



Faculté des Sciences

Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

Année académique 2016 - 2017

Contribution à l'ajustement du phyllotherme utilisé dans les modèles de croissance du blé et de l'orge

Mémoire présenté par Raphaël Delattre

en vue de l'obtention du grade de Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

Option « Monitoring environnemental »

Rédigé sous la direction de Moussa El Jarroudi

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon promoteur et mon co-promoteur Messieurs Moussa El Jarroudi et Bernard Tychon sans qui ce travail n'aurait pas eu lieu. Merci de m'avoir fait découvrir un domaine d'études passionnant et de m'avoir consacré de l'aide et du temps pour la réalisation de ce document.

Je remercie également les équipes du Luxembourg Institute of Science and Technology et de l'Université de Liège qui nous ont accompagné sur le terrain et qui ont égayé ces journées de leur bonne humeur.

Pour leur soutien et leur bonne humeur lors de la rédaction de ce travail, je remercie les docteurs et doctorants de l'unité de recherche Eau, Environnement, Développement de l'Université de Liège.

Je remercie toutes les personnes « oubliées » qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce travail.

Enfin, je remercie ma famille et mes amis qui m'ont soutenu tout au long de cette épreuve.

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES FIGURES	3
TABLE DES TABLEAUX	4
INTRODUCTION	5
PREMIÈRE PARTIE	7
1. Généralités sur le blé et l'orge	7
1.1. Les stades de développement des céréales	7
1.1.1. La levée	8
1.1.2. Stade 2 – 3 feuilles	8
1.1.3. Stade début tallage	8
1.1.4. Stade plein tallage	8
1.1.5. Stade épi à 1 cm	8
1.1.6. Stade 1 – 2 nœuds	9
1.1.7. Stade méiose pollinique	9
1.1.8. Stade épiaison	9
1.1.9. Stade floraison	10
1.1.10. La formation du grain	10
1.2. Les principales maladies du blé et de l'orge	10
1.2.1. Septoriose du blé	10
1.2.2. Rouille brune des feuilles du blé	11
1.2.3. Rouille jaune du blé	11
1.2.4. Rouille naine des feuilles de l'orge	11
1.2.5. Ramulariose	12
1.2.6. Rhynchosporiose	12
1.2.7. Helminthosporiose	12
1.2.8. Oïdium blanc	13
2. La modélisation	14
2.1. Notions de base sur la modélisation	14
2.1.1. Types de modèles	14
2.1.2. Création des modèles	14
2.1.3. Calibration des modèles	15
2.1.4. Validation des modèles	15
2.2. La modélisation de la phénologie	15
2.2.1. La phénologie	15
2.2.2. Le concept de somme des températures (degrés-jours)	16
2.2.3. Simulation de la croissance des feuilles sur base des degrés-jours	17
2.2.4. L'intégration du photopériodisme dans les modèles de croissance	18
2.3. La modélisation comme outil d'aide à la décision	19
3. AgrOptimize et l'outil PhytoProTech	21
3.1. Présentation d'AgrOptimize	21
3.2. L'outil PhytoProTech	21
DEUXIÈME PARTIE	23
1. Matériels et méthodes	23
1.1. Choix et localisation des sites d'étude	23
1.2. Caractéristiques météorologiques	24
1.3. Suivi phénologique	25

1.4.	Informations sur la base de données	27
1.4.1.	Données sur la phénologie	27
1.4.2.	Données météorologiques	27
1.5.	Analyse des données	28
1.5.1.	Préparation des données	28
1.5.2.	Scénarios pour plusieurs phyllothermes (blé)	28
1.5.3.	Calcul du phyllotherme à partir de droites de régression	28
1.5.4.	Variation du phyllotherme au sein d'une même population	29
1.5.5.	Analyse des données de 2017	29
2.	Résultats et discussions	30
2.1.	Comparaison des observations de 2012 à 2014	30
2.1.1.	Blé	30
2.1.2.	Orge	32
2.2.	Simulations de phyllotherme	34
2.2.1.	Année 2012	34
2.2.1.1.	Everlange	34
2.2.1.2.	Burmerange	35
2.2.1.3.	Christnach	35
2.2.1.4.	Reuler	36
2.2.2.	Année 2013	37
2.2.2.1.	Everlange	37
2.2.2.2.	Burmerange	37
2.2.2.3.	Christnach	37
2.2.2.4.	Reuler	38
2.2.3.	Année 2014	39
2.2.3.1.	Everlange	39
2.2.3.2.	Burmerange	39
2.2.3.3.	Bettendorf	39
2.2.3.4.	Reuler	41
2.2.4.	Synthèse	41
2.3.	Détermination du phyllotherme à l'aide de droites de régression	42
2.3.1.	Blé	42
2.3.2.	Orge	43
2.4.	Variation du phyllotherme – Cas d'une population hétérogène	45
2.4.1.	Variété Flair	45
2.4.2.	Variété Dream	46
2.4.3.	Discussion pour les deux sites	47
2.5.	Analyse des données de 2017	47
2.5.1.	Blé	47
2.5.2.	Orge	49
3.	Discussions générales et perspectives	51
	CONCLUSION	53
	BIBLIOGRAPHIE	54
	ANNEXES	I
	Annexe I : Moyennes et écarts-types des observations (2012 à 2014 et 2017)	I
	Annexe II : Analyses pour l'année 2001	XIX

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Stades de croissance des céréales (Ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires Rurales de l'Ontario, 2009)	7
Figure 2 : Stade épis 1 cm (Bonin et al., n.d.)	9
Figure 3 : Septoriose sur une feuille de blé (ARVALIS Institut du végétal, n.d.-c)	10
Figure 4 : Rouille brune sur blé (BASF, 2016)	11
Figure 5 : Rouille jaune sur blé (BASF, n.d.-b)	11
Figure 6 : Rouille naine sur orge (BAYER, n.d.)	11
Figure 7 : Ramulariose sur orge (BASF, n.d.-a)	12
Figure 8 : Rhynchosporiose sur orge (BAYER Crop Science, n.d.)	12
Figure 9 : Helminthosporiose de l'orge (<i>Helminthosporium teres</i>) (Bayer, 2014)	12
Figure 10 : Oïdium blanc sur blé (BASF, n.d.-e)	13
Figure 11 : Les outils d'aide à la décision, de la recherche aux agriculteurs (Dubrulle et al., 2014)	20
Figure 12 : Organisation de la spin-off AgrOptimize (AgrOptimize, 2017)	21
Figure 13 : Tableau de bord de l'outil PhytoProTech (WANAKA, n.d.)	22
Figure 14 : Localisation des sites d'étude (Jacquemin, 2010)	23
Figure 15 : Diagramme ombrothermique de 2010 à 2016 à Luxembourg-ville ("Statistiques // Luxembourg - Accueil," n.d.)	24
Figure 16 : Variation précipitations totales (en mm) et températures moyennes (en °C) au Luxembourg (moyennes sur 30 ans) (Ministère de l'Agriculture, de la Viticulture et la Protection des consommateurs, 2015)	25
Figure 17 : Schéma parcelles pour le suivi phénologique du blé	26
Figure 18 : Site d'étude (blé) de Bettendorf	26
Figure 19 : Control 1, site de Reuler	26
Figure 20 : Talle marquée pour le suivi phénologique	26
Figure 21 : Interface logiciel Septor (Tychon, communication personnelle)	28
Figure 22 : Observations de la formation des trois dernières feuilles du blé en fonction de la somme des degrés-jours depuis la date de semis. A : 2012, B : 2013 et C : 2014	31
Figure 23 : Observations de la formation des dernières feuilles de l'orge en fonction de la somme des degrés-jours de base 0 : A : 2012, B : 2013 et C : 2014	33
Figure 24 : Simulations vs observations à Everlange (variété Cubus) en 2012	34
Figure 25 : Simulations vs observations à Reuler en 2012	36
Figure 26 : Simulations vs observations - Christnach (2013)	38
Figure 27 : Simulations vs observations à Bettendorf pour la variété Achat (2014)	40
Figure 28 : Droites de régression Burmerange – Reuler (blé)	42
Figure 29 : Droites de régression Everlange - Christnach/Bettendorf (blé)	43
Figure 30 : Droites de régression Reuler – Burmerange – Christnach (orge)	44
Figure 31 : Droites de régression Everlange (orge)	44
Figure 32 : Fréquence des feuilles émergentes (2001 - variété Flair)	46
Figure 33 : Fréquence des feuilles émergentes (2001 - variété Dream)	46
Figure 34 : Simulations vs observations à Everlange et Burmerange - Année 2017 - Blé	48
Figure 35 : Simulations vs observations à Bettendorf et à Reuler – Année 2017, blé	49
Figure 36 : Simulations vs observations à Everlange et Burmerange – Année 2017, orge	50
Figure 37 : Simulations vs observations à Bettendorf et à Reuler - Année 2017, orge	50

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Dates des observations de terrain (pour les années de 2012 à 2014 et 2017)	25
Tableau 2: Données agronomiques concernant les sites d'essais de blé	27
Tableau 3 : Données agronomiques concernant les sites d'essais d'orge	27
Tableau 4 : Coefficients de détermination - Everlange variété Cubus (2012)	35
Tableau 5 : Coefficients de détermination - Everlange variété Achat (2012)	35
Tableau 6 : Coefficients de détermination – Burmerange (2012)	35
Tableau 7 : Coefficients de détermination - Christnach (2012)	36
Tableau 8 : Coefficients de détermination - Reuler (2012)	37
Tableau 9 : Coefficients de détermination - Everlange (2013)	37
Tableau 10 : Coefficients de détermination - Burmerange (2013)	37
Tableau 11 : Coefficients de détermination - Christnach (2013)	38
Tableau 12 : Coefficients de détermination - Reuler (2013)	38
Tableau 13 : Coefficients de détermination - Everlange (2014)	39
Tableau 14 : Coefficients de détermination - Burmerange (2014)	39
Tableau 15 : Coefficients de détermination - Bettendorf variété Achat (2014)	40
Tableau 16 : Coefficients de détermination - Bettendorf variété Kerubino (2014)	40
Tableau 17 : Coefficients de détermination – Reuler (2014)	41
Tableau 18 : Phyllothermes par site et par année calculés grâce aux droites de régression (blé)	42
Tableau 19 : Phyllothermes obtenus par site et par année grâce aux droites de régression (orge)	45
Tableau 20 : Exemple de calcul du phyllotherme suivant les fréquences (F1 – Flair)	45
Tableau 21 : Coefficients de détermination pour le blé – Simulations vs observations	48
Tableau 22 : Coefficients de détermination et RMSE pour l'orge - Simulations vs observations	49

INTRODUCTION

L'agriculture est une des activités humaines comportant à l'heure actuelle le plus d'enjeux. Face à des défis sociétaux (produire en suffisance, améliorer l'image de l'agriculture, veiller à produire des denrées de qualité, ...), des défis environnementaux (préservier les ressources naturelles, s'adapter face à l'évolution du climat et de l'environnement, ...) et des défis économiques (sécuriser les revenus, gestion des risques face à la volatilité des prix, fournir, encourager la diversité économique, ...), l'agriculteur doit être un acteur proactif et réaliser les bons choix (European Commission, n.d.).

Durant de nombreuses années, la politique mise en place par l'Union Européenne visait entre autres à produire des denrées en quantité suffisante, investir pour moderniser les exploitations ou encore garantir la sécurité des produits alimentaires. Aujourd'hui, cette politique a évolué et aide les agriculteurs à faire face aux nouveaux défis. Depuis les dernières réformes, un des objectifs est par exemple une agriculture plus respectueuse de l'environnement. La directive 2009/128/CE (retranscrite dans l'arrêté royal du 19 mars 2013) a été créée dans ce but. Elle instaure un cadre d'action afin de rendre l'utilisation des pesticides compatible avec le développement durable et fixe des objectifs cibles afin de réduire les risques de leur utilisation pour la santé humaine et pour l'environnement. À terme, l'utilisation des pesticides sera interdite et des méthodes alternatives seront utilisées pour réduire la dépendance envers ces produits. L'agriculture intensive, jusqu'alors utilisée dans le but de produire plus s'est convertie en une agriculture raisonnée, plus durable, dont la vocation est de produire plus, mieux et avec moins (EUR-Lex, n.d.; Moniteur Belge - Belgisch Staatsblad, n.d.).

L'activité agricole est très importante en Europe. En effet, en 2015, la surface occupée par celle-ci était de 178.5 million d'ha (chiffres pour l'Union Européenne – 28 pays). Plus de la moitié de cette surface (59.8 %) était dédiée à des terres arables pour l'exploitation de différentes cultures, un tiers (33.2 %) était occupé par des prairies permanentes alors que 6.6 % était couverte de cultures permanentes. Les cultures de céréales représentaient 54 % de la surface de terres arables soit plus ou moins 57.78 millions d'hectares (European Union, 2016). La superficie agricole en Belgique représentait 1 330 884 ha (en 2015) et 131 077 ha au Luxembourg (2014). La production céréalière occupait 341 639 ha du territoire belge soit environ 26% de la superficie agricole totale (en 2015) alors qu'au Luxembourg, cette superficie représentait 22 % soit 28 399 ha de la surface agricole (en 2014) (Ministère de l'Agriculture, de la Viticulture et la Protection des consommateurs, 2015; SPF Economie, P.M.E, n.d.).

Les principales céréales cultivées sont le blé, l'orge et l'épeautre. En 2015, la production de blé et d'épeautre était de l'ordre de 2 076 000 tonnes en Belgique contre 91 000 tonnes au Luxembourg. La quantité d'orge produite est inférieure mais reste tout de même très importante pour ces pays (434 000 tonnes en Belgique et 44 000 tonnes au Luxembourg) (European Union, 2016).

Afin de passer à une agriculture plus durable, une réduction des traitements phytosanitaires, appliqués sur les cultures dans le but de réduire les pertes de rendements liées aux maladies cryptogamiques, est primordiale. Il est donc important et utile pour les agriculteurs de parvenir à réduire ces substances chimiques tout en conservant une rentabilité des récoltes et ce, dans le but de préserver l'environnement (M. El Jarroudi, 2005).

Le développement des modèles de culture a permis aux agriculteurs d'avoir une aide précieuse en termes de gestion de leurs exploitations. Utilisés comme outils d'aide à la décision, ils renseignent leurs utilisateurs sur de nombreuses caractéristiques en rapport avec leurs pratiques culturales. En effet, différentes approches ont été envisagées : prévision de rendement, prévision de la teneur en protéines des grains de blé, indicateurs d'impacts environnementaux, etc. (Dumont et al., 2012).

Les modèles prédictifs de développement de maladies font partie intégrante de ces outils d'aide à la décision proposés aux agriculteurs. Effectivement, face à la grande irrégularité du développement des maladies sur les céréales, il est parfois compliqué de pouvoir estimer les risques de dégâts. C'est pourquoi ces outils permettant d'optimiser les traitements chimiques deviennent incontournables (M El Jarroudi et al., 2011).

Les applications de fongicides, pour être effectives, doivent être réalisées à des stades précis du développement des céréales. La prévision de la phénologie est donc une étape importante pour la création de ces modèles (Shaykewich, 1995).

En 2016, la société AgrOptimize a été créée. Cette spin-off a pour but de développer et de commercialiser des outils d'aide à la décision et des outils d'aide à la précision pour les exploitants agricoles. L'outil PhytoProTech a été mis sur le marché cette année. Il permet aux agriculteurs de suivre sur une plateforme en ligne le développement des maladies et renseigne sur l'utilité ou non d'une application phytosanitaire. L'objectif principal est donc de positionner au mieux les traitements s'ils sont nécessaires et donc de favoriser une lutte raisonnée (AgrOptimize, 2017).

Pour pouvoir modéliser le développement des maladies, le logiciel simule la croissance des feuilles grâce à une somme de températures (phyllotherme). Celle-ci est unique et ne tient pas compte de la culture (blé ou orge), de la variété ou du numéro de feuilles. En 2015 et 2016, des décalages phénologiques ont été constatés sur différents sites. Cela peut nuire à la qualité des modèles.

L'objectif principal de ce mémoire est donc d'essayer d'ajuster la valeur de phyllotherme en vue de l'amélioration de la prédiction du développement du blé et de l'orge.

Dans la première partie, nous allons nous concentrer sur des points théoriques essentiels à la compréhension du travail. Le premier chapitre sera porté sur les stades de développement du blé et de l'orge, le deuxième se penchera sur les maladies cryptogamiques. Nous ferons par la suite un point sur la modélisation et un état de l'art sur les modèles phénologiques existants. Enfin, un dernier chapitre sera consacré à la présentation de la société AgrOptimize.

La deuxième partie se penchera sur les aspects pratiques du travail et les différents calculs que nous avons réalisés pour parvenir à nos objectifs. Dans un premier temps, nous présenterons la méthodologie que nous avons utilisée. Ensuite, les résultats seront exposés et discutés.

Enfin, ce travail se terminera par une conclusion.

PREMIÈRE PARTIE

1. Généralités sur le blé et l'orge

1.1. Les stades de développement des céréales

Dans ce point, nous allons parler brièvement des différents stades de développement des céréales. La croissance et le développement sont deux notions souvent employées dans la simulation de la croissance des cultures. Le développement d'une plante correspond à des événements discrets que l'on peut observer à un instant donné, ces transformations étant liées à l'initiation et l'apparition de nouveaux organes. La croissance se réfère quant à elle à l'augmentation des dimensions de la plante, comme la longueur, la largeur ou encore l'augmentation de poids ou de volume. Contrairement au développement, la croissance est un phénomène difficilement repérable dans le temps (El Hassani & Persoons, 1994; M. El Jarroudi, 2005).

L'intérêt de la séparation du développement du blé ou de l'orge en différents stades apparaît sur plusieurs niveaux. Par exemple, afin de positionner au mieux différentes interventions culturales comme l'apport d'engrais, la protection phytosanitaire ou encore des régulateurs de croissance, il est nécessaire de connaître l'état de développement.

Le système de code décimal défini par Zadoks et al. en 1974 est largement utilisé pour caractériser les stades de développement des céréales. Il s'agit d'une échelle non linéaire de 0 à 100 (basée sur les stades de développement irrégulièrement espacés) et binaire. En effet, l'échelle principale (correspondant au premier chiffre de 0 à 9) renseigne sur une étape clé du développement (exemple : le chiffre 0 représente la germination et le 3 l'élongation de la tige). La seconde échelle (deux chiffres) apporte plus de détails sur le développement notamment en ce qui concerne la formation des talles, des feuilles ou encore l'apparition des nœuds. Plusieurs échelles mathématiques se sont inspirées de celle créée par Zadoks et al. (1974). Parmi celles-ci, le code BBCH (*Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische industrie*) développé en Allemagne est largement utilisé dans le monde. Une illustration (figure 1) reprend différents stades de développement et la valeur de l'échelle correspondant (M. El Jarroudi, 2005; Lepage & Bourgeois, 2012; Zadoks, Chang, & Konzak, 1974).

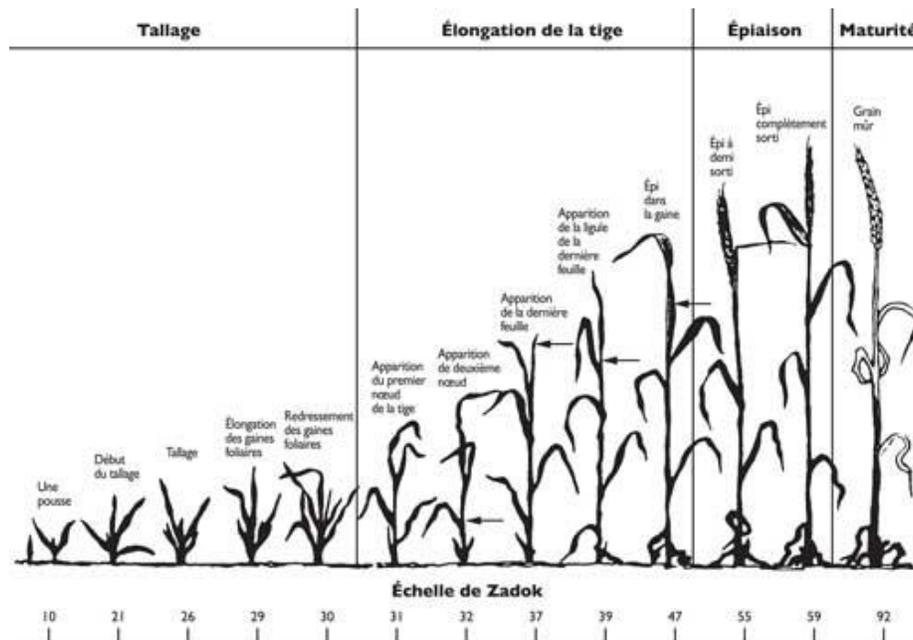


Figure 1 : Stades de croissance des céréales (Ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires Rurales de l'Ontario, 2009)

1.1.1. La levée

Le stade de la levée a lieu lorsque la première feuille traverse la gaine rigide et protectrice qui enveloppe, le coléoptile. La durée de ce stade correspond au temps séparant la date de semis et la date de levée. Différentes étapes sont observées pendant ce stade : la germination, l'élongation du coléoptile et la croissance de la première feuille. Ce stade apparaît généralement 8 à 10 jours après le semis (Gate, 1995).

Ce stade correspond à la valeur GS10 (Zadoks et al., 1974).

1.1.2. Stade 2 – 3 feuilles

Le stade 2-3 feuilles est caractérisé par le nombre de feuilles. Celles-ci émergent les unes après les autres suivant un ordre constant et un rythme régulier en fonction de la somme de températures reçues. Le phyllotherme (somme des températures nécessaire à la formation d'une feuille) est estimé à 100°C en base 0 pour le blé tendre et 80°C pour l'orge (Gate, 1995).

La progression de ce stade est aussi fonction de différents facteurs externes pouvant jouer sur la croissance notamment la durée du jour, le rayonnement ou encore la date de semis (Gate, 1995).

Le code décimal pour ce stade commence à GS12 (deuxième feuille étalée) et se termine à GS19 (9 ou davantage de feuilles étalées) (Zadoks et al., 1974).

1.1.3. Stade début tallage

L'émergence d'une nouvelle tige (appelée talle) sur le maître-brin à l'aisselle de la feuille la plus âgée marque le début de ce stade. La plante possède alors à ce moment-là trois ou quatre feuilles (Gate, 1995).

En général, ce stade apparaît plus ou moins après 300 degrés-jours (base 0) depuis la levée pour le blé et 240 degrés-jours pour l'orge (Gate, 1995).

Le stade début tallage correspond au code GS21 (Zadoks et al., 1974).

1.1.4. Stade plein tallage

Il est atteint lorsque les plantes portent deux ou trois talles. Il ne comporte pas de caractéristiques précises contrairement aux stades développés précédemment. En effet, il correspond plus à une période qu'à un moment précis puisqu'il suppose que l'on connaisse le nombre de talles. Or celui-ci est variable en fonction de la température, de la date de semis, de la variété et de l'apport en azote (Gate, 1995).

On distingue deux types de talles : les talles primaires et secondaires. Les talles primaires sont les talles se développant à l'aisselle des feuilles de la tige principale alors que les talles secondaires se développent à partir de bourgeons situés à l'aisselle des feuilles primaires (Gate, 1995).

En moyenne, une somme de température comprise entre 550 et 650 degrés jour (base 0°C) est nécessaire après le semis pour atteindre ce stade (Gate, 1995). Le stade plein tallage est défini par la valeur GS26 dans le code décimale de Zadoks (Zadoks et al., 1974).

1.1.5. Stade épi à 1 cm

L'émission des talles se termine, les plantes se redressent. Les talles commencent à s'allonger (Gate, 1995). Le stade épi à 1 cm est atteint lorsque le sommet de l'épi se situe à 1 cm de la base du plateau de tallage. Il s'agit du passage entre la phase tallage et la phase de montaison. Il constitue une étape clé pour différentes interventions dans les cultures mais il est souvent très difficile de le repérer. En effet, la meilleure solution pour l'identifier est de procéder à une dissection (Bonin, Garcia, Lesouder, & Maufras, n.d.).

Ce stade marque le moment où la plante a le plus besoin d'engrais azoté (Bogard et al., 2015). D'autres interventions comme des régulateurs de croissance ou un désherbage peuvent être appliqué à ce moment (Bonin et al., n.d.).

Il correspond à une valeur de GS30 dans l'échelle (Zadoks et al., 1974).

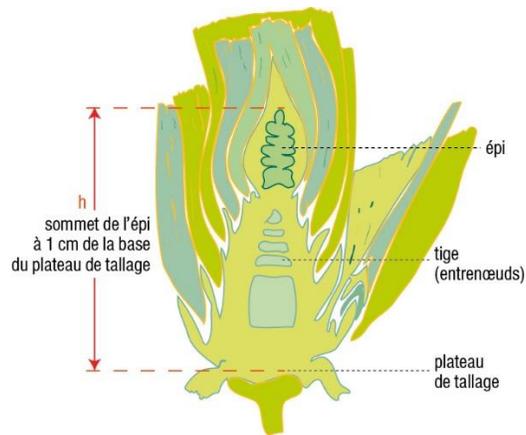


Figure 2 : Stade épis 1 cm (Bonin et al., n.d.)

1.1.6. Stade 1 – 2 nœuds

La tige qui était constituée de nœuds empilés commence à croître avec l'élongation des premiers entre-nœuds. La croissance de la tige se fait dans un ordre logique, en fonction de l'apparition successive des entre-nœuds. Ceux de la base de la tige seront donc toujours les plus courts (Gate, 1995).

Pour atteindre le stade deux nœuds, il faut que les deux premiers entre-nœuds soient visibles à la base de la tige principale sur 50 % des plantes. Pour l'orge, ce stade correspond à l'ébauche des barbes (Gate, 1995).

Ce stade est atteint lorsque la somme des degrés-jours reçue par la plante est égale à environ 250 °C depuis le stade épis 1 cm (Gate, 1995). Le stade 1 – 2 nœuds correspond à une valeur de GS31 (un nœud) et GS32 (deux nœuds) dans l'échelle de Zadoks (Zadoks et al., 1974).

Lors de ces stades, la formation de la feuille 3 (F3, antépénultième feuille) et de la feuille 2 (F2, avant-dernière feuille) débute.

1.1.7. Stade méiose pollinique

Ce stade est une séquence d'événements cellulaires. Il est atteint lorsque le sommet du jeune épi touche la ligule de l'avant dernière feuille. Pour l'orge, cela correspond au moment où le sommet des barbes devient visible. En général, nous considérons que ce stade est atteint 10 jours avant l'épiaison pour le blé et 8 jours pour l'orge (Gate, 1995).

Les valeurs de GS37 (dernière feuille pointante, F1) et GS39 (dernière feuille totalement déployée) sont données pour le début et la fin de ce stade (Zadoks et al., 1974).

Le stade de développement GS37 (apparition de la dernière feuille) est un stade déterminant. En effet, la dernière feuille (F1) est d'une importance majeure. Comme elle se situe au sommet du feuillage et à proximité de l'épi, elle intercepte plus de lumière que les feuilles inférieures et participe donc beaucoup au rendement de la plante. Si cette feuille est sévèrement attaquée par une maladie, les chutes de rendement seront élevées (M. El Jarroudi, 2005).

1.1.8. Stade épiaison

Petit à petit, la gaine de la dernière feuille s'écarte et le sommet de l'épi sort. Ce stade est atteint lorsque 50% des épis sont à moitié sortis (Gate, 1995).

Dans l'échelle de Zadoks, les valeurs retenues pour ce stade sont GS51 (début de l'épiaison), GS55 (mi-épiaison) ou encore GS59 correspondant à la fin de l'épiaison, moment où l'inflorescence est entièrement sortie de la gaine (Zadoks et al., 1974).

1.1.9. Stade floraison

Ce stade correspond au moment où les glumelles des fleurs s'ouvrent et les sacs polliniques sortent hors de la fleur (Gate, 1995). Trois valeurs sont déterminées pour ce stade : GS61 (début floraison), GS65 (pleine floraison) et GS69 (fin floraison) (Zadoks et al., 1974).

1.1.10. La formation du grain

Trois stades sont à différencier pour cet épisode du développement :

- Stade grain laiteux

Les enveloppes des futurs grains commencent à se développer. De nombreuses divisions cellulaires se produisent et les cellules de stockage de l'amidon se forment (Gate, 1995). Échelle Zadoks : de GS71 à GS75 (Zadoks et al., 1974).

- Stade grain pâteux

Les cellules de l'enveloppe se remplissent par des sucres (sous forme d'amidon). La quantité d'eau contenue dans le grain est stable, il s'agit du palier hydrique (Gate, 1995). Échelle Zadoks : de GS83 à GS87 (Zadoks et al., 1974).

- Maturité physiologique

Lorsque la migration de la matière sèche vers le grain est terminée, ce stade est atteint. Le poids sec du grain a atteint sa valeur maximum (Gate, 1995). Échelle Zadoks : code GS89 (Zadoks et al., 1974).

1.2. Les principales maladies du blé et de l'orge

Dans ce point nous allons décrire les principales maladies cryptogamiques retrouvées pour les céréales et en particulier pour le blé et l'orge.

1.2.1. Septoriose du blé

Cette maladie est provoquée par un champignon (*Zymoseptoria tritici*). Elle peut causer des dégâts importants dans beaucoup de régions et provoquer de fortes diminutions du rendement si les deux dernières feuilles sont affectées (M El Jarroudi et al., 2011; M El Jarroudi, Delfosse, Maraite, Hoffmann, & Tychon, 2009). Il s'agit de la principale maladie foliaire du blé d'hiver. Par exemple, au Grand-Duché de Luxembourg, le rendement peut être affecté de 20 à 30 % si la dernière feuille est attaquée pendant la maturité du blé (Mahtour et al., 2011).

Les symptômes de cette maladie sont tout d'abord l'apparition de taches irrégulières de couleurs brunes sur le feuillage qui, au fur et à mesure de l'avancement de la maladie, commencent à s'étendre de manière longitudinale sur la feuille. Ces symptômes provoquent la nécrose de la feuille. Des points noirs se forment alors dans les taches nécrosées, il s'agit de pycnides (ARVALIS Institut du végétal, n.d.-c; Zillinsky, 1983).

Des spores sont produites par les pycnides. Ceux-ci sont expulsés hors de l'épiderme sous forme d'une masse blanche de conidies (appelée cirrhe). En cas de fortes pluies, elles sont disséminées vers les feuilles supérieures. Si les feuilles supérieures sont contaminées, cela signifie que les feuilles inférieures le sont aussi. L'épi n'est pas attaqué par cette maladie (ARVALIS Institut du végétal, n.d.-a; Zillinsky, 1983).



Figure 3 : Septoriose sur une feuille de blé (ARVALIS Institut du végétal, n.d.-c)

1.2.2. Rouille brune des feuilles du blé

La rouille brune des feuilles du blé est une maladie causée par *Puccinia triticina*. Des pustules de couleur brunâtre sont observées sur les faces supérieures des feuilles. Deux types de spores peuvent être créés par la rouille brune : les urédosores et les téléutosores. L'apparition des symptômes est tardive et généralement constatée à partir du stade 2 nœuds mais plus souvent entre le stade dernière feuille pointante et épiaison (ARVALIS Institut du végétal, n.d.-a; Zillinsky, 1983).



Figure 4 : Rouille brune sur blé (BASF, 2016)

La formation de la maladie est favorisée par le vent qui dissémine les spores et les nuits fraîches avec rosée (BASF, 2016). Dans certaines régions tempérées, le pathogène est conservé d'une année à l'autre grâce à des hôtes intermédiaires ou des céréales d'hiver (Zillinsky, 1983). Non traitée, cette maladie peut provoquer des dégâts importants pour les cultures (ARVALIS Institut du végétal, n.d.-a).

Les apparitions de cette maladie sont de plus en plus précoces et sont liées aux changements climatiques. Entre 2003 et 2005, en Belgique et au Grand-Duché de Luxembourg, elle apparaissait entre les stades GS77 (maturité laiteuse) et GS87 (maturité pâteuse). Or entre 2006 et 2009, les premiers symptômes apparaissaient déjà dès le stade GS45 (gonflement) (Moussa El Jarroudi, Kouadio, Giraud, Delfosse, & Tychon, 2014; Junk, Kouadio, Delfosse, & El Jarroudi, 2016)

1.2.3. Rouille jaune du blé

Causée par *Puccinia striiformis*, la rouille jaune est une maladie de développant entre le stade 1 nœud et la dernière feuille. C'est une maladie très nuisible pouvant causer des dégradations élevées aux cultures si elle est détectée tardivement (ARVALIS Institut du végétal, n.d.-b; Zillinsky, 1983).

C'est une maladie à foyer. Les urédosores sont présentes sur les feuilles et les épillets, et sont disposés en stries étroites de couleur jaunâtre. La maladie se propage lors du printemps sous des températures moyennes modérées (ARVALIS Institut du végétal, n.d.-b; Zillinsky, 1983).

Depuis 2011, la sévérité de la maladie est très importante et a été observée en France, Belgique, Grand-Duché de Luxembourg et dans une grande partie de l'Europe. Sa progression est liée au cycle de développement très rapide mais également à l'apparition d'une nouvelle souche appelée « Warrior », très virulente et résistante (Moussa El Jarroudi et al., 2017).

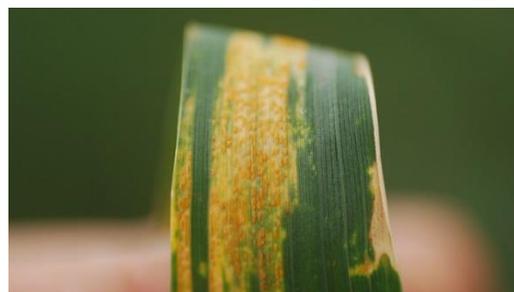


Figure 5 : Rouille jaune sur blé (BASF, n.d.-b)

1.2.4. Rouille naine des feuilles de l'orge

Les symptômes et le développement de cette maladie sont similaires à ceux de la rouille brune du blé. Ceux-ci apparaissent sur le limbe et la gaine de la feuille qui est contaminée par des urédospires créés par le champignon *Puccinia hordei*. Le développement de la rouille trouve son origine et s'accélère par des temps humides. Les spores de la maladie peuvent être émis à de longues distances et contaminer d'autres plantes grâce au vent (Zillinsky, 1983).



Figure 6 : Rouille naine sur orge (BAYER, n.d.)

1.2.5. Ramulariose

La ramulariose est une maladie fongique affectant uniquement l'orge de printemps ou d'hiver. Elle est caractérisée par des lésions de couleur brune se trouvant sur les feuilles. L'infection est souvent localisée sur les feuilles inférieures mortes. Les feuilles supérieures peuvent cependant être touchées et cela peut donc provoquer une perte de rendement (BASF, n.d.-a).

Le champignon responsable de la maladie (*Ramularia collo-cygni*) préfère des températures élevées pour sa croissance (Syngenta, n.d.-c).



Figure 7 : Ramulariose sur orge (BASF, n.d.-a)

1.2.6. Rhynchosporiose

La production de spores de cette maladie est favorisée par un temps frais et humide. Une fois infectée, des tâches pâles bordées de brun apparaissent sur les feuilles ; elles s'agrandiront avec le développement de la maladie (BASF, n.d.-d; Zillinsky, 1983).

Celle-ci se transmet par des éclaboussures de pluie, via les spores transportées par le vent ou grâce au champignon (*Rhynchosporium secalis*) qui est conservé par son mycélium sur les résidus de culture ou dans les semences (BASF, n.d.-d; Zillinsky, 1983).



Figure 8 : Rhynchosporiose sur orge (BAYER Crop Science, n.d.)

1.2.7. Helminthosporiose

o *Helminthosporium gramineum*

Cette maladie est transmise par les semences. Le champignon envahit ensuite le coléoptile et les feuilles au fur et à mesure de leur formation. Il contamine par la suite l'épi. Les symptômes sont de longues stries jaunâtres sur toute la longueur des feuilles. Le pathogène commence à sporuler lors de la floraison. Les spores peuvent affecter des plantes saines avec l'action du vent (BASF, n.d.-c; Zillinsky, 1983).

L'orge peut être attaqué de plusieurs manières par l'helminthosporiose : le semis peut être tué au moment de la levée même si cela se fait très rarement ; la maladie peut limiter la surface foliaire et donc réduire le rendement ; l'épi peut être touché et disparaître ce qui provoque l'absence de grains exploitables (BASF, n.d.-c).

o *Helminthosporium teres*

Cette forme d'Helminthosporiose, appelée également rayure réticulée, est une maladie foliaire de l'orge. Elle provoque des taches brunes sur les feuilles qui s'allongent par la suite pour former de longues stries. Les contaminations primaires ont différentes origines : les semences, les débris de paille ou les repousses d'orge ou certaines graminées adventives. Les spores produites peuvent être disséminées par le vent et affecter des plantes saines (Syngenta, n.d.-a; Zillinsky, 1983).



Figure 9 : Helminthosporiose de l'orge (*Helminthosporium teres*) (Bayer, 2014)

1.2.8. Oïdium blanc

L'oïdium blanc (*Erysiphe graminis*) est une maladie assez courante des céréales et des graminées. Elle cause le plus de dégâts pour l'orge que pour les autres céréales. Les premiers symptômes apparaissent sur les limbes inférieurs des feuilles sous la forme d'un feutrage blanc. En vieillissant, du début de la montaison au gonflement, ce feutrage prend une couleur plus foncée, jaune gris. La maladie s'installe ensuite sur les épis où elle cause le plus de dégâts (Syngenta, n.d.-b; Zillinsky, 1983).



Figure 10 : Oïdium blanc sur blé (BASF, n.d.-e)

La contamination se réalise par deux types de spores : ascospores et conidies. Les ascospores sont créées par des périthèces (organes qui conservent et fructifient le champignon) et sont conservées dans les débris de récolte et les plantes qui hivernent. Les conidies sont issues des graminées contaminées et sont dispersées par le vent, ce qui provoquera de nouvelles contaminations. Afin de lutter contre ces maladies, l'emploi de variétés résistantes est conseillé (Syngenta, n.d.-b; Zillinsky, 1983).

2. La modélisation

2.1. Notions de base sur la modélisation

Un modèle est « une formulation simplifiée qui imite les phénomènes du monde réel de telle sorte qu'il nous permet de comprendre des situations complexes et de faire des prévisions. Dans leur forme la plus simple, les modèles peuvent être verbaux ou graphiques, c'est-à-dire être faits d'énoncés concis ou de représentations picturales » (Odum, 1975) in (Gate, 1995).

Un modèle peut s'exprimer sous la forme mathématique simple suivante (Minet & Tychon, n.d.) :

Équation 1

$$Y = M(X, p)$$

Où Y représente la (les) variable(s) expliquée(s) par le modèle (la variable de sortie) ; X la ou les entrées du modèle et p les paramètres du modèle (Minet & Tychon, n.d.).

Les variables d'entrée sont les variables observées ou mesurées et qui se retrouvent dans toutes les situations où le modèle est appliqué. Pour des modèles écophysologiques pouvant décrire la croissance et le développement des cultures, il peut s'agir des données météorologiques, des caractéristiques liées à la pratique culturale (date de semis, dates et doses d'apport de fertilisant), etc. (Dumont et al., 2012).

Les paramètres du modèle sont des valeurs qui sont constantes pour toutes les situations étudiées. Pour revenir aux modèles écophysologiques, les paramètres de ceux-ci peuvent être les teneurs en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement. Pour chaque horizon de sol, ces valeurs sont des constantes permettant de calculer la réserve en eau du sol (Dumont et al., 2012). Il est donc important de trouver les meilleurs paramètres possibles afin d'avoir des valeurs en sortie qui correspondent aux observations. C'est pourquoi, l'étape de calibration est un stade important dans la création des modèles (Minet & Tychon, n.d.). Celle-ci fera l'objet d'un point suivant.

2.1.1. Types de modèles

Il existe différents types de modèles. Parmi ceux-ci, deux types ont été retenus :

- Les modèles statistiques

Construits à partir des lois statistiques, ces modèles sont basés sur des relations comme par exemple la régression à une ou plusieurs variables explicatives. Ils sont simples d'utilisation et permettent d'identifier rapidement les variables explicatives les plus déterminantes (Gate, 1995).

- Les modèles mécanistes

Ces modèles sont plus complexes car ils intègrent les principaux processus intervenant dans le système étudié (El Hassani & Persoons, 1994).

Par exemple, pour les modèles utilisés en écophysologie, le but est de reproduire les réactions de la plante ou de la culture. Ils sont basés sur des lois et des fonctions physiologiques connues. Différentes données d'entrée viennent alimenter ces modèles : données d'origine interne concernant les propriétés des plantes (génétique, etc.) et des données d'origine externe (données météorologiques, pédologiques, ...) (Gate, 1995; Rauff & Bello, 2015).

La principale difficulté de ces modèles est leur validation (El Hassani & Persoons, 1994).

2.1.2. Création des modèles

La première étape de la création d'un modèle consiste à acquérir des connaissances sur le phénomène que l'on souhaite étudier. Celles-ci permettront d'avoir une base pour différents choix notamment pour les facteurs explicatifs. Ensuite, il sera important de définir le domaine d'utilisation du modèle, ce qui permettra de délimiter son plan d'expérience (Gate, 1995).

La dernière étape comporte la construction proprement dite et donc le choix des outils mathématiques ou statistiques qui permettront le traitement des données. Ce choix sera fait en fonction du type de données à exploiter et de l'usage du modèle (Gate, 1995).

2.1.3. Calibration des modèles

La calibration d'un modèle consiste à ajuster les paramètres de celui-ci afin d'améliorer la prédiction des variables de sortie. La calibration a donc pour but d'améliorer le modèle. Cette opération est réalisée dans des conditions climatiques ou autres bien déterminées en fonction de la zone d'étude sur laquelle le modèle sera utilisé. Une fois réalisé, le modèle calibré aura une valeur prédictive plus locale qu'universelle (Minet & Tychon, n.d.).

2.1.4. Validation des modèles

La phase de validation est une étape clé dans la conception des modèles. En effet, elle va déterminer si celui-ci rend compte ou non du phénomène étudié avec suffisamment de précision ou encore si toutes les situations sont expliquées avec le même niveau de précision (Gate, 1995).

La première démarche de la validation peut être la comparaison des valeurs observées et simulées à l'aide de tests statistiques. De plus, l'analyse des erreurs résiduelles entre les valeurs simulées et les valeurs observées est souvent envisagée afin d'évaluer les performances du modèle (Dumont et al., 2012).

La méthode la plus simple consiste à calculer la différence entre la variable mesurée (Y_i) et la variable estimée par le modèle (\hat{Y}_i) :

Équation 2

$$D_i = Y_i - \hat{Y}_i$$

Le biais pourra alors être calculé comme suit :

Équation 3

$$\text{Biais} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_i$$

Dans cette équation, N représente le nombre de couples de valeurs (mesuré – estimé). Cependant, cette méthode est insuffisante pour juger de la qualité d'un modèle. C'est pourquoi, la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE, Root Mean Square Error) est utilisée (Dumont et al., 2012).

Équation 4

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}$$

Il est aisé d'interpréter la valeur obtenue par la RMSE car elle s'exprime dans les mêmes unités que les valeurs observées. Toutefois, il convient de rester vigilant sur le sens de cette valeur car un poids plus important aux erreurs les plus grandes est donné par la mise au carré du biais. La valeur idéale pour l'erreur quadratique moyenne est 0 (Dumont et al., 2012).

2.2. La modélisation de la phénologie

2.2.1. La phénologie

La phénologie est « l'étude du calendrier des événements biologiques, les causes de leur apparition en regard avec les forces biotiques et abiotiques et les interrelations entre les phases de mêmes espèces ou d'espèces différentes. » (Shaykewich, 1995). Par exemple, le stade apparition de l'épi dépend de la température et de la photopériode. Cela peut faire l'objet d'une étude phénologique (Shaykewich, 1995).

Il est important de connaître et d'étudier la phénologie des cultures pour différentes raisons : elle peut servir de guide pour développer des variétés pour un environnement spécifique ou encore faciliter la planification de travaux agricoles comme la fertilisation, l'utilisation d'herbicides ou l'irrigation puisque ces opérations doivent être réalisées à un certain stade de développement de la culture (Shaykewich, 1995).

La modélisation de la phénologie se fait depuis de longues années. Très tôt, des scientifiques ont découvert que le développement des plantes n'était pas lié à un calendrier fixe mais plutôt à différentes variables environnementales comme la température de l'air ou la photopériode et à des caractéristiques concernant la culture (date de semis et propriétés génétiques de la plante) (Heurer, Heermann, Mckee, & Benci, 1978; Hodges & Doraiswamy, 1979; Jamieson, Brooking, Porter, & Wilson, 1995; Shaykewich, 1995). Les modèles phénologiques sont très souvent associés à des modèles de cultures utilisés comme outils d'aide à la décision (McMaster & Wilhelm, 2003).

Dans la partie suivante, nous allons réaliser un état de l'art des modèles de croissance des cultures créés au cours des différentes années. Dans un premier temps, nous parlerons du concept de degrés-jours pour ensuite aborder les modèles permettant la simulation de la croissance des feuilles sur base de cette notion. Nous terminerons cette partie par un point consacré à l'interaction du photopériodisme sur la croissance des plantes et l'intégration de ce paramètre dans les modèles.

2.2.2. Le concept de somme des températures (degrés-jours)

Reaumur en 1735 suggère pour la première fois une relation entre le taux de développement des cultures et la température. Le concept de l'unité « degré-jour » est alors défini et utilisé (Bonhomme, 2000; McMaster & Wilhelm, 1997; Ritchie & NeSmith, 1991). Il s'agit d'un cumul de températures qui permet de prédire le moment où un stade de développement important sera atteint. Pour ce faire, plusieurs méthodes de calcul existent (Lepage, Bourgeois, & Bélanger, 2012).

Cette approche est basée sur un principe physiologique : en dessous d'une certaine température (appelée température de base ou encore zéro de végétation), le développement de la plante ne se réalisera pas. Différentes températures de base sont alors déterminées selon les espèces. Pour le blé et l'orge, elle est estimée à 0 °C même si pour certains chercheurs, cette température de base peut avoir des valeurs différentes (Shaykewich, 1995). Pour d'autres plantes, par exemple le maïs ou le colza, celle-ci est estimée à 6 °C et pour la vigne à 10 °C (Traullé, n.d.).

En additionnant les valeurs quotidiennes de températures moyennes supérieures à cette température de base, nous obtenons un cumul de températures (Lepage et al., 2012).

Équation 5 (McMaster & Wilhelm, 1997)

$$DJ = \left[\frac{(T_{max} + T_{min})}{2} \right] - T_{base}$$

Tmax et Tmin : Température maximale et minimale quotidiennes (°C)

Tbase : Température de base (variant selon les espèces)

Le principal problème pour réaliser ce concept est la détermination de la température de base. Deux moyens peuvent être utilisés pour trouver cette valeur :

- Dans un environnement contrôlé, à une température et une photopériode constante, nous pouvons déterminer le meilleur taux de développement exprimé en fonction de la température et ainsi extrapolé pour trouver la température en dessous de laquelle le développement sera stoppé.
- La deuxième méthode se fait dans des conditions de terrain. La température ainsi que le développement de la plante sont mesurés sur plusieurs années et à différents endroits. Dès lors, les températures mesurées peuvent être utilisées pour déterminer la température de base (Shaykewich, 1995).

Pour calculer les degrés-jours, différentes difficultés peuvent être rencontrées. Si la température moyenne est en dessous de la température de base, nous considérerons que la température moyenne sera donc égale à la température de base (Heurer et al., 1978). Quand la température maximale dépasse un niveau qui est considéré comme optimum pour les plantes, le développement est considéré comme maximal. Mais cela surestime le développement puisqu'à des températures élevées, les plantes ne grandissent pas de la même manière qu'à une température optimum (Shaykewich, 1995). En effet, les plantes croissent de manière exponentielle jusqu'à une température considérée comme optimum pour le développement. Au-delà de cette température, la vitesse de croissance diminue.

Nuttonson (1955) pose la limite de l'équation de degrés-jours et démontre dans une étude que la somme des températures varie de site en site et donc que celle-ci est spécifique pour un site. Pour certains sites étudiés, le coefficient de variation atteignait des valeurs supérieures à 25% (Heurer et al., 1978). En 1960, Wang critique fortement ce système et particulièrement la valeur seuil utilisée. En effet, pour lui, la température de base varie en fonction du cycle de la plante. D'après d'autres études dont il s'est inspiré, différents facteurs agissent sur le développement des plantes comme le rayonnement, la durée d'exposition à la lumière, le vent et l'humidité. Utiliser uniquement la température comme moyen pour déterminer la croissance des végétaux est donc une manière simplifiée pour prédire la croissance des plantes (Heurer et al., 1978).

McMaster et Wilhelm (1997) mettent en évidence des problèmes liés à l'interprétation de l'équation de calcul des degrés-jours. En effet, il existe deux méthodes pour estimer le cumul thermique en fonction de comment la température de base est incorporée dans l'équation. La première méthode est celle décrite plus haut (si $T_{moy} < T_{base}$ alors $T_{moy} = T_{base}$). La seconde considère que si la température maximale (T_{max}) est inférieure à la température de base, alors $T_{max} = T_{base}$ et si la température minimale est inférieure à la température de base, nous considérerons que la $T_{min} = T_{base}$. La principale distinction qui existe entre les deux méthodes est donc la comparaison avec la température de base. Pour la méthode 1, celle-ci est réalisée après avoir calculé la moyenne tandis que pour la deuxième, les températures minimales et maximales sont d'abord comparées à la température de base avant de réaliser le calcul. Il est donc important de préciser comment le calcul a été réalisé car l'utilisation de l'une ou l'autre méthode peut amener à des résultats pouvant fortement varier (McMaster & Wilhelm, 1997).

Enfin, afin de calculer les degrés-jours, il est important de rester vigilant sur quelques points. Par exemple sur la qualité des appareils de mesure (même une petite dérive dans la mesure peut avoir des conséquences sur la qualité des données) ou encore sur le fait que la mesure de la température soit prise à proximité du site où les observations sont réalisées. De fait, une erreur pourrait être commise si les températures utilisées pour les études sont mesurées loin des sites et à des altitudes différentes (Bonhomme, 2000; Ritchie & NeSmith, 1991).

Malgré les différents aspects négatifs relevés pour cette notion de degrés-jours, elle reste tout de même un moyen simple et donnant des résultats satisfaisants pour déterminer la croissance des végétaux. Dans la partie suivante, nous allons expliquer comment cette unité est utilisée pour la simulation de la croissance des feuilles.

2.2.3. Simulation de la croissance des feuilles sur base des degrés-jours

Différents stades peuvent être simulés par les modèles (exemple la modélisation de la phase de semis-levée, modélisation de la germination, etc.) (Gate, 1995). Dans cette partie, nous nous concentrerons principalement sur la modélisation de la croissance des feuilles qui fera l'objet des recherches que nous avons menées dans cette étude.

La croissance des feuilles est un moyen facile pour déterminer le taux de développement des plantes. En effet, les mesures sont simples et non destructives. De plus, les plantes produisent des feuilles sur la tige principale à un taux qui peut être simulé. Ainsi, si ce taux d'apparence des feuilles est prévisible avec le nombre total de feuilles qui apparaîtront, il sera donc facile de prédire l'ontogenèse des plantes pendant la croissance végétative lorsque la température de la plante est connue (Ritchie & NeSmith, 1991).

Après la germination, le développement de la plante est contrôlé et peut être simulé grâce aux valeurs quotidiennes de température de l'air et au concept de degré-jour. L'équation suivante nous donne ce taux de développement (Angus, Machenzie, Morton, & Schafer, 1981) :

Équation 6

$$R_{dev, emerg} = (T_{ave} - T_{base}) \times 0.5 / \sum T [day^{-1}]$$

Dans celle-ci, $\sum T$ représente la somme des températures nécessaires pour l'émergence (en degré-jour) ; T_{ave} la température moyenne journalière et T_{base} la température de base, toutes deux exprimées en °C (Angus et al., 1981).

De nombreuses études ont démontré que pour le développement de chaque feuille, le même nombre de degrés-jours était nécessaire (Gate, 1995; Shaykewich, 1995). De nouveaux concepts apparaissent alors : le phyllochrone qui définit « le rythme d'apparition des feuilles devenues visibles à l'œil nu sur la plante » ou encore le phyllotherme, « durée exprimée en somme de températures séparant l'apparition de deux feuilles successives » (Gate, 1995).

Pour estimer le phyllotherme, nous utiliserons la pente de la droite de régression entre les valeurs moyennes des stades foliaires et la température cumulée en base 0 depuis la date de semis ou depuis la date de levée (Gate, 1995).

Différentes valeurs de phyllotherme ont été proposées dans des études. Kirby et al. (1985) ont montré que le nombre de feuilles sur la talle principale était une fonction linéaire des degrés-jours avec comme température de base 0 °C pour le blé et 1 °C pour l'orge. En comparant les taux de croissance estimés par les régressions linéaires, une différence a été trouvée entre les variétés et les dates de semis. Le phyllotherme retenu pour cette étude était de 100 degrés-jours (Kirby, Appleyard, & Fellowes, 1985).

Pour le modèle de Wang et Engel, un phyllotherme pour le blé de 125 degrés-jours est utilisé (Wang & Engel, 1998) alors que dans le modèle Proculture utilisé par l'UCL, la valeur de phyllotherme est de 130 degrés-jours quel que soit la variété et l'étage foliaire (M El Jarroudi et al., 2011).

Différents facteurs peuvent modifier la valeur du phyllotherme. L'hypothèse du changement de phyllotherme en fonction de la date de semis a été vérifiée par plusieurs études. En effet, des résultats variant de 75 à 140 °C pour le blé en prenant une température de base de 0°C ont été obtenus. Ainsi, en fonction de la date de semis (hiver ou printemps), le développement de la plante est différent, étant plus rapide pour les variétés semées au printemps (phyllotherme faible) que pour les variétés d'automne (Ritchie & NeSmith, 1991). El Jarroudi (2005) a montré que la valeur du phyllotherme était dépendante de la date de semis, mais aussi de la variété utilisée (tardive ou hâtive) et que cette valeur différait entre les trois dernières feuilles, les deux dernières nécessitant moins de degrés-jours pour leur croissance (entre 90 et 110 degrés-jours) (M. El Jarroudi, 2005).

2.2.4. L'intégration du photopériodisme dans les modèles de croissance

Le photopériodisme est un phénomène important qui « traduit l'influence de la durée du jour et de la nuit sur diverses réactions physiologiques » (Universalis, n.d.).

Garner et Allard (1920) sont les premiers à s'intéresser à l'impact du photopériodisme sur la croissance des plantes. Ils suggèrent que la formation de celles-ci requière un certain nombre d'heures de durée du jour ou d'obscurité avant que la phase de reproduction n'ait lieu. Ils définissent deux types de plantes : les plantes à « jour-long » et les plantes à « jour-court ». Sans les conditions de photopériode requises, les végétaux n'entreront pas dans leur cycle de reproduction (Heurer et al., 1978).

En 1964, Aspinall et Paleg ont étudié les effets d'une photopériode de 10 heures et 16 heures sur la croissance de l'orge (à une température constante de 20 °C). Ils ont conclu que le taux de croissance diminuait avec le temps et avec une moindre intensité lumineuse et photopériode. Une différence dans le nombre final de feuilles était également constatée. Kirby et Perry (1980) ont montré dans leur étude que le taux de changement de la photopériode affectait plus l'émergence des feuilles que la photopériode elle-même. Cao et Moss (1989) quant à eux ont démontré que l'augmentation de la photopériode contribuait à un taux d'émergence des feuilles plus important. Dans une autre étude, ils ont mis en relation l'apparition des feuilles avec trois températures différentes et 4 photopériodes. Il ressort de cette étude que l'augmentation de la photopériode et de la température a un effet positif sur le taux d'émergence des feuilles (Shaykewich, 1995).

Kirby et Perry (1987), dans une étude réalisée sur des champs d'essais en Australie, suggèrent que le phyllotherme est déterminé par la photopériode au moment de l'émergence de la semence. Selon eux, les dates de semis ou le changement dans la durée du jour pourraient être la raison des différences qu'ils obtiennent entre les champs d'essais. Ils ont également trouvé que le taux d'émergence des feuilles diminuait avec l'augmentation de la température (pour les semis tardifs), probablement à cause des températures moyennes journalières dépassant les 25 °C (Abichou, 2009).

L'interaction du photopériodisme dans la croissance des végétaux n'est donc plus à prouver. Dès lors, des scientifiques se sont penchés sur la question et des modèles prenant en compte ce paramètre ont été créés. En 1955, Nuttonson introduit le concept « d'unités photothermiques », obtenues en multipliant les sommes quotidiennes de degrés-jours par la durée du jour. Cette méthode offrait de meilleurs coefficients de variation que le concept simple de degrés-jours. Robertson (1968) fut un des pionniers dans la réalisation de modèles prenant en compte l'effet du photopériodisme. Dans ces équations, le taux de développement quotidien est dépendant de la température et de la photopériode. Angus et al. (1981) ont également suivi la logique de Robertson et ont multiplié la fonction des températures par la fonction de photopériode pour obtenir un taux de développement. Les erreurs de prédiction ne dépassaient pas 2.7 jours (Shaykewich, 1995).

2.3. La modélisation comme outil d'aide à la décision

Une décision peut être prise pour répondre à des types de questions différents. Il s'agit de questions à caractère tactique qui sont posées à court terme (par exemple comment atteindre des objectifs de production, quelle dose d'engrais apporter aux cultures à venir) ou de questions à caractère stratégique qui sont posées sur le long terme (exemple, quelle quantité d'azote est perdue par le système de cultures) (Dubrulle et al., 2014).

Face à ce système complexe et ces nombreuses interrogations, l'acteur doit pouvoir se référer à certains éléments d'information qui vont lui servir d'aide lors de la prise de décision. Ces outils peuvent avoir plusieurs formes : il peut s'agir de guides, de référentiels, de logiciels, de la mise en place de réseaux, de démarches d'accompagnement des agriculteurs dans leur réflexion par des techniciens, ... (Dubrulle et al., 2014)

Le schéma suivant (figure 11) reprend la façon dont les outils peuvent être utilisés. Ceux-ci sont créés après la conception et le développement de modèles par les scientifiques. Il est possible de les utiliser de deux manières : soit ils sont directement utilisés par l'agriculteur qui prend alors, en fonction de l'aide reçue par l'outil, une décision ; soit l'utilisateur direct est un acteur jouant un rôle de fournisseurs de services. Ceux-ci analysent et interprètent les résultats fournis par l'outil et donnent des conseils à l'agriculteur qui de toute manière reste le destinataire final (Dubrulle et al., 2014).

Les concepteurs d'un outil devront dès le départ connaître les utilisateurs directs, les destinataires finaux et leurs objectifs. En effet, cela leur permettra de définir correctement les caractéristiques opérationnelles de leur outil (Dubrulle et al., 2014).

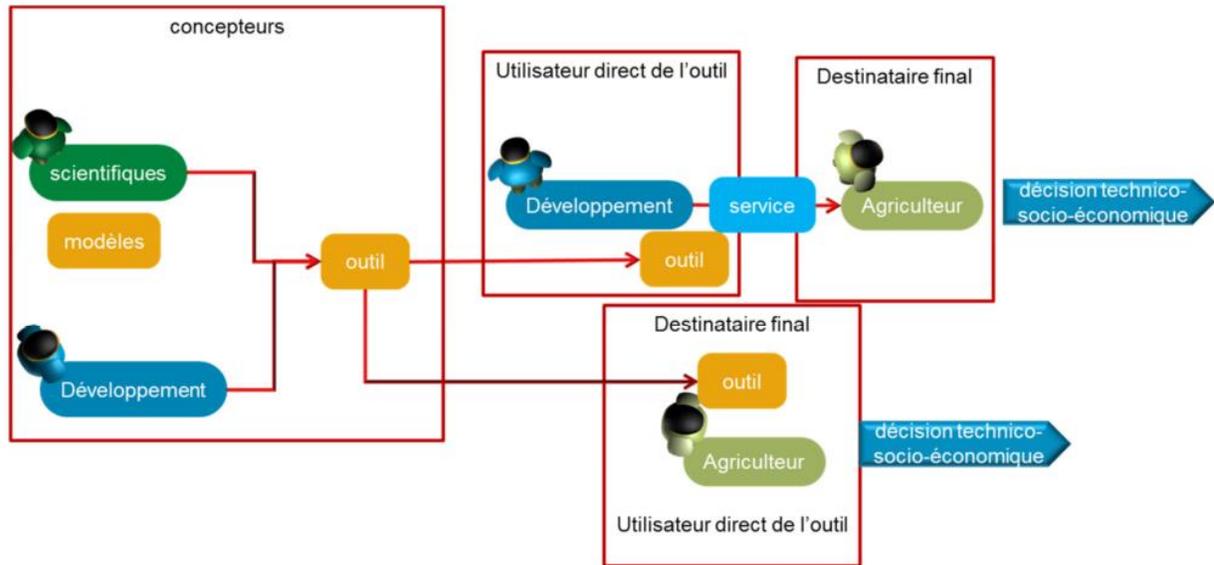


Figure 11 : Les outils d'aide à la décision, de la recherche aux agriculteurs (Dubrulle et al., 2014)

Depuis de nombreuses années, les modèles de culture sont développés par de nombreux scientifiques et sont devenus des outils indispensables pour les agriculteurs. Ils permettent notamment de comprendre et prédire le développement des cultures. Cela est essentiel afin d'optimiser des applications comme les traitements chimiques, les engrais ou encore l'irrigation (Bogard et al., 2015; M El Jarroudi et al., 2011; McMaster & Wilhelm, 2003).

La production de céréales de qualité avec un minimum d'intrants chimiques est devenue un des enjeux majeurs actuels de l'agriculture. Cela est bénéfique d'un point de vue économique (réduction du coût de l'application de pesticides) mais également d'un point de vue environnemental soumis aux fortes pressions de l'opinion publique. Il est donc intéressant de diminuer les doses de traitements appliquées sur les cultures sans pour autant augmenter les risques de dégâts causés par les maladies. Pour ce faire, il faudra trouver un juste milieu (M El Jarroudi et al., 2011).

Dans la partie suivante, nous allons présenter et développer les caractéristiques d'un outil d'aide à la décision (PhytoProTech) créé à la suite des travaux de M. El Jarroudi et la start-up AgrOptimize qui commercialise cet outil.

3. AgrOptimize et l'outil PhytoProTech

3.1. Présentation d'AgrOptimize

AgrOptimize est une spin-off universitaire créée suite aux travaux de M. El Jarroudi. Établie en mars 2016, sur base d'un partenariat entre la société française WANAKA, l'Université de Liège et le Luxembourg Institute of Science and Technology, cette start-up ambitionne de devenir un acteur majeur sur le marché européen en termes d'outils d'aide à la décision et d'outils d'aide à la précision pour l'agriculture. Cette société se veut être une plateforme collaborative entre ces principaux acteurs mais également avec des partenaires externes dans le but de développer et d'améliorer les produits qu'elle propose ("AGROPTIMIZE : nouvelle start-up transnationale de la «Smart Agriculture», 2016).

La figure 12 reprend un schéma organisationnel d'AgrOptimize.



Figure 12 : Organisation de la spin-off AgrOptimize (AgrOptimize, 2017)

Différents produits et activités sont proposés par cette société. Parmi ceux-ci, nous pouvons citer YPANEMA (Yield Prevision And NitrogEn Management) qui est un outil permettant la prévision de rendement et la gestion de la fumure azotée par satellite, le support de recherche et de développement pour différentes industries et pour des sociétés agricoles ou encore l'outil PhytoProTech qui fera l'objet du point suivant (AgrOptimize, 2017).

3.2. L'outil PhytoProTech

PhytoProTech est un outil d'aide à la décision pour la gestion phytosanitaire des grandes cultures pour lutter contre les maladies fongiques et les ravageurs du blé tendre d'hiver, de l'orge d'hiver et du colza. Différentes données agronomiques concernant la parcelle nécessaires à la simulation sont renseignées par l'agriculteur (comme la date de semis, la date à laquelle un stade de développement est atteint, des informations sur la fertilisation, etc.). Grâce à celles-ci, à des données météorologiques et à des modèles phénologiques et phytopathologiques, l'outil l'informer sur l'utilité d'appliquer ou non un traitement. Ceux-ci reçoivent alors des alertes par sms ou email lorsqu'une application sanitaire est conseillée. Ils peuvent également suivre sur une plateforme Web l'évolution des maladies en temps réel. Des ajustements concernant la phénologie sont prévus pour avoir un outil assez performant (AgrOptimize, 2017).

Différents modèles de maladies sont disponibles depuis cette année (ex : septoriose, fusariose, rouille brune et jaune pour le blé ; rouille naine, oïdium, rhynchosporiose pour l'orge) alors que d'autres sont en cours de développement, d'évaluation ou en phase de test pour différentes cultures comme l'orge de printemps ou le colza (AgrOptimize, 2017).

Parcelles					
Parcelle ↑	Maladies	Dernier Traitement	Action Conseillée	Actions	
Parcelle 1 - Exploitation 1 blé tendre d'hiver - Tobak	 C F H O P RB RJ S	Epannage de LIBRAX 1L/ha le 11/05/2016 pour une protection de 21jours	Aucune		
Parcelle 2 - Exploitation 1 Orge d'hiver - Étincel	 H O R RN	Epannage de VOXAN le 11/05/2016 pour une protection de 21jours	Aucune		
Parcelle 1 - Exploitation 2 Blé tendre d'hiver - Pakito	 C F H O P RB RJ S	--	Traiter		
Parcelle 2 - Exploitation 2 Blé tendre d'hiver - Boregar	 C F H O P RB RJ S	Epannage de Helocur 0.8L le 24/05/2016 pour une protection de 12jours	Surveiller		

C= Cécidomyie Orange / F = Fusariose / H = Helminthosporiose / O = Oïdium / P = Piétin verse /
 RB = Rouille Brune / RJ = Rouille Jaune / S = Septoriose

 Absence de risque
  Prémédité
  À traiter (aucun produit disponible)
  À surveiller (aucun produit non attendu)

Figure 13 : Tableau de bord de l'outil PhytoProTech (WANAKA, n.d.)

L'outil a été testé sur une période de 10 années (2003 à 2012) sur des placettes réparties sur quatre sites au Grand-Duché de Luxembourg (Everlange, Reuler, Christnach et Burmerange). Il s'est avéré avantageux en termes économique et environnemental pour 32 situations (sur 40). Une phase pilote a été également réalisée pour les années 2015 et 2016 dans trois pays (Belgique, France et Grand-Duché de Luxembourg) sur des cultures d'orge d'hiver et de blé tendre. Des gains moyens par hectare à hauteur de 14€ ont été obtenus (AgrOptimize, 2017).

Malgré les performances, des décalages phénologiques ont été observés. C'est pourquoi, ce travail s'inscrit dans une optique d'amélioration des modèles phénologiques. L'objectif premier a donc été l'ajustement des valeurs de phyllotherme utilisées pour les modèles (130 degrés-jours quelle que soit la variété ou la culture).

DEUXIÈME PARTIE

1. Matériels et méthodes

1.1. Choix et localisation des sites d'étude

Les sites d'études se situent en quatre endroits au Grand-Duché de Luxembourg (Everlange, Burmerange, Reuler et Christnach/Bettendorf). Les caractéristiques climatiques de ces quatre sites sont donc différentes. Les champs d'essais ont été déterminés en collaboration avec le Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) et les agriculteurs. Ces différentes parcelles servent également à réaliser d'autres études concernant les maladies du blé et de l'orge.

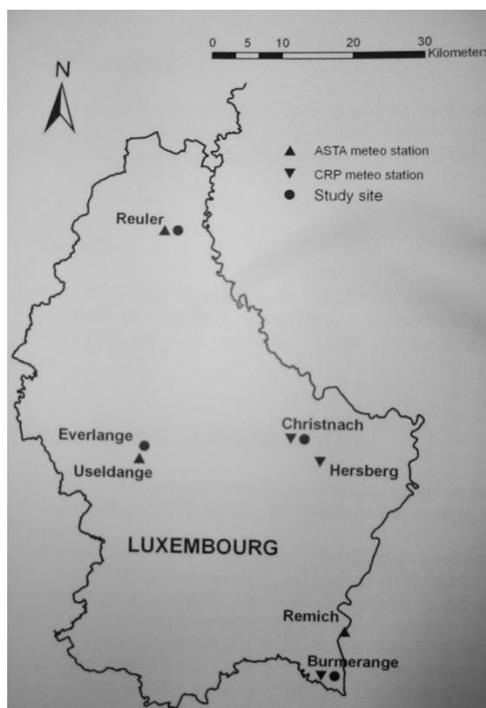


Figure 14 : Localisation des sites d'étude (Jacquemin, 2010)

- Everlange

Le site d'Everlange se situe dans la partie Ouest du Luxembourg. En 2012, le suivi phénologique s'est réalisé sur deux variétés de blé et d'orge.

- Burmerange

Situé au Sud du Luxembourg près de la frontière française, il fait partie du canton de Remich.

- Christnach/Bettendorf

Les sites de Christnach et Bettendorf sont localisés dans la partie Est et constituent la station la plus importante. En effet, pour l'année 2014 et 2017, deux variétés de blé ont été semées.

- Reuler

Le dernier site, au Nord du Luxembourg, a le climat le plus rude de toutes les stations comme nous allons le constater dans la partie suivante.

1.2. Caractéristiques météorologiques

Le climat luxembourgeois est caractérisé par des précipitations totales mensuelles réparties sur toute l'année de manière plutôt régulière. Elles sont comprises entre environ 50 et 80 mm. La quantité annuelle de précipitations est en moyenne de 795 mm. Les températures moyennes mensuelles se situent entre 2.3°C pour le mois de janvier et 19.2°C pour le mois de juillet. La température moyenne annuelle est égale à 10.5°C. Ces valeurs ont été obtenues en calculant les moyennes de 2000 à 2016 à Luxembourg-ville ("Statistiques // Luxembourg - Accueil," n.d.).

Cependant des différences dans les températures moyennes et précipitations totales sont à prendre en considération en fonction de la région dans laquelle nous nous trouvons. Comme nous pouvons le remarquer sur la figure 16, des températures moyennes annuelles ne dépassant pas 8°C sont enregistrées dans le Nord du pays alors qu'au Sud-Est, celles-ci dépassent 9°C. Les précipitations totales diffèrent également. À l'Ouest du pays, la quantité de pluie annuelle est plus importante (de 900 à 1000 mm) alors qu'au centre et à l'Est, ces valeurs ne dépassent pas les 800 mm (Ministère de l'Agriculture, de la Viticulture et la Protection des consommateurs, 2015).

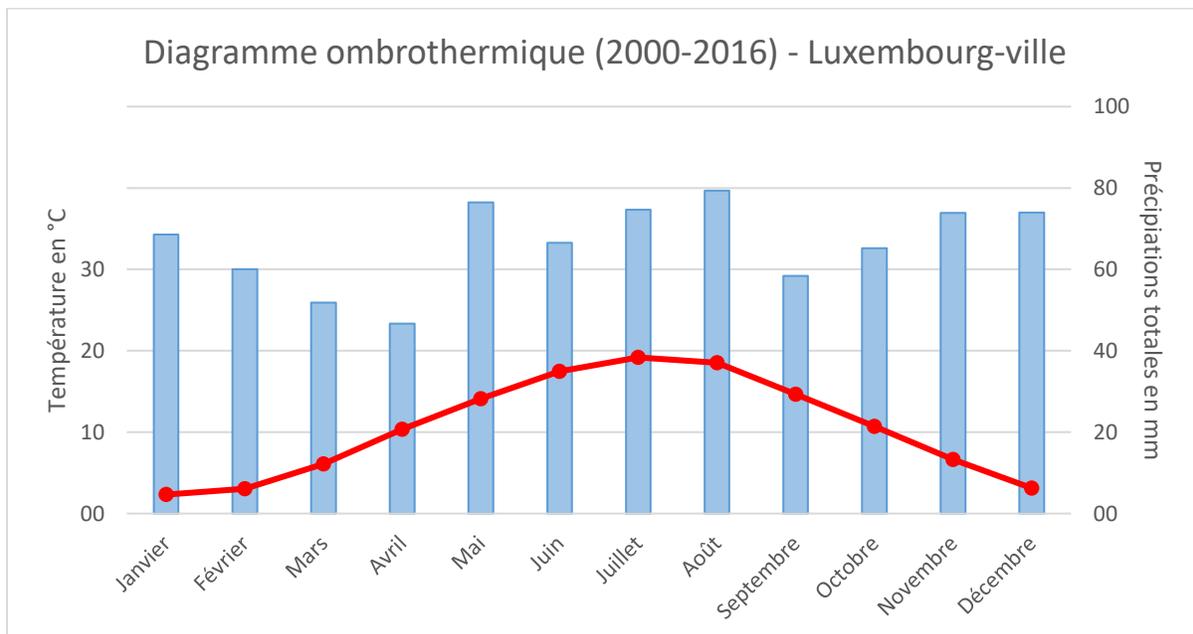


Figure 15 : Diagramme ombrothermique de 2010 à 2016 à Luxembourg-ville ("Statistiques // Luxembourg - Accueil," n.d.)

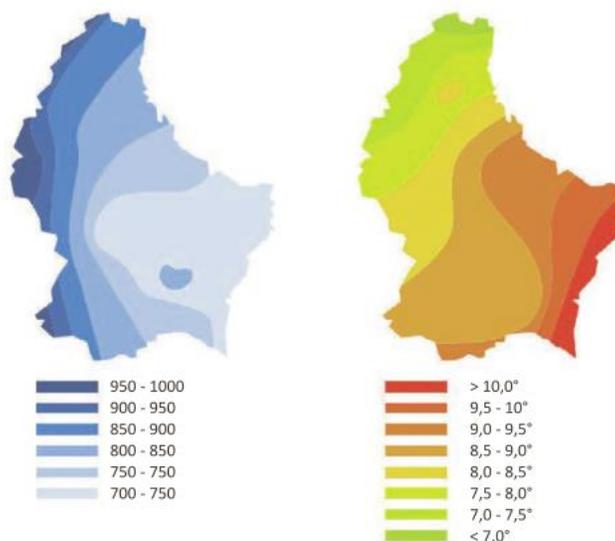


Figure 16 : Variation précipitations totales (en mm) et températures moyennes (en °C) au Luxembourg (moyennes sur 30 ans) (Ministère de l'Agriculture, de la Viticulture et la Protection des consommateurs, 2015)

1.3. Suivi phénologique

Notre étude s'est portée sur le suivi phénologique du blé et de l'orge ainsi que le calcul de la valeur de phyllotherme nécessaire au développement des feuilles. Des données de quatre années ont été utilisées. Les données de 2012 à 2014 nous ont permis de réaliser nos calculs afin de trouver le meilleur phyllotherme. Les observations réalisées cette année nous permettront de valider ou invalider les résultats obtenus.

Le suivi phénologique des cultures (formation des feuilles) a été réalisé chaque semaine d'avril à début juin (tableau 1). Le début de la campagne a commencé lorsque les céréales ont atteint le stade de développement plein tallage.

	2012	2013	2014	2017
1	23-04-12	29-04-13	14-04-14	18-04-17
2	30-04-12	06-05-13	22-04-14	24-04-17
3	07-05-12	13-05-13	28-04-14	02-05-17
4	14-05-12	21-05-13	05-05-14	08-05-17
5	21-05-12	27-05-13	12-05-14	15-05-17
6	29-05-12	03-06-13	19-05-14	22-05-17
7	04-06-12	10-06-13	26-05-14	29-05-17
8	/	17-06-13	02-06-14	06-06-17
9	/	/	10-06-14	...

Tableau 1 : Dates des observations de terrain (pour les années de 2012 à 2014 et 2017)

La première étape a été la délimitation des parcelles d'essais sur les champs. Quatre parcelles de 8 mètres de longueur et 1.5 mètre de largeur ont été utilisées pour réaliser le suivi phénologique. Celui-ci a été effectué dans les parcelles d'essais nommées control. Les autres parcelles d'essais n'ont pas été suivies pour cette étude, elles sont utilisées pour le monitoring des maladies.

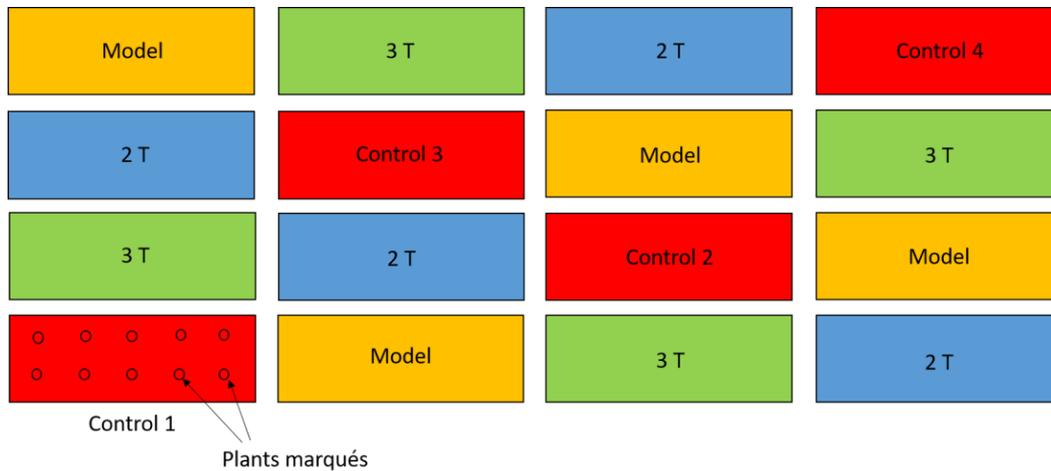


Figure 17 : Schéma parcelles pour le suivi phénologique du blé



Figure 18 : Site d'étude (blé) de Bettendorf

Dans chaque parcelle (control), nous avons procédé à un échantillonnage aléatoire pour avoir 10 plantes. Au total, 40 talles ont donc été marquées (à l'aide d'un colson) et suivies afin de connaître le pourcentage exact de formation des 5 dernières feuilles. Celui-ci est déterminé en comparant la feuille en formation à la précédente entièrement formée.



Figure 19 : Control 1, site de Reuler



Figure 20 : Talle marquée pour le suivi phénologique

Pendant les observations sur le terrain, les stades phénologiques ont été relevés en fonction de l'échelle de Zadoks.

1.4. Informations sur la base de données

1.4.1. Données sur la phénologie

Les données utilisées pour réaliser nos analyses s'étendent sur trois années d'observation (de 2012 à 2014). Elles ont été acquises selon la méthodologie expliquée au point précédent. Celles-ci ont été complétées par le suivi phénologique réalisé cette année.

Les tableaux suivants reprennent la liste des variétés testées par année ainsi que les dates de semis.

Site	2012		2013		2014		2017	
	Variété	Date de semis	Variété	Date de semis	Variété	Date de semis	Variété	Date de semis
Everlange	Achat	18-10-11	Achat	18-10-12	Privileg	03-10-13	Manitou	13-10-16
	Cubus	19-10-11						
Burmerange	Cubus	14-10-11	Kerubino	12-10-12	JB Asano	03-10-13	Kerubino	17-10-16
Christnach/ Bettendorf	Matrix	07-10-11	Orcas	12-10-12	Achat	09-10-13	Achat	12-10-16
					Kerubino	09-10-13	Kerubino	12-10-16
Reuler	Arktis	20-10-11	Kerubino	30-10-12	Kerubino	09-10-13	Kerubino	03-10-16

Tableau 2: Données agronomiques concernant les sites d'essais de blé

Site	2012		2013		2014		2017	
	Variété	Date de semis	Variété	Date de semis	Variété	Date de semis	Variété	Date de semis
Everlange	KWS Cassia	02-10-11	Leibniz	02-10-12	Meridian	29-09-13	Tamina	29-09-16
	Leibniz	02-10-11						
Burmerange	Campanile	25-09-11	Campanile	09-10-12	Sandra	27-09-13	Wotan	15-10-16
Christnach/ Bettendorf	Anisette	25-10-11	Anisette	01-10-12	Leibniz	02-10-13	California	30-09-16
Reuler	Campanile	19-10-11	/	/	California	18-10-13	California	22-09-16

Tableau 3 : Données agronomiques concernant les sites d'essais d'orge

La première étape de l'analyse a été l'encodage des données de 2012 à 2014. En effet, celles-ci étaient sous format papier.

1.4.2. Données météorologiques

Les relevés météorologiques proviennent de 4 stations gérées et entretenues par l'Administration des Services Techniques de l'Agriculture (ASTA) du Luxembourg (Reuler, Useldange, Christnach et Oberkorn). Des données concernant la température moyenne, l'humidité relative et les précipitations sont disponibles à un pas de temps horaire à partir du 1^{er} octobre de l'année de semis. Pour ce travail, seules les températures ont été utilisées afin de calculer la somme des degrés-jours en base zéro.

1.5. Analyse des données

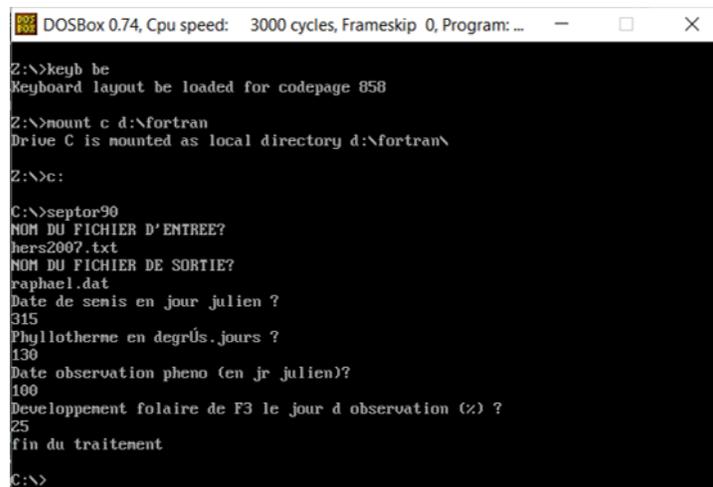
Différentes analyses ont été effectuées. Celles-ci vont être détaillées dans les chapitres suivants.

1.5.1. Préparation des données

En premier lieu, des tableaux reprenant le pourcentage de formation des 5 dernières feuilles par date d'observation ont été créés. Grâce à ceux-ci, nous avons pu calculer les moyennes ainsi que les écarts-types qui nous serviront pour nos analyses. Ces fichiers nous ont également permis de réaliser les graphiques afin de comparer les données acquises de 2012 à 2014.

1.5.2. Scénarios pour plusieurs phyllothermes (blé)

Afin de déterminer le meilleur phyllotherme, différents scénarios ont été imaginés. Cinq valeurs de phyllotherme ont été déterminées (100, 117, 130, 150 et 170 degrés-jours). La formation des 5 dernières feuilles a été simulée avec ces phyllothermes grâce à un logiciel de simulation (Septor). En entrant les degrés-jours journaliers, la date de semis et le pourcentage de formation de la feuille 3 (antépénultième feuille à se former) observé, le programme calcule le pourcentage de formation des dernières feuilles en fonction du phyllotherme défini.



```
DOSBox 0.74, Cpu speed: 3000 cycles, Frameskip 0, Program: ...
Z:\>keyb be
Keyboard layout be loaded for codepage 858
Z:\>mount c d:\fortran
Drive C is mounted as local directory d:\fortran\
Z:\>c:
C:\>septor90
NOM DU FICHIER D'ENTREE?
hers2007.txt
NOM DU FICHIER DE SORTIE?
raphael.dat
Date de semis en jour julien ?
315
Phyllotherme en degrés.jours ?
130
Date observation pheno (en jr julien)?
190
Developpement foliaire de F3 le jour d observation (%) ?
25
Fin du traitement
C:\>
```

Figure 21 : Interface logiciel Septor (Tychon, communication personnelle)

Les résultats ont été traités sous forme de graphiques. Les valeurs moyennes observées ont été ajoutées à ceux-ci afin d'avoir un aperçu de la tendance. Des coefficients de détermination ont été calculés à partir des relations entre les valeurs observées et les valeurs simulées pour chaque date lors de laquelle les données de terrain ont été acquises. Cela a été effectué pour chaque feuille et chaque phyllotherme afin de définir la meilleure somme des degrés-jours à retenir.

Cette analyse a été réalisée uniquement pour le blé. Seuls les résultats des deux dernières feuilles ont été utilisés. En effet, la simulation étant établie sur le pourcentage moyen de formation de la F3, les coefficients de détermination calculés pour cette feuille sont faussés. De plus, pour les trois années d'observations, les journées de terrain ont débuté lorsque celle-ci était en formation. Le nombre de données est insuffisant pour tirer des conclusions.

1.5.3. Calcul du phyllotherme à partir de droites de régression

La deuxième partie de l'analyse concernera le calcul de la somme des degrés-jours nécessaire à la formation d'une feuille à partir de droites de régression et de l'équation de ces droites. Cette méthode a été utilisée par Kirby et al. en 1985 (Kirby et al., 1985).

Pour cette partie, nous avons repris les moyennes des observations des années 2012 à 2014 pour les 5 dernières feuilles. Nous avons comparé ces valeurs entre elles et tracé la droite de régression qui nous renseignera sur la somme des degrés-jours en base zéro nécessaire à la formation des feuilles.

1.5.4. Variation du phyllotherme au sein d'une même population

Comme vous pourrez le constater, les résultats obtenus sont très différents les uns des autres. En effet, nous nous sommes très vite rendus compte que des erreurs existaient dans les observations moyennes. C'est pourquoi, nous avons repris une analyse réalisée sur deux variétés de blé (Flair et Dream) à deux endroits différents (Christnach et Everlange) pour l'année 2001. Lors de cette année, des différences importantes ont été trouvées dans la phénologie.

La méthode est celle utilisée dans la thèse de M. El Jarroudi (M. El Jarroudi, 2005). Les résultats nous permettront de nous rendre compte de l'hétérogénéité des données et un calcul de phyllotherme moyen basé sur les fréquences des feuilles émergées sera proposé.

1.5.5. Analyse des données de 2017

Enfin, la dernière partie de ces analyses sera consacrée aux données récoltées cette année. Une simulation basée sur un phyllotherme de 130 degrés-jours a été établie (sur base des observations moyennes de la F3). Les observations moyennes de pourcentage de formation ont été comparées avec les résultats de la simulation.

2. Résultats et discussions

Dans cette partie, nous allons reprendre les résultats des différentes analyses que nous avons effectuées dans ce travail et discuter sur ceux-ci. La première partie de ce chapitre sera consacrée à l'analyse des observations des années 2012 à 2014.

2.1. Comparaison des observations de 2012 à 2014

2.1.1. Blé

Nous avons repris dans les graphiques (figure 22) les observations des pourcentages de formation des trois dernières feuilles pour les années 2012, 2013 et 2014. Les moyennes et écarts-types de ces pourcentages ont été mis en relation avec la somme des degrés-jours en base zéro que la plante a reçu depuis sa date de semis. L'ensemble des données est repris à l'annexe I.

Une première constatation est faite concernant la date de semis. Celle-ci jouerait un rôle dans le phyllotherme nécessaire. En effet, en 2012, le blé a été semé à des dates différentes sur les sites : le 7 octobre à Christnach, le 14 octobre à Burmerange, le 18 octobre à Everlange et le 20 octobre à Reuler. Ces dates sont essentielles car elles permettent de renseigner sur la différence qui existe entre les sites. Celle-ci est d'ailleurs très marquée en fonction de ceux-ci. Par exemple, à Reuler, lors de la première journée d'observations, les plantes n'avaient reçu qu'environ 800 degrés-jours alors qu'à Everlange et Burmerange, une somme de 980 à 1000 degrés-jours était enregistrée. Cependant, en comparant les moyennes des pourcentages de formation de la F3, nous nous rendons compte que peu de différences existent entre ces sites. C'est pourquoi, cette considération prouve qu'une variété semée tardivement aura besoin de moins de degrés-jours pour réaliser sa croissance. Cela se remarque également pour la formation complète des feuilles. Le site de Reuler est en avance lorsqu'on compare la somme des degrés-jours par rapport aux autres sites.

Cette affirmation est vérifiée par les observations de l'année 2013 et 2014. En effet, en 2013, la date de semis pour le site de Reuler était très tardive (30 octobre) en comparaison avec les autres sites (18 octobre pour Everlange et 12 octobre pour Burmerange et Christnach). Les observations ont montré que la somme des degrés-jours était plus faible pour la formation du blé à Reuler que pour les autres sites. En 2014, les sites de Reuler et Everlange (date de semis 9 octobre et 3 octobre) présentaient une somme de degrés-jours nécessaire pour la formation des feuilles inférieures aux sites de Burmerange et de Bettendorf (date de semis 3 octobre et 9 octobre). Seulement six jours séparent les semis, pourtant nous constatons une différence entre ces sites. Pour Everlange, la formation est plus rapide par rapport à Reuler, alors que la date de semis est plus tardive. Cela suppose que la variété joue également un rôle dans la somme de degrés-jours nécessaire à la formation des feuilles.

Effectivement, plusieurs variétés ont été testées pendant ces trois années d'observations. Des différences semblent se créer parmi celles-ci. Toutefois, nous nous pencherons sur cette problématique plus tard dans ce travail.

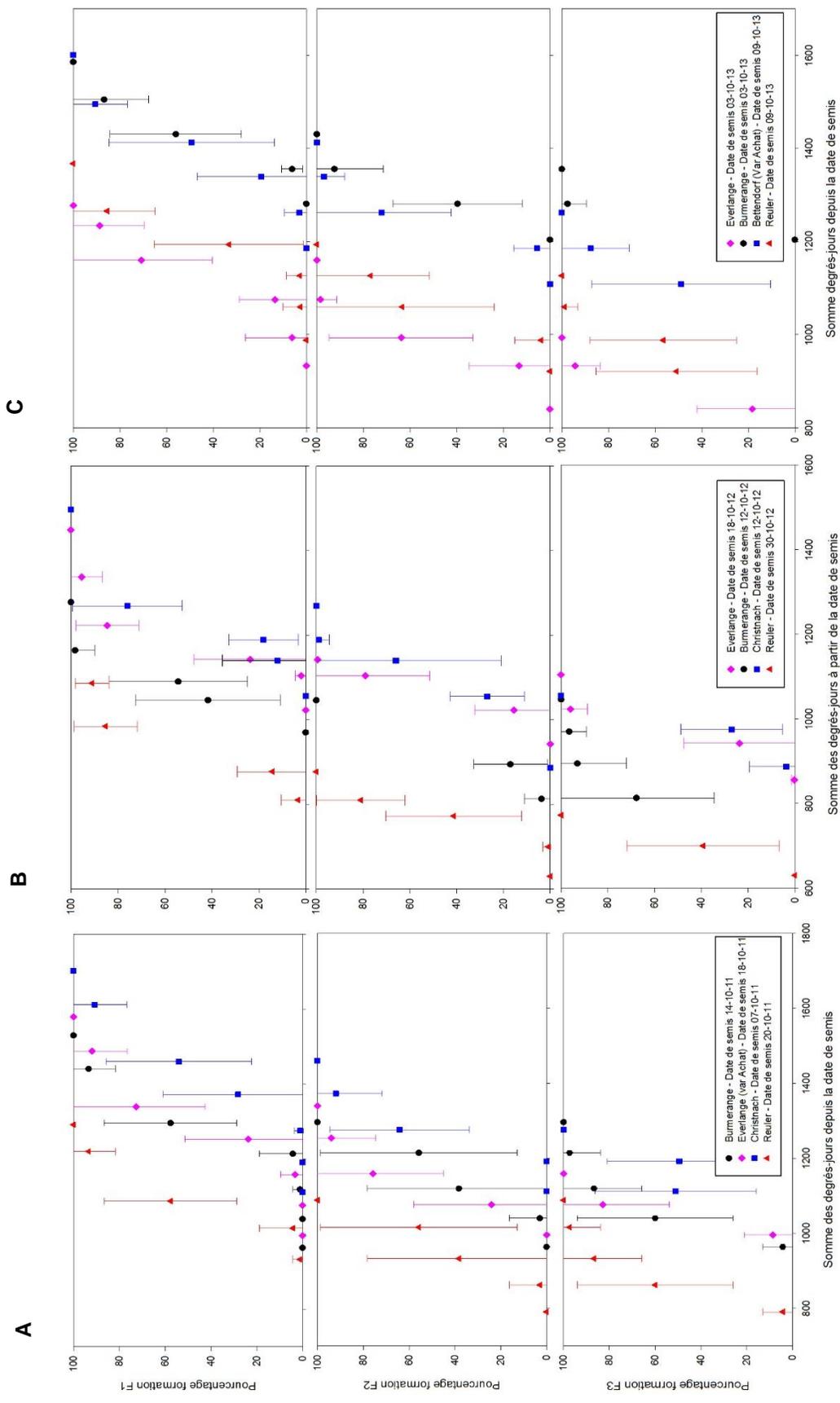


Figure 22 : Observations de la formation des trois dernières feuilles du blé en fonction de la somme des degrés-jours depuis la date de semis. A : 2012, B : 2013 et C : 2014

2.1.2. Orge

La figure 23 reprend les observations moyennes ainsi que les écarts-types pour les données concernant l'orge de 2012 à 2014. L'ensemble de ces données peut être consulté à l'annexe I. Ces pourcentages sont mis en relation avec la somme des degrés-jours accumulée depuis la date de semis. Cependant, pour certains sites, lorsque l'orge était semée avant le 1^{er} octobre, la somme des degrés-jours n'a pas pu être calculée à partir de la date de semis. C'est pourquoi, elle est calculée à partir du 1^{er} octobre.

En 2012, différentes erreurs sont à constater dans les observations moyennes. En effet, pour plusieurs sites, les moyennes diminuent d'une date à l'autre. Cela est impossible et est dû à des erreurs commises lors de l'estimation des pourcentages moyens de formation sur le terrain. De plus, pour le site de Burmerange, une moyenne de 60 % de formation de la F3 était trouvée après que les plantes aient reçu une somme de températures d'à peu près 1100 degrés-jours. Or, la F2 était formée en moyenne à 50 % et la F1 à 20 %. Les écarts-types sont assez importants pour ces observations.

En comparant les 3 variétés semées en octobre (à Everlange le 2 octobre, à Reuler le 19 octobre et à Burmerange le 25 octobre), nous pouvons nous rendre compte de la différence dans les sommes de degrés-jours accumulées depuis les dates de semis. À Reuler, la F2 est entièrement formée après avoir reçu 1020 degrés-jours. Pourtant, à Christnach et à Everlange, cette feuille est développée après 1320 et 1440 degrés-jours.

La formation de la F1 est particulièrement longue sur tous les sites d'après les résultats obtenus. Celle-ci aurait besoin de plus de 300 degrés-jours pour certains sites. Ces valeurs sont très élevées.

En 2013, le suivi phénologique a été réalisé sur trois des quatre sites. En effet, le site de Reuler n'a pas été utilisé. Des erreurs dans les observations ont également été commises. C'est le cas pour le site de Burmerange.

À Everlange et Christnach, les dates de semis se suivent d'un jour. Les résultats obtenus pour ces deux sites sont assez similaires au niveau des pourcentages moyens et de la somme des températures accumulées. Le semis de l'orge a été plus tardif à Burmerange, néanmoins lorsqu'on compare la somme des degrés-jours, la formation des feuilles est en avance par rapport aux autres sites.

Enfin, l'année 2014 est marquée par un jeu de données plus faible que celui des années précédentes. En effet, lors des premières observations de terrain, la majorité des F3 et des F2 étaient déjà formées. De nouveau, des erreurs sont à constater dans les observations moyennes notamment pour le site de Burmerange.

À Reuler, où le semis a été réalisé tardivement par rapport aux autres sites (le 16 octobre), les dernières feuilles pointantes sont formées après 1000 degrés-jours alors qu'à Burmerange (date de semis le 2 octobre), ce n'est qu'après 1400 degrés-jours que le développement est complet.

Cette première analyse a permis de mettre en avant les observations moyennes et l'hétérogénéité de celles-ci pour l'orge de 2012 à 2014. Pour chaque année, des erreurs ont été détectées dans les pourcentages de formation ce qui rendra compliqué les analyses suivantes en termes d'interprétation. Les données sont moins nombreuses que pour le blé. En effet, les observations sur le terrain ont été réalisées aux mêmes dates or l'orge a un développement plus précoce que le blé.

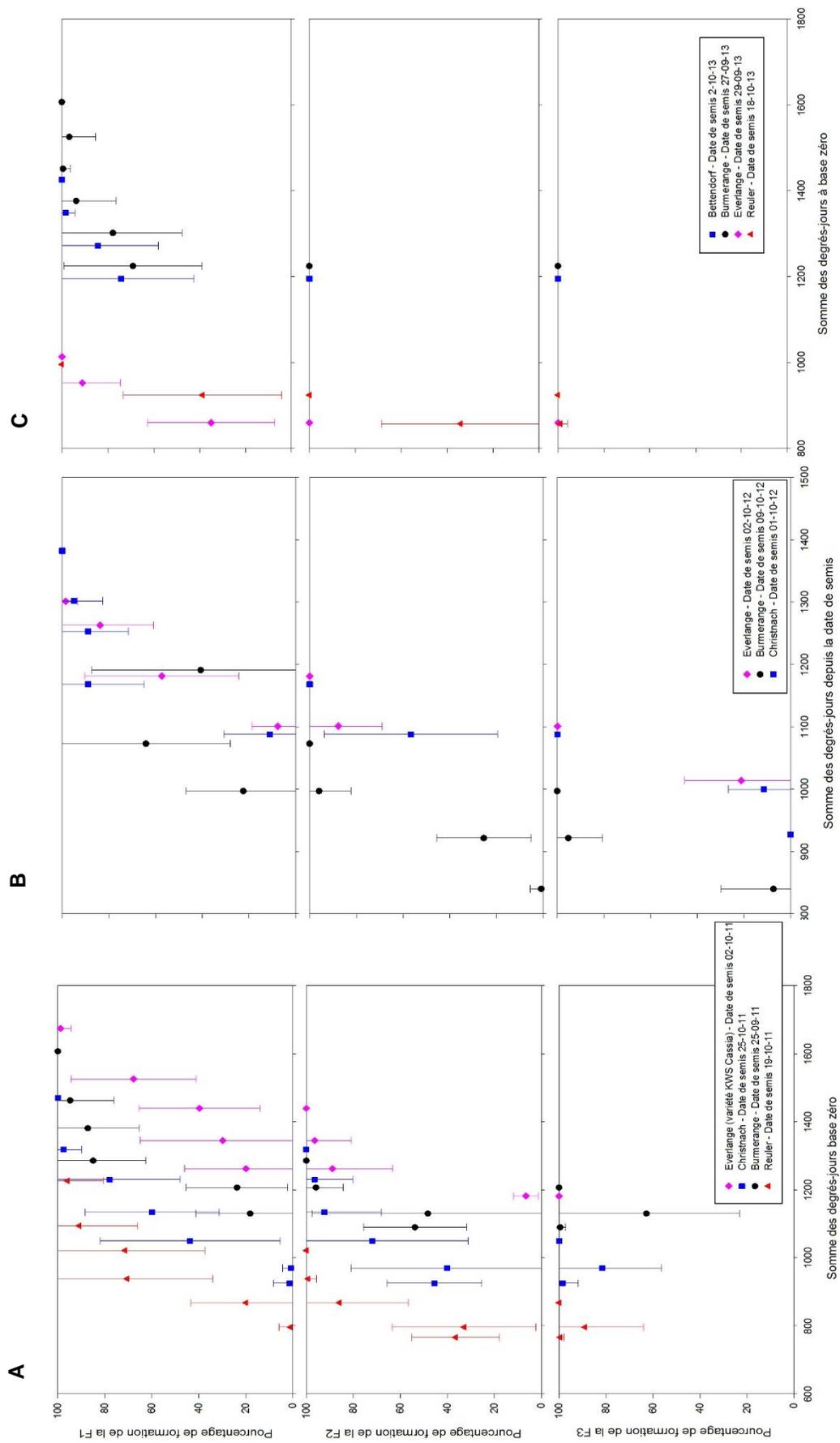


Figure 23 : Observations de la formation des dernières feuilles de l'orge en fonction de la somme des degrés-jours de base 0 : A : 2012, B : 2013 et C : 2014

2.2. Simulations de phyllotherme

Dans cette partie, les résultats des simulations de phyllotherme pour le blé seront repris par année et par site car la variabilité de ceux-ci est assez importante. Nous terminerons cette analyse par une synthèse.

2.2.1. Année 2012

2.2.1.1. Everlange

A Everlange, deux variétés ont été testées : Cubus et Achat. Le pourcentage moyen de formation de la F3 retenu pour la simulation est de 9 % pour la variété Achat et 27 % pour la variété Cubus. Ces pourcentages ont été observés lors de la première campagne à savoir le 23 avril 2012.

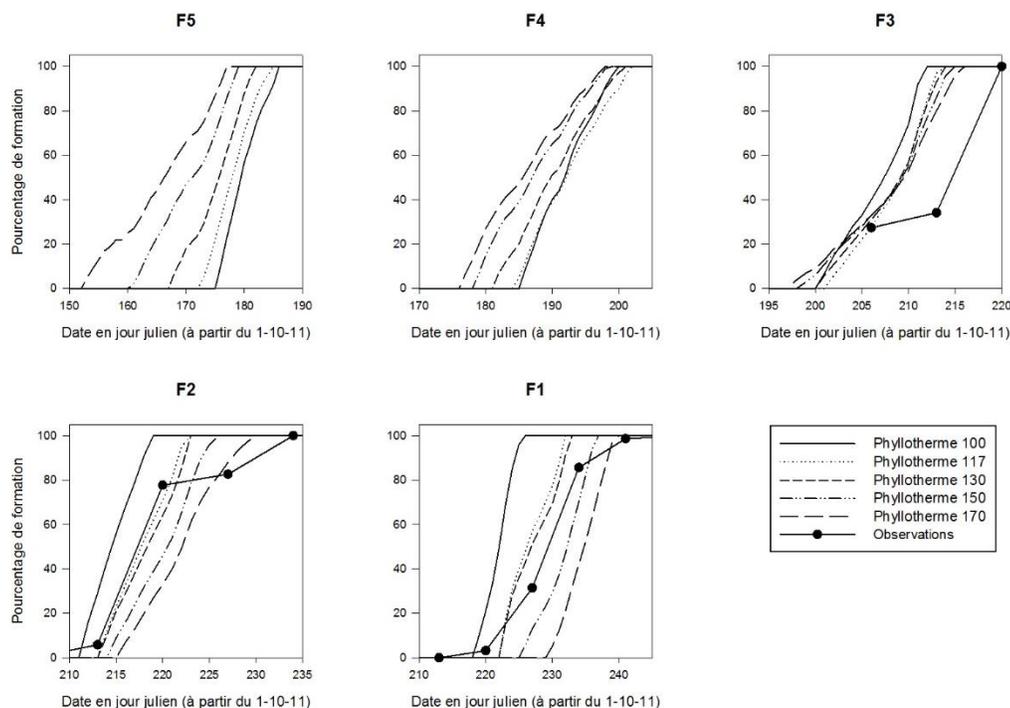


Figure 24 : Simulations vs observations à Everlange (variété Cubus) en 2012

La figure 24 nous renseigne sur les simulations des pourcentages de formation des 5 dernières feuilles en fonction de la somme des degrés-jours définies ainsi que les valeurs moyennes observées à Everlange pour la variété Cubus. Nous pouvons remarquer une tendance pour les deux dernières feuilles. Au début de sa formation, la F2 semble suivre la courbe du phyllotherme 117. Cependant, la formation complète est plus tardive que celle définie par la simulation. En fonction des valeurs moyennes des observations, la dernière feuille pointante aurait un phyllotherme compris entre 130 et 150 degrés-jours.

Cette tendance semble se confirmer grâce aux résultats obtenus pour les coefficients de détermination qui sont repris dans les tableaux suivants.

<i>Everlange- Cubus</i>	<i>FF3</i>	<i>FF2</i>	<i>FF1</i>
100	0.474	0.935	0.758
117	0.515	0.974	0.927
130	0.575	0.962	0.971
150	0.68	0.907	0.97
170	0.761	0.869	0.853

Tableau 4 : Coefficients de détermination - Everlange variété Cubus (2012)

<i>Everlange- Achat</i>	<i>FF3</i>	<i>FF2</i>	<i>FF1</i>
100	0.965	0.879	0.739
117	1	0.527	0.956
130	0.985	0.794	0.985
150	0.964	0.767	0.939
170	0.929	0.742	0.805

Tableau 5 : Coefficients de détermination - Everlange variété Achat (2012)

D'après les valeurs des coefficients de détermination, nous pouvons remarquer que le phyllotherme est différent pour chaque feuille. Pour la variété Cubus, il serait compris entre 117 et 130 pour la F2 et entre 130 et 150 pour la F1. En ce qui concerne la variété Achat, un phyllotherme de 100 pour la F2 semble être suggéré tandis que la F1 aurait besoin d'une somme de degrés-jours comprise entre 117 et 130 pour se former.

2.2.1.2. Burmerange

À Burmerange, le suivi phénologique a été réalisé sur la variété Cubus. D'après les observations du 23 avril 2012, la F3 était formée à 38 % en moyenne.

Les résultats pour les coefficients de détermination calculés en mettant en relation les valeurs obtenues grâce aux simulations et les pourcentages moyens de formation des feuilles nous donnent un phyllotherme de 130 degrés-jours pour les deux dernières feuilles. Cependant, des résultats assez élevés et proches des précédents sont obtenus pour le phyllotherme 150 (0.988 pour la F2 et 0.975 pour la F1). Le phyllotherme idéal serait donc compris entre 130 et 150 degrés-jours en base zéro.

<i>Burmerange</i>	<i>FF3</i>	<i>FF2</i>	<i>FF1</i>
100	0.913	0.903	0.807
117	0.916	0.938	0.899
130	0.916	0.996	0.983
150	0.965	0.988	0.975
170	0.997	0.961	0.837

Tableau 6 : Coefficients de détermination – Burmerange (2012)

2.2.1.3. Christnach

En 2012, la variété Matrix a été testée à Christnach. La F3 était en moyenne formée à 51% le 23 avril. Il est important de signaler que la moyenne obtenue pour les observations le 30 avril était inférieure à la formation moyenne de la semaine précédente. C'est pourquoi, les coefficients de détermination sont très faibles pour la troisième feuille.

Un phyllotherme de 150 est suggéré pour la formation de la F2 (coefficient de détermination de 0.992) et une somme de degrés-jours de 170 pour la F1 semble nécessaire. Ces valeurs sont très élevées si nous comparons aux différentes études. Il peut donc s'agir d'une erreur dans le pourcentage utilisé pour la simulation.

<i>Christnach</i>	<i>FF3</i>	<i>FF2</i>	<i>FF1</i>
100	0.397	0.806	0.638
117	0.397	0.905	0.781
130	0.397	0.863	0.782
150	0.397	0.992	0.929
170	0.397	0.987	0.976

Tableau 7 : Coefficients de détermination - Christnach (2012)

2.2.1.4. Reuler

En 2012, l'étude de la phénologie a été effectuée sur la variété Arktis. Le 23 avril, la F3 était formée en moyenne à 4 %. Cette valeur a été utilisée pour simuler la formation des feuilles en fonction des cinq valeurs de phyllothermes.

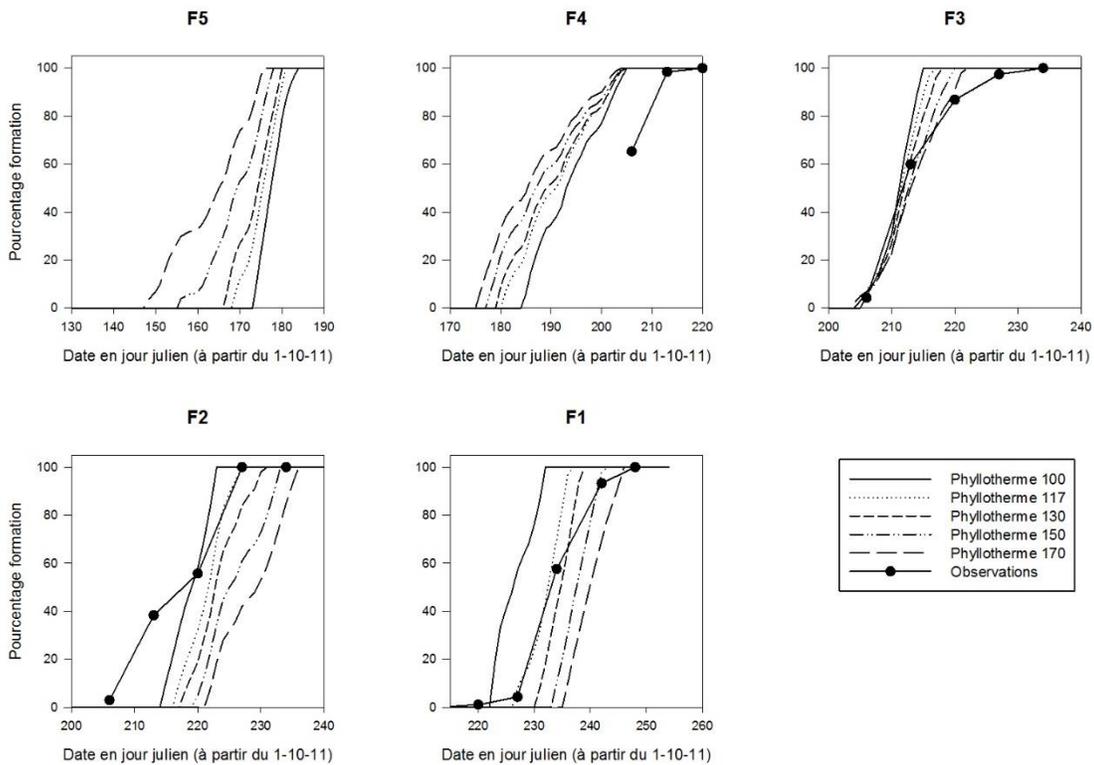


Figure 25 : Simulations vs observations à Reuler en 2012

D'après les graphiques (figure 25), nous pouvons constater que la formation de la F2 aurait besoin d'un phyllotherme inférieur à 130. Cependant les coefficients de détermination semblent suggérer le contraire. En effet, le résultat le plus élevé est obtenu pour le phyllotherme 150 (0.934). Le phyllotherme 130 a le deuxième score le plus élevé (0.919). La somme des degrés-jours nécessaire à la formation de la F2 est donc comprise entre 130 et 150.

En ce qui concerne la formation de la F3, le graphique ainsi que les coefficients de détermination renseignent une valeur de phyllotherme comprise entre 117 et 130.

<i>Reuler</i>	<i>FF3</i>	<i>FF2</i>	<i>FF1</i>
100	0.963	0.864	0.79
117	0.98	0.873	0.991
130	0.983	0.919	0.98
150	0.974	0.934	0.856
170	0.983	0.914	0.777

Tableau 8 : Coefficients de détermination - Reuler (2012)

2.2.2. Année 2013

2.2.2.1. Everlange

Pour ce site, la variété Achat a été semée. Lors de la première journée d'observations (29 avril 2013), le pourcentage moyen de formation de la F3 était à 1 % (stade GS 30). Cette valeur a été utilisée pour établir la simulation des différentes sommes de températures.

Le tableau 9 reprend les coefficients de détermination pour les relations entre formation de feuilles et somme de degrés-jours. D'après les résultats, la F2 nécessiterait un phyllotherme de 150 degrés-jours alors que pour la formation de la F1, une valeur comprise entre 130 et 150 serait à utiliser.

<i>Everlange</i>	<i>FF3</i>	<i>FF2</i>	<i>FF1</i>
100	0.624	0.767	0.602
117	0.764	0.891	0.873
130	0.831	0.949	0.988
150	0.883	0.994	0.959
170	0.939	0.949	0.82

Tableau 9 : Coefficients de détermination - Everlange (2013)

2.2.2.2. Burmerange

En 2013, la variété Kerubino a été testée. La formation de la F3 le 29 avril était de 68 % en moyenne.

Les valeurs pour les coefficients de détermination pour la formation de la F2 sont assez faibles. Il ressort de l'analyse qu'un phyllotherme de 170 degrés-jours pour la formation de celle-ci serait nécessaire. Ce résultat semble très élevé en comparaison de ceux que nous avons obtenus précédemment. Cet écart est dû à une possible erreur lors des observations réalisées sur le terrain. En effet, le 6 mai, le pourcentage moyen de formation était de 17 % alors que la semaine d'après (le 13 mai), celui-ci était inférieur (7 %).

En ce qui concerne la feuille 1, une somme des degrés-jours de 150 serait optimale.

<i>Burmerange</i>	<i>FF3</i>	<i>FF2</i>	<i>FF1</i>
100	0.948	0.452	0.693
117	0.948	0.509	0.845
130	0.948	0.535	0.92
150	0.948	0.723	0.991
170	0.948	0.79	0.955

Tableau 10 : Coefficients de détermination - Burmerange (2013)

2.2.2.3. Christnach

Le 29 avril, la F3 de la variété Orcas était formée à 4 % en moyenne.

<i>Christnach</i>	<i>FF3</i>	<i>FF2</i>	<i>FF1</i>
100	0.607	0.804	0.585
117	0.758	0.895	0.791
130	0.794	0.929	0.935
150	0.896	0.991	0.989
170	0.939	0.969	0.893

Tableau 11 : Coefficients de détermination - Christnach (2013)

En comparant les résultats des coefficients de détermination, nous pouvons nous rendre compte que la valeur 150 du phyllotherme semble être la plus appropriée. Cette tendance se remarque sur les graphiques mettant en relation les observations moyennes et les différentes sommes de températures (figure 26).

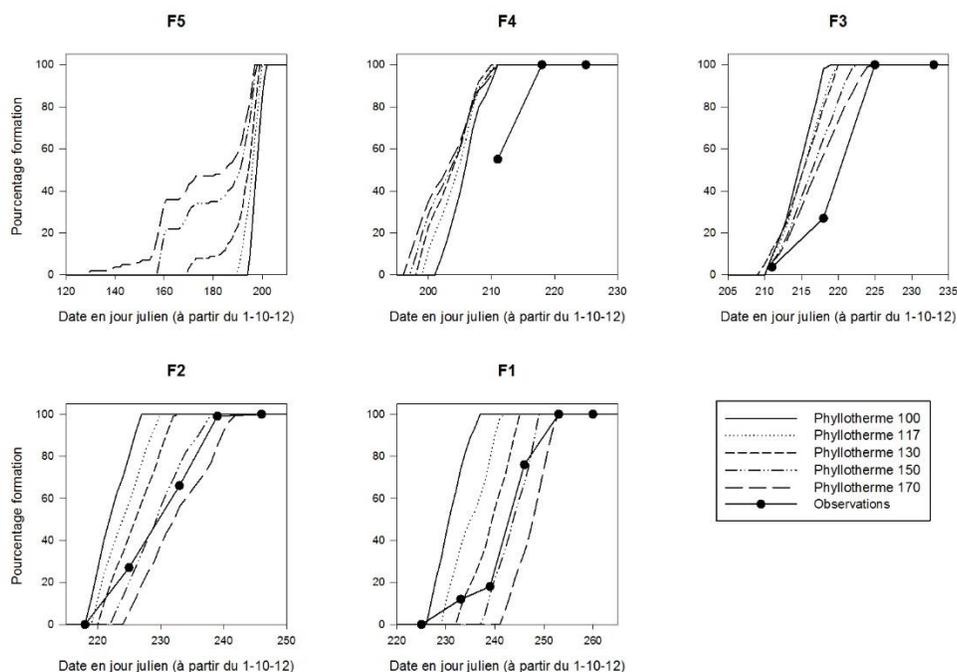


Figure 26 : Simulations vs observations - Christnach (2013)

2.2.2.4. Reuler

Enfin, le 29 avril à Reuler lors de la première journée de terrain, la F3 n'avait pas encore entamé sa formation (stade GS 28).

Les coefficients de détermination montrent que pour la formation de la F2 un phyllotherme de 100 degrés-jours serait nécessaire alors que la F1 aurait besoin d'une somme de température comprise entre 117 et 130 degrés-jours pour être entièrement étalée.

<i>Reuler</i>	<i>FF3</i>	<i>FF2</i>	<i>FF1</i>
100	0.998	0.979	0.962
117	0.994	0.915	0.995
130	0.988	0.897	0.98
150	0.996	0.747	0.828
170	0.985	0.617	0.645

Tableau 12 : Coefficients de détermination - Reuler (2013)

2.2.3. Année 2014

Pour terminer, nous allons nous pencher sur les résultats que nous avons obtenus pour l'année 2014.

2.2.3.1. Everlange

La première observation sur le terrain a été réalisée le 14 avril 2014, sur la variété Privileg. Lors de cette campagne, le pourcentage moyen de formation de la F3 était de 18 %.

<i>Everlange</i>	<i>FF3</i>	<i>FF2</i>	<i>FF1</i>
100	0.995	0.98	0.85
117	0.995	0.999	0.942
130	0.997	0.966	0.992
150	0.998	0.95	0.965
170	0.937	0.827	0.82

Tableau 13 : Coefficients de détermination - Everlange (2014)

D'après les coefficients de détermination que nous obtenons, un phyllotherme de 117 serait le plus approprié pour la formation de la F2. Concernant la dernière feuille, celle-ci nécessiterait un phyllotherme de 130 degrés-jours pour réaliser sa croissance.

2.2.3.2. Burmerange

Les premières acquisitions de données pour ce site ont été effectuées le 22 avril. La F3 était formée en moyenne à 97 %. La variété étudiée est JB Asano.

<i>Burmerange</i>	<i>FF3</i>	<i>FF2</i>	<i>FF1</i>
100	0.999	0.955	0.988
117	0.991	0.888	0.972
130	0.957	0.823	0.898
150	0.93	0.738	0.775
170	0.872	0.643	0.631

Tableau 14 : Coefficients de détermination - Burmerange (2014)

Pour les deux dernières feuilles, le phyllotherme de 100 degrés-jours obtient les meilleurs coefficients de détermination. Toutefois, la valeur du coefficient de détermination du phyllotherme 117 pour la dernière feuille est assez élevée et il y a peu de différence avec le précédent. C'est pourquoi, pour la F1, une somme des degrés-jours comprises entre 100 et 117 est suggérée.

2.2.3.3. Bettendorf

Sur le site de Bettendorf, deux variétés ont été utilisées pour cette étude (Achat et Kerubino). Le 14 avril, la F3 de la variété Achat était formée en moyenne à 49 % tandis que ce pourcentage était de 73 % pour la variété Kerbino.

Comme nous pouvons le constater sur les graphiques (figure 27), le phyllotherme retenu pour la F2 est compris entre 130 et 150 degrés-jours et pour la F1 entre 150 et 170 degrés-jours. Ces résultats sont confirmés par les coefficients de détermination élevés pour ces valeurs.

<i>Bettendorf</i> - Achat	<i>FF3</i>	<i>FF2</i>	<i>FF1</i>
100	0.942	0.915	0.657
117	0.942	0.985	0.84
130	0.942	0.994	0.883
150	0.942	0.992	0.979
170	0.985	0.959	0.979

Tableau 15 : Coefficients de détermination - Bettendorf variété Achat (2014)

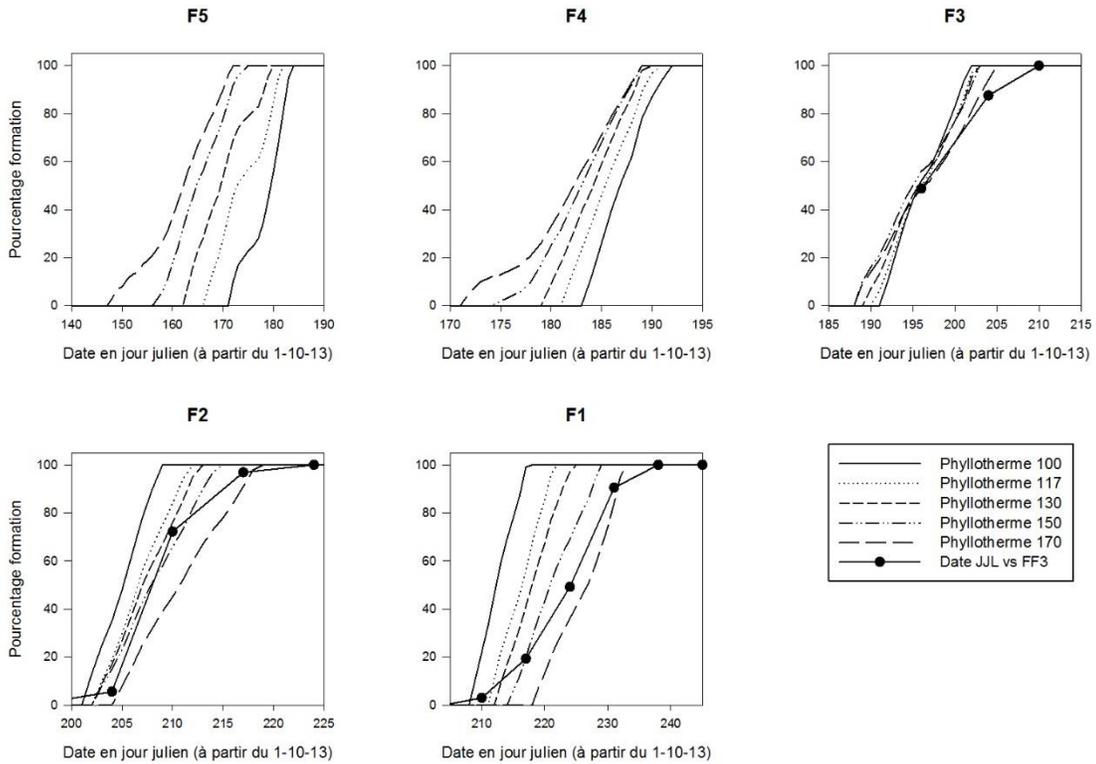


Figure 27 : Simulations vs observations à Bettendorf pour la variété Achat (2014)

Concernant la variété Kerubino, d'après les résultats obtenus pour les coefficients de détermination, la F2 aurait besoin d'une somme de températures située entre 150 degrés-jours et 170 pour sa formation et la F1 d'une valeur comprise entre 130 et 150 degrés-jours.

<i>Bettendorf</i> - Kerubino	<i>FF3</i>	<i>FF2</i>	<i>FF1</i>
100	0.931	0.75	0.82
117	0.931	0.866	0.946
130	0.931	0.886	0.989
150	0.931	0.934	0.996
170	0.931	0.931	0.904

Tableau 16 : Coefficients de détermination - Bettendorf variété Kerubino (2014)

2.2.3.4. Reuler

Le site de Reuler terminera cette analyse. La variété semée à cet endroit pour l'année 2014 est Kerubino et le pourcentage de formation de la F3 le 14 avril était de 51 %.

<i>Reuler</i>	<i>FF3</i>	<i>FF2</i>	<i>FF1</i>
100	0.507	0.845	0.586
117	0.507	0.916	0.75
130	0.507	0.967	0.943
150	0.507	0.97	0.991
170	0.639	0.971	0.985

Tableau 17 : Coefficients de détermination – Reuler (2014)

Les résultats montrent qu'un phyllotherme compris entre 150 et 170 serait nécessaire à la formation de la feuille 2 alors que pour la feuille 1, celui-ci serait égal à 150 degrés-jours. Ces résultats nous paraissent assez élevés. Il peut s'agir d'erreurs dans les observations moyennes obtenues.

2.2.4. Synthèse

Au cours de cette analyse, nous avons pu nous rendre compte de la diversité des résultats. En effet, pour chaque site et chaque variété, les phyllothermes sont très hétérogènes.

Plusieurs causes peuvent être soulevées :

- Pour réaliser les simulations, nous nous sommes basés sur les pourcentages moyens de formation de la F3 à une date donnée. En analysant de plus près, les pourcentages de formation des 40 plantes relevés lors d'une même journée diffèrent très fortement comme nous avons pu le constater dans les graphiques (figure 22). Les écarts-types pour certaines dates sont parfois plus élevés que la moyenne. Cette première constatation est une raison évidente du manque de précision de cette analyse.
- De plus, les coefficients de détermination ont été calculés à partir des échantillons hebdomadaires. C'est pourquoi, les régressions sont établies sur un jeu de 7 à 9 données par phyllotherme (en fonction de l'année des observations). Cette raison peut expliquer les petites ou les grandes valeurs de corrélation que nous obtenons.
- D'autre part, comme signalé dans l'analyse, des erreurs dans les pourcentages moyens ont été détectées. En effet, lors de certaines observations, un pourcentage inférieur à la semaine précédente était constaté.
- Enfin, les stations météorologiques sont pour certains sites assez éloignées des champs d'études. Ces distances peuvent affecter les résultats des simulations et donc fausser les chiffres que nous avons obtenus pour les coefficients de détermination.

Cependant, des conclusions peuvent être tirées de cette analyse :

- Le phyllotherme est variable en fonction des feuilles. En effet, nous avons montré que la somme des degrés-jours dépendait de la feuille. Pour 6 cas sur 14, le phyllotherme de la dernière feuille est plus élevé. Pour les 8 derniers, une moitié semble avoir un phyllotherme plus faible pour la F1 tandis que pour l'autre moitié, un phyllotherme similaire aux deux dernières feuilles est trouvé. Ces hypothèses sont confirmées par le travail de M. El Jarroudi. Ce dernier évoquait un phyllotherme dépendant fortement de la variété et affirmait que la somme des degrés-jours nécessaire au développement de chaque feuille était différent (M. El Jarroudi, 2005).
- La date de semis fait varier la valeur du phyllotherme. Les feuilles nécessitent moins de degrés-jours pour réaliser leur formation lorsque le semis est réalisé plus tard dans la saison. Par exemple, en 2013, la date de semis pour le site de Reuler était le 30 octobre. Les phyllothermes obtenus pour ce site étaient de 100 pour la F2 et 117 pour la F1. En comparant ces résultats avec le site de Burmerange (où la date de semis était le 12 octobre et où la même variété a été étudiée), nous pouvons remarquer une différence significative : la F2 nécessiterait 150 degrés-jours et la F1 130.

Les conclusions de cette analyse semblent en rapport avec différents travaux. Cependant, cette approche nous donne une idée des valeurs de phyllothermes et non des résultats précis sur ceux-ci. C'est pourquoi, une deuxième analyse a été réalisée.

2.3. Détermination du phyllotherme à l'aide de droites de régression

Dans ce chapitre, nous nous concentrerons sur une deuxième méthode pour la détermination du phyllotherme. Les pourcentages moyens de formation des quatre dernières feuilles pour le blé et cinq dernières feuilles pour l'orge (variable y) ont été mis en relation avec les sommes de températures (variable x). Des droites de régression ont été créées avec les équations et les coefficients de détermination s'y rapportant. Les phyllothermes ont été obtenus à partir de l'équation de ces droites de régression.

2.3.1. Blé

Nous allons reprendre les résultats obtenus par site. Les phyllothermes trouvés ainsi que les coefficients de détermination correspondants seront énoncés dans un tableau récapitulatif.

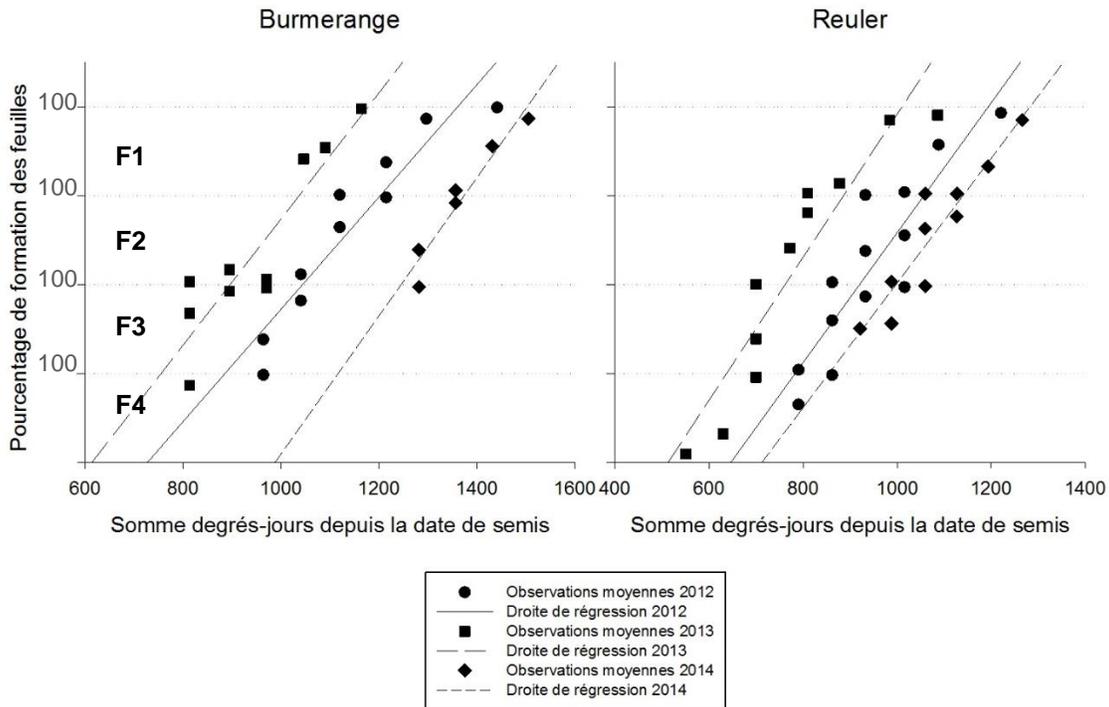


Figure 28 : Droites de régression Burmerange – Reuler (blé)

Année	2012		2013		2014		
	Site	Phyllotherme	R ²	Phyllotherme	R ²	Phyllotherme	R ²
Everlange		167 (Achat)	0.8461	129.2	0.9384	136	0.9188
		156 (Cubus)	0.8575				
Burmerange		158	0.8867	141	0.8249	129	0.9244
Chritnach/Bettendorf		159	0.8763	126	0.9645	142 (Achat)	0.9178
						167 (Kerubino)	0.8221
Reuler		136	0.7907	124	0.8752	142.5	0.8581

Tableau 18 : Phyllothermes par site et par année calculés grâce aux droites de régression (blé)

L'année 2012 est marquée par des phyllothermes élevés (allant jusque 167) sauf pour le site de Reuler où la somme des degrés-jours à base zéro est égale à 136. Les coefficients de détermination sont assez satisfaisants, ils se situent entre 0.79 (pour le site de Reuler) et 0.88 (pour le site de Burmerange).

En 2013, nous pouvons remarquer une baisse dans les sommes de températures par rapport à l'année précédente. Les phyllothermes varient de 124 degrés-jours à Reuler à 141 degrés-jours pour le site de Burmerange. Les coefficients de détermination sont plus élevés. Les valeurs sont comprises entre 0.82 (sur le site de Burmerange) et 0.96 (à Christnach).

Enfin, pour l'année 2014, nous obtenons des phyllothermes compris entre 129 et 142.5. Toutefois, une valeur sort du lot puisqu'une somme de degrés-jours en base zéro élevée (167) est nécessaire pour la formation des feuilles de la variété Kerubino à Bettendorf. Les coefficients de détermination se situent entre 0.82 et 0.92.

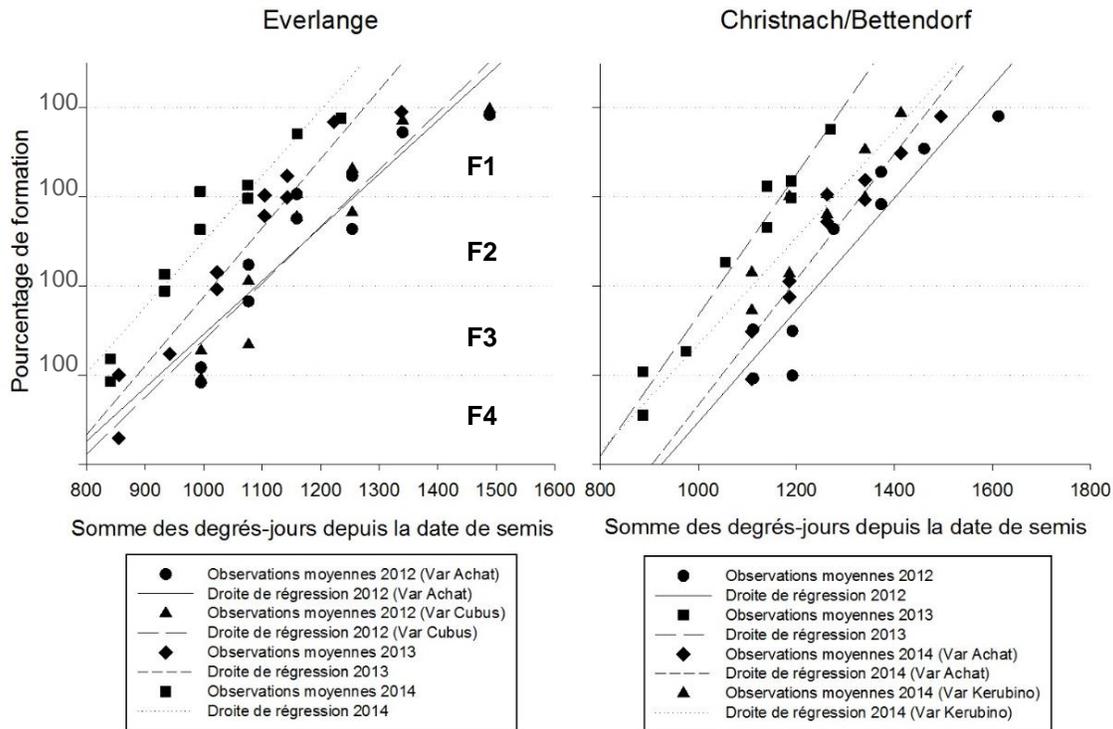


Figure 29 : Droites de régression Everlange - Christnach/Bettendorf (blé)

Un phyllotherme moyen a été calculé avec les différentes valeurs trouvées grâce aux droites de régression. Celui-ci est égal à 144 degrés-jours.

Cette analyse a montré que les phyllothermes diffèrent très fortement en fonction des sites mais également en fonction des variétés comme cela a été prouvé pour les variétés Achat et Cubus cultivées sur le site d'Everlange en 2012 et pour les variétés Achat et Kerubino utilisées en 2014 sur le site d'étude de Bettendorf.

Cependant, dans certains cas, nous avons trouvé des sommes de températures en base zéro pour la formation des feuilles très élevées. Les erreurs d'observation peuvent être la cause de ces différences dans les phyllothermes obtenus et peuvent fausser les résultats.

2.3.2. Orge

La détermination du phyllotherme à partir des droites de régression a également été réalisée pour l'orge. Les relations sont basées sur les pourcentages moyens de formation des cinq dernières feuilles et sur la somme des degrés-jours.

L'année 2014 n'a pas été utilisée dans cette analyse car lors des premières observations, seule la F1 était toujours en croissance. Les sommes de températures étaient donc biaisées par le peu de données.

Les résultats obtenus sont similaires à ceux du blé en ce sens qu'ils sont très hétérogènes et variables d'un site à l'autre.

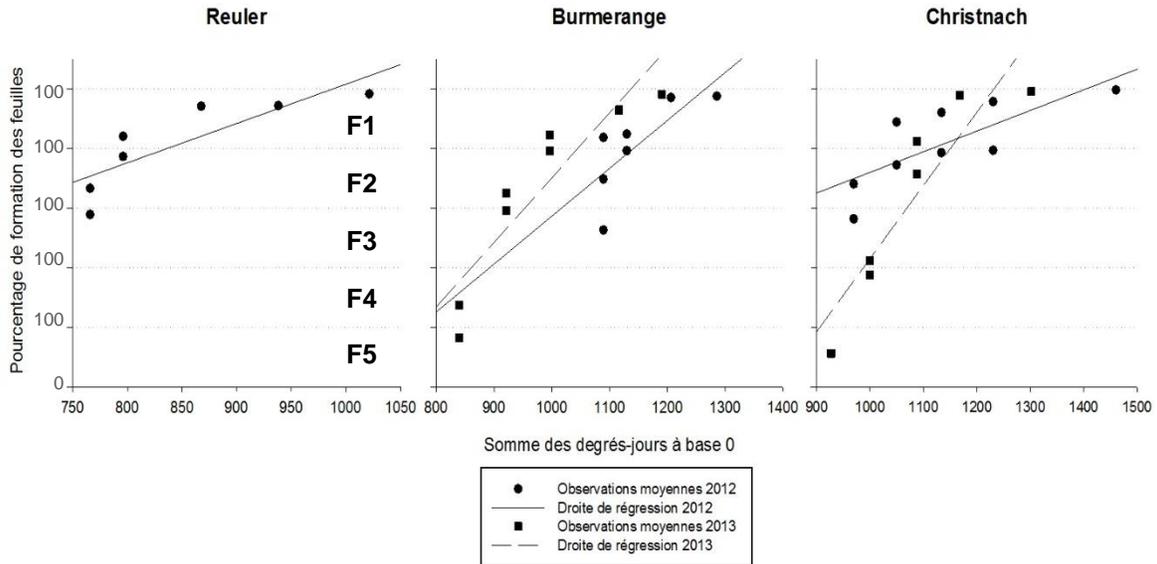


Figure 30 : Droites de régression Reuler – Burmerange – Christnach (orge)

En 2012, pour trois variétés (KWS Cassia et Leibniz à Everlange, Anisette à Christnach), des phyllothermes de plus de 170 degrés-jours sont enregistrés. Ces valeurs sont très élevées pour l'orge.

À Reuler, un phyllotherme de 152 degrés-jours (coefficient de détermination de 0.705) est nécessaire pour la formation des feuilles alors qu'à Burmerange, une valeur de 124 degrés-jours est obtenue ($r^2 = 0.575$).

En 2013, pour les trois sites analysés, les phyllothermes sont largement inférieures aux valeurs obtenues l'année précédente.

En effet, ceux-ci ne dépassent pas 101 degrés-jours (valeurs enregistrées à Everlange, $r^2 = 0.8417$).

Le phyllotherme moyen obtenu pour l'ensemble des sites et des années est égal à 155 degrés-jours en base 0.

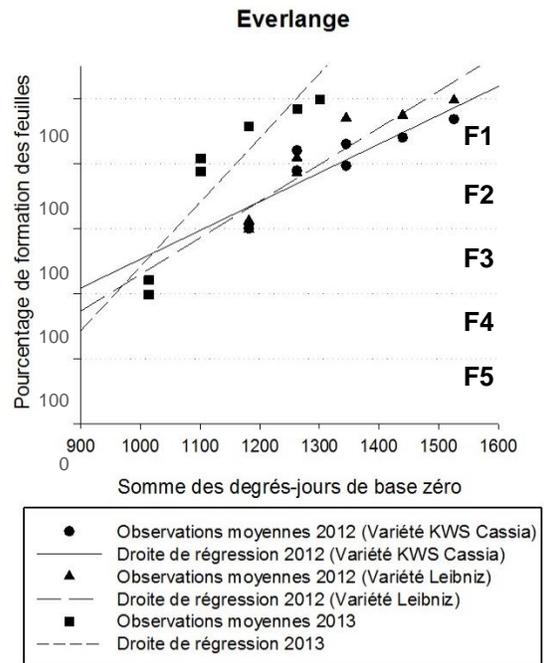


Figure 31 : Droites de régression Everlange (orge)

Année	2012		2013	
Site	Phyllotherme	R ²	Phyllotherme	R ²
Everlange	226 (KWS Cassia)	0.7747	101	0.8417
	178 (Leibniz)	0.8551		
Burmerange	124	0.575	92	0.8226
Chritnach	289	0.5904	81	0.8375
Reuler	152	0.705	/	/

Tableau 19 : Phyllothermes obtenus par site et par année grâce aux droites de régression (orge)

Les résultats de cette méthode de traitement sont très différents en fonction des sites et des années. Les relations ont été déterminées sur base d'un jeu de données plus pauvre que pour le blé. La plupart des phyllothermes sont donc établis sur des pourcentages de formation de la dernière feuille ou de l'avant dernière feuille, ce qui peut expliquer les valeurs élevées.

2.4. Variation du phyllotherme – Cas d'une population hétérogène

Enfin, la dernière méthode est basée sur le calcul du phyllotherme en fonction des fréquences de feuilles émergentes. Celle-ci a été réalisée dans les travaux de M. El Jarroudi et sera reprise ici à titre d'exemple (M. El Jarroudi, 2005).

Deux variétés ont fait l'objet de ce traitement : il s'agit de la variété hâtive Flair et la variété tardive Dream cultivées en 2001 (date de semis : 28 octobre). Les fréquences d'émergences ont été reprises par date de formation des feuilles. La durée de la formation a également été renseignée (tableau 20). L'ensemble des données se trouve à l'annexe II.

Afin de déterminer le phyllotherme moyen, la formule suivante a été utilisée :

Équation 7 (M. El Jarroudi, 2005)

$$\text{Phyllotherme moyen} = \frac{\sum(\text{fréquences} \times \sum \text{degrés-jours})}{100}$$

Date de formation	Fréquence	Début formation (en degrés-jours)	Fin formation (en degrés-jours)	Phyllotherme
12 mai-22 mai	12	1214.90	1345.05	130.15
14 mai-24 mai	38	1246.49	1379.17	132.68
15 mai-25 mai	25	1260.01	1397.48	137.47
17 mai-26 mai	15	1284.98	1415.40	130.42
19 mai-27 mai	10	1298.38	1433.28	134.91

Tableau 20 : Exemple de calcul du phyllotherme suivant les fréquences (F1 – Flair)

2.4.1. Variété Flair

Pour une même variété semée sur deux sites, la fréquence d'émergence des feuilles en fonction de la somme des degrés-jours accumulés depuis la date de semis est assez différente.

À Christnach, pour la variété Flair, la majorité des feuilles (F3) a émergé après 950 degrés-jours alors qu'à Everlange, 1000 degrés-jours sont nécessaires. La même constatation peut être faite pour les deux dernières feuilles. Après 1035 degrés-jours, 58 % des F2 étaient émergées à Christnach alors que les premières F2 n'apparaissaient qu'à partir de 1109 degrés-jours à Everlange. L'écart entre les premières feuilles émergentes et les dernières feuilles émergentes est de 90 degrés-jours pour les deux sites.

Au niveau de la dernière feuille pointante, une différence de 95 degrés-jours (quatre jours) est observée entre les premières feuilles émergentes en fonction du site. L'écart entre les premières feuilles émergées et les dernières est de 83 degrés-jours (6 jours) à Everlange et 54 degrés-jours (5 jours) à Christnach.

Des phyllothermes moyens ont été calculés pour les trois dernières feuilles selon l'équation 7. Le phyllotherme moyen pour la F3 est de 128 degrés-jours à Everlange et 134 degrés-jours à Christnach. Une valeur de 129 degrés-jours est obtenue pour la F2 à Everlange et 126 degrés-jours pour Christnach. Enfin, le phyllotherme moyen à Everlange pour la dernière feuille pointante est de 133 degrés-jours à Everlange et 117 degrés-jours à Christnach.

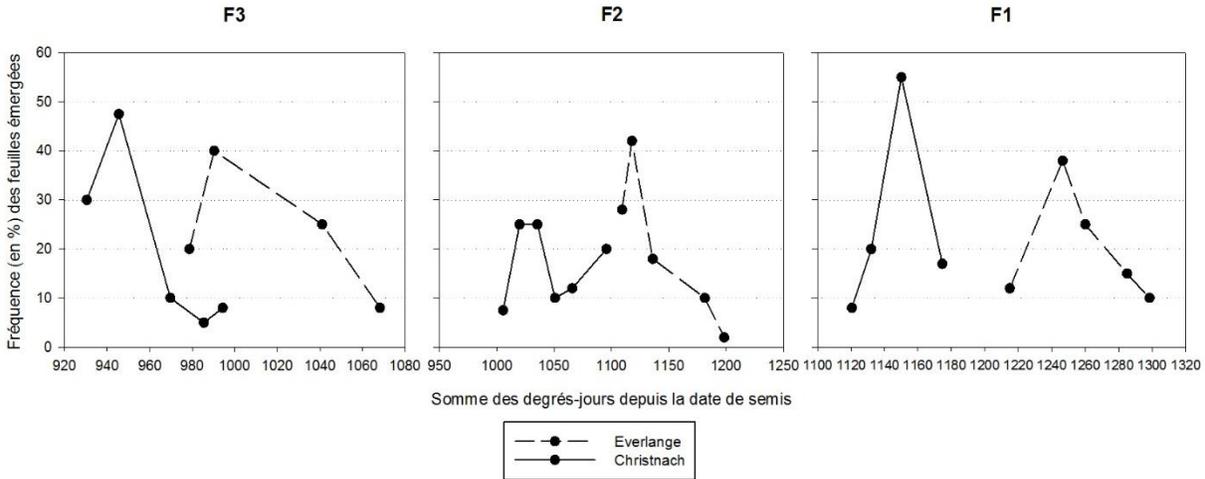


Figure 32 : Fréquence des feuilles émergentes (2001 - variété Flair)

2.4.2. Variété Dream

Des écarts dans les fréquences de feuilles émergées sont également observés pour la variété Dream sur les deux sites. À Christnach, 55 % des F3 étaient émergées après avoir reçu une somme de degrés-jours égale à 978. Sur le site d'Everlange, les premières feuilles (12 %) faisaient leur apparition après 990 degrés-jours. L'écart entre les premières feuilles émergées et les dernières est de 105 degrés-jours à Christnach et 119 à Everlange.

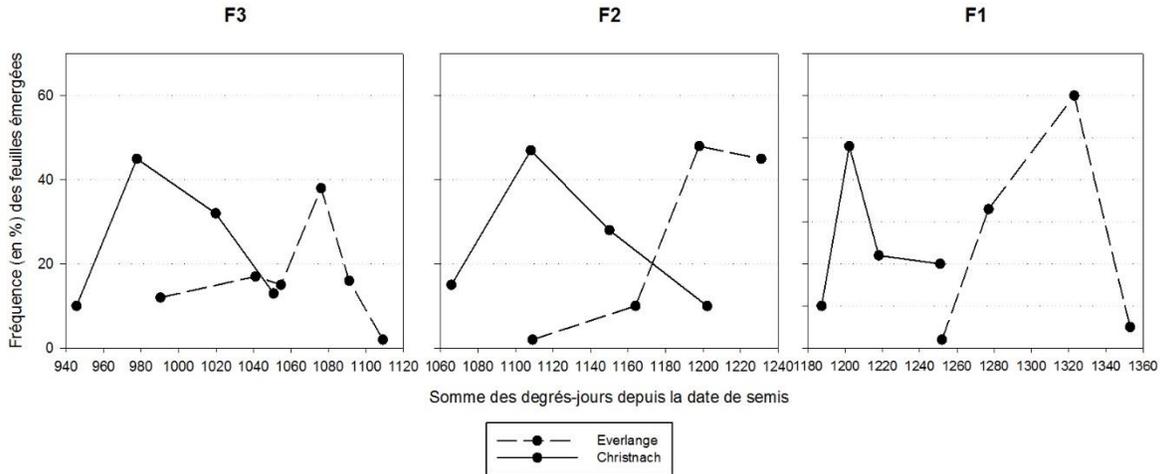


Figure 33 : Fréquence des feuilles émergentes (2001 - variété Dream)

La formation de la F2 a commencé après 1066 degrés-jours à Christnach (15 % de feuilles émergées) et 1109 degrés-jours (2 % de feuilles émergées) à Everlange. L'écart entre les premières et dernières feuilles émergentes est de 122 degrés-jours pour Everlange et 136 degrés-jours à Christnach.

Enfin, la dernière feuille pointante débutait sa croissance après 1187 degrés-jours à Christnach et 1252 degrés-jours à Everlange. Les écarts entre les pourcentages d'émergence entre la première et la dernière feuille sont de 101 degrés-jours à Everlange et seulement 64 degrés-jours à Christnach.

Les phyllothermes moyens obtenus sont les suivants : 150 degrés-jours à Everlange et 158 degrés-jours à Christnach pour la F3 ; 134 degrés-jours et 124 degrés-jours pour la F2 ; 100 et 102 degrés-jours pour la F1.

2.4.3. Discussion pour les deux sites

Il ressort de cette méthode d'analyse différentes constatations que nous exposerons ici :

- Les phyllothermes moyens diffèrent en fonction de la feuille. En effet, cette analyse a montré que la F3 nécessite plus de degrés-jours que la F2 ou la F1. Seul le site d'Everlange pour la variété Flair est une exception à cette hypothèse puisque le phyllotherme augmente dans ce cas.
- Les analyses réalisées sur deux variétés ont permis de se rendre compte de la différence qui réside entre celles-ci. Pour la variété hâtive Flair, les phyllothermes moyens des deux dernières feuilles sont plus élevés que ceux de la variété tardive. Cependant, pour la F3, c'est le contraire qui est constaté (elle nécessiterait un phyllotherme de plus de 150 degrés-jours dans le cas d'une variété tardive).

La méthode de calcul des phyllothermes sur base des fréquences a été possible pour l'année 2001 car les données ont été récoltées par une seule et même personne tout au long des stades de développement du blé. Les erreurs dans les observations, s'il y en a, sont donc constantes au cours de la période. Pour les années 2012 à 2014, il a été impossible de faire de même, tant les pourcentages de formation observés étaient différents d'une date à l'autre, cela étant dû à la présence de différents observateurs.

2.5. Analyse des données de 2017

Au terme des différentes méthodes d'analyse que nous avons effectuées, nous ne sommes pas capables de fournir une valeur précise et unique de phyllotherme ajustée. Les données de 2017 n'ont donc pas servi à valider ou invalider les hypothèses que nous aurions pu définir dans les parties précédentes.

Par conséquent, nous avons effectué des simulations avec un phyllotherme de 130 degrés-jours (phyllotherme utilisé dans les modèles de maladies de PhytoProTech). Les résultats de ces simulations ont été comparés avec les valeurs obtenues lors des observations hebdomadaires réalisées sur le terrain.

2.5.1. Blé

Pour réaliser les simulations, les pourcentages moyens de formation de la F3 ont été encodés dans le logiciel. Ceux-ci étaient de 19 % à Everlange le 24 avril et 30 % le 2 mai à Burmerange.

Les résultats sont de nouveau très changeant en fonction des feuilles. Nous les avons repris sous deux formes : un tableau récapitulatif avec les coefficients de détermination et les RMSE obtenus par feuille ainsi que des graphiques qui permettront de visualiser les différences entre les observations moyennes et les valeurs simulées.

En général, la simulation donne de bons résultats en termes de corrélation. Par exemple, à Everlange, un coefficient de 0.97 est obtenu avec un RMSE de 10.3 %. C'est également le cas pour la station d'essais de Reuler où les RMSE ne dépassent pas les 17 % et les coefficients de détermination ne sont pas inférieurs à 0.89.

Pour le site de Burmerange, la simulation ne semble pas bien fonctionner. En effet, des valeurs élevées pour les RMSE sont trouvées (28 % pour la F1 et 47 % pour la F2), les coefficients de détermination sont dès lors assez faibles (0.73 pour la F1 et 0.55 pour la F2). C'est également le cas pour la formation de la dernière feuille pointante à Bettendorf où une erreur moyenne quadratique de 28 % est relevée.

	F1		F2		F3	
	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE
EVERLANGE	0.9685	10.3	0.847	20.5	0.9936	4.3
BURMERANGE	0.7324	27.9	0.5526	47.3	0.9747	7.6
BETTENDORF	0.7638	27.9	0.9326	12.0	0.9356	14.7
REULER	0.9183	13.7	0.8863	16.8	0.9488	11.0

Tableau 21 : Coefficients de détermination pour le blé – Simulations vs observations

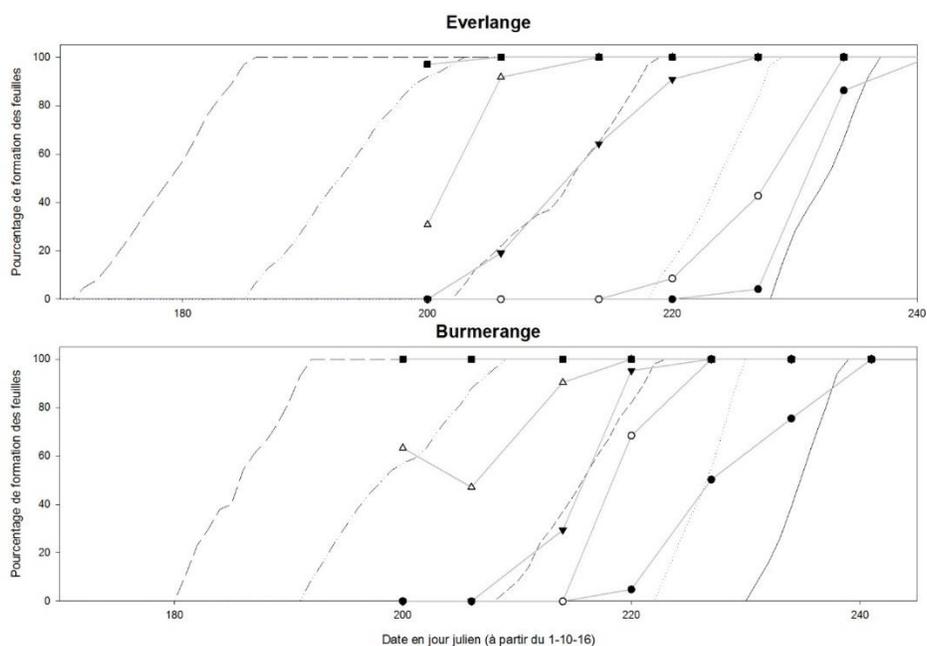
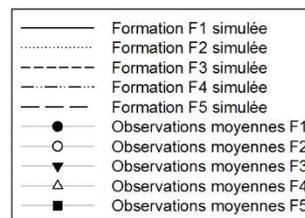


Figure 34 : Simulations vs observations à Everlange et Burmerange - Année 2017 - Blé



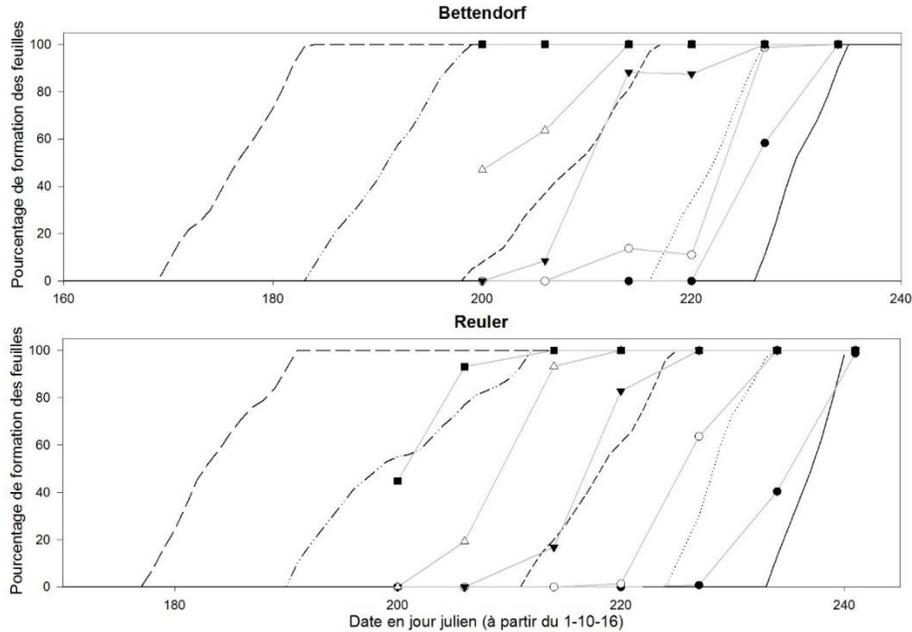


Figure 35 : Simulations vs observations à Bettendorf et à Reuler – Année 2017, blé

2.5.2. Orge

Pour l'orge, il semblerait que la simulation soit moins efficace que celle que nous avons effectuée pour le blé. Seul le site de Burmerange obtient des résultats corrects pour les coefficients de détermination (0.73 pour la F1 et 0.81 pour la F2) avec des RMSE variant de 25.4 % pour la F2 et 27.7 pour la F1.

À Bettendorf, la simulation de la F1 conduit à un très faible coefficient de détermination (0.20) et donc une erreur quadratique moyenne très élevée (63.6 %). Ces petites valeurs sont probablement dues à des erreurs lors des observations de terrain. C'est le cas notamment pour la F1 à Bettendorf et à Reuler ou encore la F3 à Burmerange où les moyennes diminuent d'une date à l'autre.

Cependant, d'après les résultats et les tendances moyennes des graphiques, nous pouvons remarquer que l'orge semble avoir un phyllotherme moins élevé que 130 degrés-jours.

	F1		F2		F3	
	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE
EVERLANG	0.3461	52.2	0.6111	38.5	0.8525	13.5
BURMERANGE	0.7371	27.7	0.8103	25.4	0.8363	22.7
BETTENDORF	0.1968	63.6	0.7573	28.9	0.9999	1.4
REULER	0.3973	41.3	0.7431	29.9	0.908	30.1

Tableau 22 : Coefficients de détermination et RMSE pour l'orge - Simulations vs observations

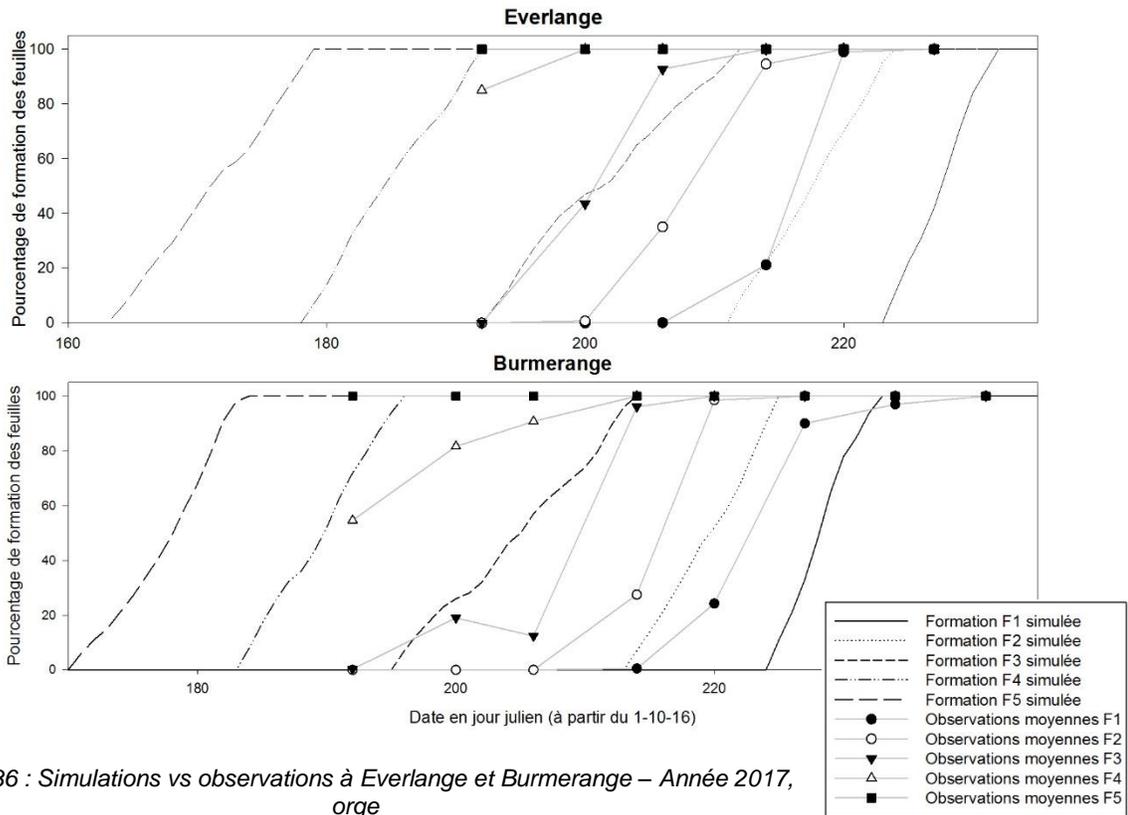


Figure 36 : Simulations vs observations à Everlange et Burmerange – Année 2017, orge

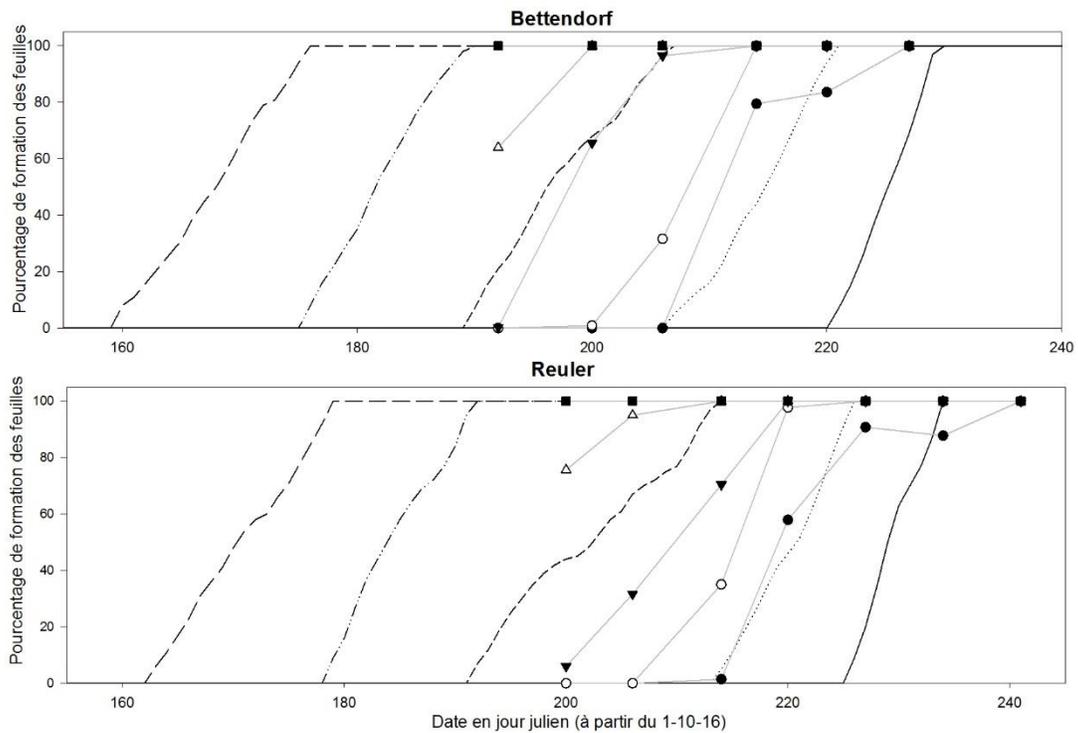


Figure 37 : Simulations vs observations à Bettendorf et à Reuler - Année 2017, orge

3. Discussions générales et perspectives

L'objectif de ce travail était de proposer un ajustement de la valeur de phyllotherme utilisée (130 degrés-jours) dans l'outil PhytoProTech, commercialisé par la société AgrOptimize. Pour rappel, lors des campagnes de 2015 et 2016, la simulation de la phénologie n'avait pas fonctionné à certains endroits et des décalages parfois assez importants entre les valeurs simulées et observées avaient été trouvés. Ceux-ci pourraient causer des problèmes pour les prévisions des maladies et donc pour les conseils donnés aux agriculteurs.

Pour réaliser les calculs, nous avons utilisé une base de données reprenant les observations pour le blé et l'orge de trois années (de 2012 à 2014) et nous l'avons complétée par des données de 2001 et celles acquises cette année. Au départ, les observations réalisées ces derniers mois devaient nous permettre de valider ou invalider les hypothèses de phyllotherme que nous aurions pu émettre. Cependant, les résultats ne nous ont pas permis de proposer une somme de degrés-jours adaptée. C'est pourquoi nous les avons utilisés pour les comparer avec des valeurs simulées.

La première démarche de ce travail a été la comparaison des observations moyennes et écarts-types pour les années 2012 à 2014 sur les quatre sites et pour les deux céréales. Ceux-ci ont été traités sous forme de graphiques reprenant par année les pourcentages moyens de formation des trois dernières feuilles pour les quatre sites. Nous avons pu nous rendre compte de l'hétérogénéité des résultats obtenus. En effet, la plupart des écarts-types sont très élevés, ce qui affirme que les moyennes sont réalisées à partir de pourcentages d'observation très diversifiés pour une même date. De plus, des erreurs ont été constatées dans les moyennes de ces derniers. D'une semaine à l'autre, elles diminuaient.

Ensuite, nous nous sommes penchés sur une méthode qui n'avait jamais été testée auparavant à savoir réaliser des simulations avec différentes sommes de degrés-jours et confronter les valeurs simulées avec les observations moyennes réalisées sur le terrain. Cette analyse a été effectuée pour le blé. Cinq valeurs de phyllothermes ont été définies et les simulations ont été établies sur base du pourcentage moyen de formation de la F3. Les résultats que nous avons obtenus n'ont pas été à la hauteur de nos attentes. En effet, pour chaque site, des phyllothermes différents étaient nécessaires pour la formation des feuilles. Cette analyse nous a renseigné sur une valeur estimée du phyllotherme et non sur un résultat précis. C'est pourquoi une seconde analyse a été réalisée.

La troisième partie de l'analyse des résultats était consacrée au calcul du phyllotherme sur base de droites de régression établies à partir des observations moyennes. La valeur exacte a été trouvée grâce à l'équation de ces droites. Des coefficients de détermination ont été calculés afin de vérifier si les phyllothermes obtenus étaient acceptables. Il ressort de cette analyse que les phyllothermes sont très changeant d'un site à l'autre. Pour le blé, la valeur minimale obtenue était à Reuler (124 degrés-jours, $r^2 = 0.8762$) en 2013 et la valeur maximale était de 167 degrés-jours (obtenue à Everlange pour la variété Achat en 2012 avec un $r^2 = 0.8461$ et à Bettendorf pour la variété Kerubino en 2014 avec un $r^2 = 0.8221$). Le phyllotherme moyen était égal à 144 degrés-jours. Au niveau de l'orge, des phyllothermes extrêmes sont observés sur le site de Chistnach (289 degrés-jours en 2012, $r^2 = 0.5904$; et 81 degrés-jours en 2013, $r^2 = 0.8375$). Le phyllotherme moyen était de l'ordre de 155 degrés-jours. Il est important de rappeler que lors des premières dates d'observations sur le terrain, les stades de développement de l'orge étaient déjà très avancés. C'est pourquoi, les régressions ont été établies sur peu de données. De plus, des erreurs dans les pourcentages moyens ont également été commises pour cette céréale. Il convient donc de rester prudent vis-à-vis des résultats que nous obtenons et de ne pas tirer des conclusions trop hâtivement.

La dernière analyse concernant les données historiques est une méthode utilisée dans la thèse de M. El Jarroudi (M. El Jarroudi, 2005). Elle reprend les fréquences d'émergence des feuilles en fonction de la somme des degrés-jours depuis la date de semis. Un phyllotherme moyen par feuille a pu être calculé. L'analyse a été réalisée sur une variété tardive (Dream) et une variété hâtive (Flair). D'après les résultats que nous avons obtenus, nous pouvons conclure que les trois dernières feuilles ont des phyllothermes différents. La dernière feuille pointante nécessiterait moins de degrés-jours pour réaliser sa croissance contrairement aux deux autres feuilles. Cette affirmation a été confirmée dans 3 cas sur 4.

Enfin, nous avons terminé la partie consacrée à l'analyse des résultats en reprenant les données récoltées cette année. Nous les avons traitées en les comparant aux valeurs obtenues par des simulations. Le phyllotherme retenu a été celui que les modèles phénologiques de l'outil PhytoProTech utilisent à savoir 130 degrés-jours. Un pourcentage moyen de formation de la F3 a été utilisé pour réaliser les simulations. Des coefficients de détermination ainsi que des RMSE ont été calculés pour juger de la qualité ou non de la simulation. Pour le blé, la simulation semble fonctionner pour deux sites sur quatre, les RMSE sont assez faibles (un peu plus de 10 %). Par contre, pour l'orge, des RMSE très élevés sont trouvés (jusque 64 % pour la F1) ce qui laisse supposer que le phyllotherme nécessaire pour cette céréale serait inférieur à 130 degrés-jours.

Grâce à ce travail, nous pouvons nous rendre compte que le calcul d'une somme de températures nécessaire pour la formation d'une feuille est difficile à réaliser. Différentes erreurs ont cependant été commises lors de la récolte des données ce qui fausse les résultats que nous obtenons. La principale source d'erreur provient des observateurs. Diverses études ont effectivement mis en avant ce problème (Bock et al., 2015; Chiang et al., 2016; M. El Jarroudi et al., 2015). Pour l'acquisition de données, un grand nombre de personnes sont mobilisées chaque semaine. En effet, les équipes du LIST et de l'ULg travaillent ensemble pour le suivi phénologique et le suivi des maladies cryptogamiques. C'est pourquoi, il arrive qu'un site d'essais ne soit pas suivi par les mêmes observateurs d'une semaine à l'autre. De plus, vu la charge de travail, des jobistes ou stagiaires accompagnent et aident les chercheurs. Dès lors, ces personnes étant moins habituées pour estimer la croissance peuvent faire des erreurs.

Une autre source d'erreur pourrait être la distance séparant les stations météorologiques et les champs d'essais. Pour 3 stations, elles se situent à proximité. Seul le site de Burmerange a une station plus éloignée. Dès lors, le calcul de la somme des degrés-jours pourraient être inexacte.

Enfin, les données ont été collectées une fois par semaine. Pourtant, la croissance des feuilles est assez rapide (il faut en effet environ dix jours entre l'émergence d'une feuille et son déploiement total) (Heurer et al., 1978). Dès lors, lorsque le pourcentage moyen de formation est égal à 100, il se peut que deux jours avant l'observation, cette valeur était la même. Cela pourrait avoir un impact sur nos calculs puisque ces résultats sont mis en relation avec les sommes de degrés-jours. De plus, les observations étant hebdomadaires, le jeu de données sur lequel les régressions ont été effectuées est donc constitué de 7 à 9 valeurs.

Afin d'éviter les sources d'erreurs dont nous avons discuté, il serait intéressant pour les futures recherches sur la phénologie de prendre quelques mesures :

- Réaliser des observations deux ou trois fois par semaine pour avoir suffisamment de données pour effectuer les régressions. Dans l'étude de Xue, Weiss et Baenzinger de 2004, le suivi phénologique a été réalisé tous les trois jours et tous les jours lorsqu'une transition d'un stade de développement à l'autre était sur le point d'avoir lieu (Xue, Weiss, & Baenziger, 2004).
- Il est également important que ce soit une même personne qui réalise les observations. En effet, cela éviterait d'avoir des erreurs dans les pourcentages moyens de formation. Du moins, l'erreur serait la même à chaque observation.
- Enfin, il serait intéressant que les capteurs météorologiques soient placés dans les champs d'essais. Cela permettrait d'avoir des données précises sur le micro-climat de la parcelle et donc d'avoir un calcul de la somme des degrés-jours plus fiable.

Enfin, je terminerai cette discussion en rappelant que nos simulations ont été effectuées à partir de pourcentages moyens de formation de la feuille 3. Aucun ajustement de cette valeur n'a eu lieu lors de nos calculs. Or, dans l'outil PhytoProTech, les agriculteurs peuvent entrer la date à laquelle un stade de formation a été observé. Le modèle ajuste dès lors les simulations ce qui n'a pas été le cas dans ce travail.

CONCLUSION

L'objectif de ce travail était l'ajustement de la valeur du phyllotherme utilisé dans les modèles de développement de maladies de l'outil PhytoProTech.

Différentes analyses ont été effectuées sur une base de données historiques (2001 et de 2012 à 2014) et sur des données collectées sur le terrain cette année. Quatre sites d'essais se trouvant au Grand-Duché du Luxembourg ont été utilisés pour cette étude : il s'agit de la station d'Everlange, de Burmerange, de Christnach/Bettendorf et de Reuler. Le suivi phénologique a été réalisé de manière hebdomadaire.

En premier lieu, la comparaison des données nous a permis de nous rendre compte que la date de semis joue un rôle dans la vitesse de développement des céréales. Une variété semée tardivement nécessitera moins de degrés-jours pour réaliser sa croissance. Cela a été vérifié pour le site de Reuler où les dates de semis étaient en général plus tardives que pour les autres champs d'essais. Comme nous l'avons mentionné dans la première partie de ce travail, le photopériodisme pourrait être la raison de cette différence dans le taux de croissance. Il serait donc intéressant de mener une étude sur cette hypothèse.

Ensuite, nous avons démontré que le phyllotherme était différent pour chaque feuille mais également en fonction du site. Cette affirmation a été vérifiée d'une part par la simulation des phyllothermes et d'autre part grâce à l'analyse réalisée sur les fréquences d'émergences.

De plus, il a été prouvé que le phyllotherme était dépendant de la variété. En effet, les dernières feuilles formées d'une variété tardive ont une somme de températures moins importante que celles d'une variété hâtive.

Cependant, au terme de nos analyses, nous ne sommes pas capables de proposer une somme de températures ajustée à utiliser pour le modèle. En effet, l'hétérogénéité des phyllothermes obtenus, le peu de données et les erreurs commises dans les observations de terrain ne nous ont pas permis d'obtenir des résultats satisfaisants.

Nous suggérons donc pour les prochaines études d'avoir un suivi plus poussé de la phénologie afin d'acquérir un nombre suffisant de données, d'éviter les erreurs d'observations en n'ayant qu'une seule et même personne pour estimer la formation des feuilles sur la saison. Il serait également judicieux d'améliorer la somme des températures en installant des capteurs dans les champs d'essais.

BIBLIOGRAPHIE

- Abichou, M. (2009). *Facteurs affectant le rythme d'apparition foliaire chez le blé d'hiver*. (Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master en Sciences et Technologies du Vivant, Ed.). UMR INRA-AgroParisTech.
- AGROPTIMIZE : nouvelle start-up transnationale de la «Smart Agriculture». (2016). Retrieved May 28, 2017, from https://www.ulg.ac.be/cms/c_7472889/fr/agroptimize-nouvelle-start-up-transnationale-de-la-smart-agriculture
- AgrOtimize. (2017). AgrOptimize - Outils d'aide à la décision en agriculture de précision. In *Développement de nouvelles technologies pour rationaliser l'usage des produits phytopharmaceutiques*. Gembloux. Retrieved from <http://www.fwa.be/wordpressfwa/wp-content/uploads/downloads/2017/02/dufrasnes.pdf>
- Angus, J. F., Machenzie, D. H., Morton, R., & Schafer, C. a. (1981). Phasic development in field crops II. Thermal and photoperiodic responses of spring wheat. *Field Crops Research*, 4, 269–283. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(81\)90078-2](https://doi.org/10.1016/0378-4290(81)90078-2)
- ARVALIS Institut du végétal. (n.d.-a). Rouille brune - Maladie sur Blé tendre, blé dur, triticale, ARVALIS-infos.fr. Retrieved March 31, 2017, from http://www.fiches.arvalis-infos.fr/fiche_accident/fiches_accidents.php?mode=fa&type_cul=1&type_acc=4&id_acc=49
- ARVALIS Institut du végétal. (n.d.-b). Rouille jaune - Maladie sur Blé tendre, blé dur, triticale, ARVALIS-infos.fr. Retrieved March 31, 2017, from http://www.fiches.arvalis-infos.fr/fiche_accident/fiches_accidents.php?mode=fa&type_cul=1&type_acc=4&id_acc=48
- ARVALIS Institut du végétal. (n.d.-c). Septoriose - Maladie sur Blé tendre, blé dur, triticale, ARVALIS-infos.fr. Retrieved March 31, 2017, from http://www.fiches.arvalis-infos.fr/fiche_accident/fiches_accidents.php?mode=fa&type_cul=1&type_acc=4&id_acc=46
- BASF. (n.d.-a). La ramulariose - Maladies de l'orge | BASF. Retrieved March 31, 2017, from http://www.agro.basf.fr/agroportal/fr/fr/cultures/les_cereales/la_protection_phyto_de_l_orge/les_maladies_ravageurs_adventices/les_maladies1/Ramulariose_1.html
- BASF. (n.d.-b). Lexique des parasites : maladies, ravageurs et adventices - détail du parasite - BASF. Retrieved March 31, 2017, from http://www.agro.basf.fr/agroportal/fr/fr/services_et_outils/outils/lexique_des_parasites/pest_information_detailpage_43672.html
- BASF. (n.d.-c). Maladie de l'orge : l'helminthosporiose - BASF. Retrieved April 3, 2017, from http://www.agro.basf.fr/agroportal/fr/fr/cultures/les_cereales/la_protection_phyto_de_l_orge/les_maladies_ravageurs_adventices/les_maladies1/Helminthosporiose_de_l_orge.html
- BASF. (n.d.-d). Maladies de l'orge : la rhynchosporiose - BASF. Retrieved March 31, 2017, from http://www.agro.basf.fr/agroportal/fr/fr/cultures/les_cereales/la_protection_phyto_de_l_orge/les_maladies_ravageurs_adventices/les_maladies1/Rhynchosporiose.html
- BASF. (n.d.-e). Powdery mildew (wheat). Retrieved April 20, 2017, from <https://agriculture.basf.com/gb/en/Crop-Protection/Powdery-mildew-wheat.html>
- BASF. (2016). Maladie du blé : rouille brune - BASF. Retrieved from http://www.agro.basf.fr/agroportal/fr/fr/cultures/les_cereales/la_protection_phyto_du_ble/les_maladies_ravageurs_et_adventices/les_maladies/Rouille_brune.html
- Bayer. (2014). Helminthosporiose de l'orge : nuisible et complexe : Bayer-Agri. Retrieved April 3, 2017, from <http://www.bayer-agri.fr/protection-cultures/helminthosporiose-de-lorge/helminthosporiose-de-lorge-nuisible-et-complexe/>

- BAYER. (n.d.). Rouille naine de l'orge : Bayer-Agri. Retrieved March 31, 2017, from <http://www.bayer-agri.fr/protection-cultures/rouille-naine-de-lorge/>
- BAYER Crop Science. (n.d.). Rhynchosporium. Retrieved March 31, 2017, from <http://cropscience.bayer.co.uk/your-crop/crop-diseases-weeds-and-pests/diseases/barley-diseases/rhynchosporium/>
- Bock, C. H., El Jarroudi, M., Kouadio, L. A., Mackels, C., Chiang, K. S., & Delfosse, P. (2015). Disease Severity Estimates-Effects of Rater Accuracy and Assessment Methods for Comparing Treatments. *Plant Disease*, 99(8), 1104–1112. <https://doi.org/10.1094/PDIS-09-14-0925-RE>
- Bogard, M., Pierre, J. B., Huguenin-Bizot, B., Hourcade, D., Paux, E., Le Bris, X., & Gouache, D. (2015). A simple approach to predict growth stages in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) combining prediction of a crop model and marker based prediction of the deviation to a reference cultivar: A case study in France. *European Journal of Agronomy*, 68, 57–68. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.04.007>
- Bonhomme, R. (2000). Bases and limits to using “degree.day” units. *European Journal of Agronomy*, 13(1), 1–10. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00058-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00058-7)
- Bonin, L., Garcia, C., Lesouder, C., & Maufra, J. Y. (n.d.). Les clés pour reconnaître le stade épi 1 cm du blé tendre - ARVALIS-infos.fr. Retrieved March 28, 2017, from <https://www.arvalis-infos.fr/stade-epi-1-cm-un-marqueur-determinant-a-savoir-reperer-@/view-21013-arvarticle.html>
- Chiang, K. S., Bock, C. H., El Jarroudi, M., Delfosse, P., Lee, I. H., & Liu, H. I. (2016). Effects of rater bias and assessment method on disease severity estimation with regard to hypothesis testing. *Plant Pathology*, 65(4), 523–535. <https://doi.org/10.1111/ppa.12435>
- Dubrulle, P., Dupont, A., Publicol, M., Rousse, N., Baratte, C., Sohbi, Y., & Charron-Moirez, M.-H. (2014). *Rapport Outils d'Aide à la Décision*.
- Dumont, B., Vancutsem, F., Seutin, B., Bodson, B., Destain, J. P., & Destain, M. F. (2012). Simulation de la croissance du blé à l'aide de modèles écophysologiques: Synthèse bibliographique des méthodes, potentialités et limitations. *Biotechnology, Agronomy and Society and Environment*, 16(3), 382–392.
- El Hassani, T. A., & Persoons, E. (1994). *Bases physiologiques et agronomiques de la production végétale*. (Hatier, Ed.), *Agronomie moderne*. Paris.
- El Jarroudi, M. (2005). *Evaluation des paramètres épidémiologiques des principales maladies cryptogamiques affectant les feuilles du blé d'hiver au Grand-Duché de Luxembourg: Calibration et validation d'un modèle de prévision*. Université de Liège.
- El Jarroudi, M., Delfosse, P., Maraite, H., Hoffmann, L., & Tychon, B. (2009). Assessing the Accuracy of Simulation Model for Septoria Leaf Blotch Disease Progress on Winter Wheat. *Plant Disease*, 93(10), 983–992. <https://doi.org/10.1094/PDIS-93-10-0983>
- El Jarroudi, M., Giraud, F., Tychon, B., Hoffmann, L., Maraite, H., & Delfosse, P. (2011). Prévoir la septoriose Un modèle belge au Luxembourg. *Phytoma*, 1(642), 43–46.
- El Jarroudi, M., Kouadio, A. L., Mackels, C., Tychon, B., Delfosse, P., & Bock, C. H. (2015). A comparison between visual estimates and image analysis measurements to determine septoria leaf blotch severity in winter wheat. *Plant Pathology*, 64(2), 355–364. <https://doi.org/10.1111/ppa.12252>
- El Jarroudi, M., Kouadio, L., Bock, C., El Jarroudi, M., Junk, J., Pasquali, M., ... Delfosse, P. (2017). A threshold-based weather model for predicting stripe rust infection in winter wheat. *Plant Disease*, 693–703. <https://doi.org/10.1094/PDIS-12-16-1766-RE>
- El Jarroudi, M., Kouadio, L., Giraud, F., Delfosse, P., & Tychon, B. (2014). Brown rust disease control in winter wheat: II. Exploring the optimization of fungicide sprays through a decision support system. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(7), 4809–4818. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2557-9>

- EUR-Lex. (n.d.). Directive 2009/128/CE du Parlement européen et du Conseil. Retrieved June 5, 2017, from <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32009L0128>
- European Commission. (n.d.). Enjeux | Agriculture et développement rural. Retrieved June 5, 2017, from https://ec.europa.eu/agriculture/research-innovation/challenges_fr
- European Union. (2016). *Agriculture, forestry and fisheries statistics 2016 edition*. Luxembourg. <https://doi.org/10.2785/147560>
- Gate, P. (1995). *Ecophysiologie du blé : de la plante à la culture*. (Tec&Doc Lavoisier, Ed.). Paris.
- Heurer, G. F., Heermann, D. F., Mckee, T. B., & Benci, J. F. (1978). *Predicting Winter Wheat Phenology Using Temperature and Photoperiod*. Fort Collins.
- Hodges, T., & Doraiswamy, P. C. (1979). *Crop phenology literature review for corn, soybean, wheat, barley, sorghum, rice, cotton, and sunflower*.
- Jacquemin, P. (2010). *Contribution à l'évaluation de l'influence des conditions climatiques entre la maturité et la récolte sur le rendement du blé d'hiver au Luxembourg - Travail de fin d'études*. (Université de Liège, Ed.).
- Jamieson, P. D., Brooking, I. R., Porter, J. R., & Wilson, D. R. (1995). Prediction of leaf appearance in wheat: a question of temperature. *Field Crops Research*, 41(1), 35–44. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(94\)00102-1](https://doi.org/10.1016/0378-4290(94)00102-1)
- Junk, J., Kouadio, L., Delfosse, P., & El Jarroudi, M. (2016). Effects of regional climate change on brown rust disease in winter wheat. *Climatic Change*, 135(3–4), 439–451. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1587-8>
- Kirby, E. J. M., Appleyard, M., & Fellowes, G. (1985). Leaf emergence and tillering in barley and wheat. *Agronomie*, 5(3), 193–200. <https://doi.org/10.1051/agro:19850301>
- Lepage, M.-P., & Bourgeois, G. (2012). *Modèles bioclimatiques pour la prédiction de la phénologie*. (Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, Ed.). Québec.
- Lepage, M.-P., Bourgeois, G., & Bélanger, G. (2012). *Indices agrométéorologiques pour l'aide à la décision dans un contexte de climat variable et en évolution*. Québec.
- Mahtour, A., El Jarroudi, M., Delobbe, L., Hoffmann, L., Maraite, H., & Tychon, B. (2011). Site-Specific Septoria Leaf Blotch Risk Assessment in Winter Wheat Using Weather-Radar Rainfall Estimates. *Plant Disease*, 95(4), 384–393. <https://doi.org/10.1094/Pdis-07-10-0482>
- McMaster, G. S., & Wilhelm, W. W. (1997). Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 87(1), 291–300. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(97\)00027-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(97)00027-0)
- McMaster, G. S., & Wilhelm, W. W. (2003). Phenological responses of wheat and barley to water and temperature: improving simulation models. *The Journal of Agricultural Science*, 141(2), 129–147. <https://doi.org/10.1017/S0021859603003460>
- Minet, J., & Tychon, B. (n.d.). *Calibration et optimisation de modèles*. Retrieved from http://www.nobohan.be/docs/InverseModelling_ULg_Arlon.pdf
- Ministère de l'Agriculture, de la Viticulture et la Protection des consommateurs, S. d'Economie rurale. (2015). *L'agriculture luxembourgeoise en chiffres*. (de la V. et de la P. des consommateurs Ministère de l'Agriculture, Ed.). Luxembourg.
- Ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires Rurales de l'Ontario. (2009). Céréales : Semis et croissance de la culture. Retrieved March 29, 2017, from <http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/pub811/4planting.htm>

- Moniteur Belge - Belgisch Staatsblad. (n.d.). Arrêté royal pour parvenir à une utilisation des produits phytopharmaceutiques et adjuvants compatibles avec le développement durable. Retrieved June 5, 2017, from <http://www.ejustice.just.fgov.be/cgi/api2.pl?lg=fr&pd=2013-04-16&numac=2013024124>
- Odum, E. P. (1975). *Ecologie*. (Doin, Ed.).
- Rauff, K. O., & Bello, R. (2015). A Review of Crop Growth Simulation Models as Tools for Agricultural Meteorology. *Agricultural Sciences*, (September), 1098–1105. <https://doi.org/10.4236/as.2015.69105>
- Ritchie, J. T., & NeSmith, D. S. (1991). Temperature and crop development. *Modeling Plant and Soil Systems*, (31), 5–29. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr31.c2>
- Shaykewich, C. F. (1995). An appraisal of cereal crop phenology modelling. *Canadian Journal of Plant Science*, 75(2), 329–341. <https://doi.org/10.4141/cjps95-057>
- SPF Economie, P.M.E, C. moyennes et E. (n.d.). Agriculture - Chiffres agricoles de 2015. Retrieved May 28, 2017, from http://statbel.fgov.be/fr/modules/publications/statistiques/economie/downloads/agriculture_-_chiffres_agricoles_de_2015.jsp
- Statistiques // Luxembourg - Accueil. (n.d.). Retrieved May 20, 2017, from <http://www.statistiques.public.lu/fr/index.html>
- Syngenta. (n.d.-a). Helminthosporiose de l'orge - Drechslera teres Maladies | Syngenta France. Retrieved April 3, 2017, from <https://www.syngenta.fr/traitements/helminthosporiose-de-lorge-drechslera-teres>
- Syngenta. (n.d.-b). Oïdium sur blé ou orge Maladies | Syngenta France. Retrieved April 20, 2017, from <https://www.syngenta.fr/traitements/oidium-sur-ble-ou-orge>
- Syngenta. (n.d.-c). Ramulariose de l'orge Maladies | Syngenta France. Retrieved March 31, 2017, from <https://www.syngenta.fr/traitements/ramulariose-de-lorge>
- Traullé, M.-P. (n.d.). Température et agriculture. Retrieved June 2, 2017, from http://www.meteoalecole.org/docs/Ressources/Ressources_scientifiques/62_-_agriculture_et_temperatures.pdf
- Universalis. (n.d.). PHOTOPÉRIODISME - Encyclopædia Universalis. Retrieved June 5, 2017, from <http://www.universalis.fr/encyclopedie/photoperiodisme/>
- WANAKA. (n.d.). Gestion des risques phytosanitaires | Phytotech. Retrieved May 28, 2017, from <http://www.wanaka.io/phytos.html>
- Wang, E., & Engel, T. (1998). Simulation of phenological development of wheat crops. *Agricultural Systems*, 58(1), 1–24. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(98\)00028-6](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(98)00028-6)
- Xue, Q., Weiss, A., & Baenziger, P. S. (2004). Predicting phenological development in winter wheat. *Climate Research*, 25(3), 243–252. <https://doi.org/10.3354/cr025243>
- Zadoks, J. C., Chang, T. T., & Konzak, C. F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research*, 14(6), 415–421. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x>
- Zillinsky, F. J. (1983). *Maladies Communes des Céréales à Paille : Guide d'identification*. (Centre International pour l'Amélioration du Maïs et du Blé, Ed.). Londres, Mexico.

ANNEXES

Annexe I : Moyennes et écarts-types des observations (2012 à 2014 et 2017)

2012 – Blé

- Everlange

Variété Achat

		FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	Stade
23-04-12	Moyenne	0.0	0.0	8.6	91.6	100.0	31
	Ecart-type	0.0	0.0	12.4	10.8	0.0	
30-04-12	Moyenne	0.0	24.1	82.9	100.0	100.0	32
	Ecart-type	0.0	34.1	29.1	0.0	0.0	
07-05-12	Moyenne	3.3	75.8	100.0	100.0	100.0	37
	Ecart-type	6.5	30.9	0.0	0.0	0.0	
14-05-12	Moyenne	23.8	63.9	100.0	100.0	100.0	37
	Ecart-type	27.6	46.4	0.0	0.0	0.0	
21-05-12	Moyenne	72.6	100.0	100.0	100.0	100.0	39
	Ecart-type	30.1	0.0	0.0	0.0	0.0	
29-05-12	Moyenne	92.0	100.0	100.0	100.0	100.0	45-59
	Ecart-type	15.6	0.0	0.0	0.0	0.0	
04-06-12	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	59-62
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
11-06-12	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	65-69
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

Variété Cubus

		FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	Stade
23-04-12	Moyenne	0.0	0.0	27.4	95.8	100.0	32
	Ecart-type	0.0	0.0	24.6	12.0	0.0	
30-04-12	Moyenne	0.0	5.8	34.1	100.0	100.0	37
	Ecart-type	0.0	8.1	38.8	0.0	0.0	
07-05-12	Moyenne	3.2	77.7	100.0	100.0	100.0	37
	Ecart-type	5.3	32.8	0.0	0.0	0.0	
14-05-12	Moyenne	31.4	82.6	100.0	100.0	100.0	37
	Ecart-type	32.0	29.5	0.0	0.0	0.0	
21-05-12	Moyenne	85.6	100.0	100.0	100.0	100.0	39-49
	Ecart-type	22.6	0.0	0.0	0.0	0.0	
29-05-12	Moyenne	98.6	100.0	100.0	100.0	100.0	59-61
	Ecart-type	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	
04-06-12	Moyenne	99.8	100.0	100.0	100.0	100.0	61-62
	Ecart-type	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	
11-06-12	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	65-69
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

- Burmerange

Variété Cubus

		FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	Stade
23-04-12	Moyenne	0.0	0.0	38.5	98.6	100.0	31-32
	Ecart-type	0.0	0.0	35.5	5.7	0.0	
30-04-12	Moyenne	0.0	11.9	82.1	100.0	100.0	32
	Ecart-type	0.0	18.7	27.5	0.0	0.0	
07-05-12	Moyenne	1.2	64.7	100.0	100.0	100.0	37
	Ecart-type	5.5	35.3	0.0	0.0	0.0	
14-05-12	Moyenne	37.7	98.3	100.0	100.0	100.0	37
	Ecart-type	31.9	6.8	0.0	0.0	0.0	
21-05-12	Moyenne	86.8	100.0	100.0	100.0	100.0	39-49
	Ecart-type	18.4	0.0	0.0	0.0	0.0	
29-05-12	Moyenne	99.5	100.0	100.0	100.0	100.0	45-59
	Ecart-type	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	
04-06-12	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	63
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
11-06-12	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	67-69
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

- Christnach

Variété Matrix

		FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	Stade
23-04-12	Moyenne	0.0	0.0	51.2	96.3	100.0	31
	Ecart-type	0.0	0.0	35.2	8.1	0.0	
30-04-12	Moyenne	0.0	0.0	49.5	99.5	100.0	31-37
	Ecart-type	0.0	0.0	31.3	2.2	0.0	
07-05-12	Moyenne	1.0	64.1	100.0	100.0	100.0	32-33
	Ecart-type	2.6	30.4	0.0	0.0	0.0	
14-05-12	Moyenne	28.0	92.0	100.0	100.0	100.0	37-39
	Ecart-type	32.9	20.3	0.0	0.0	0.0	
21-05-12	Moyenne	54.1	100.0	100.0	100.0	100.0	37+ -> 47
	Ecart-type	31.6	0.0	0.0	0.0	0.0	
29-05-12	Moyenne	90.8	100.0	100.0	100.0	100.0	45-55
	Ecart-type	14.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
04-06-12	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	57-59
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
11-06-12	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	65
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

- Reuler

Variété Arktis

		FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	Stade
23-04-12	Moyenne	0.0	0.0	4.3	65.3	99.9	30
	Ecart-type	0.0	0.0	8.6	35.2	0.3	
30-04-12	Moyenne	0.0	2.9	60.0	98.4	100.0	31-32
	Ecart-type	0.0	13.4	34.0	5.8	0.0	
07-05-12	Moyenne	1.1	38.3	86.8	100.0	100.0	32-33
	Ecart-type	3.1	40.1	20.9	0.0	0.0	
14-05-12	Moyenne	4.3	55.7	97.4	100.0	100.0	32-35
	Ecart-type	14.6	43.1	13.5	0.0	0.0	
21-05-12	Moyenne	57.6	100.0	100.0	100.0	100.0	37-45
	Ecart-type	28.9	0.0	0.0	0.0	0.0	
29-05-12	Moyenne	93.3	100.0	100.0	100.0	100.0	39-49/51
	Ecart-type	11.7	0.0	0.0	0.0	0.0	
04-06-12	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	55-57
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
11-06-12	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	61-62
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

2012 – Orge

- Everlange

KWS Cassia

		FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	Stade
23-04-12	Moy	0.0	6.5	100.0	100.0	100.0	31
	Ecart-Type	0.0	5.3	0.0	0.0	0.0	
30-04-12	Moy	20.0	89.0	100.0	100.0	100.0	32+ -39
	Ecart-Type	26.1	25.7	0.0	0.0	0.0	
07-05-12	Moy	29.8	96.5	100.0	100.0	100.0	45
	Ecart-Type	35.2	15.7	0.0	0.0	0.0	
14-05-12	Moy	39.8	100.0	100.0	100.0	100.0	45
	Ecart-Type	25.7	0.0	0.0	0.0	0.0	
21-05-12	Moy	67.8	100.0	100.0	100.0	100.0	61
	Ecart-Type	26.7	0.0	0.0	0.0	0.0	
29-05-12	Moy	99.0	100.0	100.0	100.0	100.0	68
	Ecart-Type	4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	
04-06-12	Moy	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	73
	Ecart-Type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

Variété Leibnitz

		FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	Stade
23-04-12	Moy	0.0	12.0	98.5	100.0	100.0	32
	Ecart-Type	0.0	8.5	4.9	0.0	0.0	
30-04-12	Moy	8.8	85.0	100.0	100.0	100.0	39
	Ecart-Type	8.4	23.7	0.0	0.0	0.0	
07-05-12	Moy	69.8	100.0	100.0	100.0	100.0	41
	Ecart-Type	23.5	0.0	0.0	0.0	0.0	
14-05-12	Moy	74.0	100.0	100.0	100.0	100.0	49
	Ecart-Type	25.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
21-05-12	Moy	97.0	100.0	100.0	100.0	100.0	61
	Ecart-Type	9.8	0.0	0.0	0.0	0.0	
29-05-12	Moy	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	68
	Ecart-Type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
04-06-12	Moy	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	73
	Ecart-Type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

- Burmerange

Variété Campanile

		FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	Stade
16-04-12	Moy	0.0	53.8	99.5	100.0	100.0	32
	Ecart-Type	0.0	21.9	2.2	0.0	0.0	
23-04-12	Moy	18.1	48.3	62.8	99.0	100.0	37
	Ecart-Type	23.2	49.3	39.6	6.3	0.0	
30-04-12	Moy	23.8	95.9	100.0	100.0	100.0	37
	Ecart-Type	21.6	11.5	0.0	0.0	0.0	
07-05-12	Moy	85.0	100.0	100.0	100.0	100.0	39-40+
	Ecart-Type	22.4	0.0	0.0	0.0	0.0	
14-05-12	Moy	87.3	100.0	100.0	100.0	100.0	51-55
	Ecart-Type	21.7	0.0	0.0	0.0	0.0	
21-05-12	Moy	94.8	100.0	100.0	100.0	100.0	65
	Ecart-Type	18.5	0.0	0.0	0.0	0.0	
29-05-12	Moy	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	69
	Ecart-Type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
04-06-12	Moy	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	85
	Ecart-Type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

- Christnach

Variété Anisette

		FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	Stade
16-04-12	Moy	1.5	45.5	98.5	100.0	100.0	32
	Ecart-Type	6.7	20.1	6.7	0.0	0.0	
23-04-12	Moy	0.9	40.1	81.6	100.0	100.0	32
	Ecart-Type	3.6	41.0	25.3	0.0	0.0	
30-04-12	Moy	43.8	72.0	100.0	100.0	100.0	37
	Ecart-Type	38.3	40.8	0.0	0.0	0.0	
07-05-12	Moy	60.0	92.4	100.0	100.0	100.0	39+
	Ecart-Type	28.5	24.3	0.0	0.0	0.0	
14-05-12	Moy	77.9	96.5	100.0	100.0	100.0	49-55
	Ecart-Type	29.8	16.3	0.0	0.0	0.0	
21-05-12	Moy	97.6	100.0	100.0	100.0	100.0	61-62
	Ecart-Type	7.7	0.0	0.0	0.0	0.0	
29-05-12	Moy	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
	Ecart-Type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
04-06-12	Moy	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	75
	Ecart-Type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

- Reuler

Variété Campanile

		FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	Stade
16-04-12	Moy	0.0	36.5	99.5	100.0	100.0	32
	Ecart-Type	0.0	18.7	1.5	0.0	0.0	
23-04-12	Moy	1.0	32.9	89.0	100.0	100.0	32-37
	Ecart-Type	5.0	30.7	24.9	0.0	0.0	
30-04-12	Moy	20.0	86.0	100.0	100.0	100.0	37
	Ecart-Type	23.5	29.5	0.0	0.0	0.0	
07-05-12	Moy	70.6	99.3	100.0	100.0	100.0	40-40+
	Ecart-Type	36.5	3.5	0.0	0.0	0.0	
14-05-12	Moy	71.5	100.0	100.0	100.0	100.0	45-49
	Ecart-Type	34.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
21-05-12	Moy	91.0	100.0	100.0	100.0	100.0	62
	Ecart-Type	25.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
29-05-12	Moy	96.0	100.0	100.0	100.0	100.0	68
	Ecart-Type	15.2	0.0	0.0	0.0	0.0	
04-06-12	Moy	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	82
	Ecart-Type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

2013 – Blé

- Everlange

Variété		Achat		FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	Stade
29-04-13	Moyenne	0.0	0.0	0.3	29.3	100.0			30
	Ecart-type	0.0	0.0	1.1	24.6	0.0			
06-05-13	Moyenne	0.0	0.0	23.8	100.0	100.0			31
	Ecart-type	0.0	0.0	23.8	0.0	0.0			
13-05-13	Moyenne	0.0	15.5	96.0	100.0	100.0			32
	Ecart-type	0.0	16.8	7.4	0.0	0.0			
21-05-13	Moyenne	2.0	79.0	100.0	100.0	100.0			37
	Ecart-type	2.5	27.5	0.0	0.0	0.0			
27-05-13	Moyenne	23.8	99.5	100.0	100.0	100.0			37
	Ecart-type	24.0	2.2	0.0	0.0	0.0			
03-06-13	Moyenne	84.5	100.0	100.0	100.0	100.0			40
	Ecart-type	13.4	0.0	0.0	0.0	0.0			
10-06-13	Moyenne	95.5	100.0	100.0	100.0	100.0			45
	Ecart-type	8.9	0.0	0.0	0.0	0.0			
17-06-13	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0			63
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			

Variété		Cubus		FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	Stade
29-04-13	Moyenne	0.0	0.0	0.0	20.8	100.0			30
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	17.9	0.0			
06-05-13	Moyenne	0.0	0.0	28.0	100.0	100.0			31
	Ecart-type	0.0	0.0	23.7	0.0	0.0			
13-05-13	Moyenne	0.0	15.8	98.0	100.0	100.0			32
	Ecart-type	0.0	15.7	5.0	0.0	0.0			
21-05-13	Moyenne	1.9	88.5	100.0	100.0	100.0			37
	Ecart-type	2.9	19.8	0.0	0.0	0.0			
27-05-13	Moyenne	10.3	100.0	100.0	100.0	100.0			37
	Ecart-type	10.9	0.0	0.0	0.0	0.0			
03-06-13	Moyenne	68.7	100.0	100.0	100.0	100.0			39
	Ecart-type	17.7	0.0	0.0	0.0	0.0			
10-06-13	Moyenne	98.5	100.0	100.0	100.0	100.0			45
	Ecart-type	4.9	0.0	0.0	0.0	0.0			
17-06-13	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0			59-61
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			

- Burmerange

Variété Kerubino

		FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	Stade
29-04-13	Moyenne	0.0	3.7	67.8	87.0	100.0	30
	Ecart-type	0.0	7.4	33.3	27.8	0.0	
06-05-13	Moyenne	0.0	17.0	93.0	100.0	100.0	33
	Ecart-type	0.0	15.8	20.9	0.0	0.0	
13-05-13	Moyenne	0.0	6.8	96.5	100.0	100.0	32
	Ecart-type	0.0	8.2	7.5	0.0	0.0	
21-05-13	Moyenne	41.7	100.0	100.0	100.0	100.0	
	Ecart-type	30.7	0.0	0.0	0.0	0.0	
27-05-13	Moyenne	54.3	100.0	100.0	100.0	100.0	37
	Ecart-type	29.5	0.0	0.0	0.0	0.0	
03-06-13	Moyenne	98.3	100.0	100.0	100.0	100.0	45
	Ecart-type	8.4	0.0	0.0	0.0	0.0	
10-06-13	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	61
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
17-06-13	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	65-67
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

- Christnach

Variété Orcas

		FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	Stade
29-04-13	Moyenne	0.0	0.0	3.8	55.0	100.0	30
	Ecart-type	0.0	0.0	15.6	28.9	0.0	
06-05-13	Moyenne	0.0	0.0	27.0	100.0	100.0	
	Ecart-type	0.0	0.0	21.6	0.0	0.0	
13-05-13	Moyenne	0.0	27.0	100.0	100.0	100.0	32
	Ecart-type	0.0	15.8	0.0	0.0	0.0	
21-05-13	Moyenne	12.0	66.0	100.0	100.0	100.0	37
	Ecart-type	23.5	45.0	0.0	0.0	0.0	
27-05-13	Moyenne	18.0	99.0	100.0	100.0	100.0	37
	Ecart-type	14.8	4.5	0.0	0.0	0.0	
03-06-13	Moyenne	76.0	100.0	100.0	100.0	100.0	40
	Ecart-type	23.3	0.0	0.0	0.0	0.0	
10-06-13	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
17-06-13	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

Reuler

Variété Kerubino

		FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	Stade
29-04-13	Moyenne	0.0	0.0	0.0	10.0	100.0	28
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	11.0	0.0	
06-05-13	Moyenne	0.0	0.0	0.0	32.5	98.0	
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	32.3	4.2	
13-05-13	Moyenne	0.0	0.8	39.3	96.0	100.0	31
	Ecart-type	0.0	2.4	32.6	13.9	0.0	
21-05-13	Moyenne	0.0	41.3	100.0	100.0	100.0	32
	Ecart-type	0.0	29.1	0.0	0.0	0.0	
27-05-13	Moyenne	3.3	81.0	100.0	100.0	100.0	37
	Ecart-type	7.3	18.9	0.0	0.0	0.0	
03-06-13	Moyenne	14.3	100.0	100.0	100.0	100.0	37
	Ecart-type	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
10-06-13	Moyenne	85.3	100.0	100.0	100.0	100.0	39
	Ecart-type	13.4	0.0	0.0	0.0	0.0	
17-06-13	Moyenne	91.0	100.0	100.0	100.0	100.0	40
	Ecart-type	7.2	0.0	0.0	0.0	0.0	

2013 – Orge

- Everlange

Variété Leibniz

		FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	Stade
29-04-13	Moyenne	0.0	0.0	21.1	98.8	100.0	31
	Ecart-type	0.0	0.0	24.3	3.2	0.0	
06-05-13	Moyenne	7.6	87.8	100.0	100.0	100.0	37
	Ecart-type	11.1	18.8	0.0	0.0	0.0	
13-05-13	Moyenne	57.3	100.0	100.0	100.0	100.0	39
	Ecart-type	33.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
21-05-13	Moyenne	83.8	100.0	100.0	100.0	100.0	51
	Ecart-type	22.8	0.0	0.0	0.0	0.0	
27-05-13	Moyenne	98.5	100.0	100.0	100.0	100.0	55
	Ecart-type	4.9	0.0	0.0	0.0	0.0	
03-06-13	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	62-65
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
10-06-13	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	72
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
17-06-13	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	75
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

- Burmerange

Variété Campanile		FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	Stade
29-04-13	Moyenne	0.0	0.8	7.4	37.1	82.5	30
	Ecart-type	0.0	4.7	22.4	41.2	25.5	
06-05-13	Moyenne	0.0	25.4	95.3	100.0	100.0	32
	Ecart-type	0.2	20.3	14.7	0.0	0.0	
13-05-13	Moyenne	22.4	96.0	100.0	100.0	100.0	37
	Ecart-type	24.6	13.7	0.0	0.0	0.0	
21-05-13	Moyenne	64.1	100.0	100.0	100.0	100.0	39-47
	Ecart-type	36.2	0.0	0.0	0.0	0.0	
27-05-13	Moyenne	60.0	100.0	100.0	100.0	100.0	51
	Ecart-type	33.6	0.0	0.0	0.0	0.0	
03-06-13	Moyenne	40.6	100.0	100.0	100.0	100.0	65
	Ecart-type	46.8	0.0	0.0	0.0	0.0	
10-06-13	Moyenne	97.3	100.0	100.0	100.0	100.0	63
	Ecart-type	14.6	0.0	0.0	0.0	0.0	
17-06-13	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	77
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

- Christnach

Variété Anisette		FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	Stade
22-04-13	Moyenne	0.0	0.0	0.0	0.0	56.3	29+
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	24.1	
29-04-13	Moyenne	0.0	0.0	11.5	87.3	100.0	31- ->31
	Ecart-type	0.0	0.0	15.2	20.0	0.0	
06-05-13	Moyenne	11.0	56.7	100.0	100.0	100.0	32-33
	Ecart-type	19.7	37.1	0.0	0.0	0.0	
13-05-13	Moyenne	89.0	100.0	100.0	100.0	100.0	39
	Ecart-type	24.2	0.0	0.0	0.0	0.0	
21-05-13	Moyenne	89.0	100.0	100.0	100.0	100.0	51
	Ecart-type	17.4	0.0	0.0	0.0	0.0	
27-05-13	Moyenne	95.0	100.0	100.0	100.0	100.0	55
	Ecart-type	12.4	0.0	0.0	0.0	0.0	
03-06-13	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	61-62
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
10-06-13	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	69
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
17-06-13	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	73-77
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

2014 – Blé

- Everlange

Variété		Privileg					Stade
		FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	
14-04-14	Moyenne	0.0	0.0	18.3	93.0	100.0	31
	Ecart-type	0.0	0.0	23.8	15.7	0.0	
22-04-14	Moyenne	0.0	13.2	94.3	100.0	100.0	32 - 33
	Ecart-type	0.0	21.5	10.8	0.0	0.0	
28-04-14	Moyenne	6.3	63.8	100.0	100.0	100.0	31+
	Ecart-type	20.0	30.9	0.0	0.0	0.0	
05-05-14	Moyenne	13.5	98.5	100.0	100.0	100.0	32-39
	Ecart-type	15.2	7.0	0.0	0.0	0.0	
12-05-14	Moyenne	70.8	100.0	100.0	100.0	100.0	39-39+
	Ecart-type	30.5	0.0	0.0	0.0	0.0	
19-05-14	Moyenne	88.6	100.0	100.0	100.0	100.0	42
	Ecart-type	18.9	0.0	0.0	0.0	0.0	
26-05-14	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	55
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
02-06-14	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	65
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
10-06-14	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	69
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

- Burmerange

Variété		JB Asano					Stade
		FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	
14-04-14	Moyenne	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	32
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
22-04-14	Moyenne	0.0	39.6	97.5	100.0	100.0	32
	Ecart-type	0.0	27.7	8.1	0.0	0.0	
28-04-14	Moyenne	6.2	92.5	100.0	100.0	100.0	37
	Ecart-type	4.5	20.9	0.0	0.0	0.0	
05-05-14	Moyenne	56.0	100.0	100.0	100.0	100.0	41
	Ecart-type	28.2	0.0	0.0	0.0	0.0	
12-05-14	Moyenne	86.8	100.0	100.0	100.0	100.0	45
	Ecart-type	19.1	0.0	0.0	0.0	0.0	
19-05-14	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	57
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
26-05-14	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	65
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
02-06-14	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
10-06-14	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

- Bettendorf

Variété Achat		FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	Stade
14-04-14	Moyenne	0.0	0.0	48.8	95.3	100.0	30
	Ecart-type	0.0	0.0	38.2	12.3	0.0	
22-04-14	Moyenne	0.0	5.6	87.6	100.0	100.0	30-31
	Ecart-type	0.0	10.0	16.5	0.0	0.0	
28-04-14	Moyenne	3.0	72.2	100.0	100.0	100.0	32-32+
	Ecart-type	6.4	29.6	0.0	0.0	0.0	
05-05-14	Moyenne	19.3	96.9	100.0	100.0	100.0	37-39
	Ecart-type	27.5	8.8	0.0	0.0	0.0	
12-05-14	Moyenne	49.2	100.0	100.0	100.0	100.0	39-40
	Ecart-type	35.5	0.0	0.0	0.0	0.0	
19-05-14	Moyenne	90.5	100.0	100.0	100.0	100.0	42-49
	Ecart-type	13.8	0.0	0.0	0.0	0.0	
26-05-14	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	52
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
02-06-14	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	62
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
10-06-14	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	69
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

Variété Kerubino		FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	Stade
14-04-14	Moyenne	0.0	15.4	72.8	100.0	100.0	30
	Ecart-type	0.0	30.7	32.2	0.0	0.0	
22-04-14	Moyenne	0.5	14.4	92.8	100.0	100.0	32
	Ecart-type	3.2	21.0	12.6	0.0	0.0	
28-04-14	Moyenne	3.3	80.6	100.0	100.0	100.0	32-32+
	Ecart-type	4.9	29.3	0.0	0.0	0.0	
05-05-14	Moyenne	53.2	99.7	100.0	100.0	100.0	37-39
	Ecart-type	27.6	1.6	0.0	0.0	0.0	
12-05-14	Moyenne	94.1	100.0	100.0	100.0	100.0	39-41
	Ecart-type	14.8	0.0	0.0	0.0	0.0	
19-05-14	Moyenne	98.5	100.0	100.0	100.0	100.0	42-51
	Ecart-type	3.6	0.0	0.0	0.0	0.0	
26-05-14	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	59
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
02-06-14	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	65
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
10-06-14	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	72
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

- Reuler

Variété Kerubino		FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	Stade
14-04-14	Moyenne	0.0	0.0	50.8	100.0	100.0	28
	Ecart-type	0.0	0.0	34.5	0.0	0.0	
22-04-14	Moyenne	0.0	3.8	56.5	100.0	100.0	30
	Ecart-type	0.0	11.3	31.5	0.2	0.0	
28-04-14	Moyenne	2.6	63.4	98.8	100.0	100.0	31
	Ecart-type	7.3	39.6	5.6	0.0	0.0	
05-05-14	Moyenne	2.8	77.0	100.0	100.0	100.0	32
	Ecart-type	5.8	25.2	0.0	0.0	0.0	
12-05-14	Moyenne	33.3	100.0	100.0	100.0	100.0	37
	Ecart-type	32.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
19-05-14	Moyenne	85.5	100.0	100.0	100.0	100.0	39-40
	Ecart-type	20.6	0.0	0.0	0.0	0.0	
26-05-14	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	49
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
02-06-14	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	59
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
10-06-14	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	65
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

2014 – Orge

- Everlange

Variété Meridian		FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	Stade
14-04-14	Moyenne	35.0	100.0	100.0	100.0	100.0	37
	Ecart-type	27.7	0.0	0.0	0.0	0.0	
22-04-14	Moyenne	91.1	100.0	100.0	100.0	100.0	39-40
	Ecart-type	16.5	0.0	0.0	0.0	0.0	
28-04-14	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	49
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
05-05-14	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	62-65
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
12-05-14	Moyenne	99.5	100.0	100.0	100.0	100.0	68-69
	Ecart-type	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	
19-05-14	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	75
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

- Buremerange

Variété Sandra

		FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	Stade
14-04-14	Moyenne	69.0	100.0	100.0	100.0	100.0	37
	Ecart-type	30.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
22-04-14	Moyenne	77.8	100.0	100.0	100.0	100.0	37-39
	Ecart-type	30.1	0.0	0.0	0.0	0.0	
28-04-14	Moyenne	93.8	100.0	100.0	100.0	100.0	62
	Ecart-type	17.3	0.0	0.0	0.0	0.0	
05-05-14	Moyenne	99.5	100.0	100.0	100.0	100.0	67
	Ecart-type	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	
12-05-14	Moyenne	96.8	100.0	100.0	100.0	100.0	69
	Ecart-type	11.4	0.0	0.0	0.0	0.0	
19-05-14	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

- Bettendorf

Variété Leibniz

		FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	Stade
14-04-14	Moyenne	74.3	100.0	100.0	100.0	100.0	35
	Ecart-type	31.8	0.0	0.0	0.0	0.0	
22-04-14	Moyenne	84.3	100.0	100.0	100.0	100.0	40+ -> 41
	Ecart-type	26.2	0.0	0.0	0.0	0.0	
28-04-14	Moyenne	98.4	100.0	100.0	100.0	100.0	49
	Ecart-type	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	
05-05-14	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	65-66
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
12-05-14	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	67
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
19-05-14	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	72
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

- Reuler

Variété California

		FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	Stade
14-04-14	Moyenne	0.0	34.1	99.0	100.0	100.0	32
	Ecart-type	0.0	34.5	3.1	0.0	0.0	
22-04-14	Moyenne	38.8	100.0	100.0	100.0	100.0	39
	Ecart-type	34.5	0.0	0.0	0.0	0.0	
28-04-14	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	40
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
05-05-14	Moyenne	94.0	100.0	100.0	100.0	100.0	45-49
	Ecart-type	14.3	0.0	0.0	0.0	0.0	
12-05-14	Moyenne	98.0	100.0	100.0	100.0	100.0	52-62
	Ecart-type	12.6	0.0	0.0	0.0	0.0	
19-05-14	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	69
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

2017 – Blé

- Everlange

Variété Manitou

		FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	Stade
18-04-17	Moyenne	0.0	0.0	0.0	30.8	97.0	30
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	29.2	11.7	
24-04-17	Moyenne	0.0	0.0	19.1	91.7	100.0	31
	Ecart-type	0.0	0.0	25.6	11.7	0.0	
02-05-17	Moyenne	0.0	0.0	64.2	100.0	100.0	31
	Ecart-type	0.0	0.0	27.1	0.0	0.0	
08-05-17	Moyenne	0.0	8.6	90.9	100.0	100.0	32
	Ecart-type	0.0	14.3	13.2	0.0	0.0	
15-05-17	Moyenne	4.2	42.7	100.0	100.0	100.0	32
	Ecart-type	5.7	43.2	0.0	0.0	0.0	
22-05-17	Moyenne	86.3	100.0	100.0	100.0	100.0	37
	Ecart-type	21.9	0.0	0.0	0.0	0.0	
29-05-17	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	45
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

- Burmerange

Variété Kerubino

		FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	Stade
18-04-17	Moyenne	0.0	0.0	0.0	63.3	100.0	30
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	23.7	0.0	
24-04-17	Moyenne	0.0	0.0	0.0	47.1	100.0	32
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	28.4	0.0	
02-05-17	Moyenne	0.0	0.0	29.4	90.4	100.0	34
	Ecart-type	0.0	0.0	26.0	25.2	0.0	
08-05-17	Moyenne	4.9	68.4	95.3	100.0	100.0	36
	Ecart-type	7.7	36.4	19.0	0.0	0.0	
15-05-17	Moyenne	50.3	100.0	100.0	100.0	100.0	39
	Ecart-type	15.3	0.0	0.0	0.0	0.0	
22-05-17	Moyenne	75.5	100.0	100.0	100.0	100.0	51
	Ecart-type	16.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
29-05-17	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	65
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

- Bettendorf

Variété Kerubino

		FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	Stade
18-04-17	Moyenne	0.0	0.0	0.0	47.0	100.0	30
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	34.2	0.0	
24-04-17	Moyenne	0.0	0.0	8.6	63.7	100.0	31
	Ecart-type	0.0	0.0	15.6	37.7	0.0	
02-05-17	Moyenne	0.0	13.9	88.3	100.0	100.0	31+
	Ecart-type	0.0	20.9	21.8	0.0	0.0	
08-05-17	Moyenne	0.0	11.1	87.5	100.0	100.0	32
	Ecart-type	0.0	20.5	19.5	0.0	0.0	
15-05-17	Moyenne	58.4	98.8	100.0	100.0	100.0	37
	Ecart-type	33.6	3.7	0.0	0.0	0.0	
22-05-17	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	39
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
29-05-17	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	55
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

Variété Achat

		FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	Stade
18-04-17	Moyenne	0.0	0.0	1.1	46.3	100.0	30
	Ecart-type	0.0	0.0	3.3	35.7	0.0	
24-04-17	Moyenne	0.0	0.0	7.3	78.2	99.6	30+
	Ecart-type	0.0	0.0	12.8	23.4	1.0	
02-05-17	Moyenne	0.0	2.8	83.6	99.3	100.0	31+
	Ecart-type	0.0	4.9	20.5	1.6	0.0	
08-05-17	Moyenne	0.0	13.0	89.1	100.0	100.0	32
	Ecart-type	0.0	22.2	13.8	0.0	0.0	
15-05-17	Moyenne	0.0	49.5	100.0	100.0	100.0	33
	Ecart-type	0.0	22.4	0.0	0.0	0.0	
22-05-17	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	39
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
29-05-17	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	55
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

- Reuler

Variété Kerubino

		FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	Stade
18-04-17	Moyenne	0.0	0.0	0.0	0.0	44.8	29
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	28.6	
24-04-17	Moyenne	0.0	0.0	0.0	19.3	93.1	30
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	21.6	14.6	
02-05-17	Moyenne	0.0	0.0	16.8	93.3	100.0	31
	Ecart-type	0.0	0.0	21.2	11.4	0.0	
08-05-17	Moyenne	0.0	1.4	82.8	100.0	100.0	31
	Ecart-type	0.0	2.5	28.5	0.0	0.0	
15-05-17	Moyenne	0.8	63.6	100.0	100.0	100.0	32
	Ecart-type	2.1	31.7	0.0	0.0	0.0	
22-05-17	Moyenne	40.4	100.0	100.0	100.0	100.0	37
	Ecart-type	21.5	0.0	0.0	0.0	0.0	
29-05-17	Moyenne	98.8	100.0	100.0	100.0	100.0	49
	Ecart-type	4.6	0.0	0.0	0.0	0.0	

2017 – Orge

- Everlange

Variété Tamina		FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	Stade
10-04-17	Moyenne	0.0	0.0	0.0	85.0	100.0	31+
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	21.0	0.0	
18-04-17	Moyenne	0.0	0.8	43.6	100.0	100.0	31+
	Ecart-type	0.0	4.0	30.7	0.0	0.0	
24-04-17	Moyenne	0.1	35.1	92.8	100.0	100.0	32
	Ecart-type	0.8	27.1	16.1	0.0	0.0	
02-05-17	Moyenne	21.3	94.6	100.0	100.0	100.0	37
	Ecart-type	26.3	12.4	0.0	0.0	0.0	
08-05-17	Moyenne	99.0	100.0	100.0	100.0	100.0	39
	Ecart-type	3.8	0.0	0.0	0.0	0.0	
15-05-17	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	49
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
22-05-17	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	61
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
29-05-17	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	72
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

- Burmerange

Variété Wotan		FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	Stade
10-04-17	Moyenne	0.0	0.0	0.3	54.6	100.0	32
	Ecart-type	0.0	0.0	1.6	28.5	0.0	
18-04-17	Moyenne	0.0	0.0	19.0	81.6	100.0	34
	Ecart-type	0.0	0.0	21.6	32.3	0.0	
24-04-17	Moyenne	0.0	0.0	12.4	90.8	100.0	34
	Ecart-type	0.0	0.0	13.0	21.4	0.0	
02-05-17	Moyenne	0.5	27.5	96.1	100.0	100.0	37
	Ecart-type	1.5	30.2	15.2	0.0	0.0	
08-05-17	Moyenne	24.3	98.5	100.0	100.0	100.0	38
	Ecart-type	16.4	9.5	0.0	0.0	0.0	
15-05-17	Moyenne	90.0	100.0	100.0	100.0	100.0	51
	Ecart-type	23.1	0.0	0.0	0.0	0.0	
22-05-17	Moyenne	90.0	100.0	100.0	100.0	100.0	61
	Ecart-type	8.3	0.0	0.0	0.0	0.0	
29-05-17	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	73
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

- Bettendorf

Variété California

		FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	Stade
10-04-17	Moyenne	0.0	0.0	0.3	64.0	100.0	31+
	Ecart-type	0.0	0.0	1.6	28.7	0.0	
18-04-17	Moyenne	0.0	0.9	65.6	100.0	100.0	31+
	Ecart-type	0.0	2.2	28.6	0.0	0.0	
24-04-17	Moyenne	0.0	31.6	96.5	100.0	100.0	33
	Ecart-type	0.0	26.1	11.7	0.0	0.0	
02-05-17	Moyenne	79.5	100.0	100.0	100.0	100.0	37
	Ecart-type	32.8	0.0	0.0	0.0	0.0	
08-05-17	Moyenne	83.6	100.0	100.0	100.0	100.0	42-45
	Ecart-type	30.4	0.0	0.0	0.0	0.0	
15-05-17	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	55
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
22-05-17	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	61
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
29-05-17	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	72
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

- Reuler

Variété California

		FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	Stade
18-04-17	Moyenne	0.0	0.0	6.0	75.6	100.0	30+
	Ecart-type	0.0	0.0	12.1	25.2	0.0	
24-04-17	Moyenne	0.0	0.0	31.6	95.0	100.0	31
	Ecart-type	0.0	0.0	24.0	13.8	0.0	
02-05-17	Moyenne	1.4	35.0	70.4	100.0	100.0	32+
	Ecart-type	4.4	38.5	34.0	0.0	0.0	
08-05-17	Moyenne	57.9	97.8	100.0	100.0	100.0	37
	Ecart-type	35.2	14.2	0.0	0.0	0.0	
15-05-17	Moyenne	90.8	100.0	100.0	100.0	100.0	45
	Ecart-type	22.2	0.0	0.0	0.0	0.0	
22-05-17	Moyenne	87.8	100.0	100.0	100.0	100.0	51
	Ecart-type	18.6	0.0	0.0	0.0	0.0	
29-05-17	Moyenne	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	68
	Ecart-type	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

Annexe II : Analyses pour l'année 2001

Variété Flair

- Everlange

F1 Flair

Date	Fréquence	Début	Fin	ST °C
12 mai-22 mai	12	1215	1345.05	130.15
14 mai-24 mai	38	1246	1379.17	132.68
15 mai-25 mai	25	1260	1397.48	137.47
17 mai-26 mai	15	1285	1415.4	130.42
18-19 mai-27 mai	10	1298	1433.28	134.905

F2 Flair

Date	Fréquence	Début	Fin	ST °C
4 mai-13 mai	28	1109.3	1231.16	121.86
5 mai-14 mai	42	1117.89	1246.49	128.6
7 mai-16 mai	18	1136.09	1273.03	136.94
10 mai-20mai	10	1181.43	1316.11	134.68
11 mai-21 mai	2	1198.32	1331.11	132.79

F3 Flair

Date	Fréquence	Début	Fin	ST °C
21 avr-5 mai	20	978.62	1117.89	139.27
23avr-6 mai	40	990.3	1126.16	135.86
29 avr-10 mai	25	1041.07	1181.43	140.36
1 mai-11 mai	8	1068.2	1198.32	130.12

- Christnach

F1 Flair

Fréquence	Date	Début	Fin	ST °C
8	16-25mai	1120.5	1234.6	114
20	17-26 mai	1132.1	1251	119
55	19-27 mai	1150.1	1268	118
17	21-28 mai	1174.6	1286	111

F2 Flair

Fréquence	Date	Début	Fin	ST °C
8	8-18mai	1005.5	1140.1	135
25	9-19mai	1019.8	1150.1	130
25	10-20 mai	1035.4	1161.4	126
10	11-21mai	1050.7	1174.7	124
12	12-22mai	1065.8	1187.3	122
20	14-24 mai	1095.5	1217.9	122

F3 Flair

Fréquence	Date	Début	Fin	ST °C
30	1-12mai	930.4	1065.8	135.4
47.5	2-13mai	945.5	1080.5	135
10	4-14mai	969.7	1095.5	125.8
5	6-15mai	985.4	1108.1	122.7
8	07-16 mai	994.3	1120.5	126.2

Variété Dream

- Everlange

F1 Dream

Fréquence	Date	Début	Fin	ST °C
2	15-23 mai	1252	1353	101
33	17-24 mai	1277	1371	94
60	21-27 mai	1323	1425	102
5	23-29 mai	1353	1463	110

F2 Dream

Fréquence	Date	Début	Fin	ST °C
2	4-13 mai	1109	1231	122
10	09-17 mai	1164	1285	121
48	11-20-21 mai	1198	1324	126
45	13-23 mai	1231	1362	131

F3 Dream

Fréquence	Date	Début	Fin	ST °C
12	23 avr-7mai	990	1136	146
17	29avr-11mai	1041	1198	157
15	30avr-11-12mai	1055	1207	152
38	1-2mai-12-13mai	1076	1223	147
16	2-3 mai-13-14mai	1091	1239	148
2	4 mai-15 mai	1109	1260	151

- Christnach

F1 Dream

Fréquence	Date	Début	Fin	ST °C
10	22-28 mai	1187.3	1286	98.7
48	23-29 mai	1202.2	1303.6	101.4
22	24-30 mai	1218	1320	102
20	26-02 juin	1251	1356	105

F2 Dream

Frequence	Date	Début	Fin	ST °C
15	12-23 mai	1065.8	1202.2	136.4
47	15-25 mai	1108.1	1234.6	126.5
28	19-27 mai	1150.1	1268	117.9
10	23-29 mai	1202.2	1312	109.8

F3 Dream

Fréquence	Date	Début	Fin	ST °C
10	2-14mai	945.5	1095.5	150
45	5-17mai	977.7	1132.1	154
32	9-22 mai	1019.8	1187.3	168
13	11-23 mai	1050.7	1202.2	151

Résumé

Produire des céréales de qualité avec un minimum d'intrants chimiques est devenu un des enjeux majeurs pour les agriculteurs. En effet, la directive 2009/128/CE vise une diminution progressive de ces pesticides et une réduction de la dépendance à ces produits. Dans cette optique, des outils d'aide à la décision sont créés afin de guider les agriculteurs dans leurs choix. Ils permettent notamment la prévision des maladies ou encore du rendement. Les stades de développement sont importants pour ces modèles et sont généralement simulés en fonction d'une somme de degrés-jours.

L'outil PhytoProTech, commercialisé par la société AgrOptimize, permet de conseiller les exploitants agricoles sur l'utilité d'un traitement phytosanitaire. Dans les modèles phénologiques utilisés par celui-ci afin de prédire le développement des maladies pour le blé et l'orge, une somme de 130 degrés-jours est adoptée pour simuler la croissance des feuilles. Lors des campagnes de 2015 et 2016, des décalages dans la prévision de la phénologie avaient été observés. L'objectif de ce travail est donc l'ajustement du phyllotherme utilisé dans ces modèles.

Des données historiques de 2001 et de 2012 à 2014 pour l'orge et le blé ont donc été traitées. Cette base de données a été complétée par des mesures réalisées cette année. Différentes analyses ont été effectuées : une comparaison des données historiques, une simulation de phyllotherme afin de trouver la meilleure valeur à utiliser, des calculs de phyllothermes à partir de droites de régression, une analyse sur base de fréquences d'émergence des feuilles et enfin, une comparaison des données de cette année avec des données simulées.

Les résultats ont mené à diverses conclusions. Pour commencer, la date de semis joue un rôle dans la vitesse de développement des céréales. De plus, le phyllotherme diffère pour les trois dernières feuilles. Enfin, le phyllotherme est dépendant de la variété. Cependant, nous ne sommes pas capables de proposer une valeur ajustée pour la simulation. En effet, le manque de données et les erreurs dans l'estimation de la croissance des feuilles n'ont pas permis d'arriver à des résultats satisfaisants.

Mots-clés : Phénologie, modèle de croissance du blé et de l'orge, ajustement du phyllotherme, degré-jour

Abstract

Produce quality grains with minimal chemical inputs has become one of the major challenges for farmers. Indeed, directive 2009/128/EC aims a progressive reduction of these pesticides and a reduced of the dependence on these products. In this context, decision support tools are created to guide farmers in their choices. For example, they allow the forecast of diseases or yield. The stages of development are important in crop modelling and are usually simulated with a sum of degree-days.

PhytoProTech, developed by AgrOptimize, is a tool made to advise farmers on the usefulness of a fungicide treatment. In the phenological models used in order to predict the development of diseases, a sum of 130 degree-days is used to simulate the growth of leaves. In 2015 and 2016, the prediction of phenology wasn't good for some places. The main objective of work is the adjustment of the value used in these models.

Therefore, historical data of 2001 and 2012 to 2014 have been treated. These data were completed by measurements made this year. Different analyses were conducted: a comparison of historical data, a simulation of phyllotherm in order to find the best value to use, phyllotherms calculations from lines of regression, analysis based on frequency of the emergence of leaves and, finally, a comparison of this year's data with simulated data.

Different conclusions were made. First, the sowing date plays a role in the grain's development's speed. In addition, the phyllotherm is different for the last three leaves. Finally, the phyllotherm is dependent on the variety. However, we are unable to offer an adjusted value for the simulation. Indeed, the lack of data and the errors in the estimation of the leaves growth have prevented us to find correct results.

Keywords: Phenology, growth model for wheat and barley, phyllotherm adjustment, degree-day