

CFR Angers CFR Rennes

Année universitaire : 2019 - 2020

Master Biologie, Agros sciences

Parcours Amélioration, Production,
Valorisation du végétal

Option : Génétique, Génomique et
Amélioration des Plantes

Rapport de stage

- d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Initiation florale et date de floraison chez le fraisier: effets des contraintes environnementales par des approches de prédiction

Par : Arthur FOUQUIN



Soutenu à Rennes le 24/06/2020

Devant le jury composé de :

Président : Mélanie JUBAULT

Maître de stage : Béatrice DENOYES

Enseignant référent : Mélanie JUBAULT

Rapporteur : Anne Laperche

Examineur : Maria Manzanaras-Dauleux

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celles d'AGROCAMPUS OUEST et l'université de Rennes 1

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation

« Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France »

disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>



Fiche de confidentialité et de diffusion du mémoire

Confidentialité

Non Oui si oui : 1 an 5 ans 10 ans

Pendant toute la durée de confidentialité, aucune diffusion du mémoire n'est possible ⁽¹⁾.

Date et signature du maître de stage ⁽²⁾ :

A la fin de la période de confidentialité, sa diffusion est soumise aux règles ci-dessous (droits d'auteur et autorisation de diffusion par l'enseignant à renseigner).

Droits d'auteur

L'auteur⁽³⁾ **Nom Prénom Fouquin Arthur**

autorise la diffusion de son travail (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

Oui Non

Si oui, il autorise

la diffusion papier du mémoire uniquement⁽⁴⁾

la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

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

(Facultatif) accepte de placer son mémoire sous licence Creative commons CC-BY-Nc-Nd (voir Guide du mémoire Chap 1.4 page 6)

Date et signature de l'auteur :

Autorisation de diffusion par le responsable de spécialisation ou son représentant

L'enseignant juge le mémoire de qualité suffisante pour être diffusé (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

Oui Non

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

Si oui, il autorise

la diffusion papier du mémoire uniquement⁽⁴⁾

la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

la diffusion papier et électronique du mémoire

Date et signature de l'enseignant :

(1) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation d'AGROCAMPUS OUEST s'engagent à respecter cette confidentialité.

(2) Signature et cachet de l'organisme

(3) Auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études

(4) La référence bibliographique (= Nom de l'auteur, titre du mémoire, année de soutenance, diplôme, spécialité et spécialisation/Option)) sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé

Remerciements :

Je remercie l'équipe BFP OrFE de l'INRAE de Bordeaux, pour son accueil et sa bonne humeur. J'ai pu m'immerger dans le monde de la recherche. Ce stage fut très instructif.

Je tiens particulièrement à remercier Béatrice Denoyes, ma maitre de stage. J'ai pu à son contact acquérir de nouvelles compétences et connaissances. Dans les conditions particulières où s'est déroulé mon stage de Master 2, je tiens également à la remercier pour sa disponibilité et sa confiance tout au long du confinement ainsi que pour son aide précieuse apportée lors de l'écriture de ce mémoire.

Je remercie également Amélia Gaston, Aline Potier, Marie Devers et Marie Alonso pour m'avoir formé au laboratoire et leur sympathie.

Je remercie le Gis Fruits pour son budget qui a permis de payer mon stage.

Liste des abréviations :

ADN : Acide désoxyribonucléique
ANOVA : Analysis of variance
AOPn : Association d'organisations de producteurs nationale
AP1 : Apetala 1
ARN : Acide ribonucléique
CO : Constans
FD : Flowering locus D
FT : Flowering locus T
FvCO : *Fragaria vesca* constans
FvFT1 : *Fragaria vesca* flowering locus T 1
FvSOC1 : *Fragaria vesca* suppressor of contans 1
FvTFL1 : *Fragaria vesca* terminal flower 1
GDD : Growing degree day
IGE : Interaction génotype environnement
IGP : Indication géographique protégée
LFY : Leafy
PV : Pergrine valsugana
qPCR : Quantitative polymerase chain reaction
SD : short day
SOC1 : Suppressor of contans 1
TFL1 : Terminal flower 1
Tm : Température moyenne
Tmax : Température maximale
Tmin : Température minimale
Topt : Température optimale

Table des figures :

Figure 1 : Origine du fraisier cultivé *Fragaria x ananassa*

Figure 2 : Famille des Rosaceae

Figure 3 : Schématisation d'un plant de fraisier

Figure 2 : Architecture d'un plant de fraisier

Figure 5 : Les 10 pays principaux producteurs de fraise en 2018

Figure 6 : Répartition de la production de fraise en Europe

Figure 7 : Illustration des cycles de développement des fraisiers non remontant (A) et remontant (B)

Figure 8 : Synthèse des réponses du fraisier en fonction de la combinaison moyenne de la température et de la photopériode sur un mois donné

Figure 9 : Interaction entre la température et la photopériode au court de l'initiation florale sur plusieurs cultivars

Figure 10 : Schématisation des différents cas d'interactions génotype-environnement

Figure 11 : Représentation schématique d'un modèle de prédiction complexe

Figure 3 : Figure 10 : Schéma des différentes voies de régulations de la floraison d'*Arabidopsis thaliana* (Wellmer et Riechmann, 2010), reprenant les facteurs environnementaux et endogènes.

Figure 14 : Voies de régulation chez *Fragaria*

Figure 15 : Localisation des centres expérimentaux des essais des 6 variétés

Figure 4 : Pourcentage de plant initié pour chaque date de prélèvement

Figure 17 : Représentations graphique des fonctions Chuine (A), Wang (B), GDD (C) et Triangulaire (D)

Figure 18 : Date de prélèvement des échantillons en fonction du stade d'avancée florale

Figure 19 : Evolution de la température par jour des années 2017, 2018 et 2019 sur les cinq sites expérimentaux

Figure 20 : Boxplots des dates de floraison des 6 variétés observées sur les 5 environnements

Figure 21 : Boxplots des dates de floraison des 6 variétés observées en fonction des 5 environnements

Figure 22 : Boxplots des dates de floraison sur une année en fonction des 5 environnements

Figure 23 : Heatmap des dates de floraison des 6 génotypes en fonction de l'environnement et de l'année

Figure 24 : Sélection de la meilleure répétition d'un modèle de prédiction

Figure 25 : Comparaison des prédictions des dates de floraison de 3 modèles

Figure 26 : Comparaison des prédictions des dates de floraison des modèles de Cléry avec (A) et sans (B) *Pergrine Valsugana*

Figure 27 : Modèle GDD_Tm (A), Wang_Tm (B) et Chuine_Tm (C) à partir des données de date de floraison de Cléry

Figure 28 : Paramètres des cinq modèles de prédictions créés en fonction des dates de floraison des environnements CIREF, HGU, INHORT et NIBIO sur les 3 années pour la variétés Cléry

Figure 29 : Evolution de la température par jour des années 2017, 2018 et 2019 sur les 5 environnements.

Figure 30 : Heatmap des dates d'initiation florale du stade 25% des 6 génotypes en fonction de l'environnement et de l'année.

Figure 31 : Corrélation entre les stades d'initiation florale 25% et 50%.

Figure 32 : Corrélation entre les stades d'initiation florale 50% et 75%.

Figure 33 : Corrélation entre les dates d'initiation florale de l'année N-1 et les dates de floraison de l'année N sur les 5 environnements

Figure 34 : Comparaison de l'expression du gène MADS trouvé par séquençage d'ARN et par qPCR.

Table des tableaux

Tableau 1 : Description des variétés utilisées pour le projet GoodBerry

Tableau 2 : Description des différents stades du méristème terminal

Tableau 3 Date de floraison en jour calendaire pour les six variétés étudiées sur cinq environnements et deux ou trois années d'expérimentation

Tableau 4 : Résultats des tests statistiques menés sur les 5 environnements

Tableau 5 : Résultats des tests statistiques menés sur les 6 variétés

Tableau 6 : Résultats des tests statistiques menés sur les 3 années

Tableau 7 : Résultats de l'ANOVA prenant en compte l'ensemble des effets et de leurs interactions

Tableau 8 : Classement de la date de floraison des six variétés selon le test de Tuckey sur chaque environnement (site x année)

Tableau 9 : Efficacité des modèles de prédiction en fonction des facteurs étudié et des données utilisées

Tableau 10 : Différence entre les dates de floraison calculées par le modèle et les dates observées pour la variété Cléry

Tableau 11 : Caractéristiques des 6 variétés calculées par les modèles de prédictions. Le modèle de Chuine la prise en compte de la température moyenne

Tableau 12 : Dates d'initiation florale du stade 25% calculées pour les 6 variétés sur les 5 environnements et les 3 années d'expérimentation.

Tableau 13 : Efficacité des modèles de prédiction sur le stade 25% pour les variétés Cléry et Gariguette

Tableau 14 : Caractéristiques de Cléry et Gariguette pour le stade 25% calculées par les modèles de prédictions

Tableau 15 : Efficacité des modèles de prédiction sur le stade 50% à partir du stade 25% pour la variété Cléry

Tableau 16 : Efficacité des modèles de prédiction sur le stade 50% à partir du stade 25% pour la variété Gariguette

Tableau 17 : Caractéristiques de Cléry et Gariguette pour le stade 50% calculées par les modèles de prédictions à partir du stade 25%.

Tableau 18 : Efficacité et caractéristique des modèles de prédictions créés pour l'étude des facteurs incident entre le stade 50 et 75% pour Cléry et Gariguette.

Tableau 19 : Différence d'expression des gènes sélectionnés en fonction des dates de prélèvement et des tissus en Allemagne 2016 (HGU)

Table des annexes :

Annexe 1 : Cycle de développement du fraisier non-remontant.

Annexe 2 : Détail des fonctions Chuine, Wang, GDD et Triangulaire utilisées pour les modèles de prédiction

Annexe 3 : Prédictions des dates de floraison avec le modèle Chuine_Tm

Annexe 3 : Date d'initiation florale des stades 50 et 75%

Annexe 4 : Comparaison de l'expression des gènes en séquençage d'ARN et en PCR semi-quantitative

Table des matières

I.	Introduction.....	15
A.	Présentation du fraisier.....	15
1.	Histoire.....	15
2.	Taxonomie.....	15
3.	Architecture de la fraise.....	15
B.	Contexte économique.....	15
C.	Cycle de vie du fraisier.....	2
D.	Le rôle de l'environnement et du génotype dans l'initiation florale et la floraison.....	3
1.	Description des étapes de la floraison.....	3
2.	Les contraintes environnementales et du génotype sur l'induction et l'initiation florale.....	3
3.	Les contraintes environnementales et du génotype sur la floraison.....	4
E.	Etude de la phénologie.....	4
1.	Etude de l'interaction génotype environnement.....	4
2.	Modèles de prédiction pour l'étude de la phénologie.....	5
F.	Les différentes voies de régulation de la floraison.....	6
1.	Le contrôle moléculaire de la floraison:.....	6
2.	Contrôle moléculaire de la floraison chez <i>Fragaria</i>	6
G.	Contexte de l'étude.....	7
II.	Matériels et méthodes.....	8
A.	Etude de l'initiation florale et de la floraison.....	8
1.	Matériel végétal.....	8
2.	Dispositif expérimentale.....	8
3.	Obtention du jeu de données.....	8
4.	Corrélation initiation florale et floraison.....	9
5.	Données climatiques.....	9
B.	Analyses statistiques exploratoires.....	9
C.	Etude des interactions génotype environnement à l'aide de modèles de prédiction.....	10
1.	Les données météorologiques.....	10
2.	Les données phénotypiques.....	10
3.	Choix des fonctions utilisées dans le modèle de prédiction.....	10
4.	Sortie du logiciel PMP5.....	10
III.	Résultats.....	11
A.	Analyse de la date de floraison.....	11
1.	Présentation des sites expérimentaux en période de culture des plants (floraison et production en année N).....	11

2.	Analyse exploratoire de la date de floraison.....	11
3.	Effets de la variété, de l'année et du site sur la date de floraison.....	12
4.	Les modèles de prédiction de la date de floraison à l'aide du logiciel PMP5.5	13
B.	Analyse de l'initiation florale.....	15
1.	Présentation des sites expérimentaux en période de culture des plants (Initiation florale en année N-1).....	15
2.	Dates d'initiation florale déterminées au stade 25%, 50% et 75% de plants induits	15
3.	Etude du comportement des variétés en fonction de l'environnement	15
4.	Les modèles de prédiction de la date d'initiation florale à l'aide du logiciel PMP5.5	16
C.	Corrélation initiation florale et floraison.....	17
1.	Corrélation entre les différents stades de l'initiation florale	17
2.	Corrélation entre les dates du stade 25% (N-1) et la date de floraison (N).....	17
IV.	Discussion	18
V.	Conclusion	21
	Références Bibliographiques	22
	Annexes	

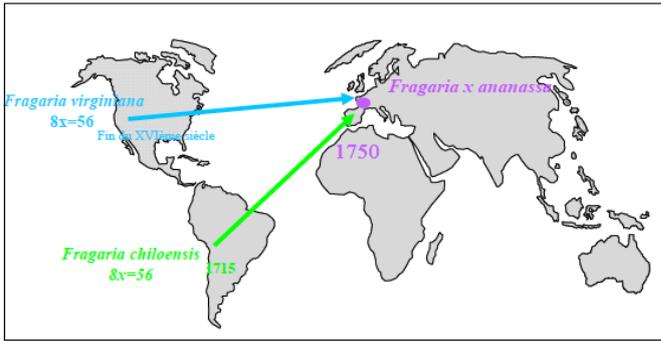


Figure 6 : Origine du fraisier cultivé *Fragaria x ananassa* (Denoyes, 2017).

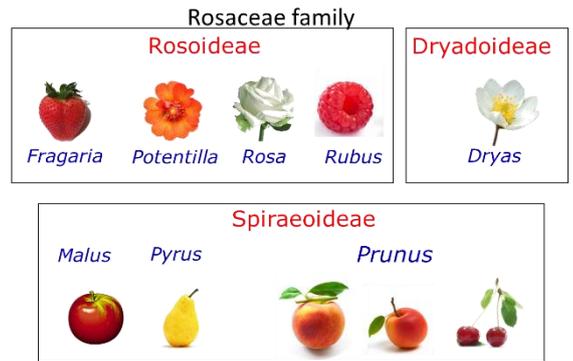


Figure 5 : Famille des Rosaceae (Denoyes, 2017).

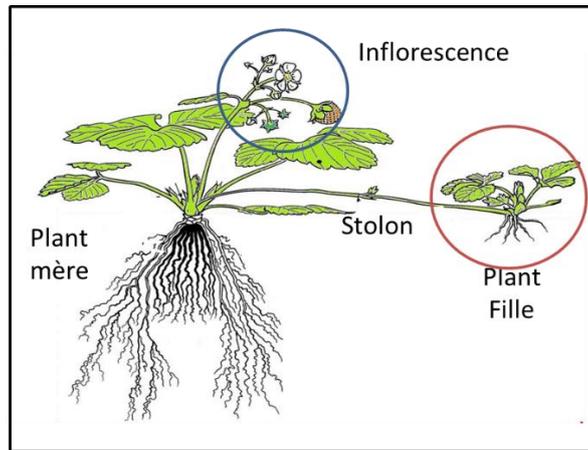


Figure 7 : Schématisation d'un plant de fraisier.

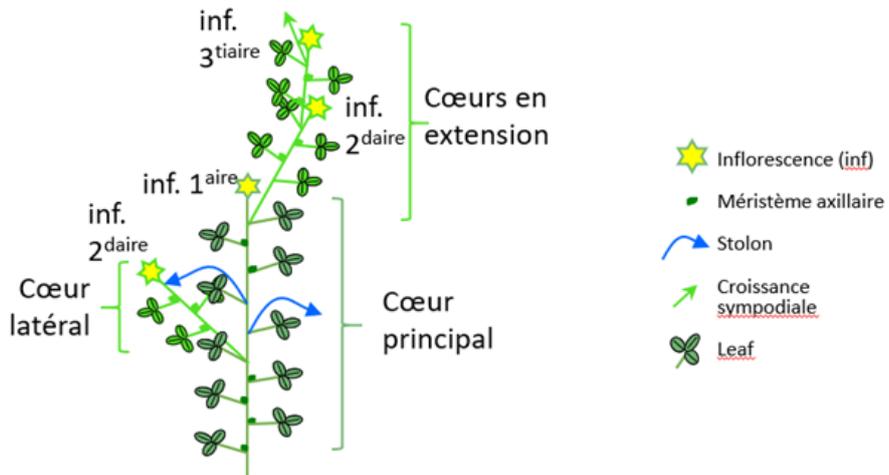


Figure 8 : Architecture d'un plant de fraisier (Tenreira et al., 2017).

I. Introduction

A. Présentation du fraisier

1. Histoire

En Europe la fraise était consommée dès l'antiquité par les romains qui s'en servait également dans des produits cosmétiques pour son odeur. Il faut attendre le XIV^{ème} siècle pour que le fraisier des bois, *Fragaria vesca* (diploïde) puis le fraisier musqué *F. moschata* (hexaploïde) soient cultivés dans les jardins européens. La fraise que nous consommons aujourd'hui est issue d'un hybride interspécifique entre deux espèces issues du continent américain (Figure 1).

Au XVI^{ème} siècle, Jacques Cartier rapportait du Canada des plants de fraisier de Virginie, *F. virginiana* (octoploïde). Elle était dénommée Scarlett car les fruits produits étaient d'un rouge intense. Début 18^{ème} siècle, Amédée François Frézier, rapportait du Chili une espèce de fraisier à gros fruits blancs, *F. chiloensis* (octoploïde), qui se sont révélés être mâle stérile. A la faveur des échanges du XVIII^{ème} siècle, les plants ont été distribués dans différents jardins botaniques européens. En 1740, le botaniste Antoine Nicolas Duchesne observait que cette espèce produisait de beaux fruits lorsqu'elle était cultivée à côté d'un fraisier de Virginie. Les plants issus de ces fruits associaient l'aptitude à la multiplication végétative de *F. chiloensis* et la couleur soutenue des fruits de *F. virginiana*. Antoine Nicolas Duchesne dénommait cette espèce interspécifique *F. x ananassa* (Darrow, 1966), qui est l'espèce de fraisier cultivé de nos jours.

2. Taxonomie

Le genre *Fragaria* appartient à la famille des *Rosaceae*. Cette famille est divisée en trois sous-familles (Figure 2). Le genre *Fragaria* appartient à la sous-famille des *Rosoideae* ainsi que les genres *Potentilla*, *Rosa* et *Rubus*.

Le genre *Fragaria* comporte 22 espèces qui présentent des niveaux de ploïdie différents. De diploïde ($2n=2x=14$) à décaploïde ($2n=10x=70$). Parmi ces espèces, le fraisier des bois diploïde représente un modèle d'étude chez *Fragaria* et chez les rosacées et le fraisier octoploïde cultivé *F. x ananassa* est étudié pour ses qualités agronomiques.

3. Architecture de la fraise

Le fraisier est une plante pérenne herbacée en rosette qui peut se multiplier par voie sexuée grâce aux inflorescences qui donnent des fruits ou par voie végétative grâce à des stolons, tiges allongées qui portent les plants filles (Figure 3).

Le développement architectural de la fraise cultivée est caractérisé (1) par des axes successifs à croissance déterminée et qui dérivent les uns des autres par ramifications sympodiales et (2) par des stolons qui sont des tiges allongées portant les plants filles (Labadie, 2017 ; Staudt, 1999). Après la transition florale du méristème apical, la croissance se poursuit par ramifications sympodiales, où un ou plusieurs méristèmes axillaires supérieurs prennent le relais pour former des nouveaux axes (Figure 4).

B. Contexte économique

La consommation de fraise dans le monde ne cesse d'augmenter, il est le petit fruit le plus consommé dans le monde et est produit dans plus de 75 pays (Hummer, 2008). La production mondiale a doublé en 20 ans et atteint en 2018 plus de 8,3 millions de tonnes (FAOSTAT, 2018). Depuis les années 2000, la surface agricole de production de fraise augmente. En 2018, 80% de la production mondiale

Répartition de la production mondiale de fraise en pourcentage

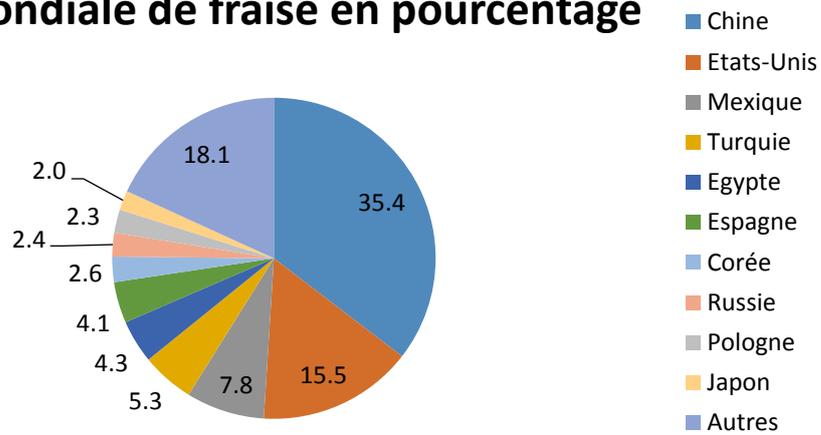


Figure 9 : Les 10 pays principaux producteurs de fraise en 2018 (FAOSTAT).

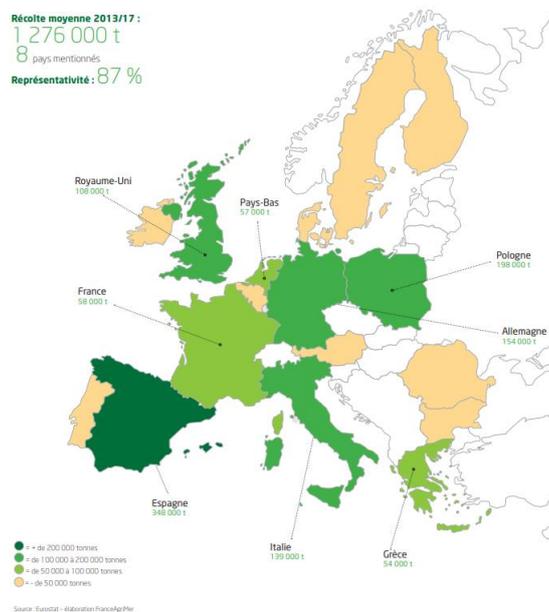


Figure 10 : Répartition de la production de fraise en Europe (FranceAgriMer).

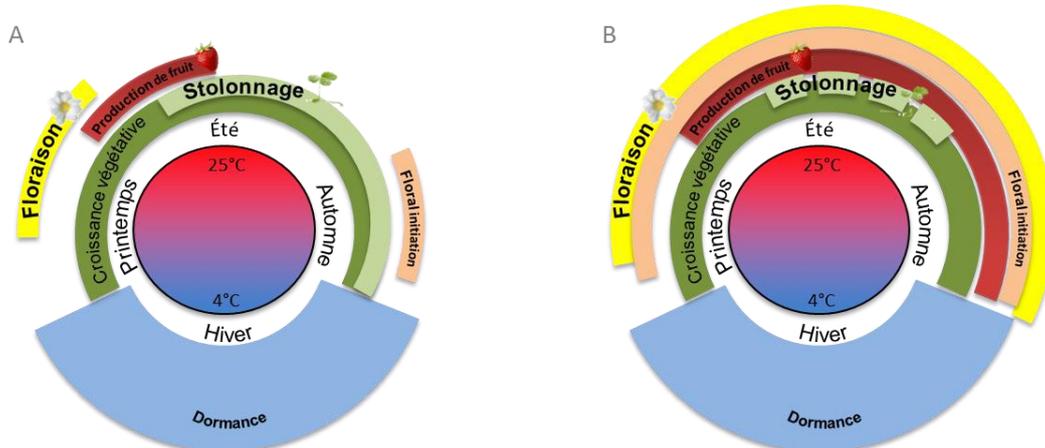


Figure 11 : Illustration des cycles de développement des fraisiers non remontant (A) et remontant (B).

est répartie entre 10 pays, la Chine et les Etats-Unis représentant 51% de cette production avec respectivement 3 millions et 1,3 million de tonnes de fraise (Figure 5).

La production Européenne représente 19,7% de la production mondiale, huit pays produisant 87% des fraises en Europe (FranceAgriMer, 2018). L'Espagne est le plus gros producteur de fraise en Europe avec 348 000 tonnes en moyenne sur les 5 dernières années suivi par la Pologne et l'Allemagne avec respectivement 198 000 et 154 000 tonnes. La France est en 6^{ème} position avec une moyenne de 58 000 tonnes ce qui représente 4,5% de la production Européenne (Figure 6).

En France, il existe trois principaux bassins de production : les régions Aquitaine (37%), Provence-Alpes Côte-d'Azur (11%) et Rhône-Alpes (9%). La fraise est le neuvième fruit le plus consommé en France, 2,6 kg par an et par habitant (selon l'INSEE). N'étant pas autosuffisante, la France importe 73 000 tonnes de fraises (principalement d'Espagne) et en servant d'intermédiaire à la fraise espagnole, la France exporte 11 000 tonnes. Pour se démarquer des fraises produites à l'étranger notamment en Espagne, la filière fraise française a valorisé la qualité gustative et nutritionnelle. La filière s'est ainsi structurée autour de l'AOPn Fraises de France pour se donner les moyens de pérenniser et développer la production de fraises françaises en offrant aux consommateurs des variétés de qualité (<http://fraisesdefrance.fr/laopn-fraise/>). De plus, différents labels géographiques et de qualité ont été créés permettant de valoriser la production à l'échelle régionale et nationale. On retrouve parmi ces labels l'IGP fraise de Nîmes, l'IGP fraise du Périgord et le Label Rouge. Afin de conserver cet atout, une attention sur la qualité organoleptique est donc portée lors de la sélection des variétés. Cette année le Covid19 a permis aux consommateurs français de découvrir la production française de qualité (Le Monde 18 mai 2020, auteur Davet Stéphane).

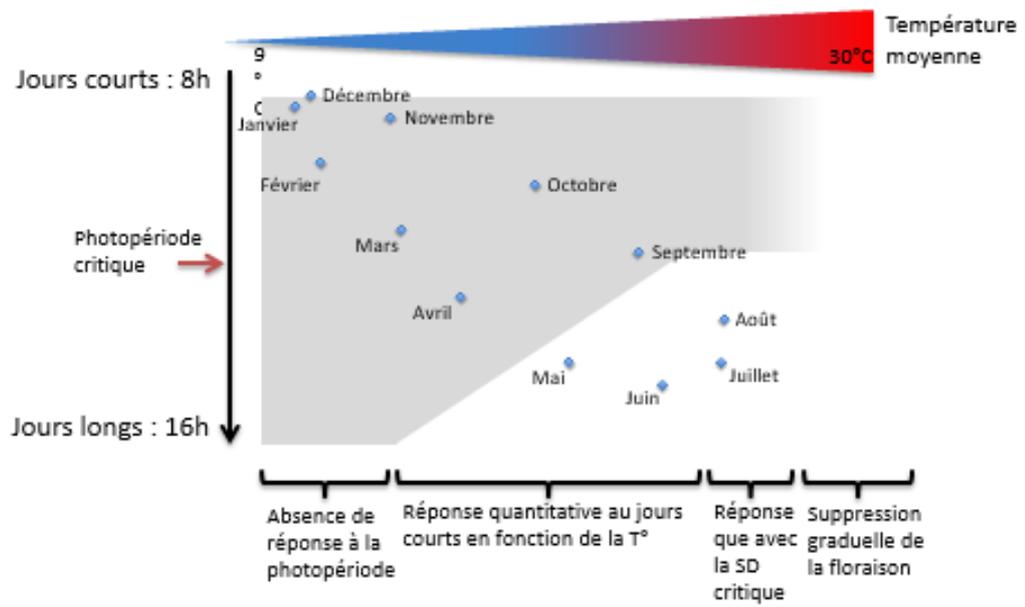
C. Cycle de vie du fraisier

Le fraisier a la particularité de présenter deux modes de floraison en fonction de leurs génotypes :

- des génotypes non remontants qui présentent une initiation florale à l'automne et fleurissent au printemps suivant ; ces génotypes produisent des stolons pendant tout l'été (Figure 7A).
- des plants remontants qui ont la capacité de fleurir en continu tout au long de l'été et qui a contrario produisent peu voire pas de stolons. Les variétés à floraison continue, remontantes, sont intéressantes d'un point de vue économique, car elles permettent d'allonger la période de production des fruits (Figure 7B).

Le cycle de développement du fraisier cultivé non-remontant est résumé en Figure 7 A et en Annexe 1:

- les jeunes plants issus de stolons sont plantés en été (année N-1), soit en pépinière d'élevage, soit en sol. Les jours longs et les températures élevées favorisent la croissance des organes végétatifs (de juillet à août) (Heide et al., 2013).
- la phase d'initiation florale, se met en place fin août - début septembre (année N-1) sous l'action des jours et des températures décroissants (voir le détail dans le paragraphe floraison). Parallèlement, une accumulation de réserves se fait dans les racines.
- le plant ralentit sa croissance lorsque les jours sont courts et les températures basses puis il entre en dormance en hiver (année N-1).
- lorsque le plant a reçu une quantité de froid (nombre d'heures inférieures à 7°C), la dormance du plant est levée (selon les variétés, de février à avril de l'année N) et le plant reprend sa croissance. Dans un itinéraire technique hors sol, le plant produit en pépinière est planté en janvier ou février en serre « chauffée » (températures maintenues au-dessus de 8°C).



- Figure 8 : Synthèse des réponses du fraisier en fonction de la combinaison moyenne de la température et de la photopériode sur un mois donné (Demené INVENIO).

- lorsque les températures augmentent, les hampes préformées à l'automne précédent (année N-1) émergent et fleurissent (floraison à l'année N). Entre l'anthèse et le fruit mûr, il s'écoule environ 1 mois. La production de fruits a donc lieu classiquement entre mai et début juillet (année N) mais les techniques culturales comme une plantation précoce des plants de pépinière en décembre (année N-1) permet une production dès février-mars (année N).

D. Le rôle de l'environnement et du génotype dans l'initiation florale et la floraison

1. Description des étapes de la floraison

Pour toutes les plantes à fleurs, la floraison est une étape primordiale. Elle marque la transition entre l'état végétatif et l'état reproducteur. La floraison est régulée par de multiples signaux environnementaux et endogènes (Simpson et Dean, 2002) et conditionne le développement du fruit et de la graine.

La floraison est composée de plusieurs phases : l'induction florale, l'initiation florale et la différenciation florale. L'induction florale correspond au moment où la plante perçoit les signaux qui conduiront à la transition florale. Suite à l'induction florale, le méristème apical végétatif se transforme en méristème inflorescentiel puis floral lors de la phase de l'initiation florale. Enfin, lors de la différenciation florale, le méristème floral produit les organes floraux.

2. Les contraintes environnementales et du génotype sur l'induction et l'initiation florale

Chez les variétés non-remontantes du fraisier, le signal d'induction florale est perçu en été N-1 lorsque les jours raccourcissent et les températures diminuent (Manakasem et Goodwin, 1998 ; revue Heide et al., 2013. La même année N-1, l'induction est donc suivie de l'initiation florale (renflement du méristème terminal fin août - début septembre) (Jahn et Dana, 1970 ; Taylor et al., 1997). Le changement d'état du méristème est observable à la loupe binoculaire après dissection du bourgeon terminal.

La réception des signaux de floraison pour l'induction florale est mesurée par la présence ou non de l'initiation florale au niveau du méristème apical. L'induction/initiation nécessite que le plant soit placé en condition inductible. La durée de ce traitement dépend de la valeur des températures et de la photopériode. Dans une étude menée par Obstad et co-auteurs (2011), les conditions optimales pour l'initiation florale ont été définies par une photopériode de 10 à 12 heures et une température de 15 à 18°C. Dans ces conditions, les génotypes Frida et Korona ont initié la floraison en deux semaines. Des températures inférieures à 9°C ou supérieures à 22°C retardent l'initiation florale et nécessitent d'augmenter le nombre de cycle de jours courts (Opstad et al., 2011 ; Sonsteby et Heide, 2008 ; Verheul et al., 2006). Selon les variétés, un cycle de 10 jours à 3 semaines selon la température est nécessaire pour l'initiation florale (Taylor et al., 1997 ; revue Heide et al., 2013).

L'interaction entre température et photopériode est schématisé sur la Figure 8. En année N-1, de juillet à décembre, la photopériode et les températures diminuent. L'induction florale ne pourra se produire qu'en dessous d'une photopériode critique et pour des températures pas trop élevées. Lorsque la température et la photopériode sont trop élevées, il n'y a plus d'initiation florale.

Le nombre de cycles de jours courts influence également le nombre de hampes et donc de fleurs produites. Plus le nombre de cycle est élevé, plus le plant pourra initier de nouvelles hampes. Le pourcentage de plants qui seront en floraison augmente donc, mais également, le nombre de hampes et de fleurs (Verheul et al, 2006).

Cultivar	Temp. (°C)	Photoperiod (h)								Author
		8	10	12	13	14	15	16	24	
'Robinson'	9	+++		+++				+++	+++	Ito and Saito (1962)
	17	+++		+++				0	0	
	24	+++		++				0	0	
	30	0		0				0	0	
'Senga Sengana'	12		+++	+++		+++		++	0	Heide (1977)
	18		+++	+++		+		0	0	
	24		++	++		0		0	0	
'Zefyr', 'Jonsok', and 'Glima'	12		+++	+++		+++		+++	+++	Heide (1977)
	18		+++	+++		+++		++	++	
	24		++	++		++		0	0	
'Korona'	12			+++	+++	+	+	0		Verheul <i>et al.</i> (2007)
	15			+++	+++	+	+	0		
	18			+++	++	+	0	0		
	24			++	+	+	0	0		
	27			++	+	0	0	0		
'Elsanta'	12			++	++	+	+	0		Verheul <i>et al.</i> (2007)
	15			++	+++	++	+	0		
	18			+++	+++	++	+	0		
	24			+++	+++	++	+	0		
	27			++	++	+	+	0		

Figure 9 : Interaction entre la température et la photopériode au court de l'initiation florale sur plusieurs cultivars (Heide et al, 2013). « +++ » Forte induction, « ++ » induction, « + » induction partielle, « 0 » absence d'induction.

Chaque géotype possède sa propre réponse. Par exemple, dans les conditions optimales, le géotype Florence nécessite un cycle de jours courts de 4 semaines alors qu'il est de 2 à 3 semaines pour Elsanta. Pour illustrer les différences entre géotypes, Heide and al en 2013 ont effectué une synthèse de différentes revues étudiant l'initiation florale en fonction de la photopériode et de la floraison (Figure 9).

3. Les contraintes environnementales et du géotype sur la floraison

La différenciation florale dure de l'automne jusqu'au printemps. Au cours de cette phase vont se mettre en place la structure des hampes (fleur primaire, fleurs secondaires), ainsi que l'ébauche de la structure des fleurs (pétales, sépales, étamines). La différenciation démarrant à l'automne N-1, elle conduit à une hampe déjà formée à l'entrée en dormance. Cette phase est principalement contrôlée par des températures favorables à l'organogénèse : en effet, dans les essais sur la floraison, après la mise en place des plants en conditions inductibles, les plants sont mis ensuite en conditions de températures autour de 20-24°C pour permettre à la hampe de se développer et d'émerger (Taylor et al., 1997 ; Verheul et al., 2006). Cette phase d'organogénèse est interrompue lorsque le plant est en dormance mais une fois la dormance levée au printemps suivant, la différenciation florale reprend. Lorsque les conditions hivernales sont chaudes, la hampe peut émerger au cours de l'hiver comme cela s'est passé en hiver 2006 (Démene, comm. pers.).

Le fraisier entre en floraison à l'année N lorsque la température et la photopériode augmentent. Après la période de dormance, les hampes reprennent leur développement et produisent des fleurs. Le fraisier est considéré en floraison lorsque la première fleur apparente est ouverte. Le facteur principal environnemental influençant la floraison est la température. Plus la température augmente jusqu'à un seuil, plus la date de floraison sera précoce. Néanmoins, à des températures supérieures à 24°C, la floraison sera inhibée. En conditions contrôlées, les publications mentionnent une photopériode favorable autour de 12 heures et une température de jour optimale de 18-20°C et de nuit de 12-14°C pour la floraison (Verheul et al, 2007 ; Sonstebj et Heide 2008).

Les températures de nuit jouent un rôle majeur dans la floraison. Des températures trop basses peuvent entraîner un retour du plant au stade végétatif. Des températures trop chaudes diminuent la proportion de fleurs sur le plant. Dans des conditions optimales de température de jour et de nuit, la floraison est plus précoce. Ces températures agissent également sur le pourcentage de plants initiés et la quantité de fleurs. Encore une fois, chaque géotype va avoir sa propre réponse.

E. Etude de la phénologie

La phénologie (de "phainein", se montrer, et "logos", étude) est l'étude d'événements biologiques périodique dans le monde animal et végétal influencé par l'environnement. Chez les plantes, la phénologie est notamment dépendante des conditions climatiques comme la température et la lumière.

1. Etude de l'interaction géotype environnement

Le choix de la méthode pour analyser la phénologie dépendra des questions que l'on se pose et des caractéristiques de l'espèce. Chez les espèces cultivées, une simple analyse de variance étudiant l'effet du géotype (G), de l'environnement (E) et de leur interaction (GxE) pourra être réalisé. Une interaction géotype environnement (IGE) est définie par une différence de comportement de

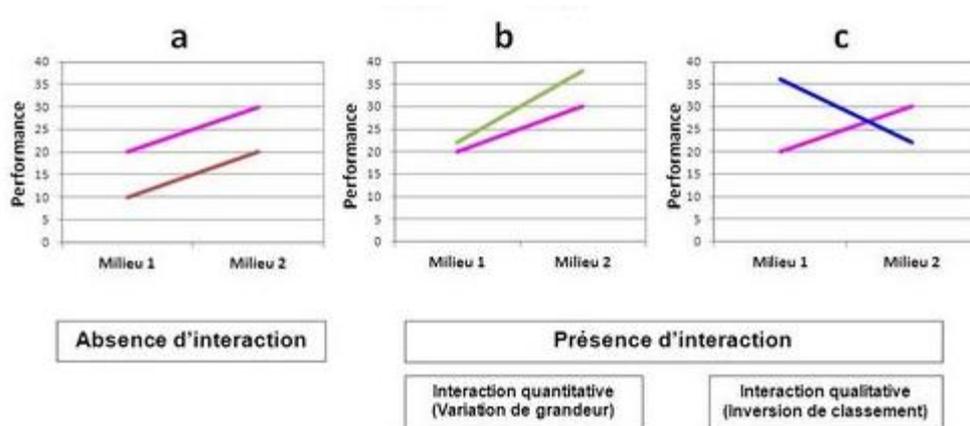


Figure 12 : Schématisation des différents cas d'interactions génotype-environnement (Brancourt-Hulmel, 2014).

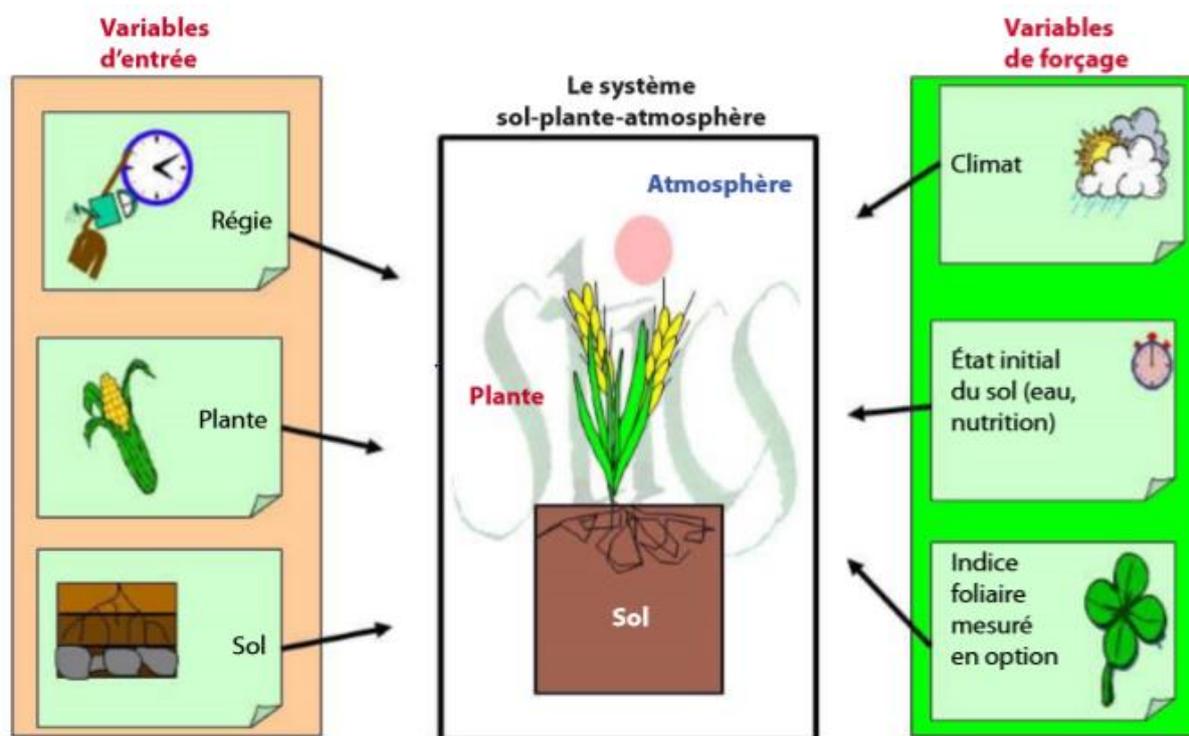


Figure 13 : Représentation schématique d'un modèle de prédiction complexe (Lepage, 2012).

génotypes dans deux environnements distincts. Les génotypes sont soumis à des facteurs ayant un effet plus ou moins fort induisant un comportement différent. L'environnement est caractérisé par le milieu pédoclimatique, l'année et également la conduite culturale.

La différence de phénotype observée est due à l'effet additif du génotype, de l'environnement et de leur interaction. Ces interactions peuvent mener à trois cas de figure (Figure 10) (Brancourt-Hulmel, 2014) : (1) Il n'y a pas d'interaction génotype environnement (Figure 10 A) ; la différence entre les deux génotypes est la même sur les deux milieux ; (2) Il existe une différence entre les deux génotypes sans changement de classement (Figure 10 B) ; il s'agit alors d'une interaction quantitative ; (3) Il y a un changement de classement entre les deux génotypes (Figure 10 C) ; l'interaction est alors qualitative.

Cette dernière est très importante dans le milieu de la sélection. Cela signifie que la meilleure variété est déterminée par l'environnement. Pour prendre en compte les IGE, l'expérimentation doit être menée sur différents environnements et sur plusieurs années afin d'évaluer la performance du génotype dans l'espace et dans le temps (Brancourt-Hulmel, 2014).

Les IGE peuvent avoir des conséquences sur la sélection et sur la stratégie à adopter. Rechercher des variétés stables dans plusieurs environnements avec un haut potentiel ou alors adapter spécifiquement une variété à un environnement.

2. Modèles de prédiction pour l'étude de la phénologie

Les modèles bioclimatiques pour la prédiction de la phénologie, de la croissance, du rendement et de la qualité des cultures sont de précieux outils d'aide à la décision pour les intervenants en agriculture. Ils contribuent à la prise de décision afin d'assurer une gestion efficace des productions agricoles. Nous nous intéresserons plus particulièrement à la modélisation de la phénologie, dont l'objectif est de représenter le plus efficacement possible la réalité observée grâce à la prise en compte des données climatiques (Lepage, 2012).

Le modèle « Growing Degree Day » (GDD) est le premier modèle référencé et est encore très utilisé aujourd'hui pour l'étude de l'impact de la température sur différents stades phénologiques des cultures (Chuine, 2013). Il effectue un cumul des températures à partir d'une température seuil entre deux stades de développement. Ce cumul permet de comprendre le comportement des variétés. Le cumul de température chez le fraisier entre le stade anthèses et le stade de début de récolte a montré que les besoins en température sont différents en fonction des variétés et de l'environnement (Krüger, 2012). Cela a également permis de mieux comprendre leur physiologie.

De nombreux modèles sont utilisés pour décrire les stades phénologiques. La date de floraison du pommier a été modélisée avec les modèles Utah et Wang (Abed et al., 2019). Il a été trouvé qu'une satisfaction plus rapide des besoins en température permettait une floraison plus précoce.

Les besoins pour la dormance chez la vigne ont été étudiés avec différents modèles (Utah, Treshold, GDD), pour démontrer la différence d'entrée en dormance des variétés en fonction de la photopériode (Camargo et al., 2020).

Les modèles de prédictions sont conçus avec les connaissances de l'espèce étudiée et validée avec une observation en parcelle expérimentale. Les équations des modèles représentent les stades phénologiques en fonction des variables indépendantes de l'environnement (Figure 11) (Lepage, 2012).

L'avancée technologique a permis la création de nombreux modèles de prédictions et également des outils d'analyses (Chuine, 2013). Le logiciel de la plateforme de modélisation phénologique version

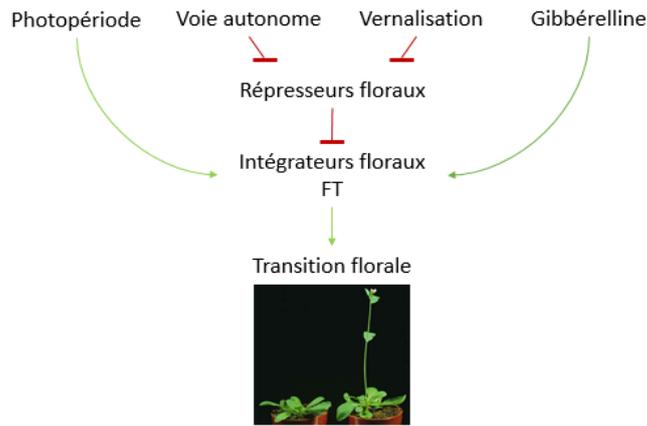


Figure 14 : Schéma des différentes voies de régulation de la floraison, en rouge les voies inhibitrices et en vert les voies activatrices

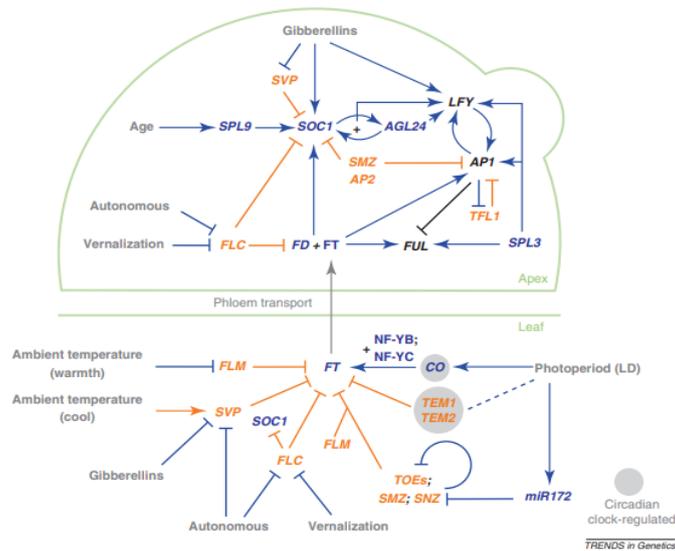


Figure 15 : Schéma des différentes voies de régulations de la floraison d'*Arabidopsis thaliana* (Wellmer et Riechmann, 2010), reprenant les facteurs environnementaux et endogènes. En bleu les voies activatrices, en orange les inhibitrices et en noir les gènes responsables de la différenciation du méristème.

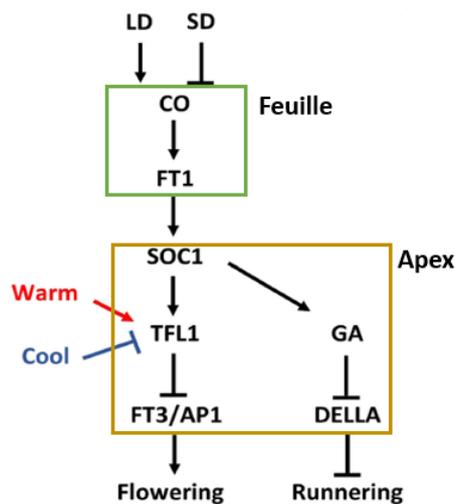


Figure 16 : Voies de régulation chez *Fragaria*.

5.5 (PMP5.5) regroupe de nombreux modèles prêts à être utilisés. Dans une étude, menée par Chuine, ils se sont servis de ce logiciel pour modéliser la croissance des bourgeons chez le platane (Chuine, 2000). Ce processus a été décrit en 3 stades, correspondant chacun à une date, début de dormance, apparition de la quiescence et le stade de débourrement des bourgeons.

L'intérêt de ces modèles de prédictions est leur capacité à s'adapter au jeu de données utilisées. Leur puissance permet de prendre en compte de nombreux facteurs environnementaux tels que la photopériode, la température, le rayonnement global ou encore les précipitations. Chaque modèle intègre de manière différente l'information donnée, il est important de choisir des modèles cohérent avec l'étude menée. La prédiction des stades phénologiques est primordiale pour assurer un bon suivi de la culture et un bon rendement (Prost, 2009).

F. Les différentes voies de régulation de la floraison

Chez la plante modèle *A. thaliana*, l'étude de mutants affectés dans leur réponse à la floraison a permis d'identifier quatre voies majeures de signalisation de la floraison : les voies de la photopériode et de la vernalisation répondant à des modifications environnementales et les voies autonomes et des gibbérellines répondant à des signaux endogènes (Wellmer et Riechmann, 2010). Le signal de floraison via les voies de régulations de la floraison est transmis aux intégrateurs floraux : FT (FLOWERING LOCUS T), SOC1 (SUPPRESSOR OF CONSTANS 1) et LFY (LEAFY) (Wellmer et Riechmann, 2010) qui à leur tour, activent les gènes de l'identité du méristème floral et permettent la transition florale (Figure 12).

1. Le contrôle moléculaire de la floraison:

Parmi les intégrateurs floraux, la protéine FT joue un rôle essentiel dans l'induction de la floraison en tant que florigène. En condition de photopériode inductible, CONSTANS (CO) va activer l'expression du gène FT dans la feuille. La protéine FT est ensuite synthétisée dans la feuille et migre via le phloème jusqu'au méristème apical où elle transmet le signal de floraison. Au niveau du méristème apical, elle entre en compétition avec le répresseur floral TFL1 (TERMINAL FLOWER1) pour l'interaction avec le facteur de transcription FD (FLOWERING LOCUS D). L'interaction de FT et FD permet la transcription des gènes de l'identité du méristème floral comme SOC1 (SUPPRESSOR OF OVER EXPRESSION OF CONSTANS 1) et AP1 (APETALA 1), dont l'activité provoque la transition de l'apex végétatif en méristème floral (Wellmer et Riechmann, 2010) (Figure 13).

Dans le méristème, SOC1 a un rôle intégrateur important, car son expression est activée par les différents signaux initiateurs de la floraison dont les gibbérellines (Moon et al., 2003). Il a aussi été montré que la voie des gibbérellines active SOC1 d'une manière indirecte en inhibant le répresseur floral SVP (Figure 13) (Srikanth et Schmid, 2011).

Ces voies de régulation et les acteurs impliqués sont globalement bien conservés parmi les angiospermes.

2. Contrôle moléculaire de la floraison chez *Fragaria*

Comme chez *Arabidopsis thaliana*, la floraison chez le fraisier est liée à des voies de signalisation distinctes et interconnectées telles que la photopériode, la température et des voies endogènes. Ces différentes voies de signalisations régulent la floraison par le biais d'activateurs et répresseurs floraux.

L'homologue de *TFL1* chez *F. vesca*, *FvTFL1*, est un gène de répression floral dont la mutation entraîne la remontée florale. (Iwata et al., 2012 ; Koskela et al., 2012). Chez les génotypes non-remontants, l'induction florale ne se produit qu'après la régulation négative de ce répresseur floral par des températures inférieures à 13 ° C ou par des jours courts. (Figure 14).

Les gènes impliqués dans la régulation par la température de *FvTFL1* attendent d'être élucidés, mais la voie photopériodique est assez bien comprise. En jours longs, l'homologue de CONSTANS (CO) chez *F. vesca*, *FvCO*, active un des trois homologues de FT, *FvFT1* dans les feuilles, ce qui conduit à la régulation à la hausse de *FvSOC1* dans l'apex. Chez les géotypes remontants qui n'ont pas de *FvTFL1* fonctionnel, la voie *FvCOFvFT1-FvSOC1* favorise la floraison, via l'activation *FvAP1* et de *FvFUL* tandis que dans les géotypes non-remontants, la régulation à la hausse du *FvTFL1* par *FvSOC1* conduit à l'inhiber (Figure 14).

Chez le fraisier, la production de fleurs et de stolons sont étroitement liées. Le méristème axillaire peut se différencier en nouveaux axes, capables de porter de nouvelles inflorescences, ou en stolons. *FvSOC1* joue un rôle très important dans l'activation de gènes de biosynthèses des gibbérellines, il régule un gène codant pour une enzyme biosynthétique de la gibbérelline (GA) GA20-oxydase (*FvGA20ox4*) (Tenreira et al., 2017). Cette enzyme limite la vitesse de la voie de biosynthèse de GA dans les bourgeons axillaires, elle va dégrader les protéines responsables de la floraison et provoquer la formation de stolon.

G. Contexte de l'étude

Mon stage s'inscrit dans le projet européen GoodBerry (<https://goodberry-eu.eu/>). Ce projet vise à renforcer la production européenne en identifiant des facteurs génétiques et moléculaires permettant de maintenir des rendements et une qualité de fruit élevée dans un contexte de changement climatique.

Pour optimiser sa production, le producteur joue sur la précocité et sur la durée de production. Cela lui permet de vendre ses fruits en début de saison, puis il maintient sa place sur le marché grâce à sa production continue en fruits. Dans ce cycle, la floraison occupe une place importante puisqu'elle influence directement la période de production (précocité et durée). Pour donner des outils aux sélectionneurs, il est donc important de comprendre les contrôles génétique et environnemental de la floraison.

De plus, dans un contexte de changement climatique et il est primordiale de comprendre comment la floraison est contrôlée par les facteurs environnementaux pour adapter la culture à un système de culture et un environnement adéquat pour un bon développement et assurer ainsi un bon rendement.

L'objectif de mon stage est une meilleure compréhension des effets environnementaux de la floraison, les effets génétiques étant abordés à travers l'analyse de six variétés présentant des comportements très différents. Pour étudier la floraison, nous nous sommes intéressés à deux étapes clés du cycle du fraisier : (1) la date de floraison qui est directement liée à celle de maturation des fruits ; (2) la date d'initiation florale qui correspond au début de mise en place de l'initiation florale ; dans les itinéraires techniques sans dormance, les plants sont cultivés sous abri en serre chauffée, la date d'initiation florale est alors corrélée avec celle de la floraison et donc à celle de maturation des fruits (Demené INVENIO pers comm).

Nous nous posons la problématique suivante : comment les conditions climatiques, le géotype et l'IGE influencent-ils la date de floraison et celle d'initiation florale chez le fraisier ? La première étape de la floraison étant l'initiation florale, nous avons recherché des marqueurs moléculaires de la mise en place de l'initiation florale.

La stratégie mise en place pour ce projet a été l'étude de six variétés de fraisiers dans cinq environnements distribués du Sud au Nord de l'Europe. Ceci a permis de disposer d'un panel de conditions climatiques présentes sur le territoire européen. Les expérimentations ont été menées pendant trois ans sur chaque site. A l'aide des données recueillies, nous avons pu étudier les effets des

Tableau 1 : Description des variétés utilisées pour le projet GoodBerry.

Nom de la variété	Région de culture	Fruits	Détails
Candongga	Sud de l'Espagne	Forme conique, fruits fermes adaptés au transport. Variété tardive	https://www.fellah-trade.com/fr/actualites-maroc/article?id=791
Cléry	France, Italie du Centre et Nord	Fruits de gros calibre à chair tendre et parfumée. Variété très précoce.	https://www.lesfruitsetlegumesfrais.com/fruits-legumes/petits-fruits-et-fruits-rouges/fraise/les-varietes
Florence	Allemagne	Qualité gustative moyenne. Variété tardive.	https://www.lesfruitsetlegumesfrais.com/fruits-legumes/petits-fruits-et-fruits-rouges/fraise/les-varietes
Frida	Scandinavie	Variété précoce en Scandinavie.	Cycle de développement court (Sonsteby A. comm. pers.)
Gariguetta	France	Fruit allongé présentant une haute qualité gustative. Variété très précoce.	https://www.lesfruitsetlegumesfrais.com/fruits-legumes/petits-fruits-et-fruits-rouges/fraise/les-varietes
Sonata	Allemagne	Fruits fermes ; potentiel de haut rendement. Variété de saison.	https://www.beeren-plantproducts.com/fr/aardbeienras-sonata

Tableau 2 : Description des différents stades du méristème terminal.



Figure 17 : Localisation des centres expérimentaux des essais des 6 variétés.

Stade	Description
17	Apex végétatif
18	Agrandissement de l'apex
19	Inflorescence avec première feuille initié
A	Primordium primaire de la fleur initié, développement du premier méristème axillaire
B	Sépales se développent en marge de primordium primaire ; un primordium secondaire se développe à la position axillaire inférieure
C	Pétales initiées mais non visibles sur le primordium primaire ; un primordium secondaire est initié sur l'axe secondaire inférieur
D	Développement des sépales et pétales de l'inflorescence du primordium primaire
E	Étamines apparaissent en marge du primordium primaire
F	Primordium primaire presque clos grâce aux sépales
G	Primordium primaire entièrement clos par les sépales ; des pistils apparaissent

génotypes, de l'environnement et de leurs interactions génotype-environnement sur la floraison du fraisier. De plus, en s'appuyant sur le logiciel PMP5, nous avons pu créer des modèles de prédiction pour ainsi comprendre le comportement des variétés en fonction des données climatiques.

Pour l'étude de marqueurs moléculaires liés à la mise en place de l'initiation florale, nous nous sommes appuyés sur les résultats d'une analyse de transcriptome réalisée avant mon arrivée en stage. Ces données étaient issues du transcriptome de bourgeons terminaux de deux variétés de fraisier, Gariguette et Cléry. Les prélèvements avaient eu lieu en France et en Allemagne avant et juste après l'initiation florale. De ces données temporelles de RNAseq, les gènes différentiellement exprimés au cours de la mise en place de l'initiation florale ont été identifiés. Au cours de mon stage, un choix de ces gènes a été réalisé et leur analyse en qPCR a été réalisée. L'arrivée du Covid19 a écourté cette partie.

II. Matériels et méthodes

A. Etude de l'initiation florale et de la floraison

1. Matériel végétal

Pour étudier la phénologie du fraisier au niveau de l'Europe, six variétés non-remontantes cultivées dans différentes régions d'Europe ont été choisies. Les caractéristiques de ces six variétés sont présentées dans le Tableau 1.

2. Dispositif expérimentale

Ces génotypes ont été cultivés dans cinq centres expérimentaux différents présents dans des pays allant du nord de l'Europe (Norvège, NIBIO) au sud de l'Europe (Italie, Pergrine Valsugana et France, Ciref), en passant par la Pologne (INHORT) et l'Allemagne (HGU) (Figure 15). L'itinéraire technique pour NIBIO, INHORT, HGU et le CIREF se sont déroulé en plein sol tandis que pour PV l'itinéraire technique est en culture hors sol sur substrat dans un tunnel fermé.

Des mesures ont été réalisées sur les plants des six variétés sur trois années d'expérimentation, chacune couvrant deux années calendaires, de 2016 à 2017, de 2017 à 2018 et de 2018 à 2019. Dans chaque environnement, trois blocs contenant 25 plants de chacune des six variétés ont été mis en place.

Un protocole pour les notations a été mis en place entre les différents pays afin de noter de la même façon (« protocole harmonisé »). Le phénotypage a concerné des mesures liées au cycle de développement du plant et à la qualité du fruit. Dans ce rapport je me suis intéressé à deux phases du cycle de développement : la mise en place de l'initiation florale en pépinière et la floraison en production. Je décrirai donc les données phénotypiques notées et étudiées pour ces deux processus.

3. Obtention du jeu de données

a. Mesure de l'initiation florale

L'initiation florale est caractérisée par la transition du méristème végétatif en méristème floral, et n'est pas observable à l'œil nu. Les plants sont disséqués et observés au microscope pour déterminer le stade du méristème terminal. La description des stades fait référence aux travaux de Jahn et Dana (1970) (Tableau 2). Dans le projet GoodBerry, le plant a été considéré comme initié lorsque le méristème terminal était au stade A :

Les observations en pépinières ont été réalisées tous les 10 jours pour chacune des six variétés et des trois années d'expérimentation. A titre d'exemple, le Tableau 3 résume les dates de prélèvements

Tableau 3 : Date de prélèvement des plants de fraisier en fonction des stations d'expérimentations.

	CIREF	PV	HGU	INHORT	NIBIO
D1	16/07/2016	22/07/2016	19/07/2016	21/07/2016	15/07/2016
D2	09/08/2016	10/08/2016	09/08/2016	09/08/2016	11/08/2016
D3	22/08/2016	23/08/2016	19/08/2016	18/08/2016	18/08/2016
D4	01/09/2016	29/08/2016	30/08/2016	29/08/2016	30/08/2016
D5	12/09/2016	08/09/2016	09/09/2016	08/09/2016	08/09/2016
D6	23/09/2016	15/09/2016	20/09/2016	18/09/2016	19/09/2016
D7	03/10/2016	26/09/2016	30/09/2016	28/09/2016	29/09/2016
D8	13/10/2016	05/10/2016	11/10/2016	08/10/2016	10/10/2016
D9	26/10/2016	17/10/2016	21/10/2016	18/10/2016	20/10/2016
D10	04/11/2016	26/10/2016	01/11/2016	28/10/2016	31/10/2016
D11		07/11/2016	10/11/2016	07/11/2016	10/11/2016
D12		22/12/2016			

effectués en pépinière pour l'année 2016. Pour chacune des dates et chaque génotype, 9 plants ont été disséqués pour observer le stade d'avancée de l'initiation florale.

Le pourcentage de plants initiés est calculé pour chaque date. L'évolution des plants initiés pour chacune des années d'expérimentation et des six variétés permet d'extraire 3 dates correspondant à 25%, 50% et 75% de plant initiés. Le stade 25% correspond au début de la mise en place de l'initiation florale. Pour les stades 50% et 75% nous supposons que la phase d'induction est terminée (Béatrice Desnoyes) et qu'ils correspondent à une évolution des stades des méristèmes terminaux et donc se rapprochent plus de l'organogénèse.

b. Mesure de la floraison

La date de floraison a été notée sur l'ensemble de chacun des trois blocs. Elle correspondait à 50% des plants fleuris au sein du bloc. Nous obtenons donc trois dates de floraison pour une variété pour une année dans les 5 environnements étudiés.

4. Corrélation initiation florale et floraison

L'initiation florale est le point déclencheur du mécanisme de la floraison chez le fraisier. L'ensemble de ces mécanismes sont liés. L'initiation florale permet le développement des hampes florales avant l'hiver. Elle détermine le potentiel de floraison, plus il y a de hampe avant l'hiver, plus il y aura de fleur et de fruit. Après la période de dormance, les hampes vont reprendre leur développement et fleurir pour enfin donner des fruits. Ces différents stades étant très liées, une corrélation entre dates d'initiation florale et dates de floraison a été effectuée.

5. Données climatiques

Les données climatiques ont été recueillies sur la période de l'expérimentation de juillet 2016 à septembre 2019 par des stations météorologiques se situant sur le site de l'expérimentation. Les données journalières sont les suivantes : température moyenne (T_m), température maximale (T_{max}) et minimale (T_{min}), taux d'humidité moyen dans l'air, précipitations, photopériode et rayonnement global.

B. Analyses statistiques exploratoires

Une analyse statistique exploratoire a été menée avec le logiciel R version 3.5.2 (2018) sur les données phénotypiques de l'expérimentation. Les caractères étudiés sont l'initiation florale et la floraison pour l'ensemble des génotypes dans tous les environnements et sur les 3 années. Les données ont été visualisées à l'aide du package « ggplot2 » pour observer comment se comportent les génotypes sur les différents environnements et également observer l'effet de l'environnement et de l'année sur le caractère étudié. Des boîtes à moustache ont été réalisées ainsi que des heatmaps. Ces visualisations permettent d'observer la distribution des données. Le package « smoother » a été utilisé pour visualiser la variation des températures sur une année, ainsi nous pouvons comparer les températures des différents environnements étudiés ainsi que les différentes années.

L'effet du génotype, de l'environnement et de l'année ont été étudiés à l'aide d'une analyse de variance (ANOVA). Le test d'égalité des variances (test d'homoscédasticité) de Bartlett et la vérification de la normalité des résidus par le test de Shapiro-Wilk ont été réalisés. Ensuite, à l'aide du test de Kruskal-Wallis, nous avons pu déterminer les différences significatives entre génotypes, entre environnements et entre années. Pour finir, un test de Tukey est réalisé pour classifier les différents effets. Le package « agricolae » a été utilisé pour ces étapes. L'ANOVA a été réalisée pour observer l'effet des facteurs et également leurs interactions à l'aide de la formule suivante :

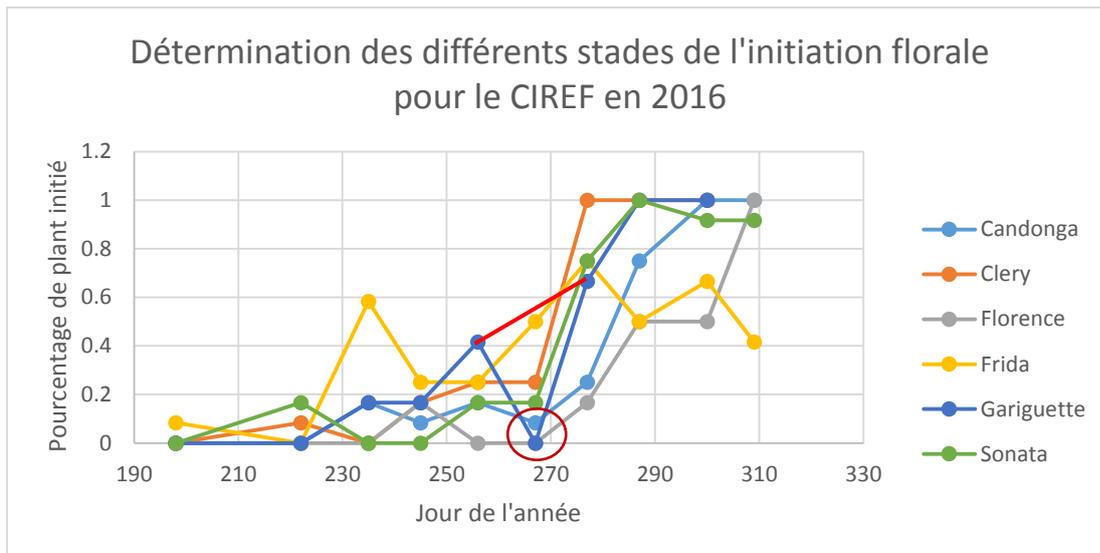


Figure 18 : Pourcentage de plant initié pour chaque date de prélèvement. Le cercle rouge montre une donnée aberrante. La droite rouge montre la correction apportée.

$$Y_{ijkl} = \mu + G_i + E_j + A_k + (GE)_{ij} + (GA)_{ik} + (EA)_{jk} + (GEA)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

μ = moyenne ; G_i = effet du génotype i ; E_j = effet de l'environnement j ; A_k = effet de l'année k ; GE_{ij} = interaction du génotype i et de l'environnement j ; GA_{ik} = Interaction du génotype i et de l'année k ; EA_{jk} = Interaction de l'environnement j et de l'année k ; GEA_{ijk} = interaction du génotype i et de l'environnement j et de l'année k ; ε_{ijkl} = erreur résiduel.

C. Etude des interactions génotype environnement à l'aide de modèles de prédiction

Nous avons cherché à modéliser la phénologie en fonction des données environnementales. Pour cela, nous nous sommes intéressés à deux processus importants pour le rendement du fraisier, la mise en place de la floraison à travers l'initiation florale et la floraison à travers la date de floraison.

Nous avons recherché un logiciel qui permette de construire un modèle simple pour expliquer la phénologie en fonction des contraintes environnementales. Le logiciel de la plateforme de modélisation phénologique version 5.5 (PMP5.5) (Chuine et al., 2013) permet de construire ou d'adapter un modèle phénologique aux données recueillies. Il permet également de faire des simulations à l'aide de modèles préexistants. Pour la création de modèles, il est possible de sélectionner des modèles phénologiques dans la base de données du programme ou bien de définir un nouveau modèle à l'aide de fonction que le logiciel met à disposition. Dans cette étude uniquement des fonctions préexistantes ont été utilisées.

Concernant les données d'entrée, trois fichiers sont nécessaires: (1) le premier fichier inclue les données météorologiques journalières (Tm), photopériode (P) et rayonnement globale (RG) en spécifiant l'environnement et l'année ; (2) le deuxième, les données phénotypiques et donc dans notre cas, la date de l'initiation florale et celle de la floraison ; (3) le troisième sert à faire le lien entre les deux premiers jeux de données.

1. Les données météorologiques

Grâce aux analyses bibliographiques réalisées au cours de ce stage, nous avons retenu les facteurs environnementaux les plus impliqués dans la date de floraison et l'initiation florale : la température (température moyenne par jour en degrés Celsius), la photopériode (en heure par jour) et la radiation globale (en Watt par mètre carré par jour).

2. Les données phénotypiques

Date de floraison : Les données de date de floraison des six variétés mesurées par chacun des partenaires du projet GoodBerry ont été regroupées dans un seul fichier ; nous avons également créé un fichier par variété pour tenir compte d'un possible effet du génotype.

Date de l'initiation florale : Contrairement à la date de floraison directement observée sur le terrain, la date d'initiation florale doit être déduite des données architecture réalisées sur les variétés. Sur la Figure 16, est représentée l'évolution du pourcentage de plants initiés pour chaque environnement (site x année). Les dates d'initiation florale sur chaque environnement (site x année) ont été extraites des courbes de la mise en place de l'initiation florale étudiée grâce à l'architecture de 9 ou 12 plants selon le site (voir Matériels et Méthodes pour le détail). Nous avons estimé que la date à 25% des plants induits (25% des plants présentant un méristème terminal au stade A minimum) pouvait représenter le début de l'initiation florale. Les dates correspondant à 50% et 75% de plants induits sont extraites de la même façon.

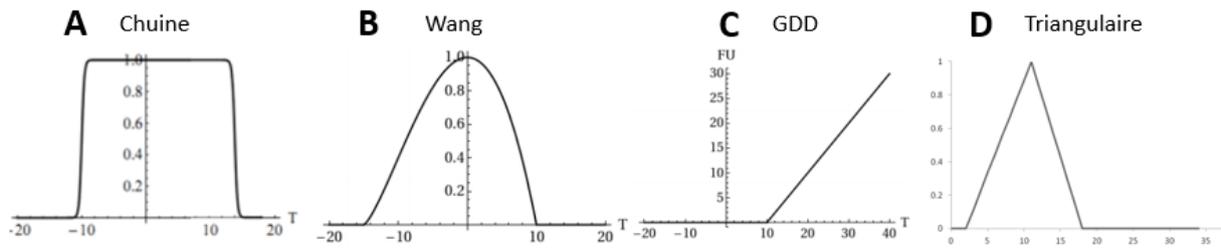


Figure 17 : Représentations graphique des fonctions Chuine (A), Wang (B), GDD (C) et Triangulaire (D).

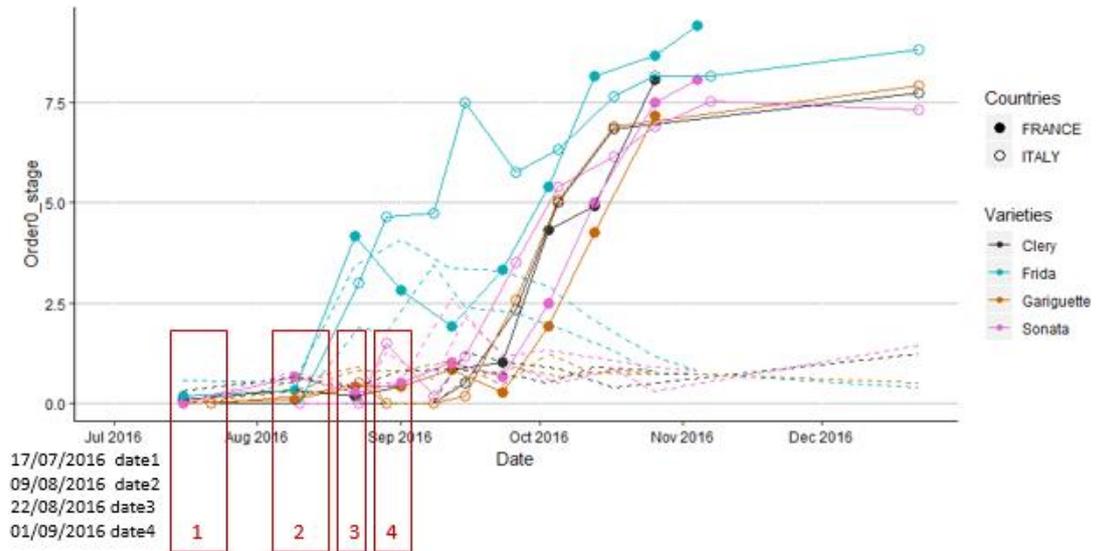


Figure 18 : Date de prélèvement des échantillons en fonction du stade d'avancée florale.

Pour identifier les dates de façon précise, nous avons utilisé la formule $Yb-Ya/Xb-Xa$. A étant le point avant que 25%, 50% ou 75% des plants soient initiés et B le point d'après. Néanmoins pour certaine valeur, une lecture graphique est nécessaire. En effet, le pourcentage de plants est issue de données architecturales qui sont destructrices. Ceci peut conduire à d'importantes variations entre deux dates comme par exemple pour Gariguette au CIREF en 2016. (Figure 16). Dans ce cas, la valeur extrême (ici 0% observé 10 jours après 40% de plants induits) n'est pas prise en compte.

3. Choix des fonctions utilisées dans le modèle de prédiction

Le logiciel PMP5.5 procure des fonctions déjà définies, elles ont été utilisées pour créer le modèle de prédiction. Quatre fonctions ont été sélectionnées et testées pour le modèle de prédiction (voir le détail en annexe 2) : Chuine, Wang, GDD et triangulaire.

La fonction de Chuine est unimodale et symétrique. Elle prend en compte la température et détermine un intervalle où elle a un impact favorable sur le caractère étudié. Les valeurs présentes dans cet intervalle ont le même effet (Figure 17 A).

La fonction de Wang n'est pas symétrique, ce modèle propose un intervalle favorable sur le caractère étudié. La représentation en cloche nous renseigne sur la température, à T_{opt} , l'effet est maximale tandis que plus on se rapproche des bornes moins la température est favorable. A l'extérieur de cette gamme, la température n'a plus aucun effet (Figure 17 B).

La fonction GDD calcul le cumul des températures nécessaires pour atteindre le stade étudié. Le cumul est effectué avec les températures supérieures à la température de base (température minimale favorable) (Figure 17 C).

La courbe présentée par la fonction Triangulaire est similaire à la fonction de Wang avec une croissance et une décroissance plus abrupte. Elle est régit par les trois même paramètres. Elle peut être symétrique ou asymétrique (Figure 17 D).

4. Sortie du logiciel PMP5

Dans le logiciel, une fois les fichiers téléchargés, le modèle est choisi et les paramètres climatiques sont sélectionnés. Il est possible de construire un modèle en faisant référence à un processus de développement (exemple pour calculer la date d'initiation au stade 50%, il est possible de se référer à la date du stade 25%). Les modèles sont comparés en fonction de leur efficacité et de leur cohérence avec la physiologie du fraisier.

Pour optimiser l'analyse, nous avons analysé la variété Cléry avec l'ensemble des fonctions retenues et les différents paramètres climatiques. Le modèle choisi a ensuite été utilisé pour les cinq autres variétés.

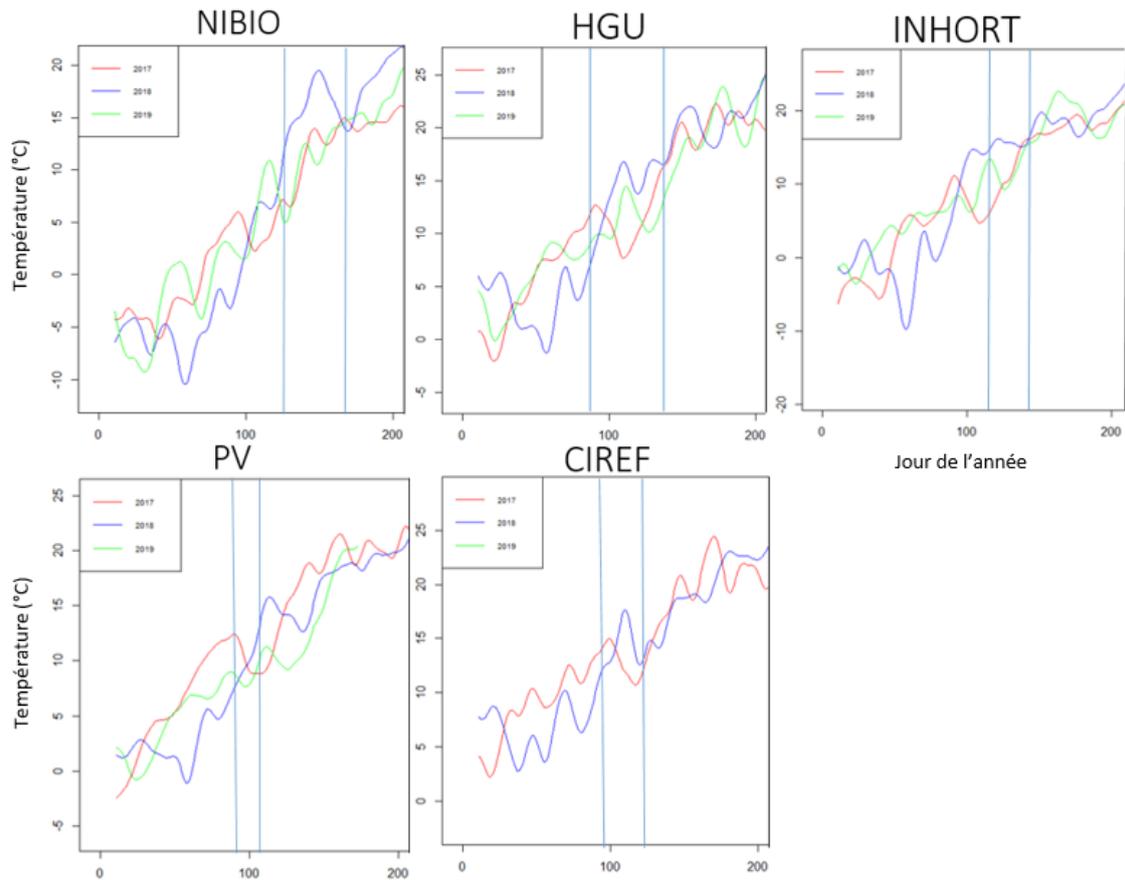


Figure 19 : Evolution de la température par jour des années 2017, 2018 et 2019 sur les cinq sites expérimentaux. Les traits bleus représentent le début et la fin de la période de floraison.

Tableau 3 Date de floraison en jour calendaire pour les six variétés étudiées sur cinq environnements et deux ou trois années d'expérimentation. Chaque valeur représente la moyenne des trois blocs. Les données sont colorées selon la précocité (rouge) ou la floraison tardive (vert).

Cultivar	CIREF (FR)		PV (IT)			HGU (GE)			INHORT (PL)			NIBIO (NO)		
	2017	2018	2017	2018	2019	2017	2018	2019	2017	2018	2019	2017	2018	2019
Candongga	97.7	109.3				115.3	111.0	111.0	122.0	142.0	123.3	167.7	141.3	166.0
Clery	94.0	104.0	94.0	101.0	92.0	94.3	106.3	98.0	121.0	136.0	119.0	157.0	147.3	161.3
Florence	99.7	114.0				124.7	118.3	114.0	124.0	140.0	127.3	168.7	150.0	172.0
Frida	94.0	110.7	102.0	102.0	98.0	130.7	109.7	110.0	120.0	137.3	119.7	158.0	148.7	165.7
Gariguette	94.7	97.0	97.0	97.0	95.0	111.0	106.3	108.3	120.0	136.7	119.0	160.3	147.0	159.7
Sonata	99.0	106.0	103.0	103.0	100.0	116.3	114.7	111.0	121.7	137.7	122.7	158.0	148.0	162.7

FR, France ; IT, Talie ; GE, Allemagne ; PL, Pologne ; NO, Norvège

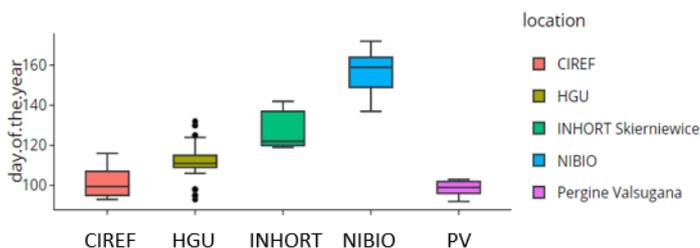


Figure 20 : Boxplots des dates de floraison des 6 variétés observées sur les 5 environnements.

Tableau 4 : Résultats des tests statistiques menés sur les 5 environnements.

Environnement	Shapiro Wilk		Kruskall-Wallis	Groupe (Tukey)
	P-value	Normalité		
CIREF	1,49e-10	non	Différence Significative	d
PV				d
HGU				c
INHORT				b
NIBIO				a

III. Résultats

A. Analyse de la date de floraison

1. Présentation des sites expérimentaux en période de culture des plants (floraison et production en année N)

La température varie très fortement entre les sites (Figure 19). De par leur latitude, les sites présentent des températures plus ou moins froides. Le site de NIBIO en Norvège présente la latitude la plus élevée et les températures les plus basses qui peuvent atteindre -10°C juste avant la période de floraison. A l'opposé, les températures au CIREF (France) et à Pergrine Valsugana (Italie) sont comprises entre 0 et 10°C pour la même période. Aux HGU (Allemagne) et INHORT (Pologne), les températures varient entre -5°C et 10°C . Dans la suite des résultats, seul le nom du site expérimental sera nommé. Les années sont également différentes entre elles sur le même site expérimental. L'année 2018 sur l'ensemble des sites illustre parfaitement le décalage de température possible entre deux années. Sur la période avant la floraison, les températures sont très froides et pendant la floraison très chaudes par rapport aux années 2017 et 2019. L'ensemble de ces courbes de températures nous montrent à quel point les variétés ont évolué dans des conditions différentes selon les sites et les années.

2. Analyse exploratoire de la date de floraison

Les dates de floraison se sont étalées du jour calendaire 94 (Italie et France) au jour calendaire 170 (Norvège) (Tableau 3).

- Le rôle de la latitude sur la précocité de la floraison :

La date de floraison varie selon les cinq sites étudiés, les plants cultivés dans les pays du sud de l'Europe étant les plus précoces et ceux cultivés en Europe du nord les plus tardifs. Les pays présentant la floraison la plus précoce sont l'Italie et la France (latitude 46 et 45°) avec une floraison à une date moyenne de 98 et 102 jours, vient ensuite l'Allemagne (latitude 50°) (date de floraison moyenne 112 jours) puis la Pologne (latitude 52°) (date de floraison moyenne 126 jours) et enfin la Norvège (latitude 60°) (date de floraison moyenne de 158 jours) (Tableau 4 et Figure 20).

L'analyse statistique est réalisée à l'aide d'un test de Kruskal-Wallis suivi d'un test post-hoc de Tuckey, les données comme les résidus ne suivant pas une loi normale. Les résultats du test regroupent les sites en quatre groupes distincts (Tableau 4). Le CIREF et Pergrine Valsugana (groupe d) qui présentent la plus grande précocité sur l'ensemble des variétés sont regroupés dans le même groupe. HGU, INHORT et NIBIO ont chacun leur propre groupe, respectivement c, b et a ; allant d'une précocité intermédiaire à une floraison tardive.

La Figure 20 nous montre également qu'il y a un étalement de la date de floraison pour les six variétés différentes selon les sites : les plants cultivés aux CIREF, INHORT et NIBIO sont plus étalés que ceux des plants cultivés aux Pergrine Valsugana et HGU (excepté pour quelques dates).

- Les variétés présentent des précocités de floraison différentes :

La précocité de floraison est différente selon les variétés avec Cléry et Gariguettes les plus précoces et Florence la plus tardive. En fonction du site, les dates de floraison pour chacune des variétés présentent une plus ou moins grande variabilité. Les dates de floraison des variétés mises en place à NIBIO et à INHORT présentent une grande variabilité au sein de chacune des variétés sur l'ensemble des deux ou trois années d'essais, comparées à celles des variétés mises en place au CIREF et à Pergrine Valsugana (Figure 21).

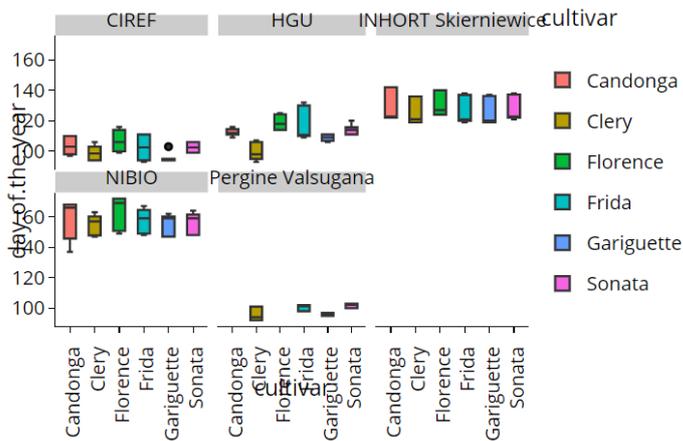


Figure 21 : Boxplots des dates de floraison des 6 variétés observées en fonction des 5 environnements

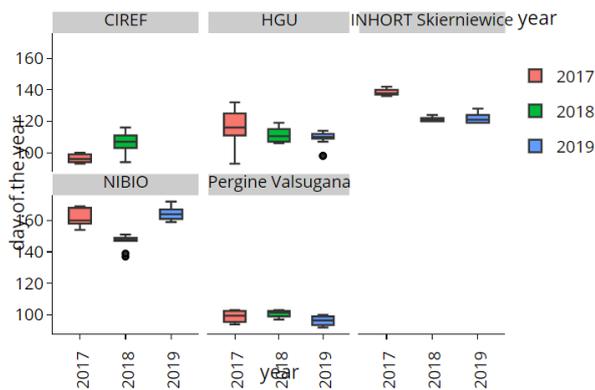


Figure 22 : Boxplots des dates de floraison sur une année en fonction des 5 environnements.

Tableau 5 : Résultats des tests statistiques menés sur les 6 variétés.

Génotype	Shapiro Wilk		Kruskall-Wallis	Groupe (Tukey)
	P-value	Normalité		
Florence	1,49e-10	non	Différence Significative	a
Candonga				ab
Frida				b
Sonata				b
Gariguette				bc
Clery				c

Tableau 6 : Résultats des tests statistiques menés sur les 3 années.

Année	Shapiro Wilk		Kruskall-Wallis	Groupe (Tukey)
	P-value	Normalité		
2017	2,242e-6	non	Différence Significative	b
2018				a

Analysis of Variance Table

Response: flor\$flo	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
flor\$geno	5	6666	1333.2	696.369	< 2.2e-16 ***
flor\$loc	4	106343	26585.7	13886.285	< 2.2e-16 ***
flor\$an	2	1205	602.3	314.569	< 2.2e-16 ***
flor\$geno:flor\$loc	18	1102	61.2	31.983	< 2.2e-16 ***
flor\$geno:flor\$an	10	488	48.8	25.514	< 2.2e-16 ***
flor\$loc:flor\$an	7	6666	952.3	497.404	< 2.2e-16 ***
flor\$geno:flor\$loc:flor\$an	31	1325	42.7	22.321	< 2.2e-16 ***
Residuals	156	299	1.9		

signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Tableau 8 : Classement de la date de floraison des six variétés selon le test de Tukey sur chaque environnement (site x année). Les groupes de floraison sont représentés par des lettres, « a » est le groupe le plus tardif. Un filtre de couleur est ajouté pour une meilleure différenciation des groupes, en vert les groupes tardifs et en rouge les groupes précoces.

	CIREF		HGU			INHORT			NIBIO			PV		
	2017	2018	2017	2018	2019	2017	2018	2019	2017	2018	2019	2017	2018	2019
Florence	a	a	b	a	a	b	a	a	a	a	a			
Candonga	b	ab	c	c	b	a	b	b	a	b	b			
Sonata	ab	b	c	b	b	c	b	bc	b	ab	bc	a	a	a
Frida	c	ab	a	c	bc	c	c	cd	b	a	b	b	b	b
Gariguette	c	c	c	d	c	cd	c	d	b	ab	c	c	d	c
Clery	c	b	d	d	d	d	bc	d	b	ab	c	d	c	d

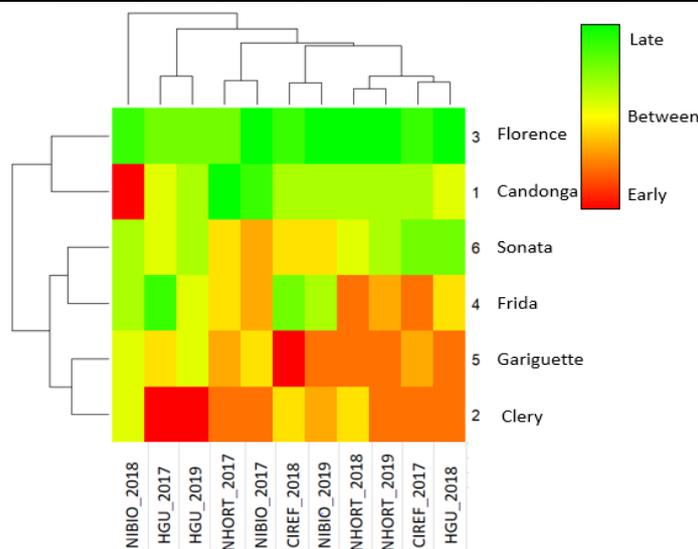


Figure 23 : Heatmap des dates de floraison des 6 génotypes en fonction de l'environnement (site x année) et de l'année.

La date de floraison est représentée par couleur, en rouge une date précoce et en vert une date tardive. Les dates de floraison sont normalisées entre les différents sites. Les variétés sont classées en fonction de leur date de floraison moyenne sur l'ensemble des sites. Les sites sont classés en fonction de la variabilité moyenne des dates de floraison des six variétés.

Comme précédemment, l'analyse statistique est réalisée à l'aide d'un test de Kruskal-Wallis suivi d'un test post-hoc de Tuckey, les données comme les résidus ne suivant pas une loi normale. Les résultats du test classent Florence comme la variété la plus tardive, (Tableau 5). Cléry est la variété la plus précoce. Entre ces deux extrêmes, nous retrouvons Frida et Sonata qui sont tardives mais moins que Florence. Candonga appartient au groupe « a » et « b » est classé tardive à très tardive. Gariguettes appartient au groupe « b » et « c », donc est classé relativement précoce.

- La date de floraison varie selon les années

L'effet de l'année sur la précocité des variétés est très différent selon le lieu. Par exemple, l'année 2017 est une année précoce pour le CIREF alors qu'il s'agit d'une année tardive pour INHORT ou NIBIO. La moyenne de la date de floraison des variétés par année et par lieu n'est pas très variable entre les années, excepté pour HGU en 2017 et le CIREF en 2018 (Figure 22).

Comme précédemment, l'analyse statistique est réalisée à l'aide d'un test de Kruskal-Wallis suivi d'un test post-hoc de Tuckey (Tableau 6), les données comme les résidus ne suivant pas une loi normale. Les résultats du test classent l'année 2017 comme l'année la plus tardive. Les années 2018 et 2019 ne sont pas significativement différentes lorsqu'on les analyse sur l'ensemble des variétés.

3. Effets de la variété, de l'année et du site sur la date de floraison

Les effets site, année et variété ainsi que les différentes interactions possibles sont analysés dans une analyse de variance (ANOVA) (Tableau 7). Tous les facteurs et toutes les interactions ont un effet significatif sur la date de floraison inférieur au seuil 0,001. La date de floraison est donc très dépendante du site, de l'année et de la variété et ces facteurs sont en interaction.

Pour tenir compte des effets environnement et année et de leur interaction, nous réalisons un test de Tuckey pour comparer les variétés dans chacun des environnements (site x année). Les résultats sont présentés dans le Tableau 8. Les résultats du test montrent que les variétés Cléry et Gariguettes sont le plus souvent les plus précoces et Candonga et Florence les plus tardives.

L'interaction entre site et année est illustré avec la variété Candonga qui présente une floraison précoce à NIBIO en 2018 alors que cette variété est plutôt intermédiaire voire tardive dans les autres conditions, ou encore avec la variété Frida en 2017 à HGU qui présente une floraison tardive alors qu'elle est plutôt précoce dans les autres conditions.

Pour mieux visualiser le regroupement des variétés et des environnements (site x année), nous réalisons une heatmap (Figure 23). Les résultats de cette approche classent les variétés et les conditions sur leurs distances après avoir normalisé les données. Pergrine Valsugana a été exclu de l'analyse car les variétés Florence et Candonga n'y ont pas été étudiées. Nous n'avons également pas de données pour le CIREF en 2019.

Les résultats de la heatmap permettent de mieux visualiser les résultats du test de Tuckey comme la précocité de Cléry et Gariguettes et la floraison tardive de Florence et Candonga. Les inversions de comportement sont ici très visibles : (1) pour Candonga qui a été très précoce à NIBIO en 2018 ; (2) pour Gariguettes (CIREF 2018) et Cléry (HGU 2017 et 2018) où elles ont été encore plus précoces que dans les autres environnements.

Les environnements (site x année) sont classifiés en fonction du classement des variétés au sein de l'environnement considéré. Au HGU en 2018, les dates de floraison des variétés sont très variables tandis que pour NIBIO en 2018, les dates de floraison sont toutes tardives excepté pour Candonga.

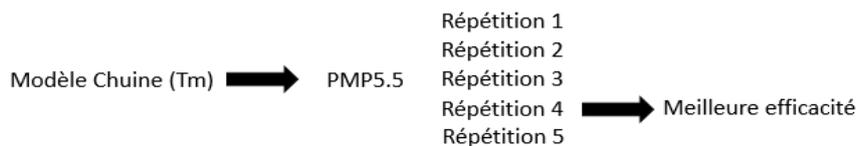


Figure 24 : Sélection de la meilleure répétition d'un modèle de prédiction.

Tableau 9 : Efficacité des modèles de prédiction en fonction des facteurs étudiés et des données utilisées.

Données	Ensemble des variétés et des environnements (sites x années)			Cléry sur l'ensemble des environnements (sites x années)	Cléry (PV exclue)
	Chuine (Tm)	Chuine (RG)	Chuine (P)	Chuine (Tm)	Chuine (Tm)
Efficacité	83%	5% à 10%	45% à 87%	90% à 92%	97% à 98%

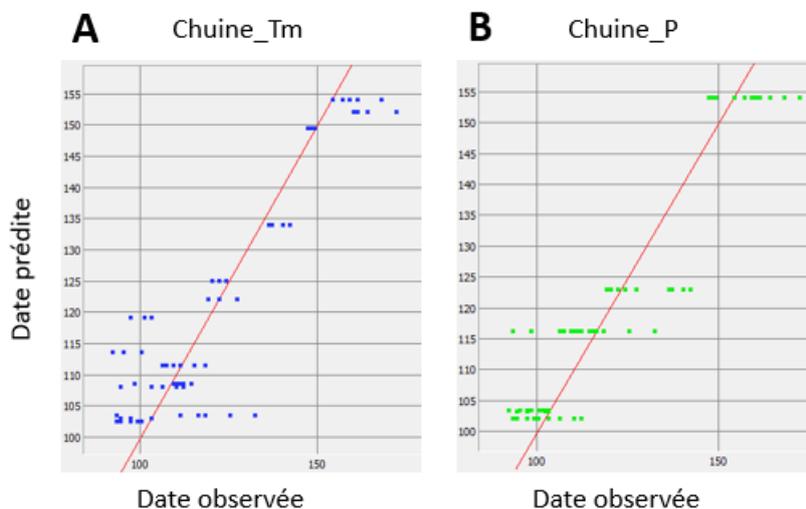


Figure 25 : Comparaison des prédictions des dates de floraison de 3 modèles. (A) Modèle comprenant la température moyenne (Tm) comme facteur explicatif avec la fonction Chuine. (B) Modèle comprenant photopériode (P) comme facteur explicatif avec la fonction Chuine.

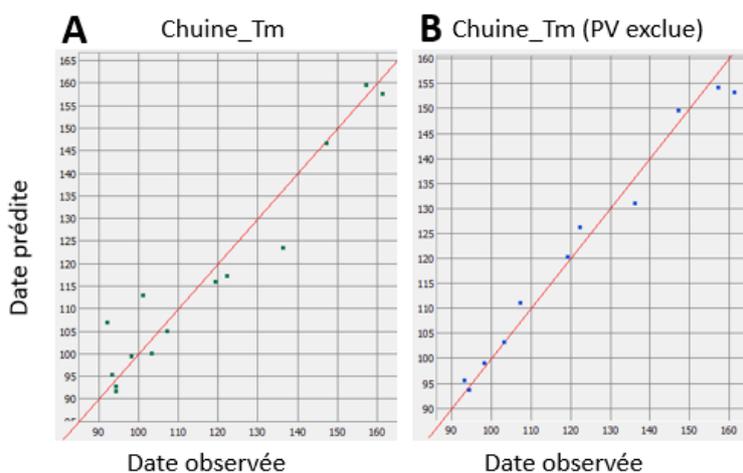


Figure 26 : Comparaison des prédictions des dates de floraison des modèles de Cléry avec (A) et sans (B) Pergine Valsugana.

4. Les modèles de prédiction de la date de floraison à l'aide du logiciel PMP5.5

La date de floraison des variétés étant très dépendante du site expérimental et de l'année d'expérimentation, nous avons recherché s'il était possible de prédire la date de floraison à l'aide des données climatiques. Les modèles de prédiction prenant en compte les données climatiques sont disponibles dans le logiciel PMP5.5.

La date de floraison est issue de la reprise de l'ontogénèse après la dormance du plant. D'après la bibliographie, que ce soit pour les feuilles ou pour les fleurs, cette phase est essentiellement contrôlée par la température mais la photopériode ou le rayonnement global peut également intervenir. Nous avons donc pris en compte dans les modèles la température ($^{\circ}\text{C}$ Tmoy), la photopériode (h/jour P) ou encore le rayonnement global (Watt/m^2 RG) et nous nous sommes appuyés sur les fonctions déjà établies dans le logiciel PMP5.5.

Chaque analyse intégrant une valeur à expliquer (date de floraison), une fonction (Chuine, Wang, Triangulaire ou GDD) et un critère climatique (Tmoy, RG, P) (ou des combinaisons de fonctions et de critères) génère plusieurs modèles (dans cette étude cinq modèles) dans lesquels les paramètres des modèles sont ajustés grâce à 20 répétitions par modèle. Le modèle le plus adapté est choisi pour visualiser la prédiction des données. Le choix du modèle le plus adapté est basé sur (1) l'efficacité du modèle qui représente la part de variabilité expliquée par le modèle par rapport à la variabilité totale, et sur (2) les paramètres donnés par le modèle : les paramètres de la fonction étudiée, la date T0 prédite et le SStar (somme des jours où la variable choisie a atteint le stade phénologique étudié).

a. Choix du modèle de prédiction en utilisant l'ensemble des données

Dans un premier temps, pour calibrer le modèle de la date de floraison, nous avons inclus l'ensemble des données disponibles obtenues sur les six variétés, les cinq sites expérimentaux et les deux ou trois années d'essais (Tableau 9). Les facteurs choisis sont la température moyenne, le rayonnement global ou la photopériode. Les combinaisons entre ces facteurs ont également été étudiées. La fonction Chuine est retenue pour cette analyse car elle permet d'étudier un processus de développement au sein d'une plage de températures. Pour cette étude, nous sélectionnons le modèle qui présente la plus grande efficacité (Figure 24).

Les cinq modèles générés avec la fonction Chuine présente une efficacité de 83% pour la température moyenne, de 45% à 87% pour la photopériode, de 5% à 10% pour le rayonnement global et de 67% à 85% pour la température moyenne et photopériode.

La Figure 25 présente les prédictions de chacun des modèles (modèle choisi au sein des cinq modèles construits selon la meilleure efficacité). Les valeurs prédites à partir du modèle Chuine_Tm sont distribuées le long de la droite (Figure 25 A) alors que celles du modèle Chuine_P se regroupent (Figure 25 B). En effet, le modèle donne une même date de prédiction pour l'ensemble des variétés présentes sur un site et ce, quelle que soit l'année. La date de floraison modélisée avec Chuine_Tm est donc sélectionnée pour la suite de l'étude de la date de floraison.

b. Choix du modèle de prédiction sur la variété Cléry

Nous savons que chez le fraisier, L'effet variétal est très important pour la dates de floraison (Verheul et al., 2007 ; Sonstebly et Heide 2008). Pour étudier de cet effet, nous avons identifié les meilleurs modèles pour chaque variété et analysé les paramètres de ces modèles. La Figure 26 présente les résultats du modèle pour la variété Cléry. Les résultats montrent une très forte augmentation de l'efficacité du modèle qui est passée à 92% (Tableau 9 ; Figure 26 A). Sur cette figure, deux dates de floraison, celles de Cléry observées en Italie, répondent très mal au modèle. Cette

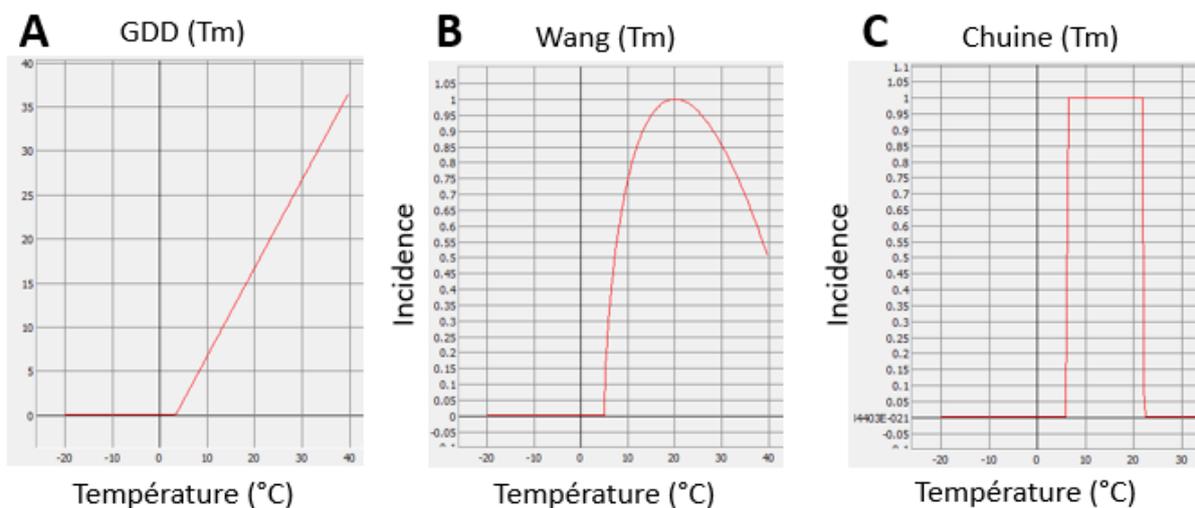


Figure 27 : Modèle GDD_Tm (A), Wang_Tm (B) et Chuine_Tm (C) à partir des données de date de floraison de Cléry.

Tableau 10 : Différence entre les dates de floraison calculées par le modèle et les dates observées pour la variété Cléry.

Environnement	Année	Prédiction	observée	Différence
CIREF	2017	93.6	94	0.4
CIREF	2017	93.6	94	0.4
CIREF	2017	93.6	94	0.4
CIREF	2018	103.2	103	-0.2
CIREF	2018	103.2	103	-0.2
CIREF	2018	103.2	106	2.8
HGU	2017	95.6	93	-2.6
HGU	2017	95.6	95	-0.6
HGU	2017	95.6	95	-0.6
HGU	2018	111.2	107	-4.2
HGU	2018	111.2	106	-5.2
HGU	2018	111.2	106	-5.2
HGU	2019	99.1	98	-1.1
HGU	2019	99.1	98	-1.1
HGU	2019	99.1	98	-1.1
INHORT	2017	131	136	5
INHORT	2017	131	136	5
INHORT	2017	131	136	5
INHORT	2018	126.2	122	-4.2
INHORT	2018	126.2	120	-6.2
INHORT	2018	126.2	121	-5.2
INHORT	2019	120.3	119	-1.3
INHORT	2019	120.3	119	-1.3
INHORT	2019	120.3	119	-1.3
NIBIO	2017	154.3	157	2.7
NIBIO	2017	154.3	156	1.7
NIBIO	2017	154.3	158	3.7
NIBIO	2018	149.6	147	-2.6
NIBIO	2018	149.6	147	-2.6
NIBIO	2018	149.6	148	-1.6
NIBIO	2019	153.2	161	7.8
NIBIO	2019	153.2	163	9.8
NIBIO	2019	153.2	160	6.8

Repetition	1	2	3	4	5
Model Type	Meta Model				
T0<1,1>	56.7	55.2	56.0	53.6	54.1
SStar<1,1>	36.322	36.698	36.437	36.214	36.834
Phase Function<1,1>	[Chuine, Tmean]				
a<1,1>	1.89192	0.32731	1.89293	1.25052	1.09873
b<1,1>	-29.99999	-18.23487	-30.00000	-29.13441	-21.83258
c<1,1>	6.07018	6.08814	6.07489	6.15553	6.13923
-----	-----	-----	-----	-----	-----
SStot	6360.7273	6360.7273	6360.7273	6360.7273	6360.7273
SSres	144.92103	152.11067	145.20821	151.28917	152.79488
RMSE	3.6296885	3.7186346	3.6332832	3.7085793	3.7269885
EFF	0.97721628	0.97608596	0.97717113	0.97621512	0.9759784

Figure 28 : Paramètres des cinq modèles de prédictions créés en fonction des dates de floraison des environnements CIREF, HGU, INHORT et NIBIO sur les 3 années pour la variétés Cléry. La modélisation est réalisé avec à partir des températures moyennes avec le modèle de Chuine.

Tableau 11 : Caractéristiques des 6 variétés calculées par les modèles de prédictions. Le modèle de Chuine la prise en compte de la température moyenne

Variété	Efficacité (%)	Date T0	Intervalle de température favorable (°C)
Cléry	97,7	56,7	5,5 - 22
Sonata	97,2	62,6	10 - 20,5
Candongga	94,8	62,1	10 - 22,5
Florence	93,8	63	10 - 20,5
Frida	93,0	60,9	10 - 21
Gariguette	93,7	60,3	6,5 - 22,5

observation s'est confirmée pour l'ensemble des quatre variétés cultivées en Italie (Pergrine Valsugana) (résultats non montrés). Lorsque les données italiennes sont exclues, l'efficacité du modèle passe à 98% (Tableau 9 ; Figure 26 B). L'hypothèse d'une réponse différente des variétés en Italie pourrait être due à un itinéraire technique différent, en serre chauffée. Dans la suite de l'analyse de la date de floraison, les données italiennes ne sont pas retenues.

Pour optimiser le modèle sur la variété Cléry, nous testons les fonctions GDD, Wang, Chuine et triangulaire. Toutes les fonctions conduisent à de bonnes prédictions excepté le modèle triangulaire. Nous nous intéressons alors aux caractéristiques données par les différents modèles pour vérifier leur cohérence avec la physiologie du fraisier (Figure 27).

Sur les cinq modèles générés à chaque analyse, les fonctions Chuine et Wang donnent des résultats cohérents et similaires alors que les efficacités de la fonction GDD sont soit basses soit correctes.

Au niveau biologique, le modèle GDD_Tm prend en compte toutes les températures au-dessus de la température de base, notamment celles dépassant 24°C qui ralentissent voire inhibent la floraison (Verheul et al, 2007 ; Sonstebj et Heide 2008) (Figure 27 A). Le modèle Wang_Tm calcule un intervalle de température favorable à la floraison allant jusqu'à 40°C, ce qui n'est pas cohérent avec les données bibliographiques (Figure 27 B). Le modèle de Chuine_Tm donne les résultats les plus cohérents avec les connaissances que nous avons sur la physiologie du fraisier. Ainsi, pour Cléry, les températures favorables à la floraison sont entre 5,5°C et 22°C (Figure 27 C). Ce modèle est donc utilisé pour chacune des six variétés.

c. Choix des modèles pour chaque variété

Pour les cinq répétitions du modèle Chuine_Tm, nous obtenons une efficacité quasiment identique de 98%. (Figure 28). Pour choisir entre ces cinq modèles, nous nous intéressons au paramètre « b » qui est un indicateur de la pertinence du modèle (Chuine, 2013 ; Annexe 2). Cette valeur comprise entre -30 et 15 doit s'éloigner le plus de 0, ce qui est le cas des modèles 1 et 3. En ce qui concerne les paramètres date T0 et SStar, les valeurs sont très similaires entre les modèles, ce qui indique que le logiciel aboutit aux mêmes conclusions. Nous avons finalement choisi le modèle 1 car il a une efficacité légèrement plus élevée que le modèle 3. L'intervalle de température favorable à la floraison est entre 5,5 et 22°C.

La précision du modèle pour la date de floraison de Cléry est de 3 jours en moyenne (Tableau 10). Cette prédiction augmente à 8 jours pour Cléry dans l'environnement (NIBIO 2019). La qualité de prédiction pour Candonga, Florence, Frida, Gariguettes et Sonata sont représentées en Annexe 3.

d. Résultats de l'ensemble des modèles

La prédiction des modèles pour chacune des variétés est très élevée, supérieure ou égale à 93% et va jusqu'à 97% pour Cléry et Sonata. Ainsi il est possible de prédire la date de floraison avec une précision de 3 jours, ce qui est utile pour le producteur (Tableau 10).

La date T0 nous indique à partir de quel jour de l'année la plante prend en compte la température (Tableau 11). Les deux variétés les plus précoces, Cléry et Gariguettes, sont celles qui prennent en compte la température le plus tôt (56,7 et 60,3 jours calendaires soit fin février, début mars). De plus, ces deux variétés sont capables d'intégrer le signal 'température' avec un seuil plus bas (5,5°C et 6,5°C respectivement) que celui des autres variétés (10°C). Les variétés avec une précocité intermédiaire ou tardive, Frida, Candonga, Sonata et Florence, sont réceptives à la température au 60,9 - 63^{ème} jour calendaire et ont une plage de température favorable plus étroite que celle de Cléry et Gariguettes.

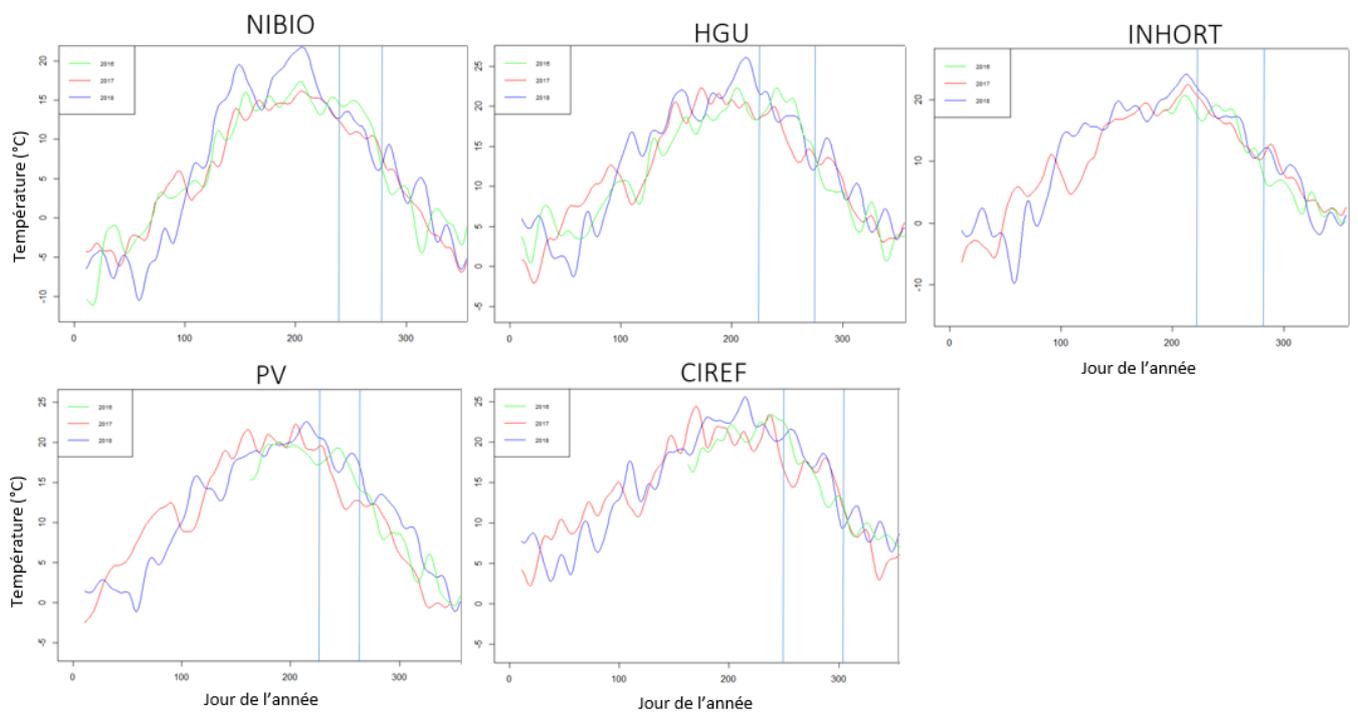


Figure 29 : Evolution de la température par jour des années 2017, 2018 et 2019 sur les 5 environnements. Les bornes bleues représentent le début et la fin de la période d'initiation florale (du stade 25% au stade 100%).

Tableau 12 : Dates d'initiation florale du stade 25% calculées pour les 6 variétés sur les 5 environnements et les 3 années d'expérimentation. Un filtre a été ajouté pour visualiser les différences de précocités, en rouge les dates d'initiation florale précoces et en vert les dates d'initiation florale tardives.

Cultivar	CIREF (FR)		PV (IT)			HGU (GE)			INHORT (PL)			NIBIO (NO)		
	2016	2017	2016	2017	2018	2016	2017	2018	2016	2017	2018	2016	2017	2018
Candonga	277	268				247	232	251	265	256	222	240	251	273
Clery	267	249	260	229	253	246	230	245	264	226	239	238	250	247
Florence	280	269				258	222	260	248	254	232	258	262	268
Frida	256	215	227	224	246	238	223	244	244	224	239	232	259	250
Gariguette	271	258	261	233	247	246	223	248	262	253	234	236	258	264
Sonata	268	260	257	235	256	246	222	245	262	255	237	248	251	245

FR, France ; IT, Talie ; GE, Allemagne ; PL, Pologne ; NO, Norvège

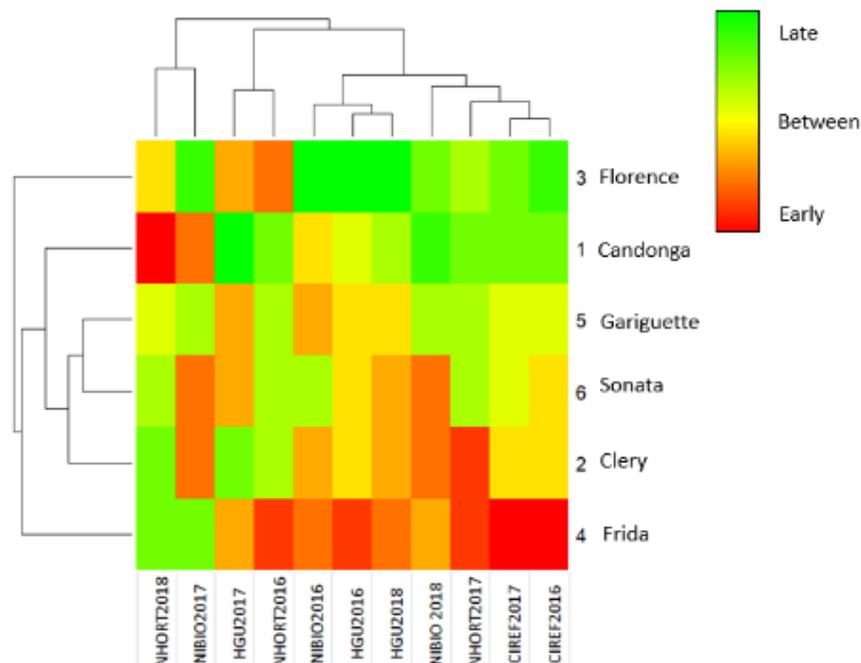


Figure 30 : Heatmap des dates d'initiation florale du stade 25% des 6 géotypes en fonction de l'environnement et de l'année. La date d'initiation florale est représentée par couleur, en rouge une date précoce et en vert une date tardive. Les dates d'initiation florale sont normalisées, les différences de précocité doivent être étudiées environnement par environnement. Les variétés sont classées en fonction de leur date d'initiation moyenne sur l'ensemble des environnements. Les environnements sont classés en fonction de la variabilité moyenne des dates d'initiation florale sur un environnement

En conclusion, ces modèles de prédiction montrent que la température moyenne explique bien la date de floraison. De plus, ces modèles mettent en évidence que les variétés ne prennent pas en compte les mêmes plages de température.

B. Analyse de l'initiation florale

L'initiation florale se met en place lorsque les jours raccourcissent et les températures diminuent. La plante reçoit alors un signal qui conduit à la transition du méristème de végétatif à floral. Une fois la transition réalisée, l'organogénèse de la fleur se poursuit et celle-ci est arrêtée par la dormance des plants lorsque les températures sont froides. La bibliographie nous dit que les deux critères climatiques importants pour le déclenchement de l'initiation florale sont la température, la photopériode et leur interaction (Heide and al, 2013 ; Opstad and al, 2011 ; Verheul and al, 2006). Une fois l'initiation florale en place, la fleur poursuit son organogénèse et ici comme pour la floraison, la température est le principal facteur climatique.

Nous avons donc extrait les dates d'initiation florale à 25%, 50% et 75% de plants induits avec l'hypothèse que 25% de plants induits représente une phase précoce de l'initiation florale qui rend compte de la perception du signal de floraison alors que 50% et 75% de plants induits représentent des phases plus tardives incluant majoritairement de l'organogénèse. Les dates d'initiation florale sur chaque environnement (site x année) ont été extraites des courbes de la mise en place de l'initiation florale étudiée grâce à l'architecture de 9 ou 12 plants selon le site (voir Matériels et Méthodes pour le détail).

1. Présentation des sites expérimentaux en période de culture des plants (Initiation florale en année N-1)

Pour l'ensemble des environnements, l'initiation florale, qui est caractérisée par la transition du méristème terminal qui devient floral (bombement du méristème) commence lorsque la température et la photopériode sont décroissantes (CTIFL) (Figure 29). A NIBIO (Norvège) (latitude la plus élevée), la température avant la période d'initiation florale est de 15°C mis à part l'année 2018 qui est très chaude. A l'INHORT (Pologne), la température ne dépasse pas 20°C. Tandis qu'au HGU (Allemagne), en Italie (Pergrine Valsugana), et en France (CIREF), les températures peuvent atteindre 25°C.

Les années sont également différentes entre elles sur un même site expérimental. (1) L'année 2018 sur NIBIO et HGU est une année très chaude avant l'initiation florale ; (2) l'année 2017 sur CIREF, Pergrine Valsugana et HGU présentent des températures froides pendant l'initiation florale. A l'INHORT les années sont similaires pendant l'initiation florale.

2. Dates d'initiation florale déterminées au stade 25%, 50% et 75% de plants induits

A 25% de plants induits, HGU présente les plants avec les dates d'initiation les plus précoces. Pour les autres environnements aucune tendance ne se dégage. Nous pouvons tout de même voir que pour l'année 2017, pour HGU et Pergrine Valsugana, les dates sont plus précoces que les autres années (Tableau 12). Malheureusement, nous ne pouvons pas faire d'analyse statistique de ces données car nous n'avons qu'une seule donnée par génotype, par année et par site. Les dates des stades 50 et 75% sont sur l'Annexe 4.

3. Etude du comportement des variétés en fonction de l'environnement

La heatmap permet de visualiser les différences de comportement entre les variétés par rapport à leur comportement moyen (Figure 30). (1) Candonga est très précoce pour l'environnement INHORT_2018 et précoce dans celui de NIBIO_2017 ; (2) Frida, très précoce pour les environnements CIREF_2016 et CIREF_2017.

Tableau 13 : Efficacité des modèles de prédiction sur le stade 25% pour les variétés Cléry et Gariguette. Le modèle Chuine est utilisée pour expliquer la température moyenne (Tm) et la photopériode (P) et le modèle de Wang le rayonnement global (RG).

Cléry				Gariguette			
Chuine Tm	Wang RG	Chuine P	Chuine Tm * Wang RG	Chuine Tm	Wang RG	Chuine P	Chuine Tm * Wang RG
40%	36%	5%	58%	42%	44%	4%	51%

Tableau 14 : Caractéristiques de Cléry et Gariguette pour le stade 25% calculées par les modèles de prédictions. Le modèle utilisé combine le modèle de Chuine utilisé pour Tm et le modèle de Wang pour RG.

Variétés	Efficacité	Température incidente (°C)	RG optimale (W/m ²)
Cléry	58%	13,5 - 20	3911
Gariguette	52%	9,5 - 24	3713

Tableau 15 : Efficacité des modèles de prédiction sur le stade 50% à partir du stade 25% pour la variété Cléry. Le modèle Chuine est utilisée pour expliquer la température moyenne (Tm) et la photopériode (P) et le modèle de Wang le rayonnement global (RG).

Cléry					
Modèle	Chuine_Tm	Wang_RG	Chuine_P	Chuine_Tm x Chuine_P	Chuine_Tm x Wang_RG
Efficacité	21%	19%	40%	54%	33%

Tableau 16 : Efficacité des modèles de prédiction sur le stade 50% à partir du stade 25% pour la variété Gariguette. Le modèle Chuine est utilisée pour expliquer la température moyenne (Tm) et la photopériode (P) et le modèle de Wang le rayonnement global (RG).

Gariguette			
Modèle	Chuine_Tm	Wang_RG	Chuine_P
Efficacité	94%	88%	88%

Tableau 17 : Caractéristiques de Cléry et Gariguette pour le stade 50% calculées par les modèles de prédictions à partir du stade 25%. Le modèle utilisé combine le modèle de Chuine utilisé pour Tm et le modèle de Wang pour RG.

Variétés	Efficacité	Température Favorable (°C)	Photopériode favorable (heure de jour)
Cléry	54%	9 - 18,5	8 - 13,5
Gariguette	94%	5 - 20	

Tableau 18 : Efficacité et caractéristique des modèles de prédictions créés pour l'étude des facteurs incident entre le stade 50 et 75% pour Cléry et Gariguette. Le modèle Chuine est utilisée pour expliquer la température moyenne (Tm) et la photopériode (P) et le modèle de Wang le rayonnement global (RG).

Cléry				Gariguette		
Modèle	Chuine Tm	Wang RG	Chuine P	Chuine Tm	Wang RG	Chuine P
Efficacité	97%	97%	98%	90%	90%	93%
Valeur optimale		7325W/m ²			6121W/m ²	
Intervalle incident	10 - 25°C		0 - 24 heures	5,5 - 19°C		10 - 12 heures

4. Les modèles de prédiction de la date d'initiation florale à l'aide du logiciel PMP5.5

Pour développer un modèle de prédiction pour la date d'initiation florale, nous suivons une démarche similaire à celle présentée dans la partie « Etude de la date de floraison ». Le déclencheur de la floraison conduisant à l'initiation florale faisant intervenir la température et la photopériode, nous avons pris en compte ces deux facteurs climatiques. Plutôt que la photopériode, le rayonnement global rend mieux compte de la perception de l'intensité lumineuse par la plante. Nous avons donc également intégré le rayonnement global à notre étude.

Des modèles de prédiction sont créés : (1) pour le stade 25% ; (2) pour le stade 50% à partir du stade 25% ; (3) pour le stade 75% à partir du stade 50%. Nous avons centré notre étude sur les deux variétés étudiées pour leur transcriptome, Cléry et Gariguettes.

a. Etude du stade précoce de l'initiation florale, à 25% de plants initiés

Sur le Tableau 13, est représentée l'efficacité des différents modèles créés pour Cléry et Gariguettes. Le modèle Chuine_P présente une efficacité de 5%, ce qui suggère que la photopériode seule n'explique pas le stade précoce d'initiation florale alors que les modèles Chuine_Tm et Wang_RG semblent mieux l'expliquer. Lorsque ces deux derniers facteurs sont combinés dans un seul modèle, Chuine_Tm x Wang_RG, l'efficacité atteint 58% et 51% pour Cléry et Gariguettes respectivement.

Les paramètres de ces modèles sont renseignés sur le Tableau 14. Gariguettes présente un intervalle de températures favorables supérieures à Cléry, respectivement 9,5 à 24°C et 13,5 à 20°C. Ces deux variétés semblent réagir de la même manière au rayonnement global.

b. Etude du stade 50% de plants initiés à partir du stade 25% de plants initiés

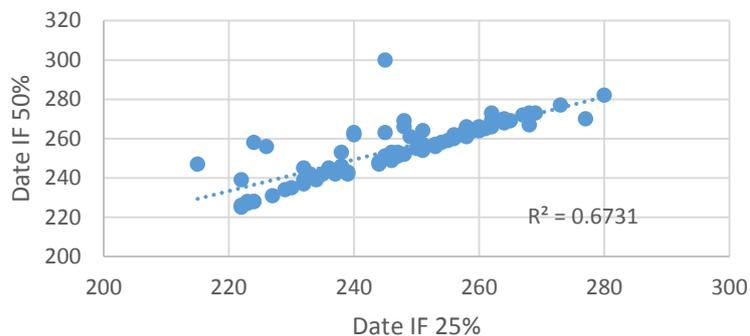
Les résultats des modèles pour prévoir la date de 50% de plants initiés chez Cléry et Gariguettes sont différents de ceux des modèles pour 25% (Tableau 15). En effet, pour Cléry, il faut combiner température et photopériode (Chuine_Tm x Chuine_P) pour atteindre une efficacité de 54% alors que seule la température avec la fonction Chuine (Chuine_Tm) permet d'expliquer 94% du modèle. Ceci traduit une perception des signaux de température et de rayonnement différents chez ces deux variétés.

Les paramètres de ces modèles sont renseignés sur le Tableau 17. Gariguettes a un intervalle de températures favorable de 5 à 20°C et Cléry de 9 à 18,5°C. Avec le modèle Chuine_Tm x Chuine_P, nous avons la photopériode favorable pour Cléry qui est de 8 à 13,5 heures de jour.

c. Etude du stade 75% de plants initiés à partir du stade 50% de plants initiés

Tous les modèles présentent une très bonne efficacité (Tableau 18), supérieur à 90% pour expliquer le passage de 50% à 75% de plants initiés. Le modèle RG montre une valeur optimale de 7300 W/m² pour Cléry et de 6121 W/m² pour Gariguettes, ces valeurs semblent extrêmes. Le modèle avec la photopériode, donne un intervalle incident entre 0 et 24 heures pour Cléry ce qui n'est pas cohérent. Néanmoins pour Gariguettes, l'intervalle donné est en parfait accord avec la littérature. Le choix a été de garder le modèle Chuine_Tm car il est le plus compréhensible en vue des valeurs données par les autres modèles et il permet une très bonne prédiction pour les deux variétés.

Corrélation entre le stade d'initiation florale
25% et 50%



Corrélation entre les dates d'initiation florale
50% et 75%

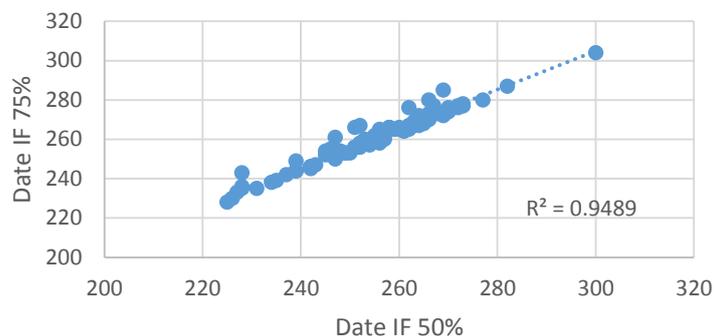


Figure 31 : Corrélation entre les stades d'initiation florale 25% et 50%.

Figure 32 : Corrélation entre les stades d'initiation florale 50% et 75%.

Corrélation date de floraison et date d'initiation
florale au stade 25%

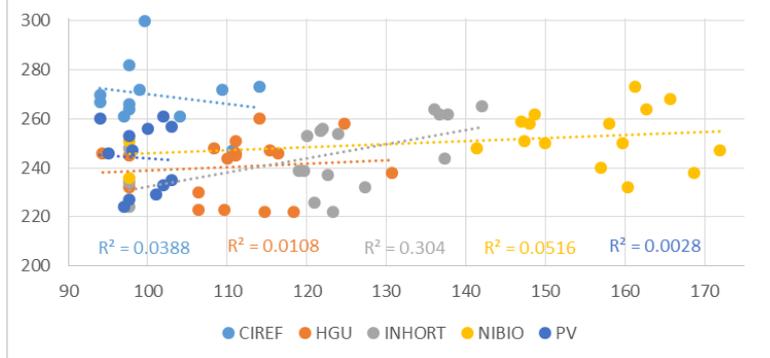


Figure 33 : Corrélation entre les dates d'initiation florale de l'année N-1 et les dates de floraison de l'année N sur les 5 environnements. Les dates des 6 variétés pour les 5 environnements et les 3 années sont représentées.

C. Corrélation initiation florale et floraison

1. Corrélation entre les différents stades de l'initiation florale

Nous nous sommes intéressés à la corrélation entre les deux processus, initiation florale et floraison, puisqu'il est fait référence à cette corrélation dans la bibliographie (Opstad et al, 2011). Les dates des stades 25% sont reliées à celles de 50% de plants initiés avec un R^2 de 67% (Figure 31). Cette corrélation est encore plus forte lorsqu'on étudie la relation entre les stades 50% et 75% de plants initiés (Figure 32) (R^2 de 95%).

2. Corrélation entre les dates du stade 25% (N-1) et la date de floraison (N)

Il n'y a pas de corrélation entre la date d'initiation florale au stade 25% de plants initiés et la date de floraison (Figure 33). Le R^2 des droites de régression pour chaque environnement est inférieur à 5% excepté pour INHORT (30%). Les dates d'initiation florale et celles de floraison ne sont donc pas liées.

L'ensemble des résultats sur les corrélations suggèrent un processus discontinu entre le début de l'initiation florale et la floraison alors que ce processus semble continu au cours de l'initiation florale. La valeur très élevée de R^2 entre les stades 50% et 75% de plants initiés pourrait être dû à un processus relevant principalement de l'organogénèse entre ces deux stades.

IV. Discussion

Plasticité du fraisier pour la date de floraison et l'initiation florale

La plasticité phénotypique est la capacité d'un organisme à exprimer différents phénotypes à partir d'un génotype donné selon des conditions biotiques et/ou abiotiques (Agrawal, 2001). Le phénotype obtenu dépend de son fond génétique, de l'expression de gènes et des facteurs environnementaux (Schlichting, 2014). L'analyse exploratoire des dates de floraison ainsi que l'observation des dates d'initiation florale des six variétés sur les cinq environnements et les trois années d'expérimentation montrent que le fraisier présente une forte plasticité. Les variétés réagissent très différemment en fonction du site et de l'année que ce soit pour l'initiation florale ou la date de floraison. Cette variation avait déjà été observée sur des variétés de fraisier (Labadie et al., 2019) ainsi que sur les espèces octoploïdes à l'origine du fraisier cultivé (Sonsteny et Heide, 2008).

La plasticité peut se traduire par des Interaction Génotype x Environnement (IGE)

Les Interactions Génotype x Environnement (IGE) sont définies comme des variations de grandeurs ou des inversement de classement (Brancourt-Hulmel, 2014). Les heatmaps ont révélées des inversement de classement entre les différents environnements (site expérimental x année d'expérimentation). En effet, l'exemple de la variété Candonga présentant une date de floraison tardive par rapport aux autres variétés dans la majorité des environnements excepté sur celui de NIBIO_2018 est très parlant (voir Figure 23). Cette IGE a également été observée pour la date d'initiation florale : e.g. la variété Frida sur le CIREF en 2016 et 2017 présente une extrême précocité comparé aux autres environnements. Ainsi, les résultats ont montré une stabilité des comportements de certaines variétés comme Sonata ou Florence alors que d'autres présentent des comportements contrastés selon les environnements (e.g. Candonga, Gariguet).

Prendre en compte de la plasticité et de l'IGE dans un programme d'amélioration

La compréhension de la base génétique de la plasticité phénotypique et de l'interaction génotype x environnement (GxE) est de première importance pour la sélection végétale dans le contexte du changement climatique (Diouf et al., 2020). Le producteur peut faire le choix de cultiver des variétés stables (e.g. les variétés Sonata et Florence qui ne présente pas de d'IGE quantitative ou qualitative (Brancourt-Hulmel, 2014)) pour assurer une production quelles que soient les températures, ou au contraire, de prendre des variétés très performante dans un environnement précis (Dugué, 2012) : e.g. les variétés Cléry, Gariguet et Candonga sont très précoces dans certains environnements.

Dans un contexte de réchauffement climatique, la précocité de floraison est recherchée pour éviter les stress hydrique en milieu de saison. En effet depuis 2015 en France, chaque année une période de canicule impact le rendement des variétés (Bernadet, 2017). Avoir des variétés qui fleurissent tôt permet d'éviter ces stress de températures pour le fraisier et beaucoup d'autre espèce (pour le blé, Mekhlouf, 2016). De plus une variété précoce permettra aux producteurs de produire tôt dans l'année et de s'installer sur les marchés avant l'arrivée des fraises étrangères et d'adapter son système de production en fonction des variétés utilisées.

Les modèles de prédiction de la date de floraison prennent en compte principalement la température et rendent compte de la précocité des variétés

La température joue un rôle majeur dans la date de floraison (Verheul and al, 2007 ; Sonstebly and Heide 2008) même si des effets de la photopériode ou de l'intensité lumineuse (Smeet, 1980) ont

été reportés. L'importance de la température dans la prédiction de la date de floraison a été confirmée par nos modèles sur l'ensemble des variétés. Grâce aux modèles, nous avons également identifiés des paramètres de la fonction Chuine spécifiques à chacune des variétés : la date T0, début de la phase de floraison, et l'intervalle de températures favorables. Ces paramètres permettraient d'expliquer la différence de précocité entre les variétés. Les variétés les plus précoces vont prendre en compte la température plus tôt dans la saison avec une température minimum plus basse. De plus, pour ces variétés précoces, les dates T0 sont plus précoces et les variétés sont donc réceptives plus tôt (ce qui peut être lié à la perception de températures favorables plus basses).

Les modèles phénologiques sont de bons outils pour décrire la phénologie des espèces. Ils peuvent être utilisés pour la compréhension de mécanismes, prédire les évolutions des variétés modélisées sous l'évolution de leur environnement (Prost, 2008). Ces modèles prennent en compte les effets du climat (température moyenne et rayonnement globale) (Jeuffroy, 2008). En effet, pour la floraison, les modèles de prédictions procurent des dates très proches de la réalité même lorsqu'il y a présence d'IGE. Pour valider les modèles de prédiction, il faudrait tester les paramètres obtenus avec de nouvelles données.

Les modèles de prédiction de la date de l'initiation florale prennent en compte l'interaction température et photopériode ou rayonnement global

L'initiation est découpée en 3 stades (25%, 50% et 75%). L'hypothèse est qu'au stade 25%, l'induction florale n'est pas terminée, ce stade dépend de la photopériode, de la température (revue dans Heide and al, 2013) mais également d'autre paramètre que nous n'avons pas pris en compte tel que l'âge du plant (Verheul and al, 2006) ou encore la régulation moléculaire (e.g. le répresseur floral *TFL1* qui est contrôlé par la lumière : Rantanen et al., 2014). Tandis que pour le stade 50 et 75% nous sommes dans une phase intermédiaire entre la réception du signal de transition florale et l'organogénèse. Pour l'organogénèse, la température est le facteur le plus important (Durner, 2015).

Ces données ont été confirmées pour la variété Gariguette, son stade 25% étant expliqué par le modèle intégrant la température moyenne et le rayonnement globale alors que seule la température intervenait pour les stades 50% et 75% de plants initiés. Cependant les résultats ont été différents pour la variété Cléry pour laquelle le stade 75% de plants initiés est expliqué uniquement par la température alors que pour les stades 25% et 50% de plants initiés, le modèle prend en compte la température moyenne et le rayonnement global. Ces résultats permettent de souligner que les variétés perçoivent la température, la photopériode et le rayonnement global de manière différente (Heide et al., 2013).

Corrélation Initiation florale et date de floraison

Les données bibliographiques montrent une corrélation entre les dates d'initiation florale à l'année N-1 avec les dates de floraison à l'année N (Opstad and al, 2011 ; Verheul and al, 2006 ; Sonstebly and Heide, 2006). Nos résultats n'ont montré aucune corrélation significative dans nos conditions d'expérimentations en conditions « naturelles » (pas d'utilisation de chambre climatique).

Lorsqu'on analyse les données de la littérature (Opstad and al, 2011 ; Verheul and al, 2006 ; Sonstebly and Heide, 2006), la floraison est forcée grâce à la culture des plants en conditions inductibles en chambre climatique, ce qui permet la mise en place de l'initiation suivie de leur culture en conditions favorables à la floraison. Dans ces essais, les variétés n'ont pas subi de dormance. Ce système est très utilisé en Norvège et au Japon (Mochizuki and al, 2009). Dans un itinéraire de floraison forcée, la date de floraison est directement liée à celle de l'initiation florale. L'impact de l'absence de dormance sur le rendement est discuté entre absence d'impact (Konsin and al, 2001) ou impact sur le développement du plant (Jonkers, 1965 ; Lieten, 1997).

Dans notre étude, la précocité de la variété pour la floraison dépend de son besoin en heure de froid et de sa prise en compte de la température. Elles n'ont pas toutes le même besoin en froid, les variétés tardives auront tendance à avoir un cumul d'heure de froid supérieur (CTIFL ; Labadie et al, 2019). Dans notre étude, il serait intéressant de prendre en compte la dormance pour pouvoir mieux relier l'initiation florale et la floraison.

Le choix des producteurs pour avoir une floraison précoce dépendra de leur système de culture. Les producteurs ayant des installations permettant de forcer la floraison (modèle norvégien et japonais) devront s'intéresser à la précocité de l'initiation florale. Les producteurs qui sont obligés d'avoir une période de dormance devront s'intéresser à la précocité à floraison.

V. Conclusion

Les analyses statistiques et la création de heatmap ont permis de mettre en évidence les interactions génotype x environnement ainsi que la plasticité du fraisier. Ainsi, les variétés montrent une adaptation aux conditions environnementales. Ces résultats sont confirmés par l'analyse de variance qui montre la significativité des effets de toutes les interactions.

Les modèles de prédictions sont des bons outils pour étudier la phénologie des variétés (e.g. date de floraison) même en présence d'IGE. En effet, dans nos expérimentations, les modèles arrivent à prédire des dates de floraison avec une précision de trois jours en moyenne et ce, même en présence d'IGE. De plus, ils permettent de comprendre comment les variétés intègrent les facteurs environnementaux.

Nos analyses ont également démontré l'absence de corrélation des dates d'initiation florale et de floraison lorsqu'elles sont séparées d'une période de dormance.

L'étude des gènes avec la qPCR, vérifie les données du séquençage d'ARN et permet de mettre en évidence une différence d'expression des gènes en fonction de la variété et de l'environnement.

Cette étude montre l'importance de choisir des variétés adaptées à son environnement et à son système de culture, surtout dans un contexte du changement climatique.

Références Bibliographiques

- ABED, Aïcha, BONHOMME, Marc, LACOINTE, André, BOURGEOIS, G. et BAALI-CHERIF, D., 2019. Climate change effect on the bud break and flowering dates of the apple trees in mountainous and plain regions of Algeria. In : *Advances in Horticultural Science*. 2019. Vol. 33, n° 3, p. 417-431. DOI 10.13128/ahs-24618.
- AGRAWAL, A. A., 2001. Phenotypic Plasticity in the Interactions and Evolution of Species. In : *Science*. 12 octobre 2001. Vol. 294, n° 5541, p. 321-326. DOI 10.1126/science.1060701.
- BERNADET, Sylvie, 2017. Fraïse. Les fortes variations de températures ont fragilisé la récolte de fraïses 2017 lors du pic de production, en avril et mai. In : [en ligne]. juin 2017. [Consulté le 15 juin 2020]. Disponible à l'adresse : <http://www.epsilon.insee.fr:80/jspui/handle/1/58794>.
- BRANCOURT-HULMEL, Maryse., 2014. Interaction genotype x milieu. In : Les mots de l'agronomie. 2014. Disponible sur : https://mots-agronomie.inra.fr/index.php/Interaction_g%C3%A9notype_x_milieu. [Consulté le 23 mai 2020]
- CAMARGO-ALVAREZ, Hector, SALAZAR-GUTIÉRREZ, Melba, KELLER, Markus et HOOGENBOOM, Gerrit, 2020. Modeling the effect of temperature on bud dormancy of grapevines. In : *Agricultural and Forest Meteorology*. 15 janvier 2020. Vol. 280, p. 107782. DOI 10.1016/j.agrformet.2019.107782.
- CHUINE, Isabelle, 2000. A united model for budburst of trees. In : *J Theor Biol*. 2000. Vol. 207, p. 337–347.
- CHUINE, Isabelle, DE CORTAZAR-ATAURI, Iñaki Garcia, KRAMER, Koen et HÄNNINEN, Heikki, 2013. Plant Development Models. In : SCHWARTZ, Mark D. (éd.), *Phenology: An Integrative Environmental Science* [en ligne]. Dordrecht : Springer Netherlands. p. 275-293. [Consulté le 1 juin 2020]. ISBN 978-94-007-6925-0. Disponible à l'adresse : https://doi.org/10.1007/978-94-007-6925-0_15.
- DARROW, G. M., 1966. The strawberry. History, breeding and physiology. In : *The strawberry. History, breeding and physiology*. [en ligne]. 1966. [Consulté le mars 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19681601719>.
- DAVET, Stéphane, 2020. La fraïse, comme un baiser d'été. In : *Le Monde.fr* [en ligne]. 18 mai 2020. [Consulté le 8 juin 2020]. Disponible à l'adresse : https://www.lemonde.fr/m-styles/article/2020/05/18/la-fraïse-comme-un-baiser-d-ete_6040004_4497319.html.
- DIOUF, Isidore, DERIVOT, Laurent, KOUSSEVITZKY, Shai, CARRETERO, Yolande, BITTON, Frédérique, MOREAU, Laurence et CAUSSE, Mathilde, 2020. Genetic basis of phenotypic plasticity and genotype x environment interaction in a multi-parental tomato population. In : *Journal of Experimental Botany*. 31 mai 2020. DOI 10.1093/jxb/eraa265.
- DUGUÉ, Marie-Josèphe, 2012. CARACTERISATION DES STRATEGIES D'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE EN AGRICULTURE PAYSANNE. In : . p. 50.
- DURNER, Edward F., 2015. Photoperiod affects floral ontogeny in strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.) plug plants. In : *Scientia Horticulturae*. octobre 2015. Vol. 194, p. 154-159. DOI 10.1016/j.scienta.2015.08.006.
- FAOSTAT. Disponible sur : <http://www.fao.org/faostat/fr/#home>. [Consulté le 19 mars 2020].
- Fraïse de France Disponible sur : <http://fraïsesdefrance.fr/laopn-fraïse/>. [Consulté le 15 mars 2020]
- FranceAgriMer. Disponible sur : <https://www.franceagrimer.fr/fam/content/download/61484/document/chiffres%20cl%C3%A9s%20FL%202017.pdf>. [Consulté le 12 mars 2020].
- HEIDE, O. M., STAVANG, J. A. et SØNSTEBY, A., 2013. Physiology and genetics of flowering in cultivated and wild strawberries – a review. In : *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. janvier 2013. Vol. 88, n° 1, p. 1-18. DOI 10.1080/14620316.2013.11512930.
- HEIDE, Ola M., 1977. Photoperiod and Temperature Interactions in Growth and Flowering of Strawberry. In : *Physiologia Plantarum*. 1977. Vol. 40, n° 1, p. 21-26. DOI 10.1111/j.1399-3054.1977.tb01486.x.
- HUMMER, K. E., 2008. Global conservation strategy for *Fragaria* (Strawberry). In : *Global conservation strategy for *Fragaria* (Strawberry)*. [en ligne]. 2008. [Consulté le 12 mars 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20103105763>.
- INSEE Disponible sur : https://www.epsilon.insee.fr/jspui/bitstream/1/103513/1/agr_IR_2019_111.pdf. [Consulté le 12 mars 2020].
- ITO, H. and SAITO, T. (1962). Studies on the flower formation in the strawberry plant. I. Effects of temperature and photoperiod on the flower formation. *Tohoku Journal of Agricultural Research*, 13, 191–203
- IWATA, Hikaru, GASTON, Amèlia, REMAY, Arnaud, THOUROUDE, Tatiana, JEAUFFRE, Julien, KAWAMURA, Koji, OYANT, Laurence Hibrand-Saint, ARAKI, Takashi, DENOYES, Béatrice et FOUCHER, Fabrice, 2012. The TFL1 homologue KSN is a

regulator of continuous flowering in rose and strawberry. In : *The Plant Journal*. 2012. Vol. 69, n° 1, p. 116-125.

DOI 10.1111/j.1365-313X.2011.04776.x.

JAHN, Otto L. et DANA, Malcolm N., 1970. Crown and Inflorescence Development in the Strawberry, *Fragaria Ananassa*. In : *American Journal of Botany*. 1970. Vol. 57, n° 6Part1, p. 605-612. DOI 10.1002/j.1537-2197.1970.tb09855.x.

JEUFFROY, Marie-Hélène, BERGEZ, Jacques-Eric, DAVID, Christophe, FLÉNET, Francis, GATE, Philippe, LOYCE, Chantal, MAUPAS, Fabienne, MEYNARD, Jean-Marc, REAU, Raymond et SURLEAU-CHAMBENOIT, Caroline, [sans date]. Utilisation des modèles pour l'aide à la conception et à l'évaluation d'innovations techniques en production végétale : bilan et perspectives. In : . p. 12.

JONKERS, H., 1965. *On the flower formation, the dormancy and the early forcing of strawberries* [en ligne]. phd. Wageningen : Veenman. [Consulté le 10 juin 2020]. Disponible à l'adresse : <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/525679>.

KONSIN, M., VOIPIO, I. et PALONEN, P., 2001. Influence of photoperiod and duration of short-day treatment on vegetative growth and flowering of strawberry (*Fragaria3ananassa* Duch.). In : *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. 1 janvier 2001. Vol. 76, n° 1, p. 77-82. DOI 10.1080/14620316.2001.11511330.

KRÜGER, E., JOSUTTIS, M., NESTBY, R., TOLDAM-ANDERSEN, T.B., CARLEN, C. et MEZZETTI, B., 2012. Influence of growing conditions at different latitudes of Europe on strawberry growth performance, yield and quality. In : *Journal of Berry Research*. 2012. Vol. 2, n° 3, p. 143-157. DOI 10.3233/JBR-2012-036.

LABADIE, Marc, 2017. *Deciphering spatio-temporal development of strawberry plant* [en ligne]. thesis. S.I. : Université de Bordeaux. [Consulté le 11 mars 2020]. Disponible à l'adresse : <https://agritrop.cirad.fr/590094/>. France

LABADIE, Marc, DENOYES, Béatrice et GUÉDON, Yann, 2019. Identifying phenological phases in strawberry using multiple change-point models. In : *Journal of Experimental Botany*. 24 2019. Vol. 70, n° 20, p. 5687-5701. DOI 10.1093/jxb/erz331.

LEPAGE, Marie-Pierre, 2012. Modèles bioclimatiques pour la prédiction de la phénologie, de la croissance, du rendement et de la qualité des cultures. In : *PAGRO104*. p. 15. Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2012

LIETEN, F., 1997. EFFECTS OF CHILLING AND NIGHT-BREAK TREATMENT ON GREENHOUSE PRODUCTION OF 'ELSANTA'. In : *Acta Horticulturae*. septembre 1997. n° 439, p. 633-640. DOI 10.17660/ActaHortic.1997.439.105.

MANAKASEM, Y. et GOODWIN, P. B., 1998. Using the Floral Status of Strawberry Plants, as Determined by Stereomicroscopy and Scanning Electron Microscopy, to Survey the Phenology of Commercial Crops. In : *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 1 juillet 1998. Vol. 123, n° 4, p. 513-517. DOI 10.21273/JASHS.123.4.513.

MEKHLouF, Abdelhamid, BOUZERZOUR, Hamana, BENMAHAMMED, Amar, SAHRAOUI, Abdelkarim Hadj et HARKATI, Nadir, 2006. Adaptation des variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) au climat semi-aride. In : . 2006. Vol. 17, p. 7.

MOCHIZUKI, T., YOSHIDA, Y., YANAGI, T., OKIMURA, M., YAMASAKI, A. et TAKAHASHI, H., 2009. FORCING CULTURE OF STRAWBERRY IN JAPAN - PRODUCTION TECHNOLOGY AND CULTIVARS. In : *Acta Horticulturae*. août 2009. n° 842, p. 107-110. DOI 10.17660/ActaHortic.2009.842.7.

MOON, Jihyun, LEE, Horim, KIM, Minsoo et LEE, Ilha, 2005. Analysis of Flowering Pathway Integrators in Arabidopsis. In : *Plant and Cell Physiology*. février 2005. Vol. 46, n° 2, p. 292-299. DOI 10.1093/pcp/pci024.

OPSTAD, N., SØNSTEBY, A., MYRHEIM, U. et HEIDE, O.M., 2011. Seasonal timing of floral initiation in strawberry: Effects of cultivar and geographic location. In : *Scientia Horticulturae*. mai 2011. Vol. 129, n° 1, p. 127-134. DOI 10.1016/j.scienta.2011.03.022.

PROST, Lorène, 2008. *Modéliser en agronomie et concevoir des outils en interaction avec de futurs utilisateurs : le cas de la modélisation des interactions génotype-environnement et de l'outil DIAGVAR*. [en ligne]. phdthesis. S.I. : AgroParisTech. [Consulté le 28 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-00381092>.

RANTANEN, Marja, KUROKURA, Takeshi, MOUHU, Katriina, PINHO, Paulo, TETRI, Eino, HALONEN, Liisa, PALONEN, Pauliina, ELOMAA, Paula et HYTÖNEN, Timo, 2014. Light quality regulates flowering in FvFT1/FvFTL1 dependent manner in the woodland strawberry *Fragaria vesca*. In : *Frontiers in Plant Science*. 2014. Vol. 5, p. 271. DOI 10.3389/fpls.2014.00271.

SCHLICHTING, Carl D. et WUND, Matthew A., 2014. Phenotypic Plasticity and Epigenetic Marking: An Assessment of Evidence for Genetic Accommodation. In : *Evolution*. 2014. Vol. 68, n° 3, p. 656-672. DOI 10.1111/evo.12348.

SIMPSON, Gordon G. et DEAN, Caroline, 2002. Arabidopsis, the Rosetta Stone of Flowering Time? In : *Science*. 12 avril 2002. Vol. 296, n° 5566, p. 285-289. DOI 10.1126/science.296.5566.285.

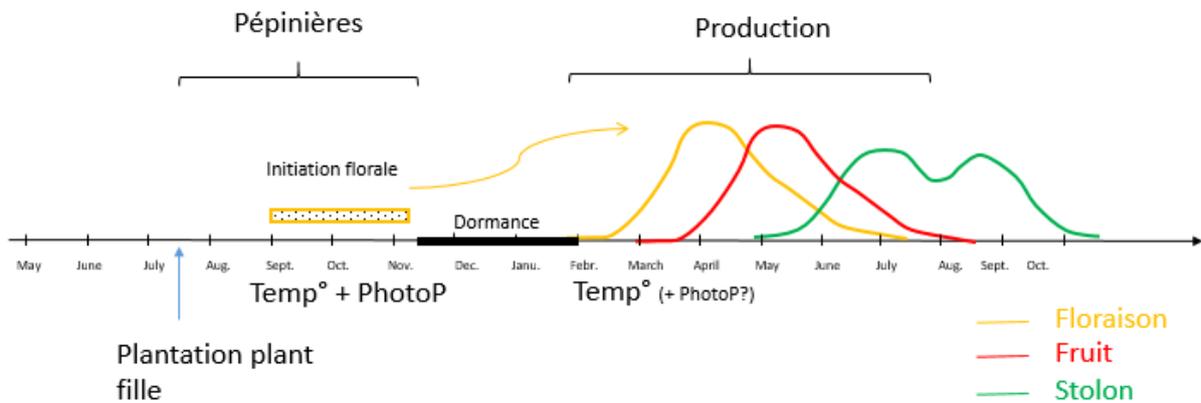
SMEETS, L., 1980. Effect of the light intensity on forcing of the strawberry cultivar 'Glasa'. In : *Scientia Horticulturae*. 1 août 1980. Vol. 13, n° 1, p. 33-35. DOI 10.1016/0304-4238(80)90019-9.

SØNSTEBY, A. et HEIDE, O. M., 2008. Flowering physiology of populations of *Fragaria virginiana*. In : *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. 1 janvier 2008. Vol. 83, n° 5, p. 641-647. DOI 10.1080/14620316.2008.11512436.

- SØNSTEBY, Anita et HEIDE, Ola M., 2006. Dormancy relations and flowering of the strawberry cultivars Korona and Elsanta as influenced by photoperiod and temperature. In : *Scientia Horticulturae*. 11 septembre 2006. Vol. 110, n° 1, p. 57-67. DOI 10.1016/j.scienta.2006.06.012.
- SØNSTEBY, Anita et HEIDE, Ola M., 2008. Temperature responses, flowering and fruit yield of the June-bearing strawberry cultivars Florence, Frida and Korona. In : *Scientia Horticulturae*. décembre 2008. Vol. 119, n° 1, p. 49-54. DOI 10.1016/j.scienta.2008.07.005.
- SRIKANTH, Anusha et SCHMID, Markus, 2011. Regulation of flowering time: all roads lead to Rome. In : *Cellular and Molecular Life Sciences*. juin 2011. Vol. 68, n° 12, p. 2013-2037. DOI 10.1007/s00018-011-0673-y.
- SRIKANTH, Anusha et SCHMID, Markus, 2011. Regulation of flowering time: all roads lead to Rome. In : *Cellular and Molecular Life Sciences*. juin 2011. Vol. 68, n° 12, p. 2013-2037. DOI 10.1007/s00018-011-0673-y.
- STAUDT, Günter, 1999. *Systematics and Geographic Distribution of the American Strawberry Species: Taxonomic Studies in the Genus Fragaria (Rosaceae: Potentilleae)*. S.l. : University of California Press. ISBN 978-0-520-91589-3.
- TAYLOR, D. R., ATKEY, P. T., WICKENDEN, M. F. et CRISP, C. M., 1997. A morphological study of flower initiation and development in strawberry (*Fragaria x ananassa*) using cryo-scanning electron microscopy. In : *Annals of Applied Biology*. 1997. Vol. 130, n° 1, p. 141-152. DOI 10.1111/j.1744-7348.1997.tb05790.x.
- TENREIRA, Tracey, LANGE, Maria João Pimenta, LANGE, Theo, BRES, Cécile, LABADIE, Marc, MONFORT, Amparo, HERNOULD, Michel, ROTHAN, Christophe et DENOYES, Béatrice, 2017. A Specific Gibberellin 20-Oxidase Dictates the Flowering-Runnering Decision in Diploid Strawberry. In : *The Plant Cell*. septembre 2017. Vol. 29, n° 9, p. 2168-2182. DOI 10.1105/tpc.16.00949.
- VERHEUL, Michèl J., SØNSTEBY, Anita et GRIMSTAD, Svein O., 2006. Interactions of photoperiod, temperature, duration of short-day treatment and plant age on flowering of *Fragaria x ananassa* Duch. cv. Korona. In : *Scientia Horticulturae*. janvier 2006. Vol. 107, n° 2, p. 164-170. DOI 10.1016/j.scienta.2005.07.004.
- VERHEUL, Michèl J., SØNSTEBY, Anita et GRIMSTAD, Svein O., 2007. Influences of day and night temperatures on flowering of *Fragaria x ananassa* Duch., cvs. Korona and Elsanta, at different photoperiods. In : *Scientia Horticulturae*. mars 2007. Vol. 112, n° 2, p. 200-206. DOI 10.1016/j.scienta.2006.12.022.
- WELLMER, Frank et RIECHMANN, José L., 2010. Gene networks controlling the initiation of flower development. In : *Trends in Genetics*. décembre 2010. Vol. 26, n° 12, p. 519-527. DOI 10.1016/j.tig.2010.09.001.

Annexes

Annexe 1 : Cycle de développement du fraisier non-remontant



Annexe 2 : Détail des fonctions Chuine, Wang, GDD et Triangulaire utilisées pour les modèles de prédiction.

La fonction de Chuine :

$$F_{\text{Chuine}} = 1 / (1 + \exp [a (T_d - c)^2 + b(T_d - c)])$$

La fonction est régit par 3 paramètres :

- Le paramètre « a » détermine la largeur de la fenêtre sur laquelle la fonction n'est pas nulle. Il appartient à un intervalle de [0 ; 10] inclus. Plus il est proche de 10 plus l'intervalle est petit et plus il est proche de 0 plus l'intervalle est grand.
- Le paramètre « b » détermine la netteté de la courbe de réponse et son asymétrie. Il appartient à un intervalle [-30 ; 15]. Plus il diffère de 0 plus la courbe sera nette et asymétrique.
- Le paramètre « c » détermine la valeur de la réponse moyenne lorsque b est proche de 0. Lorsque b est fortement différent de 0, il détermine le seuil minimale de température impactant sur le caractère étudié.

La fonction Wang :

$$F_{\text{Wang}} = \text{Max} [(2 (T_d - T_{\text{min}})^{\alpha} (T_{\text{opt}} - T_{\text{min}})^{\alpha} - (T_d - T_{\text{min}})^{2\alpha} / (T_{\text{opt}} - T_{\text{min}})^{2\alpha}), 0]$$

$$\text{Avec } \alpha = \ln(2) / \ln(T_{\text{max}} - T_{\text{min}} / T_{\text{opt}} - T_{\text{min}})$$

Cette fonction décrit une courbe en cloche et est régit par trois paramètres :

- La température optimale (T_{opt}), qui désigne la température pour laquelle le phénomène sera favorisé.
- La température minimale (T_{min}) qui désigne la borne inférieure de la gamme de température.
- La température maximale (T_{max}) qui désigne la borne supérieure de la gamme de température.

La fonction GDD :

$$F_{\text{GDD}}(T_d) = \text{Max}(0; T_d - T_b)$$

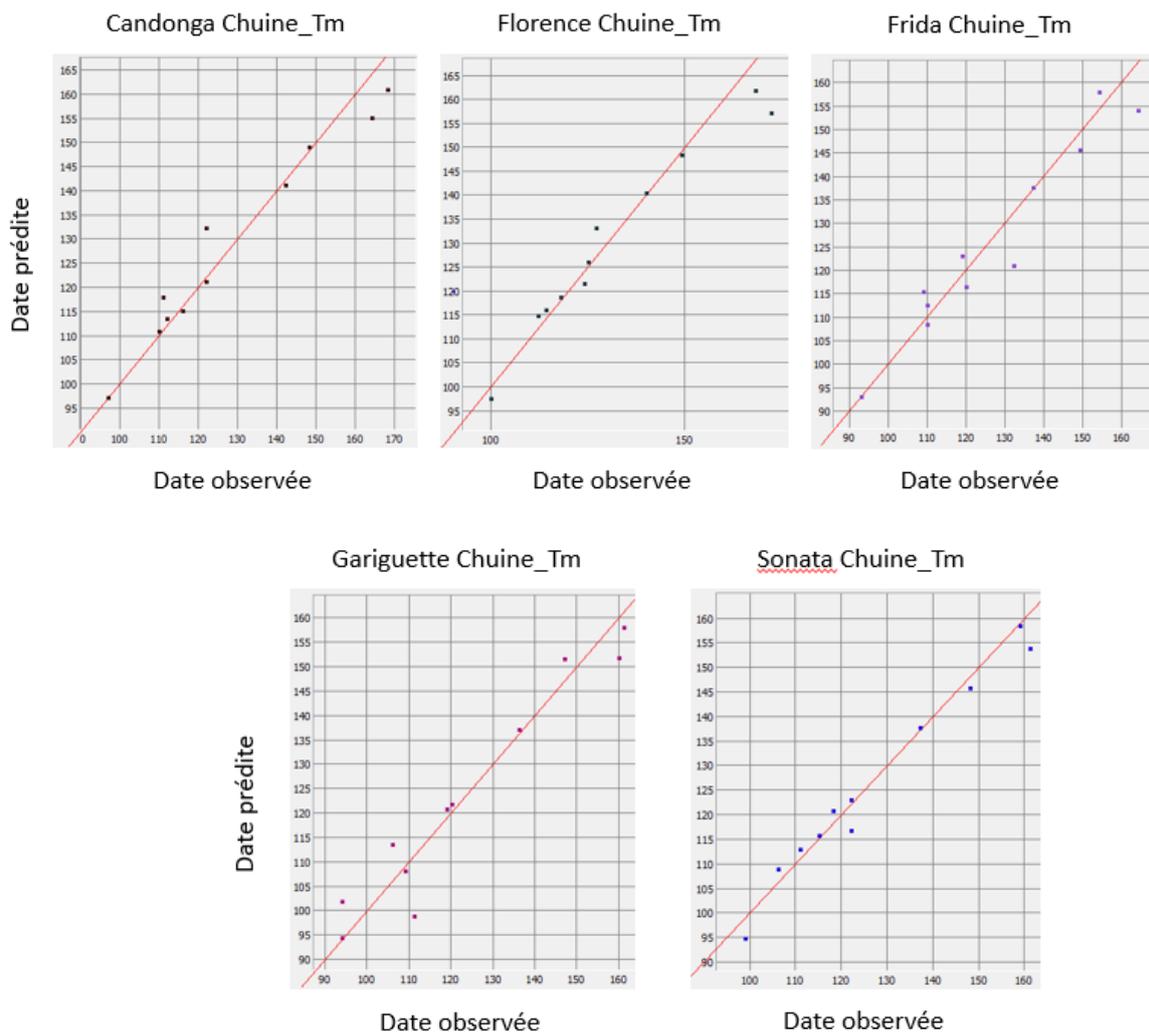
Cette fonction est régit par un unique paramètre, la température de base qui est la température la plus basse incidente sur la plante. Ce modèle va nous apporter d'autre information comme les degrés-jours nécessaires à la plante pour atteindre le phénomène étudié.

La fonction Triangulaire :

$$f_{\text{Triangular}}(T_d) = \begin{cases} 0 & \text{if } T \ll T_{\min} \\ \frac{T_d - T_{\min}}{T_{\text{opt}} - T_{\min}} & \text{if } T_{\min} < T_d \ll T_{\text{opt}} \\ \frac{T_d - T_{\max}}{T_{\text{opt}} - T_{\max}} & \text{if } T_{\text{opt}} < T_d < T_{\max} \\ 0 & \text{if } T_d \gg T_{\max} \end{cases}$$

- La température optimale (T_{opt}), qui désigne la température pour laquelle le phénomène sera favorisé.
- La température minimale (T_{\min}) qui désigne la borne inférieure de la gamme de température.
- La température maximale (T_{\max}) qui désigne la borne supérieure de la gamme de température.

Annexe 3 : Prédictions des dates de floraison avec le modèle Chuine_Tm



Annexe 4 : Date d'initiation florale des stades 50 et 75%

- Stade 50%

Cultivar	CIREF		PV			HGU			INHORT			NIBIO		
	201 6	201 7	201 6	201 7	201 8									
Candongga	282	272				251	237	254	269	262	239	262	264	277
Clery	270	261	264	234	257	249	235	251	270	256	243	246	255	253
Florence	300	273				264	226	266	269	258	239	266	269	273
Frida	267	247	231	228	249	253	227	248	247	228	242	245	264	260
Gariguette	266	261	265	242	252	250	228	252	273	256	239	245	262	268
Sonata	272	264	262	242	260	253	225	263	266	259	242	252	257	251

- Stade 75%

Cultivar	CIREF		PV			HGU			INHORT			NIBIO		
	201 6	201 7	201 6	201 7	201 8									
Candongga	287	276				266	242	257	272	267	244	276	272	280
Clery	274	264	268	238	260	253	239	256	276	265	247	255	262	260
Florence	304	277				269	230	273	285	266	249	270	273	277
Frida	277	261	235	235	253	258	233	254	250	236	246	252	268	265
Gariguette	280	265	268	246	267	253	243	256	278	258	244	254	265	273
Sonata	277	267	266	246	266	258	228	267	270	265	245	258	262	256

	Diplôme et Mention : Master Biologie, Agrosciences Parcours : Amélioration, Production et Valorisation du Végétal Option : Génétique, Génomique et Amélioration des Plantes Responsable d'option : M. JUBAULT
Auteur(s) : Arthur FOUQUIN Date de naissance* : 03/11/1997	Organisme d'accueil : INRAE, Centre Bordeaux Aquitaine, UMR 1332, Biologie et Pathologie
Nb pages : 25 Annexe(s) : 5	Adresse : 71 av. Eduard Boulaux 33140 Villenave d'Ornon.
Année de soutenance : 2020	Maître de stage : Dr. Béatrice Desnoyes
Titre français : Initiation florale et date de floraison chez le fraisier : effets des contraintes environnementales par des approches de prédiction	
Titre anglais : Flower initiation and flowering date in strawberries: effects of environmental constraints through predictive approaches	
<p>Le fraisier en France est la 3ème espèce fruitière pour son chiffre d'affaires. Cette culture est vitale pour maintenir une activité agricole dans de nombreuses régions française. Dans un contexte de changement climatique, il est important de mieux comprendre la phénologie du fraisier pour savoir quels sont les critères à sélectionner pour une production précoce et qui permette la rentabilité des infrastructures. Dans ce rapport, nous nous sommes intéressés à deux évènements de la phénologie cruciaux pour la production d'une fraise précoce : l'initiation florale qui se met en place en année N-1 en fin d'été et début d'automne et à la date de floraison qui est observée en culture en année N.</p> <p>Six variétés ont été étudiées sur cinq sites et trois années. Après une analyse exploratoire, nous avons développé à l'aide du logiciel PMP5.5 des modèles de prédiction pour les deux processus, dates d'initiation florale et de floraison. Ces modèles nous ont permis d'identifier les facteurs environnementaux impliqués dans ces processus et des paramètres des modèles spécifiques des variétés.</p> <p>Les analyses statistiques mettent en évidence une forte interaction génotype x environnement. Les modèles de prédiction montrent que l'initiation florale est régit par la combinaison de la température et du rayonnement globale ou de la photopériode tandis que la floraison est régit uniquement par la température. L'ensemble des résultats met en évidence la grande plasticité du fraisier pour ces deux processus.</p>	
<p>The strawberry tree in France is the 3rd most important fruit species for its turnover. This crop is vital to maintain agricultural activity in many regions of France. In a context of climate change, it is important to better understand the phenology of the strawberry plant in order to know what criteria should be selected for early production and for the profitability of infrastructures. In this report, we have focused on two phenological events that are crucial for the production of an early strawberry: floral initiation which takes place in year N-1 in late summer and early autumn, and the flowering date which is observed in cultivation in year N.</p> <p>Six varieties were studied on five sites and three years. After an exploratory analysis, using PMP5.5 software, we developed predictive models for both processes, floral initiation and flowering dates. These models enabled us to identify the environmental factors involved in these processes and variety-specific model parameters. Statistical analyses highlight a strong genotype x environment interaction. Prediction models show that floral initiation is governed by the combination of temperature and global radiation or photoperiod, whereas flowering is governed by temperature alone. The results as a whole highlight the high plasticity of the strawberry plant for these two processes.</p>	
Mots-clés : <i>Fragaria</i> , modèle, PMP5.5, interaction génotype x environnement, plasticité Key Words: <i>Fragaria</i> , model, PMP5.5, genotype x environment interaction, plasticity	

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