HAL
open science

Description et simulation des principaux stades de développement phénologique de la Betterave sucrière porte-graine afin de déterminer la date de récolte

Ombeline de Percin

To cite this version:

Ombeline de Percin. Description et simulation des principaux stades de développement phénologique de la Betterave sucrière porte-graine afin de déterminer la date de récolte. Sciences agricoles. 2016. dumas-01374037

HAL Id: dumas-01374037

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01374037

Submitted on 29 Sep 2016

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

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

AGROCAMPUS OUEST

☑ **CFR Angers**

☐ **CFR Rennes**

Année universitaire : 2015-2016

Spécialité : Horticulture

Spécialisation (et option éventuelle) :

GDV

Mémoire de Fin d'Études

☑ d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

☐ de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

☐ d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Description et simulation des principaux stades de développement phénologique de la Betterave sucrière porte-graine afin de déterminer la date de récolte

Par : Ombeline de PERCIN

Soutenu à ANGERS le 08/09/2016

Devant le jury composé de :

Président : Patrice Cannavo

Maître de stage : Marie-Laure CASALS

Enseignant référent : Yann TRICAULT

Autres membres du jury :

Marie-Paule RAVENEAU (enseignant chercheur à l'ESA)

Marie-Hélène Macherel

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST

Annexe III : Fiche de confidentialité et de diffusion du mémoire

Confidentialité :

☐ Non ☒ Oui si oui : ☐ 1 an ☒ 5 ans ☐ 10 ans

Pendant toute la durée de confidentialité, aucune diffusion du mémoire n'est possible[1].
A la fin de la période de confidentialité, sa diffusion est soumise aux règles ci-dessous (droits d'auteur et autorisation de diffusion par l'enseignant).
Date et signature du maître de stage[2] : 8/9/2016

Droits d'auteur :

L'auteur[3] autorise la diffusion de son travail

☒ Oui ☐ Non

Si oui, il autorise

☐ la diffusion papier du mémoire uniquement(4)

☐ la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

☒ la diffusion papier et électronique du mémoire (joindre dans ce cas la fiche de conformité du mémoire numérique et le contrat de diffusion)

Date et signature de l'auteur :

Autorisation de diffusion par le responsable de spécialisation ou son représentant :

L'enseignant juge le mémoire de qualité suffisante pour être diffusé

☒ Oui ☐ Non

Si non, seul le titre du mémoire apparaîtra dans les bases de données.
Si oui, il autorise

☐ la diffusion papier du mémoire uniquement(4)

☐ la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

☒ la diffusion papier et électronique du mémoire

Date et signature de l'enseignant :

07/09/16 O STM

(1) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation d'AGROCAMPUS OUEST s'engagent à respecter cette confidentialité.
(2) Signature et cachet de l'organisme
(3).Auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études
(4) La référence bibliographique (= Nom de l'auteur, titre du mémoire, année de soutenance, diplôme, spécialité et spécialisation/Option)) sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé

AGRO CAMPUS OUEST	Diplôme : Agrocampus Ouest Spécialité : Horticulture Spécialisation / option : GDV Enseignant référent : Yann TRICAULT

Auteur(s) : Ombeline de PERCIN Date de naissance* : 17/08/1993	Organisme d'accueil : Syngenta Adresse : Route de Francescas 47 600 Nérac Maître de stage : Marie-Laure CASALS
Nb pages : 42 Annexe(s) : 19	
Année de soutenance : 2016	

Titre français : Description et simulation des principaux stades de développement phénologique de la betterave sucrière porte-graine afin de déterminer la date de récolte.

Titre anglais : Description and simulation of the main stages of phenological development of sugar beet seed holder to determine the harvest date.

Résumé (1600 caractères maximum) :

Ce projet se situe dans le cadre du service de planification de l'usine de semences de Syngenta, à Nérac. Il a pour but de créer un modèle de développement phénologique de la betterave porte-graine, depuis le repiquage jusqu'à la phase de maturation des semences. Ce modèle permet de prévoir la date de récolte des semences. L'objectif est de pouvoir prévenir en amont les équipes de l'usine et du laboratoire du surcroît d'activité que les récoltes engendrent, pour organiser les équipes nécessaires à la réalisation du travail.
On s'est intéressé à plusieurs stades de développement de la betterave, afin de les décrire et de déterminer la somme de températures (en base de température 8) à laquelle ils sont atteints. Pour cela, des notations ont été faites sur plusieurs hybrides de betteraves, présentant des caractéristiques phénologiques différentes : précoce, médiane ou tardive. Ces notations ont été effectuées pendant trois années et sur un ou deux lieux géographiques (2013 Nérac, 2015 Nérac et Tonneins, 2016 Nérac et Beauville), sur des parcelles d'essai mises en place par Syngenta. Ces essais présentent plusieurs *plots* d'hybrides différents.
Grâce aux données de 2013 et 2015, on a pu établir le modèle de développement par stade de la betterave. Les données de 2016 ont permis de valider ce modèle jusqu'au stade Fin Floraison, que ce soit en terme de somme de températures, pour atteindre un stade de développement, ou en terme de prévision météorologique. En effet, un mois avant le stade Fin Floraison, le modèle a permis de prédire à ± 2 jours ce stade. On pourra, à partir du stade « Fin Floraison » et des connaissances sur l'acquisition des propriétés germinatives (Casals, 2002), déterminer les stades de récolte, c'est-à-dire 650 ou 950°J cumulés après fin floraison selon le stade de maturité souhaité.

Abstract (1600 caractères maximum) :

This project takes place in the planning department of the Syngenta seed factory in Nerac. It aims to create a model of phenological development of sugar beet seed holder from planting to seed maturation phase in order to predict the date of seeds harvest. The aim is to inform as soon as possible upstream teams of the factory and also the laboratory of increased activity generated by harvest, in order to organize the necessary teams who will performed the work.
We seeked interest in several of the beet development stages to describe and determine temperature sum (in base temperature 8) at which they are achieved. For that, ratings were performed on several hybrid beets showing different phenological characteristics: early, middle or late. These ratings were done on test plots established by Syngenta, yearly during 3 years, in at least two geographical locations (2013 Nérac, 2015 Nérac and Tonneins, 2016 Nérac and Beauville). These tests have been established on many differents hybrids plots.
Through 2013 and 2015 data, it was possible to establish a model of development by stage of beet. 2016 data were used to validate this model until the late flowering stage, either in terms of amount of temperature to reach a stage of development, or in terms of weather forecasting. As a result, the model has enabled to predict the flowering stage end at ± 2 days. From this latter stage and from our knowledge about the acquisition of germination property (Casals, 2002) we can then determine the harvest stage by adding 650 or 950 ° J to the previous flowering stage depanding on the seed maturity which is desired.

Mots-clés : betterave, modèle de développement, degrés-jours, prévision météorologique, phénologie

Key Words: sugar beet, development model, degree-days, weather forecast, phenology

* *Elément qui permet d'enregistrer les notices auteurs dans le catalogue des bibliothèques universitaires*

Document à intégrer au mémoire

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de mon stage et qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce rapport.

Je tiens à remercier vivement mon maitre de stage, **Marie-Laure CASALS, process specialist pour Syngenta** pour son accueil, le temps passé ensemble et le partage de son expertise au quotidien. Grâce aussi à sa confiance j'ai pu m'accomplir totalement dans mes missions. Elle fut d'une aide précieuse dans les moments les plus délicats.

Je remercie aussi **Marie-Hélène MACHEREL**, ma tutrice d'apprentissage tout au long de ces deux années et **Yann TRICAULT**, tuteur de stage qui ont été d'un précieux conseil sur plusieurs aspects de ce stage.

Je remercie également toute l'équipe Appro-Ordo pour leur accueil, leur esprit d'équipe et en particulier **Morgane DRIVIERE et Elspeth MARRIOTT,** mes collègues de bureau qui ont toujours pris le temps de répondre à mes nombreuses questions pendant ces deux ans.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont conseillé et relu lors de la rédaction de ce rapport de stage : **Aude de PERCIN** et **Sylvain FRAISSE** (camarade alternant chez Syngenta !)

LISTE DES ACRONYMES

AMS : Agriculteurs Multiplicateurs de Semences
DM : Début Montaison
DF : Début Floraison
PF : Pleine Floraison
FF : Fin Floraison
M4/ M6 / M8 : semences au stade Maturité 4 / Maturité 6 / Maturité 8
M4 : les faces antérieures et postérieures du glomérule commencent à brunir mais la dessiccation n'a pas commencé
M6 : les glomérules débutent leur dessiccation, le péricarpe de la face antérieure commence à se dessécher mais pas celui de la face postérieure
M8 : glomérule brun et sec sur la face postérieure et antérieure mais les bractées sont encore vertes-jaunes

DEFINITION DES TERMES TECHNIQUES

Bisannuelle : désigne une plante vivant pendant deux saisons successives. En général, une plante bisannuelle donne des feuilles en rosette la première année et fleurit la seconde année.

Dicotylédones : désigne une plante angiosperme dont la graine dispose de deux cotylédons.

Angiospermes : désigne un végétal dont les organes reproducteurs sont condensés en une fleur et donc les graines fécondées sont enfermées dans un fruit, à la différence des gymnospermes dont la graine est à nu.

Phanérogames : désigne une plante ayant des organes de reproduction apparents dans le cône ou dans la fleur.

Allogamie : mode de reproduction sexuelle qui consiste en l'union de deux gamètes provenant d'individus différents (ou, chez les végétaux, de fleurs différentes).

Autogamie : mode de reproduction sexuelle qui consiste en l'union de deux gamètes provenant de la même fleur.

Protandrie : modalité d'hermaphrodisme où les anthères (organes mâles) sont mûres avant les stigmates (organes femelles recueillant le pollen), ce qui évite l'autogamie.

TABLE DES ANNEXES 3
TABLE DES TABLEAUX 4
TABLE DES FIGURES 5
A. Présentation de Syngenta 6
B. Les enjeux de la filière betterave 7
C. Problématique 7
II. BIBLIOGRAPHIE 8
A. Le cycle de développement de la betterave porte-graine 8
1. Classification et caractéristique de la betterave à sucre 8
2. Cycle de la Betterave porte-graine 9
3. Lieux de production 9
4. Architecture de la Betterave porte-graine 10
B. Les modèles de développement et la méthode degrés-jours 11
1. Les modèles de développement 11
a. Les différents types de modèles 11
b. Conditions de validité du modèle 12
c. modélisation des stades de développement 12
d. Modèles de croissance existant déjà 12
2. La méthode degrés-jours 14
a. Généralités sur les degrés-jours 14
b. les sommes de température/ calcul des degrés jours 15
3. Le modèle que l'on va utiliser 16
C. Prévisions météorologiques 17
1. Etude des années météorologiques types 17
2. Méthode de la prévision en écophysiologie 17
III. MATERIEL ET METHODES 18
A. Description des dispositifs expérimentaux 18
1. Les données expérimentales de 2013 et 2015 18
a. Dispositifs expérimentaux et plan d'expérience 18
b. Acquisition des données 18
2. Validation avec les données de 2016 19
B. Climat 19
C. Description des stades phénologiques 19
1. Détermination à l'échelle de la plante 19
2. Détermination à l'échelle de la parcelle 22

D. Création de l'outil 23
1. L'outil 23
2. Insertion de tous les hybrides dans l'outil 24
E. Tests statistiques 24
1. Variabilité de développement sur la parcelle 24
2. Vérification de la taille d'échantillon 25
IV. RESULTATS 26
A. Prévision en ecophysiologie 26
B. Construction de l'outil 28
1. Choix de l'année météorologique de référence 28
2. Mise en place de l'outil et création de la macro 28
a. Mise en place basique du modèle 28
b. Mise à jour du modèle en intégrant les données température de la campagne en cours 29
3. Insertion de tous les hybrides dans l'outil 31
C. Détermination des sommes de température pour atteindre chaque stade pour 2016 pour chaque hybride 31
D. validation des dates théoriques avec les dates réelles 32
1. Validation de la prévision du cumul de température nécessaire pour atteindre un stade 32
2. Précision du modèle pour différentes dates de simulation 32
3. Validation de la prévision de la température en prenant une médiane des 22 dernières années 33
E. Validation de la méthode (protocole de YaT) 34
1. Vérification de l'homogénéité des *plots* 34
1. Validation de la taille d'échantillon 35
V. DISCUSSION 36
A. Détermination de la date de récolte (une fois que m8 est connu) 36
B. Amélioration du modele 37
1. Données climatiques 37
2. Intégration d'autres paramètres (rayonnement/ température plus proche de tonneins/ changer de température de base en fonction du stade) 37
a. Intégration du rayonnement dans le calcul 37
b. Sensibilité du modèle dans le cas où l'on prend les données climatiques d'une station plus proche de la parcelle de notation 38
a. Changer de température de base en fonction du stade 39
C. Limites de l'étude 40
D. Conclusion 40
BIBLIOGRAPHIE 41
SITOGRAPHIE 44

TABLE DES ANNEXES

TABLE DES ANNEXES

ANNEXE I : Photos des stades phénologiques

ANNEXE I : Photos des stades phénologiques (suite)

ANNEXE II : Méthode de classement des hybrides

ANNEXE II : Méthode de classement des hybrides (suite)

ANNEXE III : Tableau des sommes cumulées nécessaires pour atteindre un stade

ANNEXE IV : Aperçu de l'interface de l'outil

ANNEXE IV : Aperçu de l'interface de l'outil (suite)

ANNEXE V : Code

ANNEXE V : Code (suite)

ANNEXE V : Code (suite)

ANNEXE V : Code (suite)

ANNEXE V : Code (suite)

ANNEXE V : Code (suite)

ANNEXE V : Code (suite)

ANNEXE VI : notation de développement sur plusieurs *plots* au 24/05/16 afin de vérifier l'homogénéité des rangs et des plots

ANNEXE VII : Graphes de validation de la taille d'échantillon pour tous les *plots*

ANNEXE VII : Graphes de validation de la taille d'échantillon pour tous les *plots (suite)*

ANNEXE VIII : Formules de Yang

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1: Caractéristiques de différents modèles de croissance de la betterave..... 13
Tableau 2 : Températures de base, durée de vie des graines et temps de levée moyen pour différentes espèces [4] 15
Tableau 3 : Description des stades de développement depuis le repiquage jusqu'au dernier stade avant floraison..... 20
Tableau 4 : description des stades de développement de floraison 20
Tableau 5: Feuille de notation du 24/05 22
Tableau 6 : Tableau représentant le pourcentage des plantes ayant atteint le stade apex visible en fonction de la date de notation..... 22
Tableau 7 : Tableau représentant les sommes de température en base 8 nécessaire pour atteindre chaque stade pour trois hybrides donnés 28
Tableau 8: Date d'apparition théorique de chaque stade pour chaque hybride en fonction de l'année climatique (Chaude, Médiane ou Froide) 29
Tableau 9 : Résultat du calcul de la macro présentant les dates réelles d'observation des stades (en gras) , les dates pour le cumul de T°définis et atteints par les températures de 2016 (en gras italique) et les dates théorique d'atteinte des stades (en italique) 30
Tableau 10 : Classement des hybrides de production..... 31
Tableau 11 : Somme des températures en base 8 nécessaires pour atteindre chaque stade en 2016 31
Tableau 12 : Résultat des ANOVA montrant si les plots sont équivalents pour chaque stade ou non..... 35
Tableau 13: Etapes de développement et températures de base associées 39

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Slogan de Syngenta : Exprimer le Potentiel des Plantes 6
Figure 2: Les différents sites de Syngenta France 6
Figure 3 : Caractères morphologiques de la fleur de betterave. Source : (Soltner, 1988) 8
Figure 4 : Fleur mâle stérile (source : [3]) 8
Figure 5 : Cycle de la betterave porte-graine (source : Syngenta) 9
Figure 6 : Morphologie d'un plan de betterave porte-graine (Soltner,1998) 10
Figure 7 : Croissance des rameaux secondaires et tertiaires 10
Figure 8 : Maturité des graines en fonction de leur localisation sur la plante 11
Figure 9 : Courbe représentant la vitesse des processus biologique en fonction de la température pour une plante dont la température de base est de 5°C et dont l'optimum thermique est de 21°C 14
Figure 10 : Schéma du dispositif expérimental 18
Figure 11 : Graphique représentant le pourcentage de plantes ayant atteint le stade apex visible en fonction de la date pour le MS C024A000G0960000La date de repiquage des plants en 2013 étant le 20 mars, on calcule la somme des degrés jours entre le 20 mars et le 10 mai en fonction du calcul présenté précédemment. (II.B.2.c.) ce qui donne 215°J en température de base 8. 23
Figure 12 : Plan de l'essai, les plots notés sont représentés en jaune 24
Figure 13 : Classement des années depuis 1993 jusqu'à 2015 de la plus froide à la plus chaude 26
Figure 14 : Somme des degrés jours en température de base en fonction de la date selon les années 1995, 2003, 2008 et 2016 27
Figure 15 : Degrés-jours en température de base 8 en fonction des jours, pour les années 1995, 2003, 2008 et 2016 du 15 mars au 7 juin 27
Figure 16 :Ttempératures cumulées nécessaire pour atteindre chaque stade en fonction des sommes de températures qui ont été calculées pour mettre en place le modèle 32
Figure 17 : Précision du modèle à différentes dates de simulation 33
Figure 18 : Dates réelles d'atteinte des stades en fonction de la date estimée par le modèle à la date de repiquage pour 2016 et pour deux lieux d'essais différents : Argentens et Espagnole 34
Figure 19 : variabilité des mesures selon le nombre de rangs selectionnés 35
Figure 20 : Evolution de la qualité germinative après Pleine Floraison. Les sommes de températures sont en base 0 et JAF : nombre de jours après Pleine Floraison 36
Figure 21: Somme des degrés jours photopériodiques de 2016 en fonction de celles estimées par le modèle 37
Figure 22 : Températures cumulées de 2016 en fonction des températures cumulées nécessaires estimées pour atteindre chaque stade par le modèle amélioré 38
Figure 23 : Sommes de température de 2016 en fonction des sommes de températures estimées par le modèle en changeant la température de base entre chaque stade 39

I. INTRODUCTION

A. PRESENTATION DE SYNGENTA

Syngenta est une entreprise internationale spécialisée dans la production de produits phytosanitaires et de semences à destination des exploitations agricoles. Depuis la réception et le conditionnement des semences jusqu'à la fabrication des produits nécessaires à la protection des plantes, Syngenta assure tout un panel de services destinés à assurer une agriculture profitable et durable ainsi qu'à « Exprimer le Potentiel des Plantes ». (Figure 1)

Figure 1 : Slogan de Syngenta : Exprimer le Potentiel des Plantes

En chiffre, Syngenta c'est 28000 employés répartis dans 90 pays différents avec un chiffre d'affaire de 15,1 Milliard de dollar en 2015 répartis entre la protection des cultures (11,38 Mrd $), les semences (3.15 Mrd $et la division espace vert et produits professionnels (0.69 Mrd $).
Syngenta est troisième sur le marché des semences avec 8% de part. Les leaders sur le marché sont Monsanto (26% des parts) et Dupont (16% des parts).

Figure 2: Les différents sites de Syngenta France

Syngenta en France est composé de 6 sites de productions (Figure 2) pour les semences et les produits phytosanitaires, ces produits sont destinés à la France et à l'ensemble des pays européens. Il existe 2 usines pour les produits phytosanitaires et 4 pour la production de semence. Au total, 1300 collaborateurs sont répartis sur l'ensemble du territoire français où tous les métiers du groupe sont représentés.

Le site de Syngenta à Nérac est un pôle majeur de l'activité semencière du groupe. Il est dédié à la production et à l'expédition de semences de betteraves, tournesol, colza et maïs.

B. LES ENJEUX DE LA FILIERE BETTERAVE

En 2010, la production sucrière mondiale provenant de la betterave à sucre s'élève à 34,7 millions de tonnes. La France est le premier pays producteur de sucre de betterave au monde avec environ 4 millions de tonnes et une productivité qui s'élève à 13,1 tonnes de sucre blanc par hectare (Didier, 2013). La demande en sucre dans les prochaines années va fortement augmenter pour s'adapter à l'augmentation croissante de la population mais aussi à l'augmentation de la demande en bioéthanol (OCDE/FAO, 2008). Il y a donc une réelle opportunité pour le sucre betteravier.

La filière sucre en Europe est dans une phase de mutation et doit encore améliorer ses coûts de production. En 2000, selon les chiffres du projet AKER [1] les coûts de production du sucre de betterave étaient 2 fois plus importants que le sucre de canne, en l'espace d'une quinzaine d'année, cet écart a été réduit à 30%. Avec la fin des quotas sucrier en Europe (Lhermitte, Berlizot, 2015) la filière sucre va être plus exposée au marché mondiale avec notamment la concurrence du marché Brésilien (qui détient 40% des exportations mondiales). Les défis pour cette filière en Europe et en France sont majeurs et vont concerner l'ensemble des acteurs de la filière : semencier, agriculteur et transformateur.

Dans ce contexte, la betterave sucrière porte graine est cultivée en France sur environ 4000 Ha dont 800 Ha sont destinées aux usines de production de Syngenta. Les semences de betteraves, utilisées en Europe, en Asie et en Afrique proviennent exclusivement de France et d'Italie. Il s'agit de variétés sucrières dites industrielles. Elles sont cultivées en France dans le Sud-Ouest, majoritairement. Le Lot-et-Garonne et les départements limitrophes constituent la zone privilégiée de production de la betterave sucrière porte-graine[2]. En France, le rendement moyen pour une parcelle de production semences est de 2200 kg/ha. Après travail à l'usine (triage, polissage) seulement 25% des semences sont commercialisable.

Pour la production de semences de betterave sucrière, Syngenta se place en 4ème position des acteurs semenciers du marché français derrière KWS, Florimond Desprez (sous la marque SES VanDerHave) et Deleplanque.

C. PROBLEMATIQUE

Ma problématique s'inscrit dans le cadre du service Planning de l'usine de production de semences de Nérac.
Pour ce projet, le but est de déterminer la date de récolte de la betterave afin de pouvoir prévoir les dates de réception des semences à l'usine. Cette approche permettrait ainsi d'organiser, planifier les équipes sur le site de Nérac aussi bien à l'usine qu'au laboratoire.
Afin de répondre à cet objectif, on se propose de décrire le développement de la culture et de déterminer un modèle permettant de déterminer ses différents stades phénologiques. Cette approche sera basée sur le calcul de degrés jours pour prévoir les différents stades phénologique. Nous tenterons aussi de prendre en compte la variabilité entre les hybrides.

II. BIBLIOGRAPHIE

A. LE CYCLE DE DEVELOPPEMENT DE LA BETTERAVE PORTE-GRAINE

1. Classification et caractéristique de la betterave à sucre

La betterave sucrière (Beta vulgaris L.) est une plante bisannuelle appartenant à la famille des chénopodiacées, à l'ordre des centrospermales, à la classe des dicotylédones, à la sous division des angiospermes et à la division des phanérogames (Rocquigny, Lejosne, 1988).

La betterave sucrière est une espèce diploïde (2n = 18 chromosomes) et allogame. Chaque fleur de betterave contient des organes reproducteurs mâles (5 étamines) et femelles (3 stigmates sur le pistil). On peut observer chez la betterave un phénomène de protandrie, les organes mâles sont matures avant que les stigmates ne le soient, ce qui explique l'allogamie (le stigmate d'une fleur est fécondé par le pollen d'une autre betterave plus tardive).

Actuellement, les lignées femelles utilisées pour la production de semences betterave sont de type mâle stérile. Les étamines sont présentes mais leur pollen est non viable (Figure 3 et Figure 4). Ce type de stérilité est intéressant pour la production de semences car il ne peut pas y avoir d'autogamie (voir glossaire). (Richard, 1993)

Figure 3 : Caractères morphologiques de la fleur de betterave. Source : (Soltner, 1988)

Figure 4 : Fleur mâle stérile (source : [3])

La graine commerciale de betterave sucrière est un hybride, c'est-à-dire qu'elle a besoin de deux lignées parentales différentes pour être produite. La lignée parentale femelle (ou mâle stérile) doit être pollenisée par le pollen de la plante mâle (pollinisateur) transporté par le vent.

2. Cycle de la Betterave porte-graine

La betterave sucrière cultivée est une plante bisannuelle, son cycle se déroule en deux temps. On peut suivre un cycle complet depuis la semence jusqu'à la récolte avec la Figure 5:

- en août : la graine est semée dans des pépinières spécialisées
- d'août à octobre : la graine germe et la plante grandit jusqu'au stade 3 feuilles environ (et plus)
- d'octobre à février : il y'a vernalisation, c'est-à-dire une accumulation de froid nécessaire à la plante pour qu'elle puisse monter à graine par la suite
- en février : les plantes sont arrachées et livrées aux agriculteurs multiplicateurs de semences (AMS) sur les lieux de production de semences
- en mars : les plantes sont repiquées (1ha de pépinière fournit environ 10ha de surface en porte-graine)
- d'avril à juin : il y a reprises des plantes puis élongation de la tige (montaison) et floraison
- de juin à juillet : il y a pollenisation et formation des graines
- en août : les graines sont récoltées et envoyées en usine pour être triées et transformées

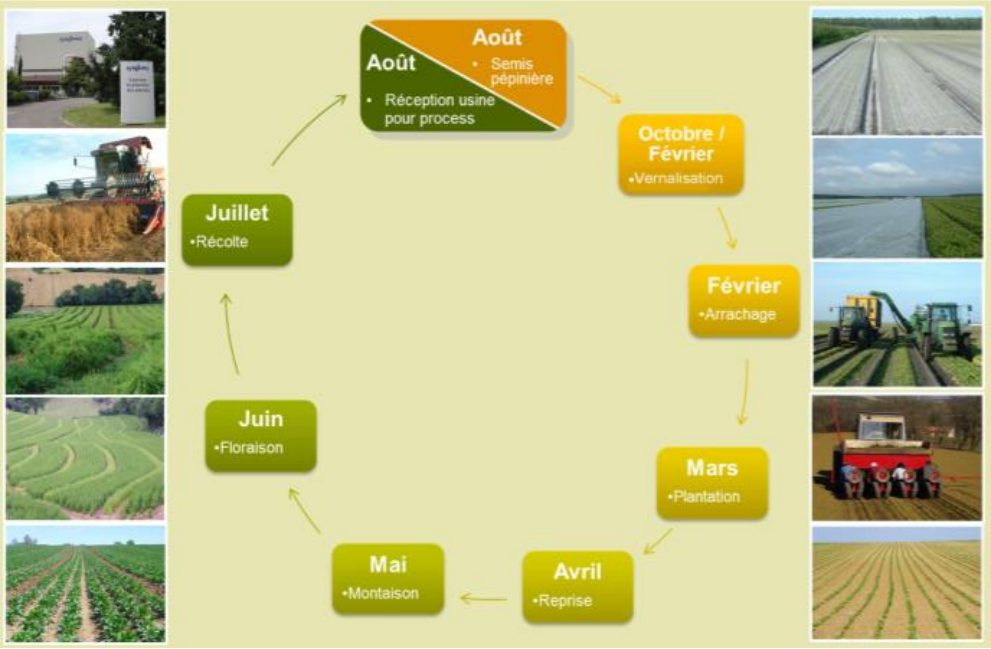

Figure 5 : Cycle de la betterave porte-graine (source : Syngenta)

3. Lieux de production

Les productions de planchons sont faites actuellement dans 3 zones climatiques très différentes : les Landes, le Finistère et l'Aquitaine.

La production de semences est faite, après repiquage des plants, en France zone Sud-Ouest principalement et en Italie zone Nord-est. Les avantages de ces zones sont les conditions climatiques favorables pour la floraison et la récolte. Elles sont également exemptes de plants de betteraves sauvages ou potagères pour garantir la pureté des semences cultivées.

4. Architecture de la Betterave porte-graine

Après élongation de la tige, les plantes sont écimées par l'AMS (Agriculteur Multiplicateur de Semences) afin de supprimer la dominance apicale et favoriser le développement des bourgeons axillaires. Plusieurs ramifications secondaires peuvent ainsi se développer sur le rameau principal. On a d'abord élongation des ramifications secondaires puis des ramifications tertiaires (se développant sur les ramifications secondaires). (Figure 6 et Figure 7)

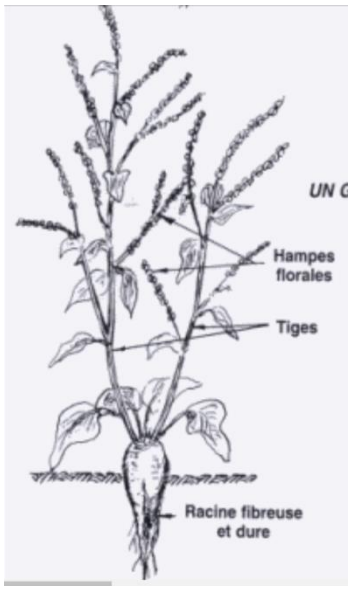

Figure 6 : Morphologie d'un plan de betterave porte-graine (Soltner,1998)

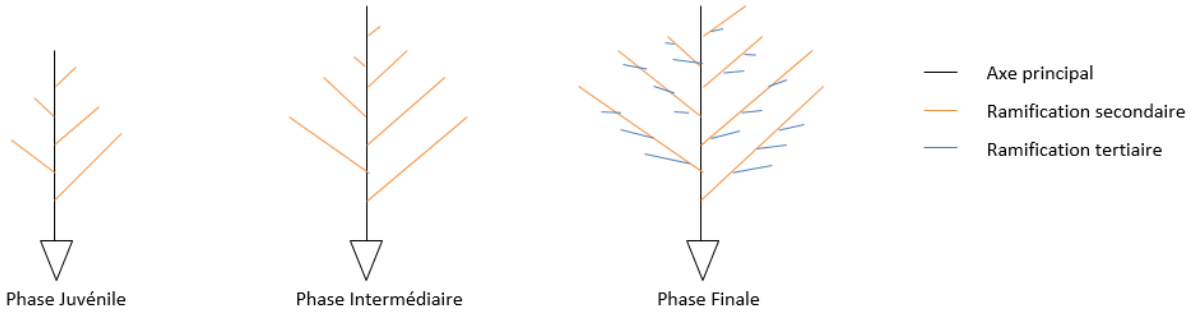

Figure 7 : Croissance des rameaux secondaires et tertiaires

Les axes secondaires portent la majeure partie des graines produites. Les ramifications tertiaires participent peu au rendement grainier soit par manque de pollen soit pour une maturité trop tardive. L'apparition des fleurs sur le porte-graine se fait selon une onde de floraison qui débute à la base de la ramification et se propage vers le sommet. L' « âge » des semences est donc différent en fonction de l'ordre du rameau porteur (Alcaraz, 1981). Les premières fleurs épanouies étant les premières à être pollinisées, les graines plus matures sont donc situées à la base des ramifications. (Figure 8)

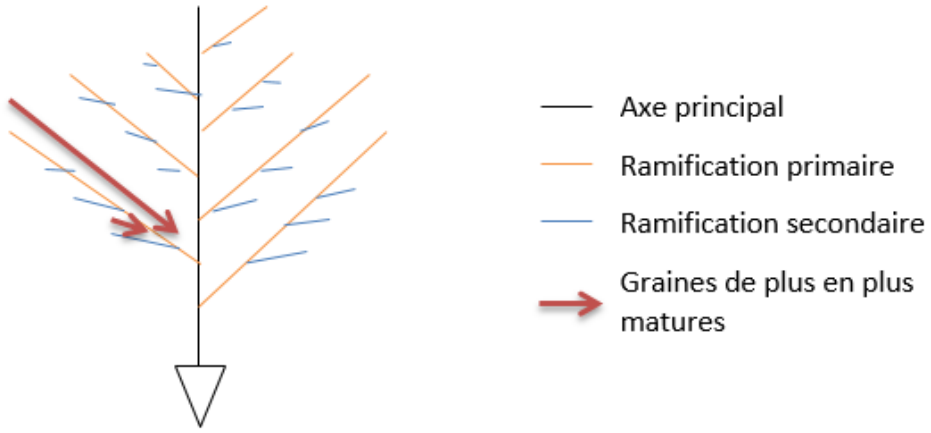

Figure 8 : Maturité des graines en fonction de leur localisation sur la plante

B. LES MODELES DE DEVELOPPEMENT ET LA METHODE DEGRES-JOURS

Un modèle est une représentation simplifiée de la réalité qui permet de fournir de l'information sans passer par des expérimentations réelles. (Rossiter, 2003) Cependant les modèles ne peuvent pas rendre compte de l'ensemble des processus qui, au niveau de la plante et du système de culture, entrent en jeu. Par conséquent, un modèle de culture doit être envisagé comme un support d'interprétation d'une réalité très complexe. (Temani, 2012)

1. Les modèles de développement

a. Les différents types de modèles

Il existe différentes manières de classer les systèmes de culture, la plus répandue étant d'opposer les modèles empiriques aux modèles mécanistes (Brisson, 2003). Les modèles mécanistes décrivent et quantifient les mécanismes et les processus qui interviennent au niveau de la plante et du sol, en se basant sur la formalisation d'hypothèses concernant le fonctionnement physiologique et physique du système étudié. (Guillaume, 2011) Les modèles empiriques décrivent, quant à eux, l'évolution du système au travers de relations simplifiées entre les différentes variables sans fournir d'explications sur le fonctionnement biologique ou physique.

Certaines personnes reprochent aux modèles à tendance empirique le manque de fondement mécaniste des fonctions utilisées; d'autres reprochent aux modèles à tendance mécaniste le nombre élevé des paramètres d'entrée, la difficulté à acquérir et renseigner ces paramètres et les temps de calcul trop longs, en particulier pour les modèles qui utilisent des procédures numériques (Brisson, 2003).

b. Conditions de validité du modèle

Afin de fournir des réponses pertinentes aux questions posées, le développement d'un modèle de culture doit aboutir à l'obtention d'un modèle présentant certaines caractéristiques parmi lesquelles la précision, la sensibilité et la robustesse tiennent une place essentielle (Guillaume, 2011). La précision fait référence à la capacité du modèle à obtenir par simulation des valeurs proches, des valeurs obtenues par l'expérimentation (Willmott et al., 1985). La sensibilité fait, elle, référence à la capacité du modèle à modifier la valeur simulée d'une variable d'état, en réponse à la variation d'une ou de plusieurs opérations techniques, ou en réponse à la variation des conditions pédo-climatiques (Naud et al., 2008). Enfin, (Confalonieri et al., 2010) considèrent qu'un modèle est robuste dans la mesure où les performances du modèle utilisé dans de nouvelles conditions sont similaires aux performances du modèle utilisé dans les conditions ayant servi à son développement.

c.modélisation des stades de développement

En améliorant nos connaissances sur les phénomènes de développement, on peut être amené, grâce notamment aux calculs basés sur la somme des températures, à prévoir plusieurs mois à l'avance, la date de récolte, et par là améliorer notre planification de la production (des traitements en usine par exemple).

La sensibilité des plantes aux influences du milieu peut être envisagée sous l'angle de la croissance ou sous celui du développement. Par développement, on entend généralement une modification qualitative dans la forme de la plante, repérable mais non mesurable d'où le terme «phénologie», du grec « phanei » : apparaître. Ainsi il est possible de décomposer l'évolution d'un sujet en un certain nombre de «stades phénologiques» : germination de la graine, montaison, floraison… La notion de «croissance» fait, elle, intervenir des données mesurables : augmentation de longueur, de surface, de poids sec ou poids frais, etc .

A conditions climatiques égales, mais sous conditions pédologiques différentes, la phénologie varie peu (mêmes dates de montaison et de floraison), alors que les tailles finales ou les rendements sont très différents. Il est donc plus difficile d'exprimer l'influence de la température sur la croissance que de rechercher les relations existant entre température et vitesse de développement. C'est pourquoi, dans ce qui suit, ne seront considérés que les problèmes relatifs au développement. (Aubert, Lossois, 1972)

d.Modèles de croissance existant déjà

On trouve dans la littérature de nombreux modèles de croissances de la betterave présentés dans le Tableau 1.

Tableau 1: Caractéristiques de différents modèles de croissance de la betterave

Modèle	Développé par	Objet de simulation	Variables utilisées par le modèle	Limite
Prévibet	ITB	Rendement racine et sucre	Temps thermique	ne prend pas en compte les effets de stress pouvant affecter la betterave
Broom's Barn	(Richter et al., 2001) (Pidgeon et al., 2001) (Qi et al., 2005)	Rendement final en sucre	Température et Rayonnement	ne prend pas en compte les effets de stress pouvant affecter la betterave
SUBEMOpo	(Vandendriessche, 2000)	Croissance et rendement en sucre	Température, Rayonnement, Sol	
SUCROS	(Spitters et al., 1989)	Croissance et rendement en sucre	Température, rayonnement global, pluviométrie, vent et humidité de l'air	
STICS	(Brisson, 2003)	Croissance et rendement en sucre via les stades de développement précis de la culture	Température, Rayonnement, Sol	
GreenLab	(Yan et al., 2004)	Croissance, architecture	Surface foliaire, rayonnement	
Ceres-betterave	(Leviel, 2000)	Fonctionnement du système sol-plante-atmosphère	Temps thermique et rayonnement	

Seul le modèle STICS se base sur un modèle de développement empirique prenant en compte les stades phénologiques de la plante et se base sur une méthode degrés-jour (II.B.2.). Tous les autres modèles sont des modèles de croissance plus mécanistes. Aucun de ces modèles ne permet de déterminer les stades phénologiques de la betterave sucrière porte-graine

2. La méthode degrés-jours

La vitesse d'un ensemble considérable de phénomènes ayant lieu dans la plante, comme les réactions biochimiques (liées à la photosynthèse, à la nutrition…) qui détermine la croissance des organes constitutifs de la plante, réagit en premier lieu à un facteur essentiel : la température. (Gate, 1995)

a. Généralités sur les degrés-jours

Grâce notamment aux calculs basés sur la somme de température on peut améliorer nos connaissances sur les phénomènes de développement des plants portes-graines et ainsi pouvoir prévoir plusieurs mois à l'avance la date de récolte et donc, se rendre maître de la production et notamment du planning de traitement en usine. (Aubert, Lossois, 1972)

Les degrés-jours sont souvent utilisés en agronomie pour estimer ou prédire la longueur de différentes phases de développement. Cependant, ce concept comporte une limite importante : il exprime uniquement l'impact de la température. En effet, certains facteurs environnementaux importants pour le développement des végétaux, telles les précipitations, l'humidité du sol et la photopériode, ne sont pas considérés. (Lepage et al., 2012)

L'analyse individuelle des réactions chimiques ayant lieu dans la plante révèle que leur vitesse augmente avec la température. Toutefois, lorsque toutes ces réactions se produisent de concert au sein de la plante ce comportement peut différer. Le processus simplifié est le suivant (Figure 9) :

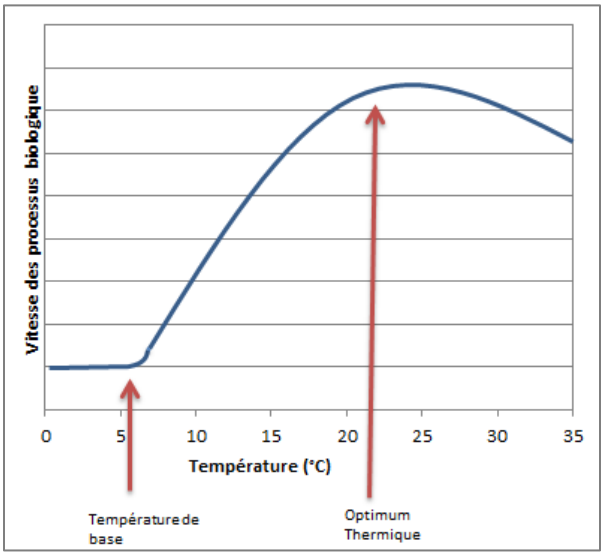

Figure 9 : Courbe représentant la vitesse des processus biologique en fonction de la température pour une plante dont la température de base est de 5°C et dont l'optimum thermique est de 21°C

- sur une large étendue de température, la vitesse des processus biologiques et nulle ou très faible quand la température est trop basse,
- lorsque la température atteint un certain seuil (appelé température de base et différent pour chaque plante), la vitesse des processus biologiques augmente progressivement jusqu'à une valeur optimale (appelé optimum thermique et dépendant également de la plante).
- après cette valeur, la vitesse peut ne plus évoluer ou chuter assez rapidement (en effet, aux températures très élevées, certaines structures vitales sont détériorées, les chloroplastes par exemple, et certaines enzymes clés sont dénaturées). (Gate, 1995)

Le concept de la température de base peut-être décrite aussi bien physiologiquement que statistiquement. (Yang et al., 1994)

- physiologiquement : on part du principe qu'en dessous d'un certain seuil de température, la croissance et le développement de la plante s'arrête. Cependant, il est difficile de déterminer la température de base physiologique, et chaque phase de développement peut avoir une température de base différente. En physiologie, la température de base devrait être similaire pour une plante donnée dans n'importe quelle saison de croissance. Cependant, en pratique, la température de base sélectionnée peut varier selon les années ou les saisons de croissance. Par exemple, Arnold (1959) a trouvé que la température de base pour le maïs était de 6°C en 1954 et de 4,3°C en 1955)
- statistiquement : la température de base est celle qui se traduit par la moindre variation dans les accumulations de degrés-jours.

Dans le tableau 1 ci-dessous, on a recensé les températures de bases des plantes de la famille des chénopodiacées, et des plantes d'autres familles. On peut voir que dans une même famille, les températures de bases peuvent être extrêmement différentes selon les espèces.

Tableau 2 : Températures de base, durée de vie des graines et temps de levée moyen pour différentes espèces [4]

Famille	Nom	Durée de vie des graines (en année)	Température de base (en °C)	Temps de levée moyen
Chénopodiacées	Arroche	5	15	17 jours
	Betterave	**6**	**8**	**9 jours**
	Blette	6	8	11 jours
	Epinard	4	3	4 jours
Amaranthacées	Amarante		15	11 jours
Brassicacées	Chou-fleur	5	20	12 jours
	Cresson	3	2	3 jours
	Navet	4	4	4 jours
	Radis	4	15	4 jours
	Roquette	4	16	5 jours

b. les sommes de température/ calcul des degrés jours

Comme expliqué ci-dessus, le calcul des degrés-jours est basé sur le principe physiologique selon lequel le développement est nul au-dessous d'un seuil désigné comme température de base. Cette température est évaluée de façon expérimentale et diffère selon les espèces et, dans certains cas, selon le stade spécifique de développement. (Lepage et al., 2012)

On définit un degré-jour de la manière suivante : un degré jour est observé lorsque la température de l'air est un degré au-dessus de la température de base pendant un jour. Le taux de

développement est considéré comme insignifiant lorsque les températures sont inférieures au seuil. (Snyder et al., 1999)

On calcule donc les degrés-jours pour une journée de la manière suivante (1) :

(1) $Si\ Tm > Tb\ ;\ DJ = Tm - Tb$
$Si\ Tm \leq Tb\ ;\ DJ = 0$

Avec Tm : la température moyenne du jour considérée et Tb : la température de base
Si l'on veut évaluer le nombre de degrés jours nécessaire pour un stade de développement atteint en x jours, on utilisera la formule suivante : (2)

(2) $DJx = \sum_{i=1}^{x} DJ, i$

avec DJ,i représentant le nombre de degrés-jours accumulés par le i-ème jour et calculé grâce à l'équation (1) et x le nombre de jours nécessaire pour atteindre le stade voulu.
On peut utiliser les sommes de degrés-jours de différentes manières (Ritchie and NeSmith, 1991):

- Classer les plantes en fonction de leur taux de floraison ou de la longueur de leur cycle (Derieux, Bonhomme, 1982)
- Estimer la maturité pour la récolte (Gilmore, Rogers, 1958) *pour le maïs*
- Planifier la date de récolte des légumes selon leur niveau de mûrissement (Katz, 1946) *pour les pois*
- Prédire la durée, sous conditions naturelles, entre deux stade de développement pour un parasite utilisé en biocontrole (Bernal, Gonzales, 1993)

On utilisera donc ces sommes de degrés-jours pour classer les MS de betterave en fonction de leur précocité, planifier la date de récolte des semences de betterave en fonction des stades de maturité et trouver la durée entre deux stades de développement du porte graine.

Cependant quelques points à la base de la méthode, peuvent être discutés :

- La linéarité entre le taux de croissance et la température
- La relation sans équivoque entre croissance de la plante et température
- L'absence d'autres facteurs pouvant limiter le développement.

3. Le modèle que l'on va utiliser

Le but de ce mémoire est de créer un modèle empirique qui présenterait les stades de développements de la betterave porte-graine en fonction de la température à l'aide notamment des degrés-jours. C'est donc un modèle quantitatif à l'échelle de la plante qui sera mis en place. L'un des principaux avantages de ce modèle sera sa facilité d'utilisation.

C. PREVISIONS METEOROLOGIQUES

Un des principaux problèmes rencontrés lors de l'établissement de ce modèle est de pouvoir prévoir la température. En effet c'est la température qui nous permettra d'établir la croissance physiologique de la betterave et *in fine* sa date de récolte. Afin d'approcher la date probable de mise en place d'un stade de développement, il faut donc établir une simulation à partir des données météorologiques dont on dispose. Plusieurs méthodes sont utilisées par différents secteurs pour pallier ce problème.

1. Etude des années météorologiques types

Dans le secteur du bâtiment, afin de connaître les contraintes climatiques et énergétiques auxquelles sera soumis une nouvelle construction, la *Typical Meteorological Year* (TMY – Année Type Météorologique) est utilisée. (Marion, Urban, 1995)

Une TMY est un ensemble de données de valeurs horaires du rayonnement solaire et des éléments météorologiques pour une période de 1 an. Elle se compose de mois choisis parmi différents années et concaténés pour former une année complète.

Le problème de la TMY est qu'elle n'est pas nécessairement un bon indicateur des conditions au cours de la prochaine année, ou même des 5 prochaines années. Au contraire, elle représente les conditions jugées typiques au cours d'une longue période de temps (par exemple 30 ans). Bien que très intéressante, elle paraît donc difficilement applicable à notre cas.

2. Méthode de la prévision en écophysiologie

Dans cette partie, nous décrirons la méthode utilisée par Philippe Gate (Gate, 1995) pour faire de la prévision en écophysiologie sur blé.

Selon lui, afin de juger si une année peut être considérée comme précoce ou tardive, on peut effectuer sur l'ensemble des années pour lesquelles les conditions météorologiques sont connues, la somme des températures qui encadrent deux dates calendaires. Ces dates sont choisies de manière empirique, notre objectif sera d'effectuer les cumuls thermiques entre la date de repiquage et la date de récolte de la betterave porte-graine.

Cette méthode semble plus adaptée que la précédente pour l'évaluation de la croissance des plantes. Elle sera donc employée dans la suite de cette étude et sera détaillée dans les parties III et IV.

III. MATERIEL ET METHODES

A. DESCRIPTION DES DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

1. Les données expérimentales de 2013 et 2015

a. Dispositifs expérimentaux et plan d'expérience

Les notations pour la mise en place du modèle ont été faites au cours de deux années : 2013 et 2015. Pour 2013, l'acquisition des données expérimentales a été faite sur une parcelle située à Nérac (lieu-dit : Argentens). Pour 2015, deux parcelles ont été sélectionnées, l'une à Nérac (lieu-dit : Argentens) et l'autre à Tonneins. Pour chaque année, les parcelles étudiées correspondent aux essais « productivités » mise en place par le service PPT Betterave pour tester les variétés.

Les parcelles sont configurées de la manière suivante : 2 rangs de betteraves mâles (qui apportent le pollen) et 4 rangs de betteraves femelles (ou Mâles Stériles). Le motif est répété sur l'ensemble de la parcelle (Figure 10).

Les rangs de betteraves femelles sont ensuite divisés en plusieurs *plots* (un *plot* est donc composé de 4 rangs avec sur chaque rang environ 30 plants de betteraves femelle), chaque *plot* présente un mâle stérile différent. (Figure 10)

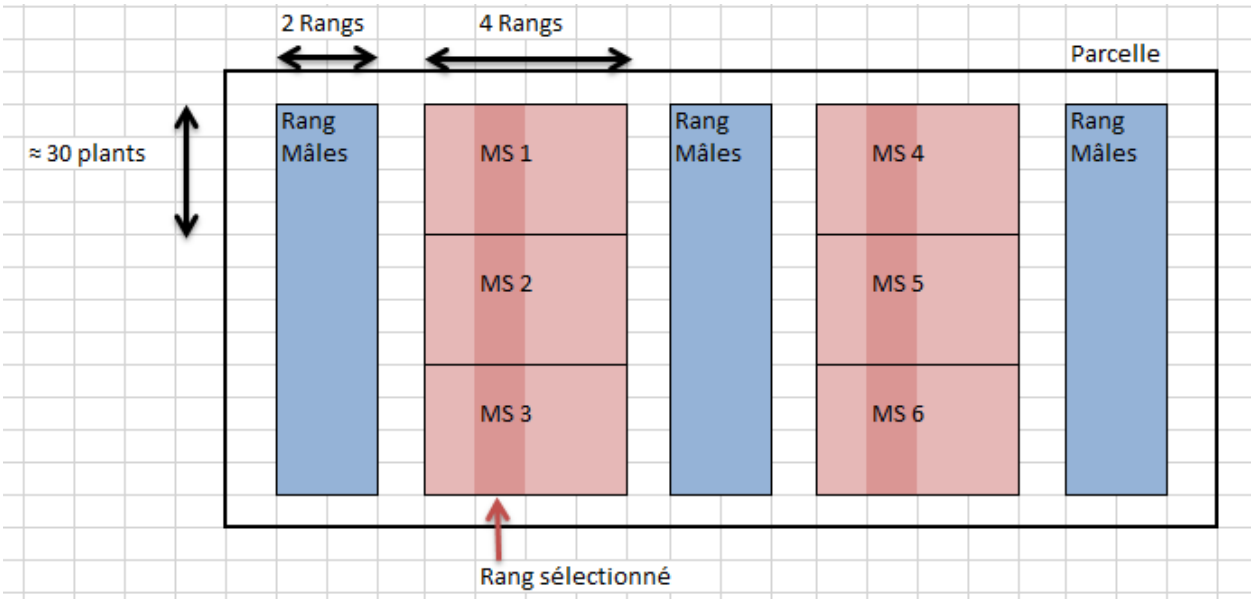

Figure 10 : Schéma du dispositif expérimental

b. Acquisition des données

Les observations sont réalisées une fois par semaine. Pour chaque plot, on sélectionne un des deux rangs du milieu pour réaliser les notations. Pour ne pas avoir d'effet de bordure, les observations ne seront pas réalisées sur les rangs de bordures. (Figure 10)

Pour chaque date d'observation, nous comptons le nombre de plante sur ce rang et nous déterminons le stade de développement de chaque plante (plante non reprises, plantes décollées, plante avec apex étirée, plante avec apex R2 étirés). La description plus précise des stades se fera en III.C.1)

2. Validation avec les données de 2016

Afin de permettre la validation du modèle, des données ont été acquises sur 2016. Deux parcelles ont été sélectionnées, Argentens (44°8'37.57"N, 0°21'25.03"E) et Espagnole (44°19'11.91"N, 0°55'21.06"E).
Sur ces deux parcelles, on effectue les mêmes notations que les années précédentes afin de comparer par la suite les dates que l'on estimait grâce au modèle pour l'atteinte d'un stade avec les dates réelle d'atteinte de ces stades.

On pourra par la suite améliorer la précision du modèle en y intégrant les données de 2016

B. CLIMAT

Les données météorologiques sont récupérées grâce à la base de donnée météorologique internet Géotroll. Cette base de donnée fournit les données météorologiques journalières (températures maximum, minimum, moyenne, précipitation, radiation, humidité et vent) depuis 1993 sur un point proche de la ville d'Agen (Latitude: 44.25000; Longitude : 0.75000). Pour chaque parcelle, on considère donc que les températures étaient équivalentes à celles qu'il y avait à l'endroit référencé dans Géotroll.

C. DESCRIPTION DES STADES PHENOLOGIQUES

1. Détermination à l'échelle de la plante

Nous proposons dans cette partie, un tableau synthétique des caractéristiques de stades de développement (Tableau 3 et Tableau 4), on pourra trouver en ANNEXE I des photos plus précises des différents stades décrits.

Tableau 3 : Description des stades de développement depuis le repiquage jusqu'au dernier stade avant floraison

Stade	**Repiquage**	**Début Montaison**	**Apex visible**	**Apex étiré sur ramification I**	**Apex étiré sur ramification II**
Définition	Les plants ont été repiqués. Développement du système foliaire en rosette.	L'axe principal commence à s'allonger. L'apex n'est pas encore visible	L'axe principal continue à s'étirer, l'apex de l'axe principal est visible dans le bouquet foliaire.	La plante atteint le stade apex étiré sur l'axe principal lorsque l'apex émerge du bouquet foliaire.	Mise en place de ramifications secondaires dont l'apex est étiré. L'apex est très étiré sur l'axe principal.
Reconnaissance terrain	La plante développe son système foliaire mais ne présente pas encore d'axe principal visible	Lorsqu'une plante débute sa montaison, un premier nœud est visible. Il est reconnaissable par un renflement à la base de la tige principale. L'apex n'est pas encore visible	L'apex n'est pas visible, il est encore situé dans le bouquet foliaire. L'apex a un aspect compact.	L'apex a une forme plus étirée, on peut y observer des pré-feuilles. L'apex est au-dessus du bouquet foliaire.	L'apex des ramifications secondaires est au-dessus du bouquet foliaire.
Classification	Plante non montée ou rosette	Plante montée, apex non visible	Apex visible	Apex étiré	Apex R2 étiré
Photo					

Tableau 4 : Description des stades de développement de floraison

Stade	Début floraison	Pleine Floraison	Fin Floraison
Définition	Lorsque les fleurs situées à la base de la ramification secondaire sont épanouies	Lorsque les fleurs situées sur le tiers médian de la ramification secondaire sont épanouies	Lorsque les fleurs situées sur le dernier tiers médian des ramifications secondaires sont épanouies
Reconnaissance terrain	La floraison part de la base de la ramification vers le sommet. Regarder à la base de la ramification si les fleurs sont ouvertes.	La floraison part de la base de la ramification vers le sommet. Regarder sur le premier tiers médian des ramifications secondaires si les fleurs sont ouvertes.	La floraison part de la base de la ramification vers le sommet. Regarder sur le dernier tiers des ramifications secondaires si les fleurs sont ouvertes.
Classification	Début floraison	Pleine floraison	Fin floraison
Photo			

2. Détermination à l'échelle de la parcelle

Tableau 5: Feuille de notation du 24/05

						24/05					
Country	MS	Location	n° observation	Column	Ligne	NB plante	NB plante non reprise	NB plante décollée	NB plante apex visible	Nb plante apex étiré	NB plante apex R2 étiré
FR	C024A000/G0960000	Nérac	1	C1	R102	30	0	2	12	10	6

Après chaque date de notations, les informations sont saisies dans un fichier Excel (Tableau 5). Pour chaque date de mesure, nous calculons le % de plante ayant atteint un stade de développement.

Exemple de calcul du pourcentage de plante ayant atteint le stade « Apex R2 étirée »

*$ calcul du pourcentage de plante apex R2 étiré le 24/05/15 pour le MS 24*96 = 100*6/30 = 20%*
*$ calcul du pourcentage de plante apex étiré le 24/05/15 pour le MS 24*96 (les plantes ayant un apex R2 étiré ont, elles aussi l'apex étiré, on en tient donc compte dans le calcul) : 100 * ((6/30) + (10/30))= 53,3%*
*$ calcul du pourcentage de plante ayant un apex visible (on prend donc en compte aussi les plantes ayant un apex étiré et les plantes ayant un apex R2 étiré) : 100 *((6+10+12)/30)=93,3%*

On trie les données de manière à ce qu'elles soient présentées ainsi :

Tableau 6 : Tableau représentant le pourcentage des plantes ayant atteint le stade apex visible en fonction de la date de notation

			Date	04/05	08/05	14/05	24/05
			∑ T°	176,0	209,6	243,0	281,4
Country	MS	Country	Location	% apex visible	% apex visible	% apex visible	% apex visible
FR	C024A000G0960000	FR	Nérac	0	38	69	93,3

Grâce aux notations effectuées chaque semaine, on a le pourcentage de plantes ayant atteint le stade cherché à plusieurs dates et les sommes de températures base 8 cumulées depuis la date de repiquage.
On considère que le stade recherché a été atteint à l'échelle de la parcelle si 50% des plantes notées ont atteint ce stade. Par construction graphique, on cherche donc la somme de température pour laquelle ont atteint 50% des plantes au stade X.

Exemple : on cherche la somme de température nécessaire aux plantes pour atteindre le stade de début montaison (c'est-à-dire la température à laquelle 50% des plantes présentent un apex visible) du MS C024A000G0960000. Pour cela, on a récolté les données suivantes (Tableau 6).

Pour trouver la température cumulée à laquelle 50% des plantes ont atteint le stade «Début Montaison » on trace une courbe qui représente le pourcentage de plante qui a atteint ce stade en fonction des températures cumulées. On récupère ensuite l'abscisse du point d'ordonnée 50% pour trouver la date de montaison. Dans cet exemple, on trouve une température cumulée pour le début montaison de 221 °J (Figure 11).

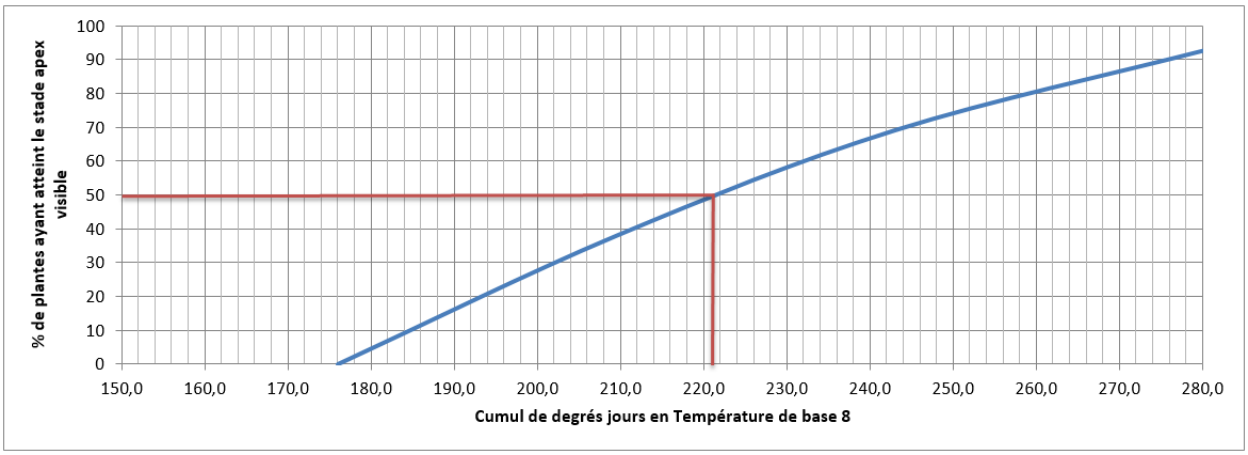

Figure 11 : Graphique représentant le pourcentage de plantes ayant atteint le stade apex visible en fonction de la date pour le MS C024A000G0960000La date de repiquage des plants en 2013 étant le 20 mars, on calcule la somme des degrés jours entre le 20 mars et le 10 mai en fonction du calcul présenté précédemment. (II.B.2.c.) ce qui donne 215°J en température de base 8.

D. CREATION DE L'OUTIL

1. L'outil

L'outil sera mise en place sur Excel et fonctionnera via une Macro. Cette macro sera capable de déterminer les dates d'atteinte de chaque stade pour chacune des trois classes d'hybride (précoce-médian-tardif).

2. Insertion de tous les hybrides dans l'outil

Afin de pouvoir étudier avec le modèle tous les hybrides étant actuellement en production, on a cherché à trier tous les hybrides dans les trois classes : précoce – médian – tardif.

Les trois hybrides représentatifs de chaque classe étant :

- précoce : C0**62**0100G0**99**0000 (62*99)
- médian : C0**24**A000G0**96**0000 (24*96)
- tardif : C0**42**0000G**111**0000 (42*111)

Une méthode plus précise de classement des hybrides se trouve en ANNEXE II.

E. TESTS STATISTIQUES

1. Variabilité de développement sur la parcelle

Afin de tester la variabilité des mesures faites sur un rang dans un plot, on décide de faire les notations pour un même hybride (24*96), sur tous les rangs de plusieurs *plots*. Ces *plots* se situent sur la parcelle d'Argentens et sont répartis comme suit (Figure 11)

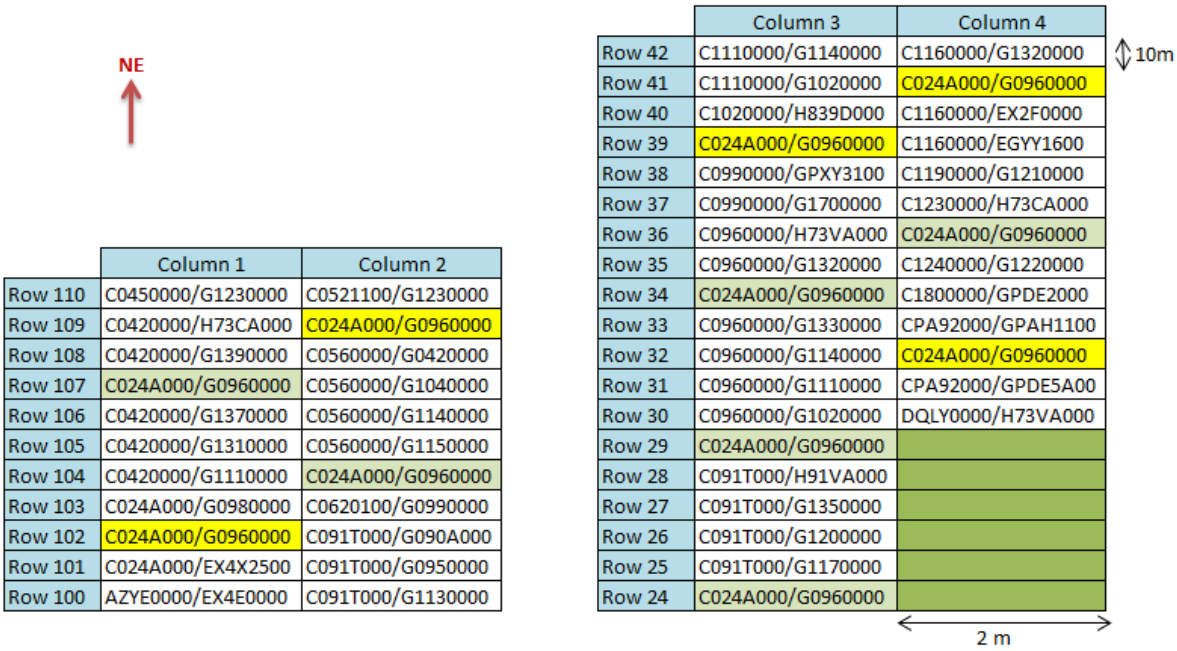

Figure 12 : Plan de l'essai, les plots notés sont représentés en jaune

On effectuera ensuite une ANOVA avec le logiciel Excel pour déterminer si tous les plants de betterave de chaque *plot* ont un développement équivalent.

2. Vérification de la taille d'échantillon

Les relevés ayant toujours été fait sur un seul rang, on se demande si l'échantillon considéré (de 1 rang soit environ 30 plantes) était suffisant.

Pour vérifier cela, on a effectué une série de mesure sur chacun des rangs des 5 *plots* mentionnés ci-dessus. Cette série de mesure dénombre le nombre de plante sur chaque rangs aux trois stades suivants : Apex Visible – Apex Etiré – Apex R2 Etiré.

On regarde ensuite le pourcentage de plante ayant atteint chaque stade sur chaque rang. On obtient une certaine moyenne en prenant un rang. On regarde donc quelle moyenne on aurait obtenu en considérant 2 rangs, puis 3 rangs, puis l'ensemble du *plot*. On pourra ensuite conclure sur le fait que notre modèle basé sur l'observation d'un unique rang est assez précis ou s'il aurait fallu considérer plutôt 2,3 ou 4 rangs.

IV. RESULTATS

A. PREVISION EN ECOPHYSIOLOGIE

Dans cette partie, nous décrirons la méthode utilisée par Philippe Gate (Gate, 1995) pour faire de la prévision en écophysiologie du blé.

On considère une date de repiquage au 15 mars et une date de récolte au 15 août. Pour toutes les années complètes présentes sur la base Géotroll (depuis 1993 jusqu'à 2015), on calcule le nombre de degrés-jours (en température de base 8) qui sépare ces deux dates. On trie ensuite ces années de la plus froide à la plus chaude, on considère qu'une année à 1/5 chance d'être une année très froide, 1/5 chance d'être une année très chaude et 3/5 chances d'être une année intermédiaire. Sur les 23 dernières années, 1995 est considéré comme une année médiane (lorsqu'on ne prend en compte que les températures de mi-mars à mi-août –Figure 13).

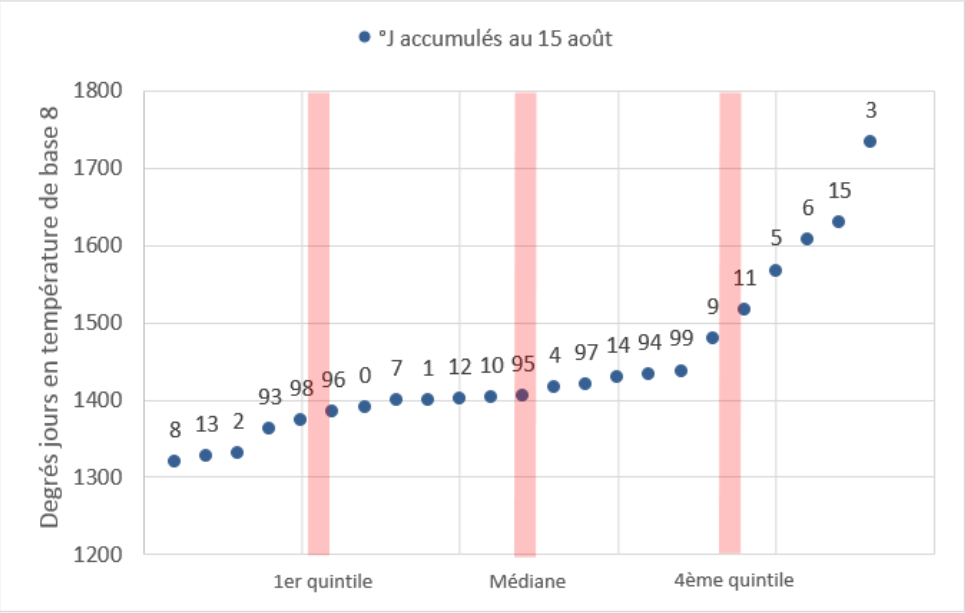

Figure 13 : Classement des années depuis 1993 jusqu'à 2015 de la plus froide à la plus chaude

La méthode précédente nous permet de montrer que l'année la plus froide (entre mi-mars et mi-août) sur les 23 dernières années est l'année 2008, et l'année la plus chaude est l'année 2003 (ce qui concorde avec les données historiques des années jugées les plus chaudes et les plus froides).

Si l'on trace les courbes représentant la somme des degrés jours en fonction de la date (Figure 14) selon les années relevées ci-dessus, le graphique présentera donc une plage de température qui « borne » les températures de l'année étudiée (on considère qu'il y a peu de chance que l'année étudiée ait des températures plus hautes que 2003 ou plus faibles que 2008).

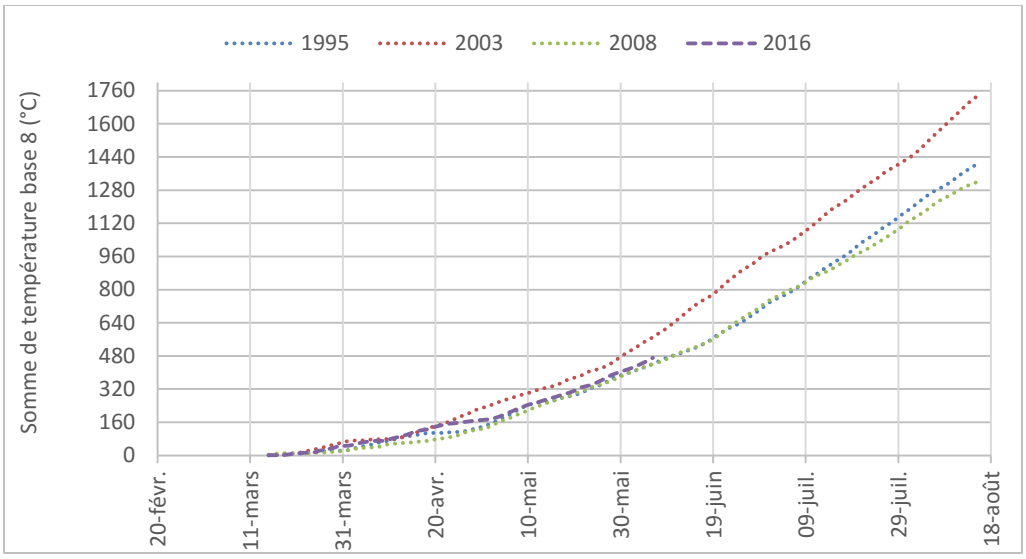

Figure 14 : Somme des degrés jours en température de base en fonction de la date selon les années 1995, 2003, 2008 et 2016

Si l'on veut faire le test à une date donnée (7 juin 2016 dans notre exemple), on se propose de tracer le graphe ci-dessous (Figure 15) pour comparer les degrés-jours de l'année 2016 avec ceux des autres années types. On considère qu'au fur et à mesure que la plante croît, la prise en compte des sommes de degrés jours journaliers permet pas à pas de caractériser l'orientation climatique sur la campagne (Gate, 1995). Au 7 juin, il semble donc que l'orientation climatique de la campagne soit un peu plus chaude que 1995. On considérera donc l'année 2016 comme une année ayant des températures médianes.

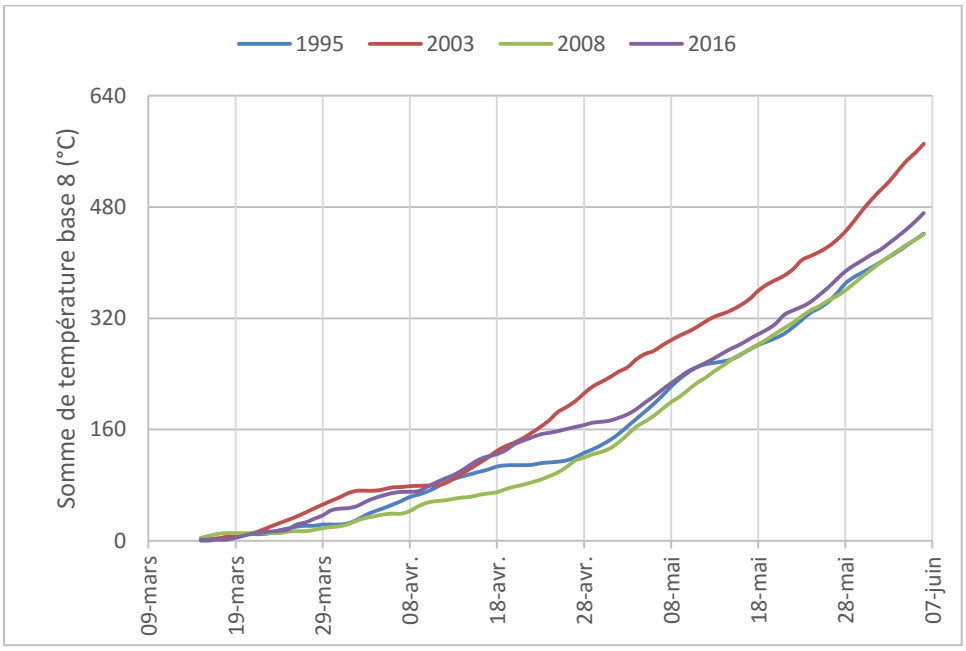

Figure 15 : Degrés-jours en température de base 8 en fonction des jours, pour les années 1995, 2003, 2008 et 2016 du 15 mars au 7 juin

B. CONSTRUCTION DE L'OUTIL

1. Choix de l'année météorologique de référence

On a pu déterminer précédemment (IV.A) quelles étaient sur une période de 23 ans, les années considérées comme « chaudes » et les années considérées comme « froides ».

Tant que l'on n'a pas réussi à caractériser notre année, on estime qu'elle se rapprochera d'une année médiane (qui est la médiane des températures sur les 23 années).

On bornera nos résultats par rapport à ceux que l'on aurait eus en année chaude (2003) ou en année froide (1998) afin d'avoir une « plage » de dates à laquelle un stade peut effectivement être atteint.

2. Mise en place de l'outil et création de la macro

a. Mise en place basique du modèle

Grâce aux données mesurées en 2013 et 2015, on calcule la somme de température nécessaire pour atteindre à l'échelle de la parcelle les différents stades de développement. (Tableau 7)

La détermination de ces stades se fait grâce à la méthode développée en III.B.2, répétée 6 fois (pour chaque stade) sur tous les hybrides (une quarantaine) pour chaque année. On trouvera en ANNEXE III, les valeurs pour les trois hybrides (précoce-médian-tardif) pour chaque année/lieu de notation. On a moyenné ces valeurs pour obtenir le Tableau 7.

Tableau 7 : Tableau représentant les sommes de température en base 8 nécessaire pour atteindre chaque stade pour trois hybrides donnés

Somme de température base 8°C (°C)	Précoce	Médian	Tardif
Début Montaison	213	252	314
Début Floraison	438	490	522
Pic Floraison	486	560	578
Fin Floraison	611	655	656
M4	909	1001	1062
M6	1037	1076	1128

A partir de la connaissance des sommes de T°C et de la date de repiquage réalisé en 2016 de l'essai productivité, nous avons calculé la date pour l'apparition de chaque stade en fonction de l'année climatique médiane, chaude et froide. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 8.

Tableau 8: Date d'apparition théorique de chaque stade pour chaque hybride en fonction de l'année climatique (Chaude, Médiane ou Froide)

	T° Chaude	T° Médiane	T° Froide	T° Chaude	T° Médiane	T° Froide	T° Chaude	T° Médiane	T° Froide
	62*99	62*99	62*99	24*96	24*96	24*96	42*111	42*111	42*111
	Réel 2016 _ estimé au	Réel 2016 _ estimé au	Réel 2016 _ estimé au	Réel 2016 _ estimé au	Réel 2016 _ estimé au	Réel 2016 _ estimé au	Réel 2016 _ estimé au	Réel 2016 _ estimé au	Réel 2016 _ estimé au
Stade phénologique	23/03/2016	23/03/2016	23/03/2016	23/03/2016	23/03/2016	23/03/2016	23/03/2016	23/03/2016	23/03/2016
Début Montaison	*30-avr.*	*7-mai*	*10-mai*	*5-mai*	*12-mai*	*15-mai*	*15-mai*	*20-mai*	*23-mai*
Début Floraison	*29-mai*	*02-juin*	*7-juin*	*1-juin*	*07-juin*	*12-juin*	*4-juin*	*10-juin*	*16-juin*
Pic Floraison	*1-juin*	*07-juin*	*12-juin*	*7-juin*	*14-juin*	*20-juin*	*8-juin*	*15-juin*	*21-juin*
Fin Floraison	*10-juin*	*18-juin*	*23-juin*	*13-juin*	*21-juin*	*26-juin*	*13-juin*	*21-juin*	*26-juin*
M4	*28-juin*	*11-juil*	*16-juil.*	*5-juil.*	*18-juil*	*23-juil.*	*9-juil.*	*22-juil*	*28-juil.*
M6	*7-juil.*	*20-juil*	*26-juil.*	*10-juil.*	*23-juil*	*29-juil.*	*13-juil.*	*26-juil*	*1-août*

Comme prévu, pour un hybride, plus la température est chaude plus le stade arrive tôt, et plus la température est froide plus il arrive tard. Un hybride précoce atteint chaque stade plus tôt qu'un hybride tardif.

b.Mise à jour du modèle en intégrant les données température de la campagne en cours

A partir du repiquage de la culture, nous avons intégré les données climatiques de l'année 2016.

Pour mettre en place cette méthode de calcul, nous avons réalisé un modèle à partir d'Excel et des données suivantes :

- Les températures d'atteinte des stades pour chaque hybride (basées sur des moyennes entre 2013 et 2015)
- Les températures médianes des 22 années précédentes
- Les températures d'une année « froide » et d'une année « chaude »
- Les températures d'atteinte des premiers stades de 2016 pour chaque hybride
- Les températures de l'année en cours depuis la date de repiquage des betteraves jusqu'à la dernière température disponible

Le calcul se fait ensuite automatiquement selon une routine de calcul implanté dans le fichier Excel (Annexe V) suivant le protocole ci-après :

- Dans un premier temps, la macro cherche s'il y a déjà des stades atteints à la période considérée ; si oui, elle remplit le tableau de résultats (en gras) en prenant comme référence les températures de la campagne en cours ; si non, elle passe à la deuxième étape
- Ensuite la somme des températures de l'année en cours sera comparée aux données des années précédentes. Si les données températures de l'année en cours aboutissent à un nombre de degré jour suffisant pour atteindre un palier de

développement (fixé à partir des années précédentes), alors le tableau de résultats est rempli (caractères gras et italique) à partir des résultats de cette année ; autrement la macro passe à la troisième étape.

Rq : Il est à noter qu'une réponse positive au test ci-dessus sera théoriquement rare car elle implique soit que les données de notation n'ont pas été mises à jour (hypothèse la plus probable qui rend cette réponse positive plus probable), soit que le stade réellement atteint par la culture est en retard par rapport au stade prédit. Ce dernier cas sera très rare, notamment de par le fait que les décalages entre le stade réel et le stade théorique seront très faible.

- Troisième et dernière étape, ici la macro commence par sommer les températures sur l'année en cours jusqu'à ce qu'elle n'ait plus de données disponible. À partir de ce moment-là, elle continue de sommer mais avec les températures de l'année médiane (ou froide ou chaude selon le tableau qu'elle remplit) jusqu'à ce qu'elle atteigne la somme de température recherchée. La date à laquelle la somme des degrés jour nécessaire à atteindre le stade suivant peut alors être déterminé et est renseigné dans le tableau de résultat (en italique).

Au 13 juin 2016, 640°Cj se sont accumulés depuis la date de repiquage. A cette date, les stades début montaison, début floraison, pleine floraison et fin floraison ont été atteints pour les 3 MS référence (Tableau 9)

Tableau 9 : Résultat du calcul de la macro présentant les dates réelles d'observation des stades (en gras) , les dates pour le cumul de T°définis et atteints par les températures de 2016 (en gras italique) et les dates théorique d'atteinte des stades (en italique)

	Précoce	Médian	Tardif
	62*99	24*96	42*111
	Réel 2016 _ estimé au	**Réel 2016 _** estimé au	**Réel 2016 _** estimé au
Phénologie du glomérule	13/06/2016	13/06/2016	13/06/2016
Début Montaison	**28-avr.**	**7-mai**	**11-mai**
Début Floraison	***26-mai***	***30-mai***	***03-juin***
Pic Floraison	***30-mai***	***07-juin***	***08-juin***
Fin Floraison	***11-juin***	*15-juin*	*15-juin*
M4	*04-juil*	*12-juil*	*16-juil*
M6	*15-juil*	*17-juil*	*21-juil*

Dans ce tableau, les dates en gras (uniquement) sont donc celles qui ont effectivement été atteintes dans l'année en cours. Les dates en gras-italique sont celles qui ont été calculées seulement grâce aux températures de l'année en cours (mais sur des sommes théoriques de température pour atteindre ces stades). Les dates en italiques sont celles qui ont été calculées en prenant en compte des températures théoriques médianes.

3. Insertion de tous les hybrides dans l'outil

D'après la méthode décrite dans le III.D.2, les hybrides présents actuellement en production sont classés de la manière suivante (Tableau 10) ; on peut ainsi suivre leur développement grâce à l'outil selon la classe à laquelle ils appartiennent.

Tableau 10 : Classement des hybrides de production

Précoce	Médian	Tardif
C0420000HSUHB000	C024A000G0960000	AHED2000EMU90000
C0960000G1140000	C024A000G0980000	AZYE0000EMTF1000
C1160000G1320000	C0560000G1140000	AZYE0000EMTR0000
C1800000GPDE2000	C091T000G1130000	C024A000G0420000
C0620100G0990000	C091T000G1200000	C0420000G1110000
C0990000G1700000	C0980000G1160000	C091T000G090A000
	C1160000EX3E0000	C0960000G1110000
	CPA92000GPAH1100	DJGY4100G1020000
	C024A000EX4X2500	C1230000H73CA000
	C024A000EX4X2000	C0420000H73HA000
	C0420000H73CA000	C0560000G1040000
	C1240000G1220000	C1190000G1210000
	C024A000G1020000	C024A000EHBQ0000
	C0420000H73SB000	C1020000H73HA000
	C1160000EGYY1600	

C. Determination des sommes de temperature pour atteindre chaque stade pour 2016 pour chaque hybride

Grâce aux données mesurées en 2016, on a pu calculer la somme de température nécessaire pour atteindre les différents stades de développement à l'échelle de la parcelle (Tableau 11). Intégrer les données de 2016 à la fin de chaque stade dans l'outil, permet d'améliorer la précision du modèle.

Tableau 11 : Somme des températures en base 8 nécessaires pour atteindre chaque stade en 2016

Somme de température base 8°C (°C)	Précoce	Médian	Tardif
Début Montaison	194	252	287
Début Floraison	477,5	501,5	512,5
Pleine Floraison	?	573	568,5
Fin Floraison	572	643	637

D. VALIDATION DES DATES THEORIQUES AVEC LES DATES REELLES

1. Validation de la prévision du cumul de température nécessaire pour atteindre un stade

Afin de vérifier la précision du modèle, nous avons comparé les sommes de températures théoriques (moyenne des données expérimentales de 2013 et 2015) et les températures cumulées qui ont été nécessaires pour atteindre chaque stade en 2016 (Figure 16). La validation du modèle ne pourra se faire que sur 4 stades : Début Montaison, Début Floraison, Pleine Floraison, Fin Floraison. Les stades de maturité du glomérule n'étant pas encore disponibles.

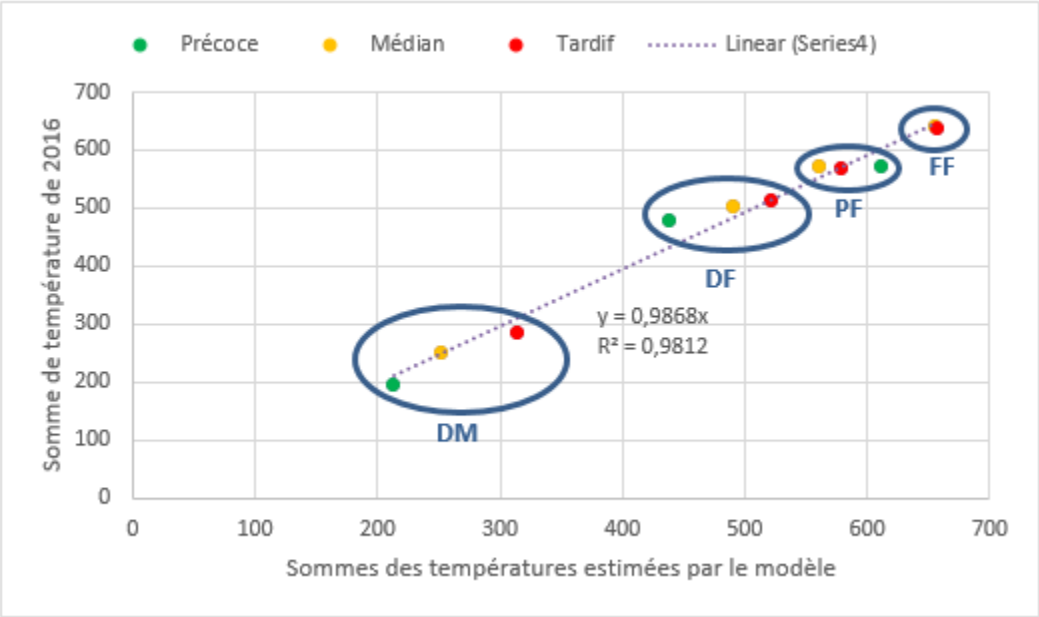

Figure 16 :Ttempératures cumulées nécessaire pour atteindre chaque stade en fonction des sommes de températures qui ont été calculées pour mettre en place le modèle

D'après la Figure 16, on observe une forte corrélation entre les sommes de températures théoriques et les sommes de températures réelles (R^2 de 0.98).

2. Précision du modèle pour différentes dates de simulation

Afin de visualiser la précision du modèle pour différentes dates de simulation, on compare le nombre de jours de différence qu'il y a entre la date théorique prédite par le modèle (à une date de simulation précise) et la date réelle pour atteindre un stade (Figure 17) a sélectionné 5 dates de simulation (22 mars, 22 avril, 22 mai, 1 juin, 16 juin).

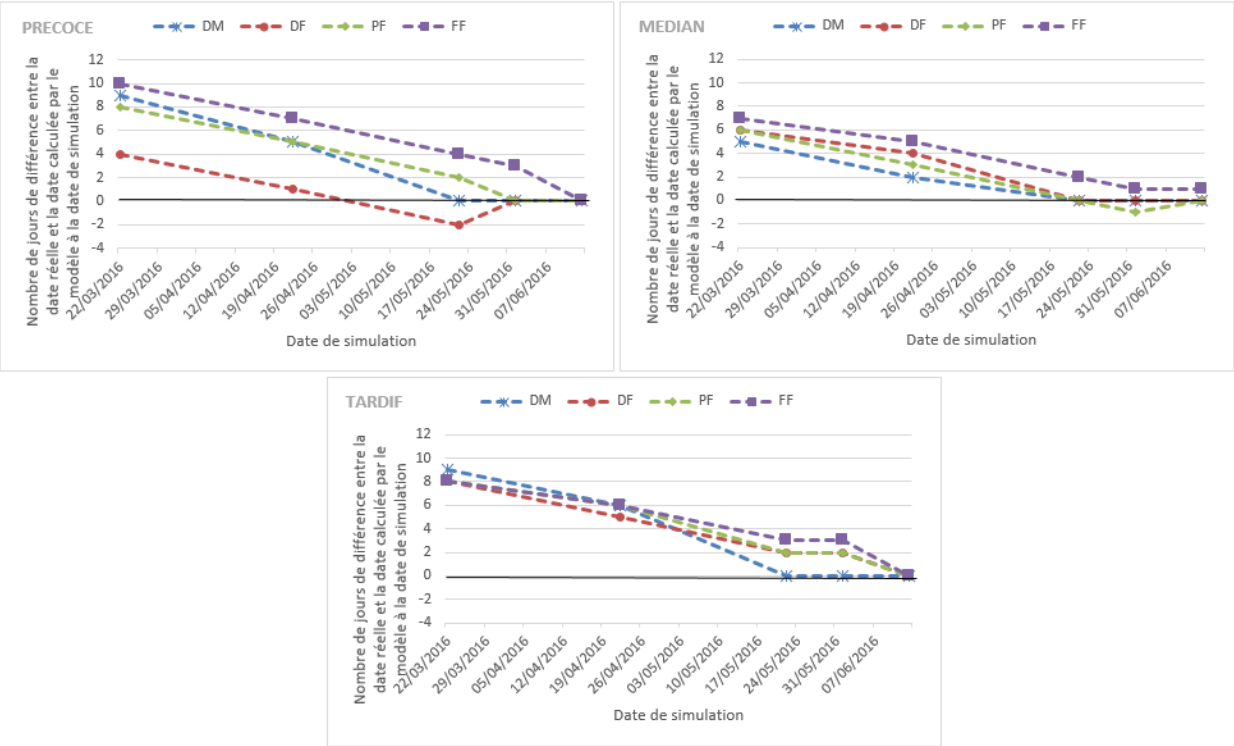

Figure 17 : Précision du modèle à différentes dates de simulation

D'après cette simulation, on observe que plus on lance le modèle tardivement, plus l'outil est précis. Ceci est expliqué par le fait que plus la simulation est récente, plus l'outil a pris en compte les températures de 2016 (à la place des températures médianes des 21 années précédentes) et les sommes de températures réelles de 2016 pour atteindre chaque stade (au lieu des sommes calculées à partir de 2013 et 2015). On a donc une précision de 0 à 3 jours pour les stades DM, DF, PF et FF à partir du 22 mai (date à laquelle aucun hybride n'a encore atteint le stade début floraison).

3. Validation de la prévision de la température en prenant une médiane des 22 dernières années

Afin de vérifier si la prévision de la température qu'on effectue est correcte, on fait une régression linéaire (Figure 18) présentant les dates réelles d'atteinte des stades pour un des deux lieux d'essai de 2016, en fonction de la date estimée d'atteinte des stades (cette date est estimée à partir de la date de repiquage sur les deux lieux).

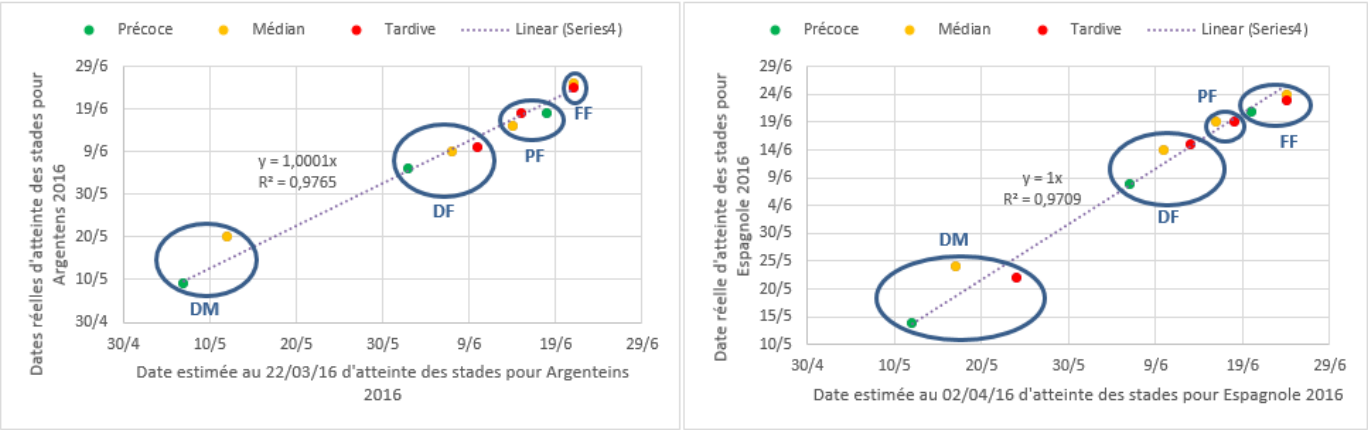

Figure 18 : Dates réelles d'atteinte des stades en fonction de la date estimée par le modèle à la date de repiquage pour 2016 et pour deux lieux d'essais différents : Argentens et Espagnole

Sur les deux graphiques de la Figure 18 les points suivent la bissectrice (la courbe de d'équation y = x) avec un R^2 de plus de 0.97 ce qui montre une très bonne adéquation entre le modèle et les données observées.

Pour ces graphiques la date est estimée à partir de la médiane des 22 années disponibles dans notre base de données de température, on peut donc aussi en déduire que l'année 2016 est une année médiane en terme de température (puisque les R^2 sont respectivement de 0.98 pour Argentens et 0.97 pour Espagnole).

E. VALIDATION DE LA METHODE

1. Vérification de l'homogénéité des *plots*

Le modèle ayant été construit sur le postulat que toutes les plantes d'un même hybride se développaient de la même manière sur le lieu de culture, il est à présent nécessaire de vérifier ce postulat. Pour cela on a fait une série de notation de développement sur toutes les plantes de tous les rangs de plusieurs plots de 24*96 présents sur la parcelle (on trouvera ces notations en ANNEXE VI).

On a ensuite fait des ANOVA pour déterminer si le nombre de plantes à chaque stade présents à cette date (Apex Visible, Apex Etiré, Apex R2 étiré) était équivalent pour chaque *plot*. (III.C.1)

On se propose de donner les résultats de ces ANOVA dans le Tableau 12 :

Tableau 12 : Résultat des ANOVA montrant si les plots sont équivalents pour chaque stade ou non

	p-valeur
Apex Visible	0,086507
Apex Etiré	0,19982
Apex R2 Etiré	0,108015

Les p-valeur sont toujours supérieures à 0.5 (5% étant notre taux de confiance), on valide donc l'hypothèse H_0 : le développement des plantes est équivalent sur tous les *plots*.

Notre modèle créé à partir des données sur un seul *plot* paraît donc bien cohérent.

1. Validation de la taille d'échantillon

Pour établir le modèle précédemment cité, les notations ont été faites au niveau d'un rang (sur 4) pour chaque *plot* sélectionné. Afin de voir si cet échantillon était suffisant pour représenter l'ensemble de la parcelle ou s'il fallait envisager d'augmenter le nombre de rangs observées, on a étudié l'ensemble des plantes de la parcelle sur chaque rang. Puis on a établi un graphique représentant la variabilité des mesures si l'on sélectionnait un, deux, trois ou quatre rangs. (Figure 19). Ce travail a été fait sur 5 *plots*, dont les résultats se trouvent en ANNEXE VII.

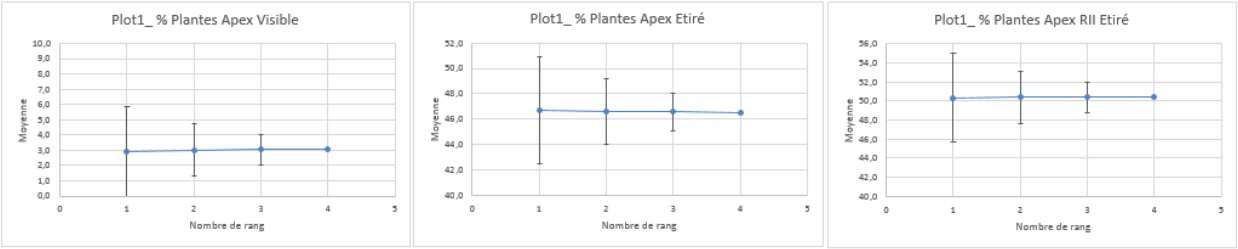

Figure 19 : variabilité des mesures selon le nombre de rangs selectionnés

D'après les trois graphiques de la Figure 19, on observe que la variabilité baisse fortement lorsqu'on augmente la taille de l'échantillon (soit le nombre de rangs notés) jusqu'à atteindre zéro lorsque 4 rangs sont notés (il n'y a pas de variabilité car les 4 rangs représentent l'ensemble du *plot*). Cependant même en prenant un seul échantillon (donc un seul rang), on est rarement à plus de 4% de variation, ce qui représente pour un rang de 30 plantes environ 1 plantes de différence à chaque stade. L'augmentation de la taille de l'échantillon permet de réduire la variabilité, mais le gain de la précision ne semble pas pertinent, connaissant en plus la charge de travail pour réaliser ces observations. Cette analyse permet de valider la taille de l'échantillon réalisé pour faire les notations de développement

V. DISCUSSION

A. DETERMINATION DE LA DATE DE RECOLTE (UNE FOIS QUE M8 EST CONNU)

Dans la présentation des résultats, on a pu voir que le modèle était bien calé jusqu'à Fin Floraison. On n'a cependant pas pu valider les dates de maturité, mais on peut estimer qu'elles sont correctes au vu de la précision que l'on a sur les premiers stades.

La date de récolte dépendra du stade de maturité souhaité pour le process des semences et de la sensibilité des semences au désoperculage, à l'égrenage... A partir des travaux sur l'acquisition des propriétés germinative de la betterave sucrière (Casals, 2002), la capacité germinative est atteinte après 650°C cumulé (base 0) depuis Floraison et la faculté germinative maxi après 950°C cumulé. (Figure 20)

Phénologie du glomérule	J.A.F.	∑ T°C depuis la floraison	T.E. de la semence	Paramètres de qualité
Floraison	0			
Péricarpe, calice et bractée verte	9	150 - 180°C.j	90%	Glomérule vide
Péricarpe, calice et bractée verte	25	450 - 490°C.j	80%	Glomérule avec amande
Brunissement du péricarpe				
Péricarpe brun, calice et bractée verte	34	650 - 700°C.j	70%	Capacité germinative Poids maximal
Brunissement du péricarpe et du calice				
Péricarpe et calice brun, bractée jaune	47	950 - 1000°J	20%	Faculté germinative maximale

Figure 20 : Evolution de la qualité germinative après Pleine Floraison. Les sommes de températures sont en base 0 et JAF : nombre de jours après Pleine Floraison

Le modèle prendre donc ces deux hypothèse pour déterminer un stade de récolte précoce et un stade de récolte normal soit 650°J cumulé ou 950°J (en température de base 0) cumulé depuis le stade « pleine Floraison ».

B. AMELIORATION DU MODELE

1. Données climatiques

On pourrait se poser la question, afin que la méthode soit plus rigoureuse, d'installer sur chaque parcelle une station météo, et de se baser sur les données météorologiques de chaque parcelle pour faire le modèle de développement. Cependant, le but de ce modèle est qu'il fonctionne en production, et il serait beaucoup trop compliqué d'installer une station météo sur chaque parcelle de production. On essayera donc de créer un modèle qui fonctionne sur les parcelles du Lot-et-Garonne en considérant comme température de référence celle d'Agen donnée par Geotroll.

2. Intégration d'autres paramètres (rayonnement/ température plus proche de tonneins/ changer de température de base en fonction du stade)

a. Intégration du rayonnement dans le calcul

Pour tenter d'améliorer la prévision du modèle, nous avons testé l'utilisation des degrés-jours photothermiques, comme utilisé dans d'autres modèles de croissance telles que STICS (Brisson, 2003). Ces degrés jours photothermiques prennent en compte les températures (au-dessus de la température de base 8) ainsi que le rayonnement (en Wh/m²) selon la formule suivante : *DJP = DJ * Rayonnement.*

En effet, nous avons pu constater qu'en 2016, la luminosité avait été bien inférieure à ce qu'elle avait été en 2015. Il nous a donc paru pertinent d'essayer de l'intégrer dans le modèle de développement de la betterave. La Figure 21 représente les sommes des degrés jours photothermiques dont il y a eu besoin en 2016 pour atteindre les stades DM, DF, PF et FF en fonction de celles que l'on a pu estimer grâce au modèle.

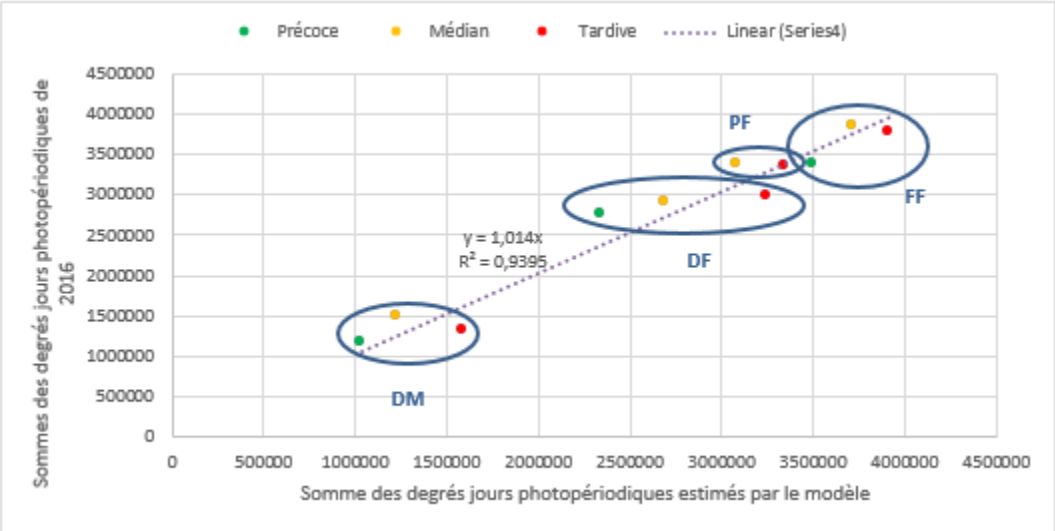

Figure 21: Somme des degrés jours photopériodiques de 2016 en fonction de celles estimées par le modèle

Le R² obtenu est de 0,94, inférieur à celui atteint en utilisant uniquement la température. Si la croissance est impactée par le rayonnement et par la température, le développement phénologique semble moins sensible à l'effet rayonnement. Il n'apparaît pas en l'état d'inclure cette variable dans le modèle de prévision.

b.Sensibilité du modèle dans le cas où l'on prend les données climatiques d'une station plus proche de la parcelle de notation

Pour la mise en place du modèle nous avons utilisé les températures données par Géotroll au niveau de la ville d'Agen. Il aurait semblé plus juste pour améliorer la sensibilité du modèle, de prendre les températures de Tonneins pour le développement des plantes au niveau de Tonneins (essai 2015). On a donc adapté le modèle pour prendre en compte ces températures-là, puis on a fait la moyenne sur les températures cumulées d'atteinte des stades de Argentens 2013, Tonneins 2015 et Argentens 2015 pour pouvoir estimer la température cumulée nécessaire pour atteindre chaque stade.

La précision de ce modèle est présentée en Figure 22.

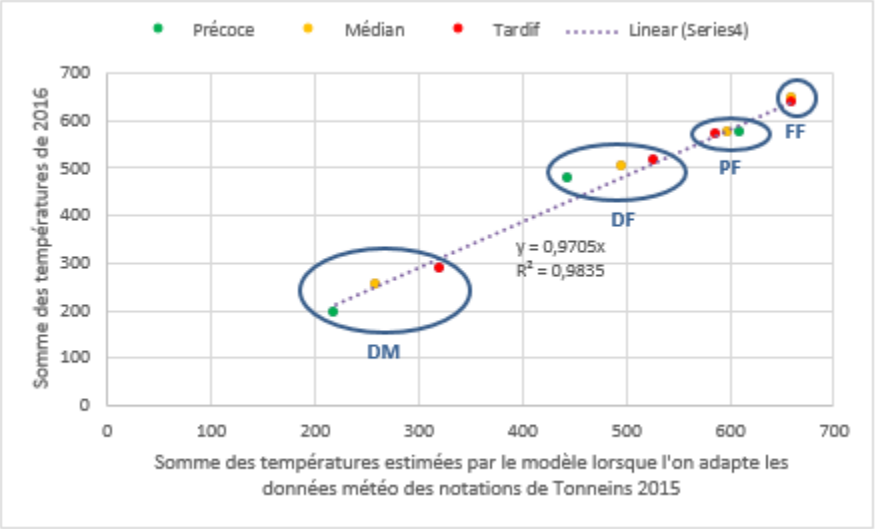

Figure 22 : Températures cumulées de 2016 en fonction des températures cumulées nécessaires estimées pour atteindre chaque stade par le modèle amélioré

On trouve un R² de 0.9835 qui est légèrement supérieur au R² du modèle de base (0.9812), le modèle se trouve donc amélioré lorsque l'on considère des températures plus proches du lieu de l'essai. Il serait donc également amélioré en prenant des températures plus proches du lieu de production de l'hybride considéré. Toutefois, la prise en compte de ces températures implique de changer la base de donnée considérée par le modèle. Un tel changement prend du temps, il faut alors se demander si le temps nécessaire pour modifier le modèle est justifié par le gain de sensibilité et de précision du modèle.

a.Changer de température de base en fonction du stade

Pour l'ensemble de notre étude on a pris une température de base 8 trouvée dans la littérature (Guizbullin, 2000). Cependant, les auteurs s'accordent pour dire que la température de base varie en fonction du stade auquel la plante se trouve (Gate, 1995 ; Yang et al., 1994). Nous avons donc essayé d'appliquer la méthode de Yang (voir les équations en annexe VIII), par laquelle nous avons trouvé les températures de base de chaque étape ; elles sont recensées dans le Tableau 13:

Tableau 13: Etapes de développement et températures de base associées

Etape	Température de base trouvée selon la méthode de Yang 1993
Repiquage → Début Montaison	13°C
Début Montaison → Début Floraison	15°C
Début Floraison → Pleine Floraison	20°C
Pleine Floraison → Fin Floraison	20°C

Nous avons effectué un graphique similaire à IV.D.1 (Validation des données) afin de voir si ces sommes de températures pourraient améliorer le modèle. Mais d'après le graphique (Figure 23), cela empire le modèle. Les points étant très séparés de la bissectrice, il semblerait que les températures inférieures aux températures de bases trouvées (Tableau 13) permettent quand même une croissance de la plante. En effet, on estime avec les données de 2013 et 2015 qu'un hybride précoce atteint le stade début montaison en ayant cumulé 55°J en température de base 13 alors que l'on s'aperçoit avec les données de 2016 qu'il n'a besoin de cumuler que 21,5°J à cette même température de base.

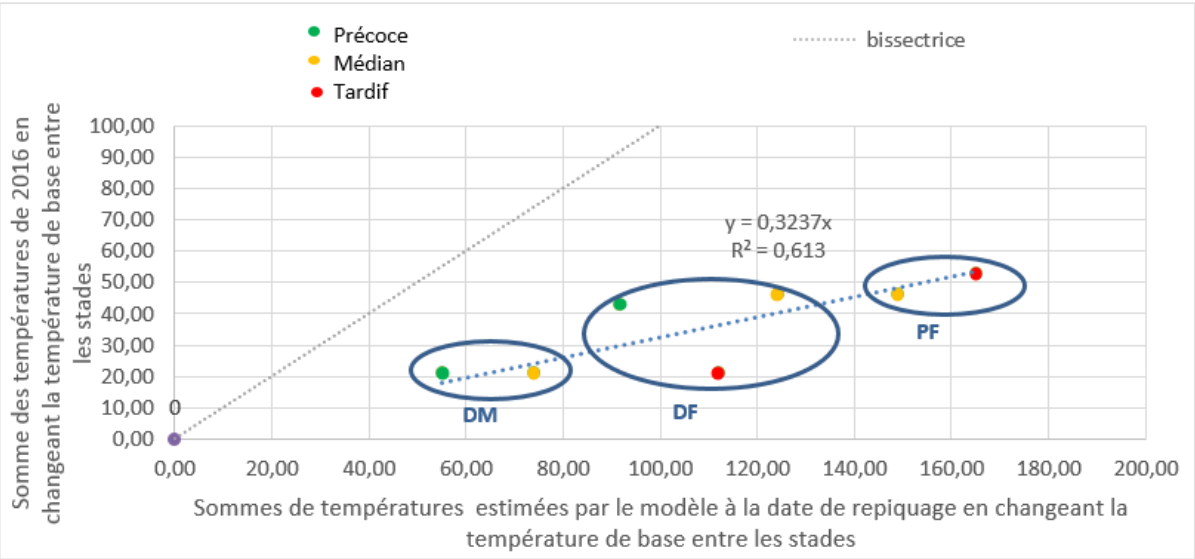

Figure 23 : Sommes de température de 2016 en fonction des sommes de températures estimées par le modèle en changeant la température de base entre chaque stade

La méthode de Yang ne semble donc pas applicable dans ce cas et il est plus intéressant de rester en température de base 8 pour avoir un modèle le plus précis possible.

C. Limites de l'etude

La limite principale de l'étude réside dans le peu de données disponibles pour établir le modèle. Actuellement on possède un jeu de données de 3 années (2013, 2015 et 2016) ; il sera donc intéressant d'incrémenter de nouvelles années dans la base de données pour améliorer la précision du modèle. Le modèle est donc amené à évoluer et donc à devenir de plus en plus robuste au fil des années.

Pour le moment le modèle fonctionne sur un historique des températures d'Agen (22 années), il pourrait être intéressant d'établir un historique des températures de Tonneins et de Beauville, afin de permettre à l'utilisateur de choisir à partir de quel lieu faire tourner le modèle. Ceci permettrait, de plus, d'améliorer la sensibilité du modèle. En effet, pour certains stades, il y a beaucoup de variabilités dans la détermination des sommes de températures entre plusieurs essais, cette variabilité n'est pas vraiment réduite par le passage à une température de base 8. Donc la solution serait d'adapter les températures utilisées au lieu géographique.

Le modèle a été validé sur des essais de 2016 mais jamais encore testé en parcelle de production dans des conditions pédo-climatiques différentes (en effet les données principales ayant permis d'établir le modèle proviennent d'un même endroit : Argentens). On pourrait tester la sensibilité du modèle en l'utilisant sur une parcelle de production ayant un sol différent de celui d'Argentens.

D. Conclusion

Nous avons pu montrer dans cette étude qu'il était possible d'établir un modèle correct de développement de la betterave porte-graine, qui permet, à peu de jours près (dépendant de la météo) de savoir quand une parcelle va atteindre un stade phénologique donné. Le modèle créé permet d'aller jusqu'au stade de maturité 6 (les glomérules débutent leur dessication, le péricarpe de la face antérieure commence à se désecher mais pas celui de la face postérieure). On peut, de plus, suivre en production la plupart des hybrides de Syngenta grâce au classement de ces hybrides dans une des trois classes prise en compte par le modèle.

BIBLIOGRAPHIE

ALCARAZ, 1981. Etude de certains aspects de l'hétérogénéité de la semence de betterave sucrière. S.l. : Paris VI.

ARNOLD, C.Y., 1959. The development and significance of the base temperature in a linear heat unit system. In : *Proceedings of the American Society for Horticultural Science*. 1959.

AUBERT, B. et LOSSOIS, P., 1972. Considérations sur la phenologie des espèces fruitières arbustives. In : *Fruits*. 1972. Vol. 27, n° 4, p. 269–286.

BERNAL, J. et GONZÁLEZ, D., 1993. Experimental assessment of a degree-day model for predicting the development of parasites in the field. In : *Journal of Applied Entomology*. 12 janvier 1993. Vol. 116, n° 1-5, p. 459-466. DOI 10.1111/j.1439-0418.1993.tb01222.x.

BRISSON, N., GARY, C., JUSTES, E., ROCHE, R., MARY, B., RIPOCHE, D., ZIMMER, D., SIERRA, J., BERTUZZI, P., BURGER, P. et OTHERS, 2003. An overview of the crop model STICS. In : *European Journal of agronomy*. 2003. Vol. 18, n° 3, p. 309–332.

CASALS, ML., 2002. Evolution of seed quality during the fruit development on sugar beet mother plant. Presented in: *workshop ISTA* .

CONFALONIERI, R., BREGAGLIO, S. et ACUTIS, M., 2010. A proposal of an indicator for quantifying model robustness based on the relationship between variability of errors and of explored conditions. In : *Ecological Modelling*. mars 2010. Vol. 221, n° 6, p. 960-964. DOI 10.1016/j.ecolmodel.2009.12.003.

DERIEUX, M., BONHOMME, R., 1982. Heat unit requirements for maize hybrids in Europe. Results of the european FAO sub network. II. Period from silking to maturity. *Maydica, 27*, 79-96. http://prodinra.inra.fr/record/1608

DIDIER, A., 2013. Modélisation de la croissance, des relations sources-puits et du rendement en sucre de la betterave sucriere (Beta vulgaris L.) sous des régimes contrastés de nutrition azotée [en ligne]. S.l. : AgroParisTech. [Consulté le 21 juillet 2016]. Disponible à l'adresse : https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00949047/.

GATE, P., 1995. *Ecophysiologie du blé*. Paris; New York; Paris : Tec & Doc-Lavoisier ; ITCF. ISBN 978-2-7430-0046-2.

GILMORE, E. C. et ROGERS, J. S., 1958. Heat Units as a Method of Measuring Maturity in Corn1. In : *Agronomy Journal*. 1958. Vol. 50, n° 10, p. 611.
DOI 10.2134/agronj1958.00021962005000100014x.

GUILLAUME, S., 2011. Adaptation d'un modèle de culture et conception d'un modèle de décision pour la gestion conjointe de l'irrigation et de la fertilisation azotée du blé dur. In : [en ligne]. 2011. [Consulté le 7 décembre 2015]. Disponible à l'adresse : http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00001550/.

Guizbullin, N. G., 2001: A seedling transplanting method for sugar beet seed production in Ukraine. In : *Seed Science and Technology* 29(2): 463-469

KATZ, Y.H., 1946. The relationship between heat unit accumulation and the planting and harvesting of canning peas. In : *Agronomy Journal*. 44 : 74-78

LEPAGE, MP., BOURGEOIS, G. et BÉLANGER, G., 2012. *Indices agrométéorologiques pour l'aide à la décision* [en ligne]. S.l. : Rapport, Québec, CRAAQ. [Consulté le 21 juillet 2016]. Disponible à l'adresse : http://www.agrometeo.org/atlas/display_guide/PAGR0103.pdf.

LEVIEL, P., 2000. Evaluation des risques et maîtrise des flux d'azote au niveau d'une parcelle agricole dans la plaine roumaine et bulgare. Application aux cultures de maïs, blé, colza et betterave. S.l. : INP Toulouse.

LHERMITTE, S. et BERLIZOT, T, 2015. 15016 : *Quelle ambition pour la filière betterave-sucre française dans la perspective de la fin des quotas européens?* [en ligne]. S.l. Conseil Général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces verts. [Consulté le 21 juillet 2016]. Disponible à l'adresse : http://www.aker-betterave.fr/images/rapport-15016.pdf.

MARION, W. et URBAN, K., 1995. User's Manual for TMY2s. S.l. : s.n.

NAUD, C., MAKOWSKI, D. et JEUFFROY, MH., 2008. Is it useful to combine measurements taken during the growing season with a dynamic model to predict the nitrogen status of winter wheat? In : *European Journal of Agronomy*. avril 2008. Vol. 28, n° 3, p. 291-300. DOI 10.1016/j.eja.2007.08.005.

OCDE/FAO, 2008. Perspectives agricoles de l'OCDE et de la FAO 2008-2017. 2008. S.l. : s.n.

PIDGEON, J., WERKER, A., JAGGARD, K., RICHTER, G. et JONES, P, 2001. Climatic impact on the productivity of Sugar Beet in Europe. In : *Agricultural and Forest Meteorology*. 2001. Vol. 109, n° 27-37.

QI, A., KENTER, C., HOFFMANN, C. et JAGGARD, K., 2005. The Broom's Barn sugar beet growth model and it's adaptation to soils with varied available water content. In : *Journal of Agronomy*. 2005. Vol. 23, n° 108-122.

RICHARD, J.C., 1993. Etude de la production de semences de betteraves sucrières : influence de la qualité du pollen sur le pourcentage de graines vides. S.l. Institut supérieur agricole de Beauvais.

RICHTER, G., JAGGARD, K. et MITCHELL, R., 2001. Modelling radiation interception and radiation use efficiency for Sugar Beet under variable climatic stress. In : *Agriculture and Forest Meteorology*. 2001. n° 109, p. 13-25.

RITCHIE, J. T. et NESMITH, D. S., 1991. Temperature and Crop Development. In : *Agronomy Monograph* [en ligne]. S.l. : American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. [Consulté le 9 septembre 2016]. ISBN 978-0-89118-223-8. Disponible à l'adresse : https://dl.sciencesocieties.org/publications/books/abstracts/agronomymonogra/modelingplantan/5.

ROCQUIGNY et LEJOSNE, 1988. Betterave sucrière porte-graine : expérimentation et progrès technique - contribution à la détermination du stade optimal de récolte. S.l. ISA.

ROSSITER, D. G., 2003. Biophysical models in land evaluation. In : *W. Verheye (Ed.)* [en ligne]. 2003. Vol. 1. [Consulté le 9 janvier 2016]. Disponible à l'adresse : http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.142.1416&rep=rep1&type=pdf.

SNYDER, R. L., SPANO, Donatella, CESARACCIO, Carla et DUCE, Pierpaolo, 1999. Determining degree-day thresholds from field observations. In : *International Journal of Biometeorology*. 1999. Vol. 42, n° 4, p. 177–182.

SOLTNER, D., 2004. *Les grandes productions végétales phytotechnie spéciale: céréales, plantes sarclées, prairies*. Sainte-Gemme-sur-Loire : Collection sciences et techniques agricoles. ISBN 978-2-907710-02-2.

SPITTERS, C., VAN KEULEN, H. et VAN KRAALINGEN, D., 1989. A simple and universal crop growth simulator : SUCROS87. In : RABBINGE, R. et WARD, S. A. (éd.), 1989. *Simulation and systems management in crop protection*. Wageningen : Pudoc. Simulation Monographs, 32. ISBN 978-90-220-0899-7.

TEMANI, N., 2012. Evaluation de la capacité d'indicateurs et de modèles de cultures à quantifier différentes variables du système sol-plante à l'échelle d'un territoire.pdf. Institut Agronomique Méditerrannéen de Montpellier : s.n.

VANDENDRIESSCHE, H, 2000. A model of growth and sugar accumulation of sugar beet for potential production conditions : SUBEMOpo. I. Theory and model structure. In : *Agricultural Systems*. 2000. n° 64, p. 1-19.

WILLMOTT, C. J., ACKLESON, S., G., DAVIS, R. E., FEDDEMA, J.J., KLINK, Katherine M., LEGATES, D. R., O'DONNELL, J.et ROWE, C.M., 1985. Statistics for the evaluation and comparison of models. In : *Journal of Geophysical Research*. 1985. Vol. 90, n° C5, p. 8995. DOI 10.1029/JC090iC05p08995.

YAN, H.P., KANG, M., DE REFFYE, P. et DINGKUHN, M., 2004. A dynamic architectural plant model simulating ressource-dependant growth. In : *Annals of Botany*. 2004. n° 93, p. 1-12.

YANG, S., LOGAN, J. et COFFEY, D. L., 1995. Mathematical formulae for calculating the base temperature for growing degree days. In : *Agricultural and Forest Meteorology*. avril 1995. Vol. 74, n° 1-2, p. 61-74. DOI 10.1016/0168-1923(94)02185-M.

SITOGRAPHIE

[1] http://www.aker-betterave.fr/fr/presentation/les-enjeux-de-la-filiere-betterave-au-niveau-international

[2] http://www.gnis.fr/index/action/page/id/151/title/La-vallee-de-la-Garonne-berceau-de-la-production-de-semences-de-betteraves

[3] http://www.ufs-semenciers.org/lufsenaction/lessectionsparespeces/betchic/Lists/pages/betteravessucre.aspx

[4] http://www.carre-tillens.be/?q=tillens/roosendael/potager_urbain/divers/907

TABLE DES ANNEXES

TABLE DES ANNEXES 1
ANNEXE I : Photos des stades phénologiques 2
ANNEXE I : Photos des stades phénologiques (suite) 3
ANNEXE II : Méthode de classement des hybrides..... 4
ANNEXE II : Méthode de classement des hybrides (suite)..... 5
ANNEXE III : Tableau des sommes cumulées nécessaires pour atteindre un stade 6
ANNEXE IV : Aperçu de l'interface de l'outil..... 7
ANNEXE IV : Aperçu de l'interface de l'outil (suite)..... 8
ANNEXE V : Code 9
ANNEXE V : Code (suite) 10
ANNEXE V : Code (suite) 11
ANNEXE V : Code (suite) 12
ANNEXE V : Code (suite) 13
ANNEXE V : Code (suite) 14
ANNEXE V : Code (suite) 15
ANNEXE VI : notation de développement sur plusieurs *plots* au 24/05/16 afin de vérifier l'homogénéité des rangs et des plots 16
ANNEXE VII : Graphes de validation de la taille d'échantillon pour tous les *plots* 17
ANNEXE VII : Graphes de validation de la taille d'échantillon pour tous les *plots (suite)*.....18
ANNEXE VIII : Formules de Yang 19

ANNEXE I : Photos des stades phénologiques

Stade Rosette :

Figure 1 : plant de betterave au stade rosette

Figure 2 : plant de betterave au stade rosette

Stade Apex Visible :

Figure 4 : plant de betterave au stade apex visible

Figure 3 : plant de betterave au stade apex visible

ANNEXE I : Photos des stades phénologiques (suite)

Début Montaison :

Figure 5 : plant de betterave au stade début montaison

Apex étiré :

Figure 6 : plant de betterave au stade apex étiré

Début Floraison :

Figure 7 : plant de betterave au stade début floraison

ANNEXE II : Méthode de classement des hybrides

On considère que notre hybride de base est le 24*96 (médian), et on va trier tous les hybrides en fonctions de celui-là.

Pour expliquer la démarche de classement, considérons un hybride quelconque que l'on nommera H1. Dans un premier temps, il est nécessaire de trouver le nombre de degrés jours nécessaire à cet hybride pour atteindre chacun des trois stades de sa croissance : Début Montaison, Début Floraison et Fin Floraison. Pour ce faire il est utilisé la méthode détaillée en III.A.2.

Une fois que ces données sont disponibles, l'hybride étudié H1 est comparé à l'hybride de référence 24*96 pour chaque stade. De plus ces données étant soumises au lieu de culture, elles seront comparées pour les sites d'Argenteins et de Tonneins. Le résultat de cette comparaison fourni un pourcentage d'écart entre H1 et le 24*96 pour chaque lieu. Cet écart est ensuite moyenné pour les trois stades et fourni une valeur globale, propre à chaque site de culture qui permet alors de classer l'hybride selon la règle suivante :

- si les deux moyennes sont inférieures à 95% : on considérera que l'hybride est précoce
- si les deux moyennes sont comprises entre 95 et 105% : on considérera que l'hybride est médian
- si les deux moyennes sont supérieures à 105% : on considérera que l'hybride est tardif

Lorsque les deux moyennes ne sont pas comprises dans la même tranche de variation, on applique les règles suivantes :

- stade à stade on regarde le nombre de cas pour lequel l'hybride est dans chaque tranche de variation, celui dans laquelle il est le plus souvent détermine sa catégorie (s'il manque une donnée, cette règle est tout de même utilisée)
- si le nombre de cas est égal pour deux catégories différentes, on effectue la moyenne sur les 6 données et on classe dans la catégorie correspondante à la moyenne
- si la moyenne est égale à 105, on considère l'hybride comme étant tardif

Tableau 1 : les deux moyennes sont inférieures à 95%, l'hybride est précoce

		Pourcentage de variation par rapport au 24*96					
Localisation	MS	DM	DF	FF	Moyenne	Moyenne	Classement
Argentens	MS 1	94	92	96	94	93,5	Précoce
Tonneins	MS 1	91	94	94	93		

ANNEXE II : Méthode de classement des hybrides (suite)

Tableau 2 : les deux moyennes ne sont pas comprises dans la même tranche de variation, l'hybride est 4 fois classé en tardif et 2 en médian, il est donc tardif

		Pourcentage de variation par rapport au 24*96					
Localisation	MS	DM	DF	FF	Moyenne	Moyenne	Classement
Argentens	MS 1	104	105	106	105,0	104,3	Tardif
Tonneins	MS 1	105	101	105	103,7		

Tableau 3 : les deux moyennes ne sont pas comprises dans la même tranche de variation, l'hybride est classé 3 fois en médian et 3 fois en tardif, on regarde la moyenne générale, il est donc médian

		Pourcentage de variation par rapport au 24*96					
Localisation	MS	DM	DF	FF	Moyenne	Moyenne	Classement
Argentens	MS 1	104	105	107	105,3	104,2	Médian
Tonneins	MS 1	105	101	103	103,0		

Tableau 4 : les deux moyennes ne sont pas comprises dans la même tranche de variation, l'hybride est classé 3 fois en médian et 3 fois en tardif, on regarde la moyenne générale, elle est égale à 105, il est donc tardif

		Pourcentage de variation par rapport au 24*96					
Localisation	MS	DM	DF	FF	Moyenne	Moyenne	Classement
Argentens	MS 1	103	106	106	105	105	Tardif
Tonneins	MS 1	104	104	107	105		

ANNEXE III : Tableau des sommes cumulées nécessaires pour atteindre un stade

Tableau 5 : Sommes de températures en base 8 pour atteindre chaque stade en fonction des années et des lieux de notation

Lieu	Année	MS	Début Montaison	Début Floraison	Pleine Floraison	Fin Floraison	Maturité 4	Maturité 6
Argentens	2013	62*99	184	410		620		
Argentens	2015	62*99	185	460	500	602	930	1038
Gadiot	2015	62*99	270	445	472		888	1035
Argentens	2013	24*96	217	430				
Argentens	2015	24*96	270	545	598	670	960	1095
Gadiot	2015	24*96	268	496		640	1042	1057
Argentens	2013	42*111	290	482		620		
Argentens	2015	42*111	325	570	596	700	1058	1125
Gadiot	2015	42*111	327	515	560	648	1065	1130

ANNEXE IV : Aperçu de l’interface de l’outil

	Date	Somme des Températu
date de repiquage	22/03/2016	
date voulue	03/07/2016	788,9

Calcul de la somme de Température en base 8

la date voulue correspond à la dernière dates pour laquelle les températures sont disponibles sous géotroll

si les températures de saison sont "normales"

	Précoce	Médian	Tardif
	62*99	24*96	42*111
	Réel 2016 _ estimé au	Réel 2016 _ estimé au	Réel 2016 _ estimé au
Phénologie du glomérule	03/07/2016	03/07/2016	03/07/2016
Début Montaison	**22-mai**	**7-mai**	**11-mai**
Début Floraison	**29-mai**	**01-juin**	**02-juin**
Pic Floraison	**30-mai**	**08-juin**	**07-juin**
Fin Floraison	**08-juin**	*15-juin*	**13-juin**
M4	*04-juil*	*12-juil*	*16-juil*
M6	*15-juil*	*17-juil*	*21-juil*

si la saison devient très froide

	Précoce	Médian	Tardif
	62*99	24*96	42*111
	Réel 2016 _ estimé au	Réel 2016 _ estimé au	Réel 2016 _ estimé au
Phénologie du glomérule	03/07/2016	03/07/2016	03/07/2016
Début Montaison	**28-avr.**	**7-mai**	**11-mai**
Début Floraison	**29-mai**	**1-juin**	**2-juin**
Pic Floraison	**30-mai**	**8-juin**	**7-juin**
Fin Floraison	**8-juin**	*15-juin*	**13-juin**
M4	*4-juil.*	*12-juil.*	*17-juil.*
M6	*15-juil.*	*18-juil.*	*23-juil.*

si la saison devient très chaude

	Précoce	Médian	Tardif
	62*99	24*96	42*111
	Réel 2016 _ estimé au	Réel 2016 _ estimé au	Réel 2016 _ estimé au
Phénologie du glomérule	03/07/2016	03/07/2016	03/07/2016
Début Montaison	**28-avr.**	**7-mai**	**11-mai**
Début Floraison	**29-mai**	**1-juin**	**2-juin**
Pic Floraison	**30-mai**	**8-juin**	**7-juin**
Fin Floraison	**8-juin**	*14-juin*	**13-juin**
M4	*30-juin*	*7-juil.*	*11-juil.*
M6	*9-juil.*	*12-juil.*	*14-juil.*

Recalculer

gras	les dates sont les dates effective pour l'atteinte des stades pour l'année en cours
gras-italique	les dates calculées le sont à partir des données météorologiques de cette année (peut arriver quand les notations n'ont pas été faites ou rentrées dans la BDD depuis un certain temps)
italiques	les dates calculées sont prévisionnelles et calculées à partir des température que l'on a eu cette année puis des températures probable pour la suite de la saison

Définition des stades de développement

Début Montaison	50% des plantes présentent un apex visible
Début Floraison	50% des plantes avec fleurs sur 1/3 inférieur
Pleine Floraison	50% des plantes avec fleurs sur 1/3 médian
Fin Floraison	50% des plantes avec fleurs sur 1/3 supérieur
Maturité 4	50% des plantes avec glomérules du tiers médian brun vert / bractées vertes
Maturité 8	50% des plantes avec glomérules du tiers médian brun / bractées jaunes

Figure 8 : aperçu de l'interface de l'outil permettant de prévoir les stades de maturité en fonction de la température (feuille « modèle »)

ANNEXE IV : Aperçu de l’interface de l’outil (suite)

Tableau 1

Précoce	Médian	Tardif
C0420000HSUHB00(	C024A000G0960000	AHED2000EMU90000
C0960000G1140000	C024A000G0980000	AZYE0000EMTF1000
C1160000G1320000	C0560000G1140000	AZYE0000EMTR0000
C1800000GPDE2000	C091T000G1130000	C024A000G0420000
C0620100G0990000	C091T000G1200000	C0420000G1110000
C0990000G1700000	C0980000G1160000	C091T000G090A000
	C1160000EX3E0000	C0960000G1110000
	CPA92000GPAH1100	DJGY4100G1020000
	C024A000EX4X2500	C1230000H73CA000
	C024A000EX4X2000	C0420000H73HA000
	C0420000H73CA000	C0560000G1040000
	C1240000G1220000	C1190000G1210000
	C024A000G1020000	C024A000EHBQ0000
	C0420000H73SB000	C1020000H73HA000
	C1160000EGYY1600	

Tableau 2

Température cumulée estimée pour atteindre le	Précoce	Médian	Tardif
Début Montaison	213	252	314
Début Floraison	438	490	522
Pleine Floraison	486	560	578
Fin Floraison	611	655	656
M4	909	1001	1062
M6	1037	1076	1128

les moyennes sont faites sur 2 résultats
(si on veut incrémenter, le faire en pondérant)
les moyennes sont faites sur 3 résultats

Tableau 3

Stade atteint en 2016	Précoce	Médian	Tardif
Début Montaison	194	252	287
Début Floraison	477,5	501,5	512,5
PleineFloraison	486	573	568,5
Fin Floraison	572	643	637
M4			
M6			

Tableau 4

Date	plus froide 2008	plus chaude 2003	Médiane 1995	Médiane de 1993 à 2015	Année actuelle 2016	plus froide tb8 2008	plus chaude tb8 2003	Médiane tb8 1995	Médiane tb8 de 1993 à 2015	actuelle tb8 2016
1/3	12,5	10,9	6,1	7,3	9,60	4,5	2,9	0	0	1,6
2/3	11,3	10,4	8,3	8,3	7,40	3,3	2,4	0,3	0,3	0
3/3	10,5	9,9	6,6	8,3	5,90	2,5	1,9	0	0,3	0
4/3	5,8	12,3	4,6	8,3	7,00	0	4,3	0	0,3	0
5/3	4,6	11,5	6,9	6,9	10,70	0	3,5	0	0	2,7
6/3	4,9	9,7	6,6	6,6	11,10	0	1,7	0	0	3,1
7/3	7,6	7,7	6,3	7,7	10,90	0	0	0	0	2,9
8/3	8,1	8,9	6,1	9,5	9,40	0,1	0,9	0	1,5	1,4
9/3	6,6	8,7	7,8	8,9	9,60	0	0,7	0	0,9	1,6
10/3	7,3	10,5	10	9,4	9,00	0	2,5	2	1,4	1
11/3	11,3	11,9	11,7	10,3	9,90	3,3	3,9	3,7	2,3	1,9
12/3	12,4	12,4	11,1	10,4	15,10	4,4	4,4	3,1	2,4	7,1
13/3	11,8	11,5	10,3	10,2	10,90	3,8	3,5	2,3	2,2	2,9
14/3	12,2	10,5	8,4	10,5	13,40	4,2	2,5	0,4	2,5	5,4
15/3	12,2	9,7	8,3	10,5	12,90	4,2	1,7	0,3	2,5	4,9
16/3	11	8,9	8	10,8	15,40	3	0,9	0	2,8	7,4
17/3	10,8	9,1	10,1	10,8	10,40	2,8	1,1	2,1	2,8	2,4
18/3	9	9,3	12	10,8	8,70	1	1,3	4	2,8	0,7
19/3	5,6	10,5	11,2	11,3	11,20	0	2,5	3,2	3,3	3,2
20/3	5,8	9,9	7,4	10,2	14,40	0	1,9	0	2,2	6,4
21/3	7,8	9,6	6,3	10,2	12,90	0	1,6	0	2,2	4,9
22/3	6,2	12,4	7,9	10,2	11,90	0	4,4	0	2,2	3,9
23/3	4,8	13	9,6	11,4	11,20	0	5	1,6	3,4	3,2
24/3	6,7	12,8	12	11,4	9,70	0	4,8	4	3,4	1,7
25/3	10,1	12,7	10,4	10,9	8,20	2,1	4,7	2,4	2,9	0,2
26/3	8,7	12,9	10,7	10,5	8,90	0,7	4,9	2,7	2,5	0,9
27/3	6,8	13,7	9,3	10,8	14,30	0	5,7	1,3	2,8	6,3
28/3	9,8	13,9	6,4	11	14,00	1,8	5,9	0	3	6
29/3	10,6	13,7	9,8	11,9	13,60	2,6	5,7	1,8	3,9	5,6
30/3	9,5	13,5	5,7	11,8	13,20	1,5	5,5	0	3,8	5,2
31/3	9,3	13,3	6,4	11	14,80	1,3	5,3	0	3	6,8
1/4	11,2	14	10	11,9	16,40	3,2	6	2	3,9	8,4
2/4	13,3	11,1	13,1	12,8	15,40	5,3	3,1	5,1	4,8	7,4
3/4	11,5	7,9	14,9	11,5	12,30	3,5	0	6,9	3,5	4,3
4/4	10,4	8,1	13,1	10,8	11,1	2,4	0,1	5,1	2,8	3,1
5/4	10,5	9,9	12,4	10,8	13,7	2,5	1,9	4,4	2,8	5,7
6/4	9,1	10,8	13	12,5	16,5	1,1	2,8	5	4,5	8,5
7/4	6,7	8,4	13,1	11	13,3	0	0,4	5,1	3	5,3
8/4	11,7	9,4	14,1	11,7	12,6	3,7	1,4	6,1	3,7	4,6
9/4	15,1	8,4	11,3	12	12,5	7,1	0,4	3,3	4	4,5
10/4	13	8,4	12,4	12,2	10,2	5	0,4	4,4	4,2	2,2
11/4	10,2	8,2	13,8	11,3	10,4	2,2	0,2	5,8	3,3	2,4

Figure 9 : aperçu de l'interface dans laquelle la macro vient chercher les infos pour compléter l'interface de la figure 8 (feuille « InfosPourCalcul »)

ANNEXE V : Code

```
Sub SommeDegreJours()
' cette application calcule la somme de degré jours depuis la date de repiquage (en B2) jusqu'à la date voulue (en B3)

DateRepiquage = Sheets("Modèle").Cells(2, 2)
DateVoulue = Sheets("Modèle").Cells(3, 2)

Dim i As Integer 'i est le numéro de ligne à laquelle on a la date de repiquage dans la BDD de température dans la feuille "InfosPourCalcul"
Dim j As Integer 'j est le numéro de ligne à laquelle on a la date voulue dans la BDD de température dans la feuille "InfosPourCalcul"

i = Sheets("InfosPourCalcul").Columns("O").Find(DateRepiquage, lookat:=xlWhole).Row ' trouve i
j = Sheets("InfosPourCalcul").Columns("O").Find(DateVoulue, lookat:=xlWhole).Row 'trouve j


Sheets("Modèle").Cells(3, 3) = Application.Sum(Sheets("InfosPourCalcul").Range("Y" & CStr(i) & ":Y" & CStr(j))) 'fait la somme depuis la température (en base 8) à la date de repiquage
                                                                                                                 'jusqu'à la température (en base 8) à la date voulue
```

Figure 10 : code VBA permettant de remplir la case C3 de l'outil, c'est à dire le nombre de degrés-jours s'étant écoulés depuis la date de repiquage jusqu'à une certaine date choisie

ANNEXE V : Code (suite)

```
Sub Remplissage()
' cette application a pour but de trouver les dates prévues d'atteinte des stades de développement en fonction des température de l'année en cours et des températures estimées pour la suite de la saison


Dim i As Integer 'i est le numéro de ligne de la date d'apparition du stade
Dim j As Double 'j est la somme des degrés jours à partir de la date
Dim h As Integer 'h numéro de colonne de la feuille modèle, représente les précoce, median et tardif
Dim k As Integer 'k numéro de la ligne à remplir dans la feuille "modèle"
Dim flag As Integer 'flag qui sert à déterminer de quelle manière on a trouvé la date cherchée
DateRepiquage = Sheets("Modèle").Cells(2, 2)
DateVoulue = Sheets("Modèle").Cells(3, 2)


'1 --------------------remplissage pour des températures médianes

' on boucle sur l'ensemble du tableau A de la feuille modèle, de C7 à E17
For h = 3 To 5 'h numéro de colonne, représente les précoce, median et tardif
For k = 12 To 17 'k numéro de la ligne à remplir dans la feuille "modèle"

Cells(k, h).Font.Bold = False
Cells(k, h).Font.Italic = False


If (Sheets("InfosPourCalcul").Cells(k + 11, h + 4) <> 0) Then 'on cherche si le tableau 3 de la feuille InfosPourCalcul nous donne les températures pour atteindre un stade, si oui


i = Sheets("InfosPourCalcul").Columns("O").Find(DateRepiquage, lookat:=xlWhole).Row ' on commence à la ligne de la date de début de repiquage dans le tableau 4 de la feuille InfosPourCalcul
j = Sheets("InfosPourCalcul").Range("Y" & CStr(i)).Value 'récupération de la température à la date de repiquage

    Do While (j < Sheets("InfosPourCalcul").Cells(k + 11, h + 4))  'tant qu' on a les données pour l'année 2016 de la Somme de température pour atteindre le stade on prend
                                                                   '(on reste donc sur la colonne Y jusqu'à ce qu'on dépasse la DateVoulue, dernière date pour laquelle on a les infos de température)

     i = i + 1 'on passe à la ligne d'après

    If (Sheets("InfosPourCalcul").Cells(i, 15) <= DateVoulue) Then 'si la date de cette ligne est inférieure à la DateVoulue alors on peut rester colonne Y
    j = j + Sheets("InfosPourCalcul").Range("Y" & CStr(i)).Value 'on aditionne à la température précedente, la température de cette ligne là
    flag = 1 'on met un drapeau pour savoir à quel moment a été trouvé la date du stade

    ElseIf (Sheets("InfosPourCalcul").Cells(i, 15) > DateVoulue) Then 'si la date de cette ligne est supérieur à la date voulue, on n'a plus les données températures de
                                                                      'l'année en cours alors on passe colonne X pour avoir les données température d'une année Médiane
    j = j + Sheets("InfosPourCalcul").Sheets("InfosPourCalcul").Range("X" & CStr(i)).Value 'on aditionne à la température précedente, la température de cette ligne là
                                                                                            '(mais colonne X, puisqu'on n'a plus de température dispo dans la colonne Y)
    flag = 2 'on met un drapeau pour savoir à quel moment a été trouvé la date du stade
    End If

    Loop

Sheets("Modèle").Cells(k, h) = Sheets("InfosPourCalcul").Range("O" & CStr(i)) ' la cellule (k,h) de la feuille modèle se remplit et est égale à la date à laquelle le while s'est arrêté
                                                                               '(quand j a dépassé la valeur d'atteinte du stade)
```

Figure 11 : code principal de l'outil (partie 1)

ANNEXE V : Code (suite)

```
Else ' sinon on va chercher ce qu'on avait les autres années (tableau 2) pour estimer la date

i = Sheets("InfosPourCalcul").Columns("O").Find(DateRepiquage, lookat:=xlWhole).Row ' on commence à la ligne de la date de début de repiquage
j = Sheets("InfosPourCalcul").Cells(i, 25).Value 'on début j avec la température de la date de repiquage

    Do While (j < Sheets("InfosPourCalcul").Cells(k - 9, h + 4)) 'And (Sheets("InfosPourCalcul").Cells(i, 15) <= DateVoulue)

    i = i + 1

    If (Sheets("InfosPourCalcul").Cells(i, 15)) <= DateVoulue Then
    j = j + Sheets("InfosPourCalcul").Range("Y" & CStr(i)).Value
    flag = 3

    ElseIf (Sheets("InfosPourCalcul").Cells(i, 15) > DateVoulue) Then
    j = j + Sheets("InfosPourCalcul").Range("X" & CStr(i)).Value
    flag = 4

    End If


    Loop



Sheets("Modèle").Cells(k, h) = Sheets("InfosPourCalcul").Range("O" & CStr(i))

End If
If flag = 1 Then ' on a trouvé à partir du tableau 3 et de la colonne Y (le stade a deja été atteint, c est la date réelle)
Sheets("Modèle").Cells(k, h).Font.Bold = True 'on met en gras
ElseIf flag = 2 Then 'on a trouvé à partir du tableau 3 et de la colonne Y
Sheets("Modèle").Cells(k, h).Font.Italic = True 'on met en gras italique
ElseIf flag = 3 Then ' on a trouvé à partir du tableau 2, de la colonne Y
Sheets("Modèle").Cells(k, h).Font.Bold = True
Sheets("Modèle").Cells(k, h).Font.Italic = True ' on a trouvé à partir du tableau 2, de la colonne Y et X
ElseIf flag = 4 Then
Sheets("Modèle").Cells(k, h).Font.Italic = True
End If
Next


Next
```

Figure 12 : code principal de l'outil (partie 2)

ANNEXE V : Code (suite)

```
'remplissage pour des températures froides

For h = 10 To 12 'h numéro de colonne, représente les précoce, median et tardif
For k = 12 To 17 'k numéro de la ligne à remplir dans la feuille "modèle"

Cells(k, h).Font.Bold = False 'enlève le format gras de la cellule
Cells(k, h).Font.Italic = False 'enlève le format italique de la cellule --> clear la cellule sans enlever le format "date"

If (Sheets("InfosPourCalcul").Cells(k + 11, h - 3) <> 0) Then


i = Sheets("InfosPourCalcul").Columns("O").Find(DateRepiquage, lookat:=xlWhole).Row ' on commence à la ligne de la date de début de repiquage
j = Sheets("InfosPourCalcul").Range("Y" & CStr(i)).Value 'récupération de la température à la date de repiquage

    Do While (j < Sheets("InfosPourCalcul").Cells(k + 11, h - 3)) 'And (Sheets("InfosPourCalcul").Cells(i, 15) <= DateVoulue) 'si on a les données pour l'année 2016 de la
                                                                  'Somme de température pour atteindre le stade on prend

     i = i + 1

    If (Sheets("InfosPourCalcul").Cells(i, 15) <= DateVoulue) Then
    j = j + Sheets("InfosPourCalcul").Range("Y" & CStr(i)).Value
    flag = 1

    ElseIf (Sheets("InfosPourCalcul").Cells(i, 15) > DateVoulue) Then
    j = j + Sheets("InfosPourCalcul").Sheets("InfosPourCalcul").Range("U" & CStr(i)).Value
    flag = 2
    End If

    Loop

Sheets("Modèle").Cells(k, h) = Sheets("InfosPourCalcul").Range("O" & CStr(i))
```

Figure 13 : code principal de l'outil (partie 3)

ANNEXE V : Code (suite)

```
Else ' sinon on va chercher ce qu'on avait les autres années pour estimer la date

i = Sheets("InfosPourCalcul").Columns("O").Find(DateRepiquage, lookat:=xlWhole).Row ' on commence à la ligne de la date de début de repiquage
j = Sheets("InfosPourCalcul").Cells(i, 25).Value 'on début j avec la température de la date de repiquage

    Do While (j < Sheets("InfosPourCalcul").Cells(k - 9, h - 3))

    i = i + 1

    If (Sheets("InfosPourCalcul").Cells(i, 15)) <= DateVoulue Then
    j = j + Sheets("InfosPourCalcul").Range("Y" & CStr(i)).Value
    flag = 3

    ElseIf (Sheets("InfosPourCalcul").Cells(i, 15) > DateVoulue) Then
    j = j + Sheets("InfosPourCalcul").Range("U" & CStr(i)).Value
    flag = 4

    End If


    Loop



Sheets("Modèle").Cells(k, h) = Sheets("InfosPourCalcul").Range("O" & CStr(i))

End If
If flag = 1 Then
Sheets("Modèle").Cells(k, h).Font.Bold = True
ElseIf flag = 2 Then
Sheets("Modèle").Cells(k, h).Font.Italic = True
ElseIf flag = 3 Then
Sheets("Modèle").Cells(k, h).Font.Bold = True
Sheets("Modèle").Cells(k, h).Font.Italic = True
ElseIf flag = 4 Then
Sheets("Modèle").Cells(k, h).Font.Italic = True
End If
Next


Next
```

Figure 14 : code principal de l'outil (partie 4)

ANNEXE V : Code (suite)

```
'remplissage pour des températures chaudes

For h = 17 To 19 'h numéro de colonne, représente les précoce, median et tardif
For k = 12 To 17 'k numéro de la ligne à remplir dans la feuille "modèle"

Cells(k, h).Font.Bold = False
Cells(k, h).Font.Italic = False

If (Sheets("InfosPourCalcul").Cells(k + 11, h - 10) <> 0) Then


i = Sheets("InfosPourCalcul").Columns("O").Find(DateRepiquage, lookat:=xlWhole).Row ' on commence à la ligne de la date de début de repiquage
j = Sheets("InfosPourCalcul").Range("Y" & CStr(i)).Value 'récupération de la température à la date de repiquage

    Do While (j < Sheets("InfosPourCalcul").Cells(k + 11, h - 10)) 'si on a les données pour l'année 2016 de la Somme de température pour atteindre le stade on prend

     i = i + 1

    If (Sheets("InfosPourCalcul").Cells(i, 15) <= DateVoulue) Then
    j = j + Sheets("InfosPourCalcul").Range("Y" & CStr(i)).Value
    flag = 1

    ElseIf (Sheets("InfosPourCalcul").Cells(i, 15) > DateVoulue) Then
    j = j + Sheets("InfosPourCalcul").Sheets("InfosPourCalcul").Range("V" & CStr(i)).Value
    flag = 2
    End If


    Loop

Sheets("Modèle").Cells(k, h) = Sheets("InfosPourCalcul").Range("O" & CStr(i))
```

Figure 15 : code principal de l'outil (partie 5)

ANNEXE V : Code (suite)

```
Else ' sinon on va chercher ce qu'on avait les autres années pour estimer la date

i = Sheets("InfosPourCalcul").Columns("O").Find(DateRepiquage, lookat:=xlWhole).Row ' on commence à la ligne de la date de début de repiquage
j = Sheets("InfosPourCalcul").Cells(i, 25).Value 'on début j avec la température de la date de repiquage

    Do While (j < Sheets("InfosPourCalcul").Cells(k - 9, h - 10))

    i = i + 1

    If (Sheets("InfosPourCalcul").Cells(i, 15)) <= DateVoulue Then
    j = j + Sheets("InfosPourCalcul").Range("Y" & CStr(i)).Value
    flag = 3

    ElseIf (Sheets("InfosPourCalcul").Cells(i, 15) > DateVoulue) Then
    j = j + Sheets("InfosPourCalcul").Range("V" & CStr(i)).Value
    flag = 4

    End If


    Loop



Sheets("Modèle").Cells(k, h) = Sheets("InfosPourCalcul").Range("O" & CStr(i))

End If
If flag = 1 Then
Sheets("Modèle").Cells(k, h).Font.Bold = True
ElseIf flag = 2 Then
Sheets("Modèle").Cells(k, h).Font.Italic = True
ElseIf flag = 3 Then
Sheets("Modèle").Cells(k, h).Font.Bold = True
Sheets("Modèle").Cells(k, h).Font.Italic = True
ElseIf flag = 4 Then
Sheets("Modèle").Cells(k, h).Font.Italic = True
End If
Next


Next

End Sub
```

Figure 16 : code principal de l'outil (partie 6)

ANNEXE VI : notation de développement sur plusieurs *plots* au 24/05/16 afin de vérifier l'homogénéité des rangs et des plots

Tableau 6 :% de plantes à trois stades différents au 24/05/2016 sur tous les rangs de 5 plots

plot	Rang	% plantes apex visible	% plantes apex étiré	% plantes apex R2 étiré
1	1	5,7	40,0	54,3
1	2	0,0	46,9	53,1
1	3	0,0	48,4	51,6
1	4	6,1	51,5	42,4
2	1	16,1	35,5	48,4
2	2	3,6	53,6	42,9
2	3	6,5	22,6	71,0
2	4	6,1	36,4	57,6
3	1	11,8	52,9	35,3
3	2	12,5	56,3	31,3
3	3	17,2	48,3	34,5
3	4	24,2	27,3	48,5
4	1	27,6	31,0	41,4
4	2	9,4	40,6	50,0
4	3	6,9	20,7	72,4
4	4	8,6	34,3	57,1
5	1	17,2	31,0	51,7
5	2	6,7	46,7	46,7
5	3	5,6	41,7	52,8
5	4	0,0	29,0	71,0

ANOVA : apex visible

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Between Groups	442,9425	4	110,7356	2,502579	**0,086507**	3,055568
Within Groups	663,729	15	44,2486			
Total	1106,672	19				

ANOVA : apex étiré

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Between Groups	678,7353	4	169,6838	1,711164	**0,19982**	3,055568
Within Groups	1487,442	15	99,16279			
Total	2166,177	19				

ANOVA : apex RII étiré

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Between Groups	958,213	4	239,5532	2,287135	**0,108015**	3,055568
Within Groups	1571,091	15	104,7394			
Total	2529,304	19				

Figure 17: Résultats des ANOVA dont H0 : les plots sont équivalentsen terme de pourcentage de plante au stade donné

ANNEXE VII : Graphes de validation de la taille d'échantillon pour tous les *plots*

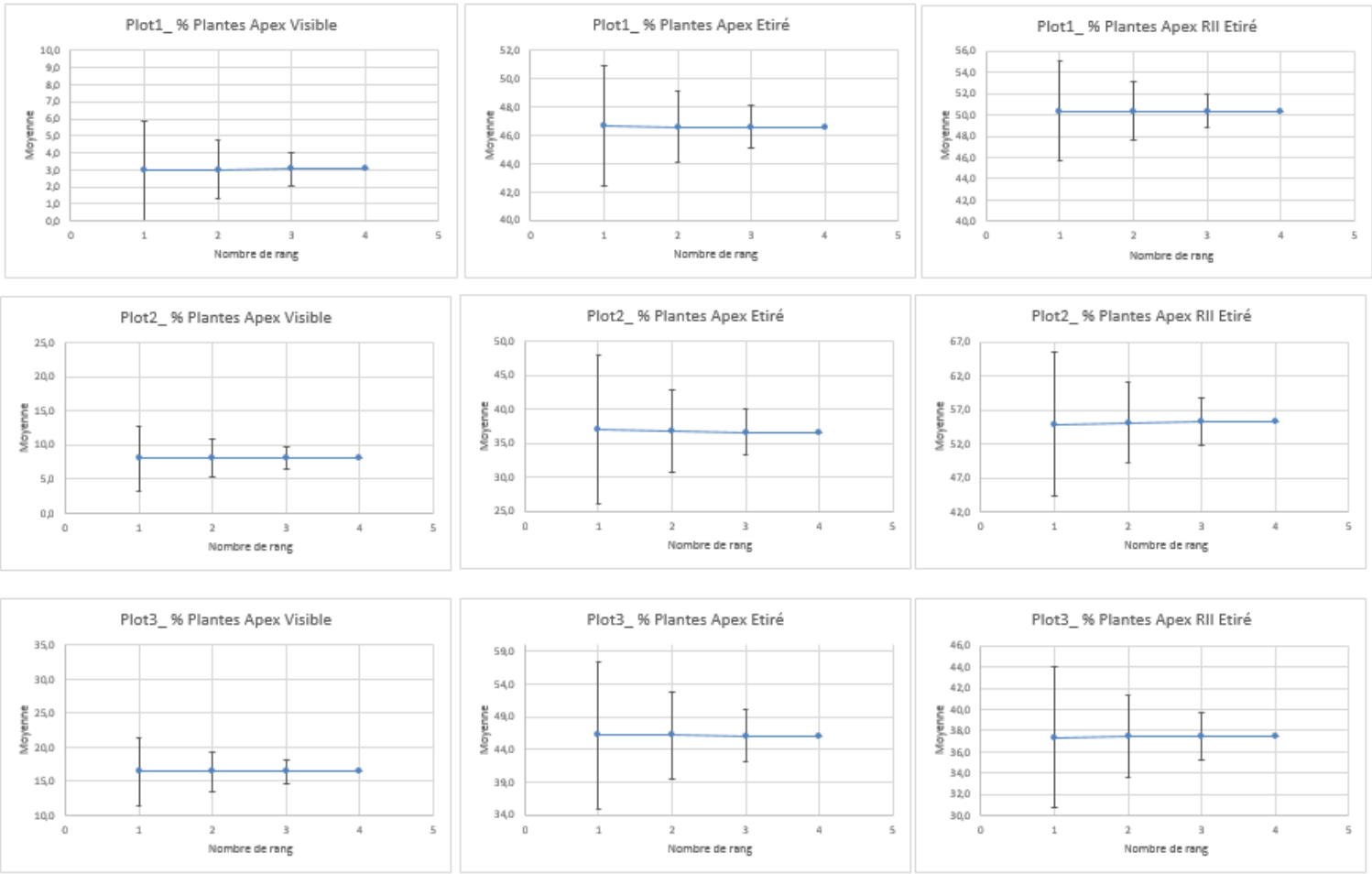

Figure 18 : graphes de validation de la taille d'échantillon nécessaire pour faire les notations sur un plot

ANNEXE VII : Graphes de validation de la taille d'échantillon pour tous les *plots (suite)*

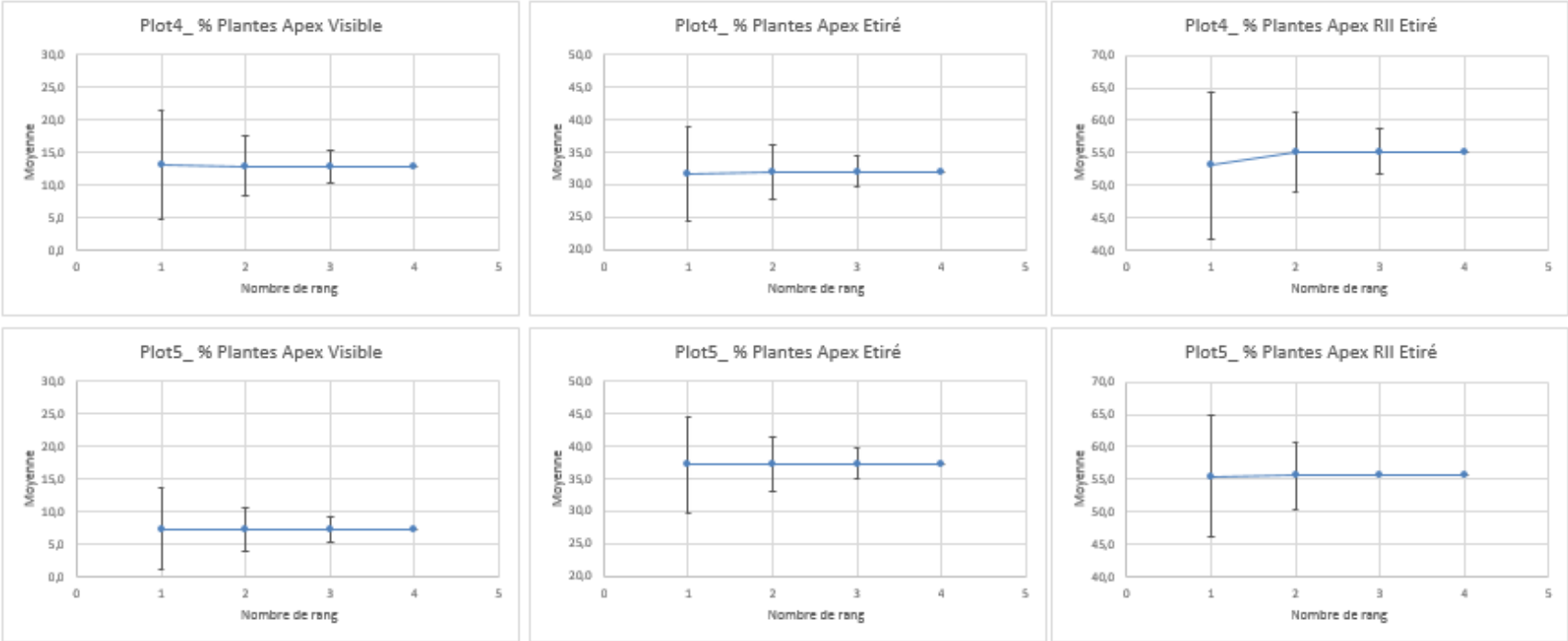

Figure 19: graphes de validation de la taille d'échantillon nécessaire pour faire les notations sur un plot (suite)

ANNEXE VIII : Formules de Yang

Dans : Mathematical formulae for calculating the base temperature for growing degree days (Yang and al.,1994)

Équation 1 : première équation de Yang

$$x = \frac{\sum_{i=1}^{n} T_i d_i \sum_{i=1}^{n} d_i - n \sum_{i=1}^{n} d_i^2 T_i}{(\sum_{i=1}^{n} d_i)^2 - n \sum_{i=1}^{n} d_i^2} \tag{9}$$

where T_i is the overall mean temperature of the ith planting and d_i is the number of days of the ith planting to reach a developmental stage under study.

Équation 2 : deuxième équation de Yang

$$x = T - \frac{(\sum_{i=1}^{n} t_i d_i)^2 - n \sum_{i=1}^{n} t_i^2 d_i^2}{n \sum_{i=1}^{n} d_i^2 t_i - n \sum_{i=1}^{n} t_i d_i \sum_{i=1}^{n} d_i} \tag{12}$$

where d_i is the number of days required to reach a developmental stage for the ith planting and t_i is the difference of the overall mean of temperature in all plantings and the mean temperature of the ith plantings.

Équation 3 : troisième équation de Yang

$$x = \frac{\sum_{i=1}^{n} T_i d_i^2 \sum_{i=1}^{n} T_i d_i - \sum_{i=1}^{n} d_i \sum_{i=1}^{n} T_i^2 d_i^2}{\sum_{i=1}^{n} d_i^2 \sum_{i=1}^{n} T_i d_i - \sum_{i=1}^{n} d_i \sum_{i=1}^{n} T_i d_i^2} \tag{15}$$

where T_i is the overall mean of temperature of the ith planting, d_i is the number of days of the ith planting, and n is the number of all plantings.

Équation 4 : quatrième équation de Yang

$$x = \frac{\sum_{i=1}^{n} T_i \sum_{i=1}^{n} d_i T_i - n \sum_{i=1}^{n} d_i T_i^2}{\sum_{i=1}^{n} d_i \sum_{i=1}^{n} T_i - n \sum_{i=1}^{n} d_i T_i} \tag{17}$$

where T_i is the overall mean of temperature of the ith planting, d_i is the number of days of the ith planting, and n is the number of all plantings.

On propose en Tableau 4, les températures de bases trouvées à l'aide de ces 4 équations (en supprimant les résultats aberrants)

Tableau 7 : tableau des températures de base trouvées à partir des 4 équations proposées par Yang

	R-->DM	DM--> DF	DF --> PF	PF-->FF
Equation 1	14,0	16,1	22,1	21,6
Equation 2	17,8	18,6	22,5	27,6
Equation 3	12,3	16,2	20,4	20,0
Equation 4	14,1	19,4	23,8	21,5