pas la variabilité génétique du soja.

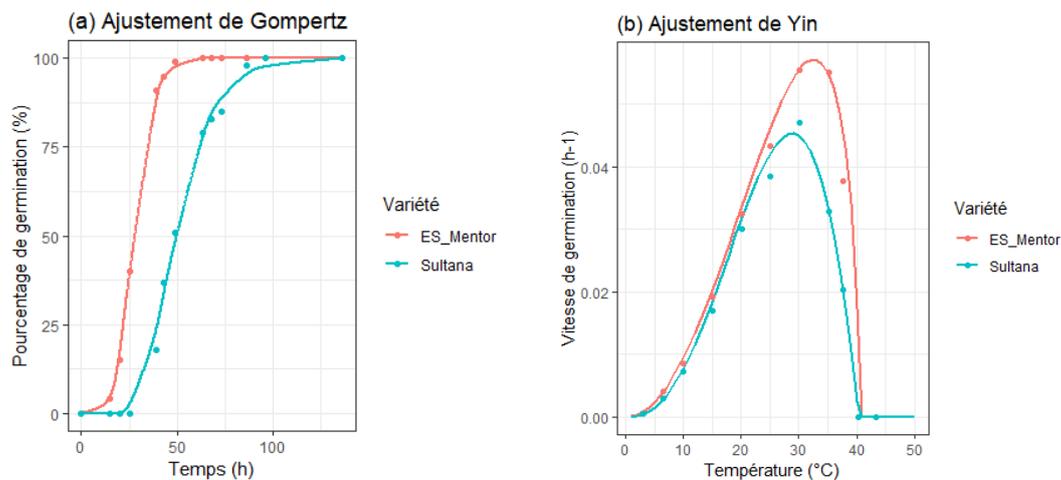


Figure 2 : Dynamique de germination pour la température 37.7°C (a) et vitesse de germination en fonction de la température (b) pour deux variétés de soja (ES-Mentor et Sultana). Les points représentent les données observées et les lignes continues les ajustements de Gompertz (a) et de Yin (b). La vitesse de germination est calculée pour un taux de germination de 50 %.

Ces données de réponse de la germination à la température seront utilisées, dans la suite de l'article, dans le cadre de la calibration de la phénologie dans les modèles de culture « soja ». En effet, les températures cardinales servent à calculer les sommes de températures en °C.Jours nécessaires à la réalisation de stades phénologiques tels que la floraison (R1), le début du remplissage des grains (R5) ou encore la maturité physiologique (R7). Ces informations sont capitales pour positionner le cycle du soja dans de nouveaux environnements thermiques.

1.2 Effets de la température et de la photopériode sur la phénologie

Pour comprendre et évaluer les effets de la photopériode sur le développement du soja, une solution est de placer des plantes dans différentes conditions de photopériodes, avec une température proche de la température optimale et de noter la date d'apparition des stades. Ce type d'étude a déjà été réalisé (Cober et al., 2014) mais jamais sur un cycle total, et toujours en phytotron ou en chambre de culture. Il est également possible de modifier la durée du jour au champ en éclairant certaines modalités après le coucher du soleil (Kantolic et Slafer, 2001 ; Kantolic et al., 2013), mais ce type d'expérimentation est très lourd à mettre en place et à suivre. Ayant accès à une plate-forme de phénotypage en pots en extérieur (Heliaphen, INRA Toulouse), nous avons choisi de conduire une expérimentation en conditions « naturelles » en explorant une large gamme de photopériodes et de températures par la réalisation de semis échelonnés.

Pour ce faire, 6 dates de semis, de mi-mars à fin août, correspondant à des conditions de photopériodes-températures contrastées, ont été mises en place. Les variétés ont été semées en serre pour homogénéiser la levée puis transplantées en pots en extérieur autour du stade VC (cotylédons déployés) à raison de 5 plantes par pot de 15 litres rempli de substrat (Proveen distribué par Soprimex, Chateaufort, Bouches-du-Rhône, France) et complété par 125 grammes d'engrais à libération prolongée (Osmocote Exact High K 5-6M, ICL Specialty Fertilizers, distribué par Agri Garonne, Castelginest, Haute-Garonne, France). Les variétés ont été réparties en 3 blocs et regroupées par date de semis au sein de chaque bloc pour éviter les effets d'ombrage. Les pots étaient randomisés au sein de chaque date de semis (dispositif en split plot). Ces plantes ont été maintenues à un état hydrique non limitant tout au long du cycle grâce à un système d'irrigation automatique. Les stades ont été notés 2 fois par semaine depuis la transplantation jusqu'à la maturité physiologique en se référant à l'échelle de Fehr et Caviness (1977). La transplantation des plantes a été réalisée à 6 dates : D1-17-mars, D2-6-avril, D3-16-mai, D4-26-juin, D5-24-juillet, D6-1^{er}-septembre.

A partir de ces notations, il a été possible de calculer successivement, par variété et en fonction de la date de semis, les durées des phases phénologiques (en jours calendaires et en temps thermique ou °C.jours). Le calcul du temps thermique a été réalisé en appliquant le modèle non linéaire de Wang et Engel (1998) et en utilisant les températures cardinales déterminées pour les différentes variétés (cf. § 1.1). La photopériode moyenne par phase (en heures) a été calculée d'après les recommandations de la FAO (Allen et al., 1998), en utilisant un angle d'élévation solaire de 0°.

Ces différentes étapes ont permis de mettre en évidence dans un premier temps l'effet significatif de la date de semis sur la durée du cycle VC-R7 (101 à 152 jours selon les dates de semis toutes variétés confondues, $p < 0.001$). Le temps calendaire nécessaire à l'accomplissement du cycle VC-R7 dans ce cas dépend des températures et photopériodes rencontrées par les variétés pour ces différentes conditions de semis. La transformation de ce temps calendaire (nombre de jours) en temps thermique permet de prendre en compte l'effet de la température sur le développement. En effet, la durée du cycle étant fortement dépendante des températures, on peut observer un raccourcissement du temps calendaire au fur et à mesure du décalage de la date de semis vers des températures plus élevées (de la date 1- mi-mars à 5 – fin juillet). Lorsque les durées de phases sont exprimées en temps thermique, la différence entre dates de semis a tendance à s'amenuiser. Cependant, on remarque (Figure 3) que les dates de semis 4 et 5 conservent un cycle significativement ($p < 0.001$) plus court malgré la transformation en °C.jours suggérant un effet important de la photopériode sur la phénologie du soja dans ce cas. Cette analyse ayant également été réalisée par variété, il est possible de caractériser les réponses photopériodiques de celles-ci pour les différentes phases. Le temps thermique nécessaire à la réalisation du cycle VC-R7 est plus influencée par la variété ($cv = 16\%$, $p < 0,001$) que par la date de semis ($cv = 10\%$, $p < 0,001$), avec une interaction significative entre ces deux facteurs.

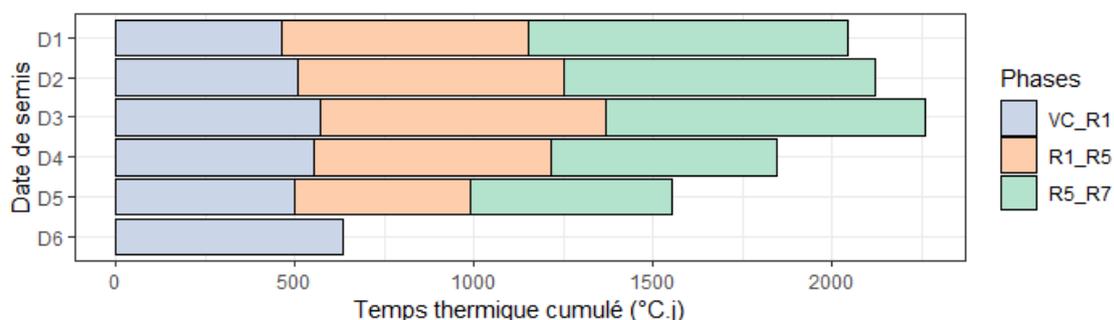


Figure 3 : Diagramme empilé du temps thermique cumulé par phase phénologique (VC à R1, R1 à R5 et R5 à R7) pour les 6 dates de semis (de mi-mars pour D1 à fin-août pour D6), toutes variétés confondues. Le stade VC est atteint lorsque les cotylédons sont étalés. Le stade R1 correspond au début de la floraison, R5 au début du remplissage des graines et R7 à la maturité physiologique. La date D6 n'a pas été menée à terme en raison des conditions trop froides en fin de cycle (gel) qui ont entraîné un arrêt du développement.

Comme la photopériode par phase phénologique a été calculée, nous pouvons représenter la durée des phases exprimées en temps thermique en fonction de la photopériode moyenne (voir Figure 4 pour la phase VC-R7). Les pentes observées traduisent la sensibilité des variétés testées à la photopériode : plus la pente est forte, plus la variété est sensible et inversement.

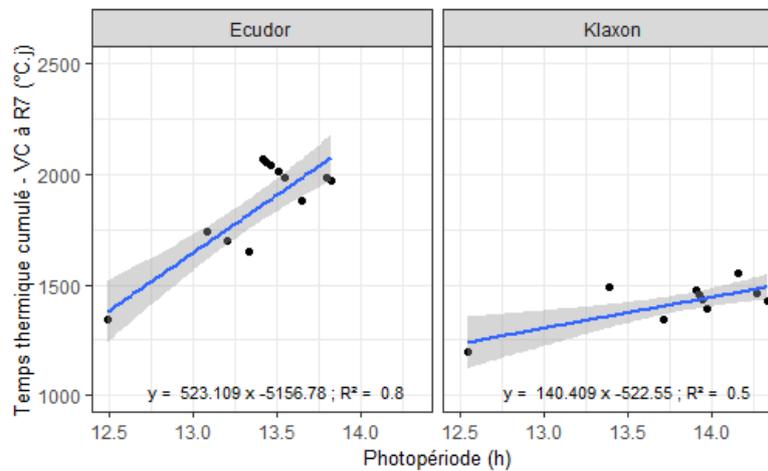


Figure 4 : Représentation graphique du temps thermique de la phase VC à R7 en fonction de la photopériode moyenne de la phase VC-R7 pour une variété tardive (Ecuror – GM II) et une variété précoce (Klaxon – GM 000). Les points correspondent au temps thermique cumulé nécessaire pour atteindre le stade R7, pour les 5 dates de semis (D1 à D5) – D6 n’ayant pas atteint le stade R7. La régression linéaire du temps thermique cumulé en fonction de la photopériode ainsi que son intervalle de confiance à 5% sont représentées par la droite bleue et la zone grise, respectivement. Les équations des droites et coefficients de détermination (R^2) sont reportés pour chaque variété en bas de graphique.

La comparaison de ces pentes avec une ANCOVA puis leur classement avec un test HSD Tukey a permis de regrouper les variétés en fonction de leur sensibilité à la photopériode. On s’attendrait à regrouper les variétés précoces et les variétés tardives en fonction de leur réponse à la photopériode, car les variétés précoces sont sélectionnées pour être moins dépendantes de la durée du jour (Watanabe et al., 2012). Or, ce n’est pas le cas ici, puisque Sigalia, une variété de groupe de maturité 00 se trouve classée avec les variétés tardives (GM I et II). Seules les variétés précoces ES Mentor, RGT Shouna et Klaxon montrent une faible sensibilité à la photopériode avec une pente presque horizontale.

Ces différences variétales en termes de sensibilité à la photopériode sont à prendre en compte si l’on souhaite cultiver ces variétés sous d’autres latitudes que celles où elles ont été sélectionnées et inscrites ou si l’on souhaite, dans une même zone de production, réaliser des semis plus précoces ou plus tardifs que les semis conventionnels.

2. Modélisation de la réponse thermo-photopériodique de variétés de soja

2.1 Démarche générale

Les modèles de culture sont des outils précieux pour comprendre la réponse des cultures à une gamme de situations culturales, pour explorer de nouvelles situations non expérimentées, ou pour aider à la décision notamment pour les choix variété-environnement-conduite (Hammer et al., 2006 ; 2002). Prévoir la phénologie du soja est indispensable pour positionner le cycle cultural dans de nouveaux environnements. Ainsi, le modèle Soysim spécifique du soja simule bien la phénologie avec une erreur de 1.7 à 4.3 jours lorsqu’il est parfaitement calibré (Setiyono et al., 2007), les erreurs de modèles multi-

espèces plus complexes comme Cropgro et STICS se situant plutôt entre 7 et 15 jours (Mercau et al., 2007 ; Sojamip, 2012).

Les travaux de modélisation développés dans la cadre de cette étude (thèse de C. Schoving 2016-2019) portent sur un modèle plus simple dérivé de Cropsyst (Stockle et al., 2003) nommé «Simple Phenology (PS)».

L'intérêt principal d'un modèle mécaniste est de représenter en détail les processus écophysologiques sous-jacents à l'élaboration du rendement et de la qualité des graines. Cela permet de diagnostiquer les contraintes hydriques, thermiques ou nutritionnelles qui peuvent affecter le développement de la surface foliaire, le fonctionnement photosynthétique et *in fine* la production de biomasse (Thornley et Johnson, 1990). L'autre intérêt de ce type de modèle est de pouvoir modifier intentionnellement des traits variétaux pour tester la réponse de « nouvelles » variétés dans des environnements choisis. Il est ainsi possible de tester ces variétés trait par trait, ou en combinant plusieurs traits supposés améliorants. Cette méthode a déjà été utilisée avec succès dans différentes études (Battisti et al., 2017; Sinclair et Muchow, 2001). Outre la modification des traits variétaux, le modèle peut servir à tester de nombreuses conduites culturales, dans notre cas principalement la date de semis, comme cela a été étudié par Battisti et al. (2018) mais également les successions culturales afin de mesurer la réponse d'une variété de soja à un état laissé par le précédent cultural et l'impact de cette variété sur la culture suivante. Dans cette étude, la date de semis sera couplée à différentes variétés afin de mettre en évidence le meilleur compromis « utilisation d'eau – rendement – date de récolte » pour les environnements connus ou potentiellement cultivables en soja. Par extension, il sera possible de simuler la phénologie et le rendement du soja dans de nouveaux environnements, dans le cadre du changement climatique à l'échelle de l'Europe. Couplé à des modèles climatiques qui détermineront les nouveaux environnements en fonction des scénarios choisis, le modèle mécaniste fournira une image des nouvelles zones de culture du soja ainsi que les principaux freins et opportunités pour cette culture.

2.2 Modèle phénologique : Simple Phenology (SP)

Le modèle simple dérivé de Cropsyst est en cours de développement en collaboration avec Claudio O. Stöckle de l'Université de Washington (USA). La première étape a consisté à développer un modèle de prédiction de la phénologie simulant, au pas de temps journalier, les effets photopériodiques et thermiques, seuls et en interaction (Figure 5), sur le développement de la culture. Les effets de ces deux facteurs sont multiplicatifs dans le modèle SP.

Pour simuler la phénologie du soja à partir de variables d'entrées relatives à la situation culturale (climat: températures minimales et maximales journalières, latitude, altitude ; conduite: date de semis/levée), le modèle SP repose sur des paramètres variétaux : températures cardinales (T_{min} , T_{opt} et T_{max}), photopériodes seuils (P_{opt} et P_{crit}), sensibilité à la photopériode (S_p) et durée minimale de développement (D_{min}). Les valeurs de latitude servent à calculer la photopériode journalière sur le site d'expérimentation étudié. Les paramètres variétaux servent à ajuster la phénologie des variétés aux différentes conditions rencontrées. Ils seront renseignés lors de la phase de calibration du modèle.

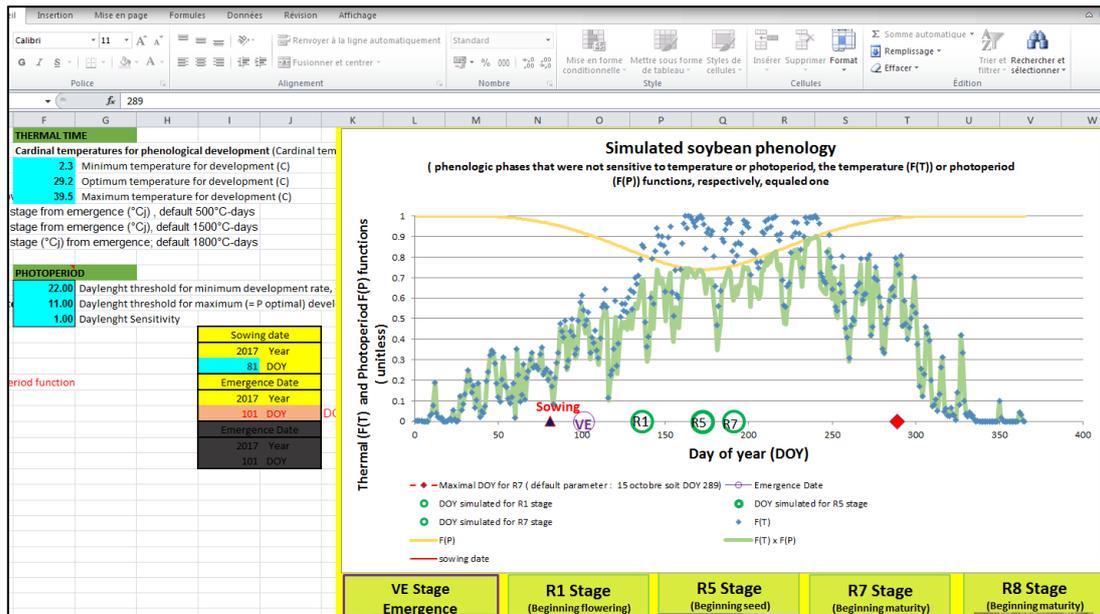


Figure 5 : Impression écran du modèle Phenology Simple et d'un graphique permettant de visualiser les fonctions thermique (f(T) en bleu), photopériodique (f(P) en jaune), et la combinaison des deux (f(T) x f(P) en vert) au cours du temps. Ces fonctions (valeurs comprises entre 0 et 1) permettent le calcul du temps photothermique journalier : $(T_{opt} - T_{min}) \times f(T) \times f(P)$, avec T_{opt} et T_{min} pour températures optimale et minimale, respectivement. Lorsque la fonction thermique - ou photopériodique - est égale à 1, les conditions thermiques - ou photopériodiques - sont optimales pour le développement. En revanche, l'accumulation du temps photothermique par le soja est diminuée par ces fonctions lorsque leurs valeurs sont inférieures à 1 ; il en résultera un allongement en jours de la durée de la phase phénologique pour satisfaire l'exigence photothermique de la variété. Les jours d'apparition des stades phénologiques clés pour la situation de production simulée sont représentés par des cercles.

2.2.1 Calibration

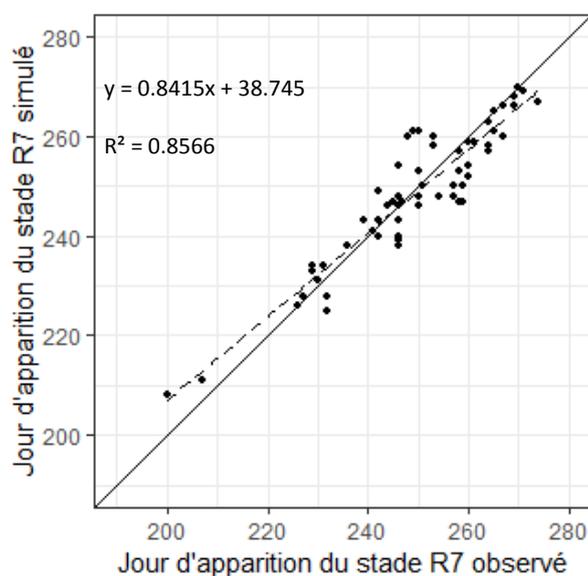
L'utilisation en confiance des modèles passe par une phase de calibration, forme d'apprentissage à partir de données d'observation. La calibration est réalisée en utilisant les données les plus précises de la base de données. Ici, ce sont les données issues des expérimentations en conditions contrôlées (« germination » et plateforme « Heliaphen »).

La calibration a dans un premier temps été réalisée pour simuler au mieux le jour d'apparition du stade R7 (maturité physiologique). Pour ce faire, les températures cardinales déterminées au cours de l'expérimentation de germination ont été reportées directement dans le modèle. Les paramètres de photopériode (P_{opt} et P_{crit}) ont été fixés grâce à la littérature (Setiyono et al., 2007) en appliquant la formule proposée aux groupes de maturité étudiés. Il ne restait plus qu'à ajuster (pour chaque variété) la sensibilité à la photopériode (S_p) et la durée minimale de développement (D_{min}) de la phase VC à R7, à partir des données de l'expérimentation en pots « Heliaphen » (cf. 1.2). Ces deux paramètres variétaux (S_p et D_{min}) ont été ajustés conjointement avec pour objectif d'obtenir la plus petite RMSE (Root Mean Square Error) possible. Celle-ci étant calculée à partir des valeurs observées et simulées du jour d'apparition du stade R7 pour les 5 dates de semis de la variété considérée. Une fois cette première étape accomplie, la calibration a concerné les jours d'apparition des stades R1 et R5, selon la même procédure avec comme seule variable d'ajustement la durée minimale de développement de la variété (D_{min}) pour la phase considérée (VC à R1 ou R1 à R5) – les autres paramètres variétaux restant inchangés.

2.2.2 Evaluation

Une fois les paramètres variétaux déterminés, le modèle a été évalué pour sa qualité de prédiction de la phénologie des variétés à partir de nouvelles données issues d'essais au champ. Dans ce cadre, les situations les mieux renseignées de la base de données Sojamip (2013-14) et les expérimentations menées en 2017 et 2018 à l'INRA-Auzeville ont été retenues.

Pour chaque variété, les paramètres Popt, Pcrit, Topt, Tmax, Tmin et sensibilité à la photopériode (Sp) permettant la meilleure qualité de simulation lors de la phase de calibration ont été reportés dans le modèle. Il en a été de même pour le temps thermique de référence (Dmin) des différentes phases phénologiques. Lors de la simulation, le modèle estime le jour d'apparition des différents stades phénologiques à partir d'un calcul de temps photothermique pour chaque unité de simulation (variété x date de semis x année climatique x lieu). Les valeurs simulées sont ensuite comparées aux valeurs observées et la qualité de prédiction évaluée à l'aide d'indicateurs statistiques (Efficience, RMSE, Biais). Les résultats sont plutôt encourageants pour Phenology Simple comme le montre la Figure 6. Ce modèle peut ainsi prédire la maturité physiologique des variétés avec une erreur inférieure à 6 jours, et une efficience du modèle de 90%.



Biais	RMSE	RRMSE	EF
-0.70	5.61	0.02	0.90

Figure 6 : Evaluation du modèle SP sur les données « champ » de 2013 à 2018 pour la phase VC à R7. Les points représentent les différentes combinaisons variété*année*conduite*lieu utilisées dans la base d'évaluation du modèle. La régression linéaire des valeurs simulées en fonction des valeurs observées est représentée par la ligne en pointillés. Son équation ainsi que son coefficient de détermination sont reportés en partie haute du graphique. Le tableau recense les indicateurs de qualité de prédiction : le biais, la RMSE (Root Mean Square Error, en jours), la RRMSE (Relative RMSE, en %) et l'Efficience du modèle (0 - mauvais, 1 - parfait).

3. Conclusion et perspectives

La démarche précédente vise à modéliser les réponses de variétés contrastées de soja à différentes conditions thermo-photopériodiques afin de pouvoir positionner ces variétés dans de nouveaux environnements. Dans cette étude, nous avons déterminé les températures cardinales de variétés

cultivées en Europe, à partir de l'étude du processus de germination. En particulier, les variétés ont pu être discriminées par leurs températures optimales de germination. Pour compléter notre étude limitée à la germination et vérifier nos conclusions par rapport à celles de Parent et Tardieu (2012), il serait intéressant d'étudier une phase de développement juvénile, par exemple VC (cotylédons déployés) à V3 (3^{ème} nœud sur la tige principale), ce qui reste concevable en phytotron. Ainsi, la stabilité des températures cardinales pour différents processus de développement pourrait être évaluée.

Nous avons également quantifié les impacts de la photopériode et de la température sur la phénologie de ces mêmes variétés, en testant 6 dates de semis sur la plate-forme Heliaphen de l'INRA Toulouse. Des différences significatives de sensibilité à la photopériode ont été mises en évidence entre variétés, ce qui valide le choix de la gamme variétale « contrastée » utilisée pour les expérimentations. Ces données issues de méthodes simples de phénotypage « photothermique » ont été utilisées pour renseigner les paramètres variétaux du modèle Phenology Simple (et pourront l'être également pour calibrer le modèle de culture STICS). Les phases successives de calibration puis d'évaluation donnent des résultats encourageants avec une erreur de prédiction de la durée du cycle cultural inférieure à 6 jours (de la levée à la maturité physiologique en conditions hydriques favorables), ce qui se situe entre Soysim et Cropgro/STICS, pour un modèle de conception simplifiée. Cependant, d'autres facteurs que la température et la photopériode tel que le stress hydrique, peuvent influencer dans une moindre mesure la phénologie. La prochaine étape sera d'intégrer l'effet de la contrainte hydrique sur la phénologie à partir d'autres données expérimentales déjà acquises, produites en conditions contrôlées et au champ.

Le processus de développement et de calibration du modèle Phenology Simple et d'un modèle simple de croissance pour le soja se poursuivra en 2019 avec pour objectif d'intégrer la surface foliaire, la biomasse, le rendement, puis la contrainte hydrique. Lorsque ce modèle sera assemblé, un couplage à de la télédétection pourra être recherché pour automatiser la récolte de données et permettre une couverture plus importante du territoire. Le couplage à des bases climatiques (actuelles ou futures) permettra d'anticiper de nouvelles zones de cultures ou de tester des combinaisons variété*conduite sur de nouveaux environnements. On pourra alors envisager une utilisation de STICS pour des travaux portant sur la réponse du soja dans un système de culture (en particulier grâce à la prise en compte de la fixation symbiotique).

A l'issue de ce processus, le choix d'un modèle adapté permettra de répondre à deux objectifs : comprendre et décortiquer les conditions connues des expérimentations passées, celles qui ont contribué à la construction de la base de données, et explorer de nouvelles conditions. C'est cette étape qui permettra de tester de nouveaux environnements, d'intégrer le changement climatique, de modifier des traits variétaux ou encore de tester d'autres conduites pour définir de nouveaux idéotypes. Nous pourrions ainsi simuler les potentialités du soja avec ou sans complément d'irrigation dans les principaux bassins de production français et européens mais également dans des zones où le soja n'a pas été introduit. Il sera par ailleurs possible de proposer pour chaque zone agro-climatique homogène des couples date de semis-variété compatibles. La combinaison de ces informations permettra de réaliser un « atlas » de la culture du soja à l'échelle française puis européenne. Avec la calibration fine pratiquée sur les variétés étudiées, les modèles pourront être actualisés au fur et mesure de l'innovation variétale.

Ces approches exploratoires auront tout leur intérêt puisqu'il faut environ 10 ans à une société semencière pour proposer une nouvelle variété sur le marché. Les environnements français et européens étant très divers, il est fondamental de les caractériser pour utiliser au mieux le matériel génétique à disposition ou concevoir des idéotypes.

Remerciements

Les travaux présentés relèvent du projet de recherche « Sojamip » (<http://www6.inra.fr/sojamip>) associant différents partenaires (Euralis Semences, RAGT2n, Caussade Semences, Terres Inovia, Terres Univia, EIP Purpan, Toulouse INP, ENSAT, INRA) et bénéficiant d'un soutien financier de la région Occitanie / Pyrénées-Méditerranée. Nous remercions Toulouse INP pour l'invitation du Pr. C.O. Stöckle comme « Professeur visiteur » à l'UMR AGIR - Toulouse en 2017 et en 2019. Nous remercions Nicolas Capoul, Céline Colombet, Michel Labarrère, Damien Marchand, et Hugo Quintana pour l'aide technique apportée à la réalisation des essais agronomiques.

Références bibliographiques

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M., 1998. Irrigation and Drainage Paper No. 56, Crop Evapotranspiration. Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO. <http://www.kimberly.uidaho.edu/water/fao56/fao56.pdf>. Consulté le 19/11/2018.
- Battisti R., Sentelhas P.C., Boote K.J., Gil G.M. Farias J.R.B., Basso C.J., 2017. Assessment of soybean yield with altered water-related genetic improvement traits under climate change in Southern Brazil. *European Journal of Agronomy*, 83, 1–14.
- Battisti R., Sentelhas P.C., Parker P.S., Nendel C., Câmara G.M.D.S., Farias J.R.B., Basso C.J., 2018. Assessment of crop-management strategies to improve soybean resilience to climate change in Southern Brazil. *Crop and Pasture Science*, 69, 154–162.
- Boote K.J., Jones J.W., Hoogenboom G., 1998. Simulation of crop growth. CROPGRO Model. *Agricultural Systems Modeling and Simulation*, 18, 651-692.
- Boote K.J., 2011. Improving Soybean Cultivars for Adaptation to Climate Change and Climate Variability. *Crop Adaptation to Climate Change*. Wiley-Blackwell, Oxford, UK, 370–395.
- Brisson N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Zimmer D., Sierra J., Bertuzzi P., Burger P., Bussièrre F., Cabidoche Y.M., Cellier P., Debaeke P., Gaudillère J.P., Hénault C., Maraux F., Seguin B., Sinoquet H., 2003. An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*, 18, 309-332.
- Caffaro S.V., Martigmon R.A., Torres R., Nakayama F., 1988. Photoperiod regulation of vegetative growth and meristem behavior toward flower initiation of an indeterminate Soybean. *Botanical Gazette*, 149, 311–316.
- Cober E., Curtis D., Stewart D., Morrison M., 2014. Quantifying the effects of photoperiod, temperature and daily irradiance on flowering time of soybean isolines. *Plants*, 3, 476–497.
- Covell S., Ellis R. H., Roberts E. H., Summerfield R. J., 1986. The influence of temperature on seed germination rate in grain legumes. I. A comparison of chickpea, lentil, soybean and cowpea at constant temperatures. *Journal of Experimental Botany*, 37, 705–715.
- FAOSTAT, 2018. FAOSTAT - Data. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/TP>. Consulté le 19/11/2018.
- Fehr W.R., Caviness C.E., 1977. Stages of Soybean Development. Special report, 80, 11.
- Grimm S.S., Jones J.W., Boote K.J., Hesketh J.D., 1993. Parameter estimation for predicting flowering date of soybean cultivars. *Crop Science*, 33, 137–144.
- Hadley P., Roberts E., Summerfield R.J., Minchin F.R., 1984. Effects of temperature and photoperiod on flowering in soybean [*Glycine max* (L.) Merrill]: a quantitative model. *Annals of Botany*, 53, 669–681.
- Hammer G., Cooper M., Tardieu F., Welch S., Walsh B., van Eeuwijk F., Chapman S., Podlich D., 2006. Models for navigating biological complexity in breeding improved crop plants. *Trends in Plant Science*, 11, 587-593.
- Hammer G.L., Kropff M.J., Sinclair T.R., Porter J.R., 2002. Future contributions of crop modelling - From heuristics and supporting decision making to understanding genetic regulation and aiding crop improvement. *European Journal of Agronomy*, 18, 15–31.

- Hu M., Wiatrak P., 2012. Effect of planting date on soybean growth, yield, and grain quality. *Agronomy Journal*, 104, 785–790.
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (Eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.
- Jouffret P., Labalette F., Parachini E., 2015. Analyse multicritère de la production de soja dans des exploitations agricoles contrastées du Sud-Ouest de la France. *OCL*, 22, D505.
- Kantolic A.G., Slafer G.A., 2001. Photoperiod sensitivity after flowering and seed number determination in indeterminate soybean cultivars. *Field Crops Research*, 72, 109–118.
- Kantolic A.G., Peralta G.E., Slafer G.A., 2013. Seed number responses to extended photoperiod and shading during reproductive stages in indeterminate soybean. *European Journal of Agronomy*, 51, 91–100.
- Kurasch A.K., Hahn V., Leiser W. L., Vollmann J., Schori A., Bétrix C.A., Mayr B., Winkler J., Mechtler K., Aper J., Sudaric A., Pejic I., Sarcevic H., Jeanson P., Balko C., Signor M., Miceli F., Strijk P., Rietman H. et al., 2017. Identification of mega-environments in Europe and effect of allelic variation at maturity E loci on adaptation of European soybean. *Plant Cell and Environment*, 40, 765–778.
- LeMahieu P.J., Brinkman M.A., 1990. Double-cropping soybean after harvesting small grains as forage in the north central USA. *Journal of Production Agriculture*, 3, 385–389.
- Maury P., Andrianasolo F. N., Alric F., Berger M., Beugnet G., Chambert C., Champolivier L., Doumenc A., Estragnat A., Gras A., Jeanson P., Jouffret P., Labalette F., Thomas R., Justes E., Debaeke P., 2015. Le semis très précoce : une stratégie agronomique pour améliorer les performances du soja en France ? *OCL*, 22, D503
- Mercau J.L., Dardanelli J.L., Collino D.J., Andriani J.M., Irigoyen A., Satorre E.H., 2007. Predicting on-farm soybean yields in the pampas using CROPGRO-soybean. *Field Crops Research*, 100, 200–209.
- Merrien A., 1994. Soybean water management under French conditions. *World Soybean Research Conference*, V, Chiang Mai, Thailand, 20–26.
- Nico M., Miralles D.J., Kantolic A.G., 2015. Post-flowering photoperiod and radiation interaction in soybean yield determination. Direct and indirect photoperiodic effects. *Field Crops Research*, 176, 45–55.
- Parent B., Turc O., Gibon Y., Stitt M., Tardieu F., 2010. Modelling temperature-compensated physiological rates, based on the co-ordination of responses to temperature of developmental processes. *Journal of Experimental Botany*, 61, 2057–2069.
- Parent B., Tardieu F., 2012. Temperature responses of developmental processes have not been affected by breeding in different ecological areas for 17 crop species. *New Phytologist*, 194, 760–774.
- Preissel S., Reckling M., Schläfke N., Zander P., 2015. Magnitude and farm-economic value of grain legume pre-crop benefits in Europe : A review. *Field Crops Research*, 175, 64–79.
- Raper C.D., Thomas J.F., 1978. Photoperiodic alteration of dry matter partitioning and seed yield in soybeans. *Crop Science*, 18, 654–656.
- Salem M.A., Kakani V.G., Koti S., Reddy K.R., 2007. Pollen-based screening of soybean genotypes for high temperatures. *Crop Science*, 47, 219–231.
- Salmeron M., Gbur E.E., Bourland F.M., Buehring N.W., Earnest L., Fritschi F.B., Golden B.R., Hathcoat D., Lofton J., Miller T.D., Neely C., Shannon G., Udeigwe T.K., Verbree D.A., Vories E.D., Wiebold W.J., Purcell L.C., 2014. Soybean maturity group choices for early and late plantings in the midsouth. *Agronomy Journal*, 106, 1893–1901.
- Setiyono T.D., Weiss A., Specht J., Bastidas A.M., Cassman K.G., Dobermann A., 2007. Understanding and modeling the effect of temperature and daylength on soybean phenology under high-yield conditions. *Field Crops Research*, 100, 257–271.
- Sinclair T.R., Muchow R.C., 2001. System analysis of plant traits to increase grain yields on limited water supplies. *Agronomy Journal*, 93, 263–270.

- Sinclair T.R., Neumaier N., Farias J.R.B., Nepomuceno A.L., 2005. Comparison of vegetative development in soybean cultivars for low-latitude environments. *Field Crops Research*, 92, 53–59.
- Sojamip, 2012. Résultats du projet régional « Quelles stratégies agronomiques et de sélection pour concevoir un soja économe en eau et de qualité répondant aux enjeux de Midi-Pyrénées? » 2012-15, (<http://www6.inra.fr/sojamip>); données non publiées
- Stöckle C.O., Donatelli M., Nelson R., 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*, 18, 289–307.
- Terres Univia, 2018. Chiffres clés - Oléagineux et plantes riches en protéines - 2017. <http://www.terresunivia.fr/sites/default/files/chiffres%20cl%C3%A9s/TerresUnivia-chiffresCles-2017-PREP.pdf>. Consulté le 19/11/2018.
- Thornley J.H., Johnson I.R., 1990. *Plant and crop modelling: a mathematical approach to plant and crop physiology*. Oxford University Press, Oxford, 669 p.
- Tribouillois H., Dürr C., Demilly D., Wagner M.H., Justes E., 2016. Determination of germination response to temperature and water potential for a wide range of cover crop species and related functional groups. *PLoS ONE* 11(8): e0161185.
- Wang E., Engel T., 1998. Simulation of phenological development of wheat crops. *Agricultural Systems*, 58, 1–24.
- Watanabe S., Harada K., Abe J., 2012. Genetic and molecular bases of photoperiod responses of flowering in soybean. *Breeding Science*, 61, 531–543.
- Yin X., Goudriaan J., Lantinga E.A., Vos J., Spiertz H.J., 2003. A flexible sigmoid function of determinate growth. *Annals of Botany*, 91, 361–371.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0).



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « *Innovations Agronomiques* », la date de sa publication, et son URL ou DOI).