



HAL
open science

De la nouaison à la récolte : modèles de prévision et indicateurs de la chute physiologique du pommier (*Malus domestica* Borkh.)

Antoine Marceron

► **To cite this version:**

Antoine Marceron. De la nouaison à la récolte : modèles de prévision et indicateurs de la chute physiologique du pommier (*Malus domestica* Borkh.). Sciences agricoles. 2012. dumas-00738826

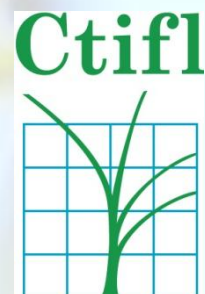
HAL Id: dumas-00738826

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00738826>

Submitted on 5 Oct 2012

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

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



AGROCAMPUS OUEST

CFR Angers

2, Rue André Le Nôtre

49000 ANGERS

Ctifl

Centre de Lanxade

28, Route des Nebouts

24130 PRIGONRIEUX

Mémoire de Fin d'Etudes

**Diplôme d'Ingénieur de l'Institut Supérieur
des Sciences Horticoles et du Paysage**

Année universitaire : 2011-2012

Option : Gestion Durable du Végétal

*De la nouaison à la récolte : modèles de prévision et indicateurs de la chute physiologique du pommier (*Malus domestica* Borkh.)*

Par : Antoine MARCERON

Volet à renseigner par l'enseignant responsable de l'option/spécialisation*

Date : .../.../... Signature :

Bon pour dépôt (version définitive)

Autorisation de diffusion : Oui Non

Devant le jury :

Soutenu à Angers le : 13 septembre 2012

Sous la présidence de : Josiane LE CORFF, enseignant-chercheur AO

Maître de stage : Laurent ROCHE, ingénieur Ctifl

Enseignant référent : Pascale GUILLERMIN, enseignant-chercheur AO

Autres membres du jury : Jean- Marc CELTON, Post-doctorant INRA et Gerhard BUCK-SORLIN, professeur AO

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

Remerciements :

Je tiens à remercier dans un premier temps toutes les personnes qui m'ont suivi pendant ma formation et qui m'ont permis d'arriver à mon niveau actuel de connaissances.

Je remercie particulièrement Laurent, mon maître de stage pour son écoute et sa présence. J'ai apprécié que l'on travaille ensemble avec rigueur et passion sur ma problématique de stage.

Je souhaiterais remercier Pascale pour sa disponibilité à mon égard, son aide dans l'analyse statistique des résultats et sa relecture attentive.

Une partie de ce rapport n'aurait jamais été possible sans la participation de collaborateurs des centres régionaux (Cefel, CEHM, Ctifl de Balandran et La Morinière) pour leur échange des données d'éclaircissage.

Un grand merci aux membres du Ctifl de Lanxade pour leur accueil et leur sympathie durant les pauses café.

Merci à tous mes amis relecteurs qui m'ont permis de finaliser ce rapport.

Table des matières :

| | |
|---|----|
| Introduction..... | 1 |
| I. Synthèse bibliographique sur la chute physiologique | 3 |
| II. Démarche générale..... | 7 |
| A. Tester l'intérêt respectif de 4 grandes approches..... | 7 |
| 1. Approche 1 : modèle physiologique de type mécanistique..... | 8 |
| 2. Approche 2 : modèle climatique de type corrélatif | 9 |
| 3. Approche 3 : modèle global d'estimation de la charge | 9 |
| 4. Approche 4 : recherche d'indicateurs en vue de modélisation..... | 10 |
| B. Le dispositif général | 10 |
| III. Approche 1 : modèle physiologique de type mécanistique | 12 |
| A. Mesures et observations..... | 12 |
| B. La compétition nutritionnelle : le rapport feuille/fruit... .. | 12 |
| C. ... provoque des différentiels de croissance... .. | 15 |
| D. ... et des différentiels en teneurs en sucres..... | 17 |
| E. Etude des interactions entre ces facteurs | 18 |
| F. Bilan..... | 19 |
| IV. Approche 2 : modèle climatique de type corrélatif | 20 |
| V. Approche 3 : modèle global d'estimation de la charge | 23 |
| A. Présentation des outils d'analyse : PRÉVAQUI et Méc@vision | 23 |
| B. Résultats et prévisions pour l'avenir | 24 |
| VI. Approche 4 : recherche d'indicateurs en vue de modélisation | 25 |
| A. Couleur des pédicelles | 25 |
| B. Dégagement d'éthylène..... | 26 |
| C. Pépins..... | 27 |
| D. Vascularisation | 29 |
| VII. Discussion générale | 30 |
| Sitographie et Bibliographie..... | 31 |
| Annexes..... | 36 |

Lexique :

Abscission : Phénomène de lyse cellulaire induit par une hormone et provoquant la chute d'organes.

ANA : ou Acide Naphtalène Acétique est un régulateur de croissance qui peut provoquer la chute des fruits.

Auxine : ou « acide indole 3-acétique » ou « AIA », est une phytohormone d'élongation cellulaire jouant un rôle dans beaucoup de processus de croissance, et elle inhibe la chute des fruits.

BA : ou 6-benzyladénine, est une cytokinine de synthèse inhibant la synthèse d'auxines (donc favorise la chute des fruits) et améliore le grossissement du fruit (en augmentant la division cellulaire).

Balance C : est un équilibre des substances carbonées (principalement sucres) entre les consommateurs (organes puits) et les producteurs (organes sources).

Carbaryl : ou méthylcarbamate de 1-naphyle, est au départ un insecticide, qui a présenté un effet de régulateur de croissance agissant sur la chute des fruits.

Carbohydrates : substances carbonées assurant des fonctions nutritionnelles, souvent assimilées aux sucres.

Chute de nouaison : chute des fruits qui n'ont pas été fécondés et qui ne peuvent donc pas se développer (par manque d'auxine produite par les pépins).

Chute physiologique : ou « chute de juin », chute naturelle des fruits d'une taille de 10-20 mm qui intervient à cause d'une réponse hormonale ou nutritionnelle de la plante pour éviter une surcharge de l'arbre.

Corymbe : ensemble regroupant l'inflorescence, les feuilles et la pousse de bourse ; tous issues d'un bourgeon à fleur.

Ctifl : Centre Technique Interprofessionnel des Fruits & Légumes, ayant pour objectif d'améliorer les performances et la compétitivité des entreprises de la filière, de la production à la vente.

Darwin® : outil d'éclaircissage mécanique (**Figure 1**) créé par Hermann Gessler, dans les années 1990, arboriculteur en Allemagne, utilisant des fils qui fouettent les corymbes dans le but de faire chuter soit des fleurs, soit des corymbes entiers (extinction).

Eclaircissage : mode de sélection naturelle ou artificielle (manuelle, mécanique ou chimique) des fleurs ou des fruits afin de limiter la charge de l'arbre.

Eclaircissage chimique : a pour objectif de diminuer la charge de l'arbre, soit en détruisant les fleurs (bouillie sulfo-calciq), soit en bloquant la fécondation (Ethephon) et soit en augmentant de manière artificielle la chute physiologique (ANA, BA, Carbaryl).

Eclaircissage manuel : consiste à réduire la charge en fruits d'un arbre par retrait manuel après la chute physiologique.

Eclaircissage mécanique : utilisation d'une machine (Darwin® ou vibreur, Rosa *et al.*, 2008) pour diminuer la charge de l'arbre.

Ethylène : ou « C₂H₄ », est une phytohormone impliquée dans les phénomènes de mûrissement et d'abscission, étant par exemple une activatrice de la chute physiologique.

Fixor® : est le nom commercial de l'Acide Naphtalène Acétique.

Gibbérelline : ou « Ga3 » ou « acide gibbérellique », est une phytohormone intervenant dans de multiples mécanismes, dans la pomme elle est produite par les pépins et inhibe l'abscission.

Maxcel® : est le nom commercial de la 6-Benzyladénine (ou BA).

Mur fruitier : système de conduite du verger, sans branche fruitière (en opposition à l'axe) mais avec des coursonnes (branches secondaires) directement implantées dans le tronc, permettant la mécanisation de la taille par rognage.

Organe Puits : organe en croissance (tige, fruit, etc.) qui utilise les ressources carbonées provoquant un flux de sucres dans sa direction.

Organe Source : organe de production de ressources carbonées grâce à la photosynthèse, principalement les feuilles matures.

PAR : ou Photosynthetically Active Radiation est le rayonnement photosynthétiquement actif, dont les longueurs d'onde s'étendent de 400 à 700 nm, qui est utilisé par le feuillage des plantes pour la photosynthèse.

Pédicelle : petite ramification du pédoncule portant une fleur de l'inflorescence, en langage courant 'queue du fruit'.

Régalis® : est le nom commercial du Prohexadione de Calcium, qui a pour effet d'augmenter la charge, en diminuant le développement végétatif et en inhibant les émissions d'éthylène.

Sevin® : est le nom commercial du Carbaryl.

Taux de fructification = $\frac{\text{nombre de fruits comptés 3 mois après floraison}}{\text{nombre de corymbes comptés}}$ (= nombre moyen de fruits par corymbe qui devrait tenir jusqu'à la récolte).

Taux de nouaison = $\frac{\text{nombre de fruits comptés 1 mois après floraison}}{\text{nombre de corymbes comptés}}$ (= nombre moyen de fruits par corymbe après la coulure)

Liste des Figures :

Figure 1 : Photographie (A.Marceron) de Darwin® montée sur un tracteur en pleine action d'éclaircissage mécanique en parcelle Sa

Figure 2 : Illustration provenant de Bangerth, 2004, expliquant les facteurs pouvant influencer les mécanismes de chute physiologique

Figure 3 : Illustration provenant de Lakso *et al.*, 2006(a) expliquant le lien entre la croissance relative et le pourcentage d'abscission (hypothèse : chute probable à 75 % si la croissance relative est inférieure à 60-70 %)

Figure 4 : Illustration provenant de Bangerth, 2004 présentant les différentes parties de notre objet d'étude : le corymbe composé d'un fruit principal, de fruits axillaires, des feuilles de rosette, la pousse de bourse et ses feuilles.

Figure 5 : Effet du gel (pourcentage de fruits brûlés au cœur) suivant les modalités de passage de la Darwin, mesuré une semaine après le gel

Figure 6 : Photographie (A.Marceron) du matériel nécessaire à l'analyse du taux de sucres des fruits

Figure 7 : Histogramme montrant l'évolution de la surface foliaire du corymbe (mesurée par planimétrie) en fonction du temps (passage de Darwin® le 6 avril)

Figure 8 : Histogramme de la surface foliaire de la pousse de bourse mesurée par aplanimétrie en fonction du temps pour les modalités de Sa

Figure 9 : Graphique de la surface foliaire mesurée avec un logiciel d'analyse d'images Assess2.0® pour la parcelle Ra

Figure 10 : Graphique des corrélations entre les deux mesures différentes de la surface foliaire dans la parcelle Sa sur différentes modalités à différentes dates

Figure 11 : Graphique montrant l'évolution du rapport feuille/fruit dans la parcelle Sa suivant les modalités étudiées (ayant subi du gel)

Figure 12 : Evolution du diamètre des fruits en parcelle Ra pour la modalité Témoin en fonction du temps (avec barres d'écart-type)

Figure 13 : Graphique montrant la proportion de fruits chutés en fonction du temps pour la parcelle Ra pour les trois modalités étudiées

Figure 14 : Histogramme des résultats d'un simple modèle de prédiction basé sur la croissance maximale relative au sein du corymbe pour la parcelle Ra

Figure 15 : Histogramme présentant le diamètre et l'indice Brix mesurés sur les fruits prélevés chutés ou sur l'arbre en parcelle Ra puis congelés

Figure 16 : Représentation graphique de la corrélation entre les valeurs prédites (predicted) et réelles (measured) pour la prédiction par pls du diamètre en fonction des variables de l'indice Brix

Figure 17 : Résultat graphique de l'impact des composantes sur la qualité (Mean Squared Error of Prediction) de la prédiction du diamètre

Figure 18 : Graphique corrélant deux estimations de quantités de lumière : le PAR et la durée d'ensoleillement (1 point représente une date)

Figure 19 : Graphique corrélant le taux de fructification en fonction de la somme d'heures d'ensoleillement au mois d'avril pour les sites étudiés

Figure 20 : Graphique corrélant sur 17 ans le taux de fructification avec la somme des précipitations du mois d'avril pour les sites étudiés

Figure 21 : Graphique des corrélations existantes entre le taux de fructification et les sommes de températures au mois d'avril (données du Cefel) sur le centre de Montauban

Figure 22 : Représentation graphique des valeurs prédites et mesurées dans le modèle de prédiction du taux de fructification par les données météorologiques

Figure 23 : Schématisation du principe de calcul de prévision de récolte de PRÉVAQUI

Figure 24 : Photographie (A.Marceron) de la réflexion lumineuse sur des pommes

Figure 25 : Représentation graphique de la corrélation existante entre le comptage manuel à l'écran et celui effectué par Méc@vision lors de la phase pré-floraison (stade E2 en parcelle Sa)

Figure 26 : Photographie (A.Marceron) après utilisation de Méc@vision qui a repéré les pommes (cercles jaunes), éliminé les feuilles ayant reflété la lumière (cercles rouges) et comptabilisé le nombre total de pommes

Figure 27 : Représentation graphique de la précision de comptage de Méc@vision

Figure 28 : Montage photographique (A.Marceron) servant d'échelle lors de la notation de la coloration rouge des pédicelles de la parcelle Ra

Figure 29 : Représentations graphiques du nombre de pixels rouges (à gauche) et de la note moyenne sur l'échelle pour des fruits ayant résistés ou non à la chute physiologique (photographies prises le 18 mai)

Figure 30 : Photographie (A.Marceron) d'un pochon à éthylène utilisé au départ pour capturer les émissions d'éthylène

Figure 31 : Histogramme des émissions d'éthylène après le passage de Darwin® en parcelle Sa

Figure 32 : Représentations graphiques des émissions d'éthylène de 15 corymbes après prélèvement à trois dates différentes après traitements chimiques (le 10 mai)

Figure 33 : Représentation graphique des corrélations entre le poids ou le poids moyen des pépins et le poids du fruit

Figure 34 : Représentation graphique du diamètre et du nombre des pépins pour les fruits chutés et encore sur l'arbre (Parcelle Ra)

Figure 35 : Histogramme du poids du fruit, du nombre de pépins viables, avortés ou total pour les fruits chutés ou ceux sur l'arbre

Figure 36 : Relation entre le poids et le diamètre différente suivant les fruits pour la parcelle Ra toute modalité confondue

Figure 37 : Photographies (A.Marceron) de coupes colorées au bleu de méthylène de fruits allant (à gauche) ou non (à droite) chutés

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Présentation des caractéristiques de vitesse de passage du tracteur et de rotation des fils pour les modalités de la Darwin®

Tableau 2 : Description des modalités effectuées dans la parcelle Sa

Tableau 3 : Résultat de la régression linéaire de l'effet sur la chute des variables mesurées avec la croissance relative pour les fruits de la parcelle Ra

Tableau 4 : Coefficients de la modélisation par Lda de la chute par les variables mesurées avec la croissance relative et la matrice de confusion de la modélisation

Tableau 5 : Résultats de la régression linéaire de la chute en fonction des variables suivantes : le diamètre, l'indice Brix, la différence d'indice Brix avec le minimum en indice Brix du corymbe et la position du fruit dans le corymbe

Tableau 6 : Coefficients de la modélisation par Lda de la chute par les variables mesurées avec le taux de sucre et la matrice de confusion moyenne du modèle

Tableau 7 : Résultat de la régression linéaire entre le diamètre et l'indice Brix

Tableau 8 : Localisation et précisions sur les sites étudiés pour l'éclaircissage

Tableau 9 : Résultat de la régression linéaire sur le taux de fructification en fonction des conditions météorologiques du mois d'avril pour tous les sites

Tableau 10 : Résultats montrant l'importance des variables dans la prédiction des taux de fructification et de nouaison à partir des données météorologiques

Tableau 11 : Régression linéaire du poids du fruit en fonction du nombre de pépins viables et avortés pour la modalité Témoin de la parcelle Ra

Tableau 12 : Régression linéaire de la chute en fonction du poids et du nombre de pépins viables et avortés pour la modalité Témoin de la parcelle Ra

Tableau 13 : Résultat des coefficients affectés aux variables de mesure des pépins par modélisation par Lda sur la chute et sa matrice de confusion moyenne

Liste des Annexes :

Annexe I : Stades phénologiques du pommier d'après Fleckinger (source : Réseau FREDONFDGDON Rhône-Alpes)

Annexe II : Représentation graphique de la surface foliaire de toutes les feuilles du corymbe mesurée pour différentes variétés au même stade (E2) à l'aide d'un aplanimètre

Annexe III : Impact de Darwin® sur les fleurs suivant l'intensité de la machine

Annexe IV : Plan de la parcelle Sa avec la représentation des blocs expérimentaux (en orange sont représentés les trois arbres de chaque bloc)

Annexe V : Taux de floraison initial des différentes modalités avant passage de la Darwin®

Annexe VI : Calendrier des mesures respectives sur les 2 parcelles

Annexe VII : Plan de la parcelle Ra avec les modalités associées

Annexe VIII : Représentation graphique de la croissance des pousses de bourse après passage de Darwin® mesurée avec un pied à coulisse sur 40 corymbes par modalité en parcelle Sa

Annexe IX : Chute différentielle des fruits suivant la présence ou l'absence d'une pousse de bourse active en parcelle Ra (Régalis = Prohexadione de Calcium)

Annexe X : Script et explication de la régression linéaire

Annexe XI : Script et explication de l'analyse Lda

Annexe XII : Script de l'utilisation d'une boucle dans la prédiction

Annexe XIII : Script et explication de l'analyse Pls

Annexe XIV : Représentation graphique corrélant le taux de fructification à la somme des précipitations reçues au mois d'avril par les parcelles pour les 4 sites étudiés

Annexe XV : Représentation graphique de l'évolution des températures moyennes de 3 années différentes pour leur taux de fructification (données du Cefel)

De la nouaison à la récolte : modèles de prévision et indicateurs de la chute physiologique du pommier (*Malus domestica* Borkh.)

Introduction :

La France est le troisième producteur de pommes en Europe et le septième producteur mondial (Belrose, Inc, 2010), malgré le déclin de la production à cause de la baisse des surfaces (Agreste, 2007 et Agreste, 2012). La pomme est l'un des seuls fruits dont la balance commerciale est excédentaire (Agreste, 2010).

La concurrence dans la filière pomme est très importante et les prix de vente des pommes n'évoluent pas proportionnellement à l'augmentation des coûts. En Europe, le coût de la main d'œuvre (représentant au moins 50% du coût global) est un frein à la rentabilité de la production de pommes. Pour répondre à ce problème, la filière se tourne de plus en plus vers la mécanisation de toutes les techniques anciennement manuelles (taille, éclaircissage, etc.). Cette mécanisation est devenue possible par l'adoption de nouvelles formes de conduite dont le mur fruitier est un exemple.

Comme les autres filières agricoles, l'arboriculture fruitière est touchée par l'évolution de la réglementation sur les produits phytosanitaires. En 2008, le Sevin®, ayant comme molécule éclaircissante le Carbaryl, a été retiré du marché français (Ephy, 2008). De plus, le cadre du Plan Ecophyto 2018 a pour objectif de réduire « si possible » notre utilisation de produits phytosanitaires de 50 %. L'objectif global de l'étude est de quantifier précocement le potentiel floral, les chutes physiologiques et le nombre de fruits à l'aide de modèles afin d'ajuster les stratégies d'éclaircissage pour atteindre les objectifs de production souhaités par les producteurs.

L'éclaircissage du pommier dépend de nombreux facteurs (encore incertains) et présente une grande variabilité d'année en année. De nombreuses interactions existent entre les techniques employées et les conditions météorologiques conduisant à la chute des fruits mais elles sont pour l'instant à l'étude. Les relations entre la plante et son environnement peuvent permettre d'expliquer la chute physiologique (modèle de la balance carbone de Lakso *et al.*, 2007) mais pas seulement puisqu'il faut aussi prendre en compte la conduite et les antécédents de l'arbre (Jones *et al.*, 2000). De multiples sollicitations ont été faites de la part du Ctifl dans le but de collaborer pour adapter le modèle carbone américain en Europe, mais sans succès. Il a fallu trouver d'autres moyens pour comprendre la physiologie de la chute des fruits.

Sur le plan physiologique, la fleur se développe en fruit s'il y a fécondation, sinon elle chute (coulure). Après la floraison et la fécondation, les fruits grossissent jusqu'à un diamètre de 10-20 mm (les stades phénologiques sont décrits en **Annexe I**). A cette période, il existe un risque important de chute : c'est la chute physiologique. Cette chute physiologique fait appel à des processus internes multiples dits hormonaux (action d'hormones tel que l'auxine et l'éthylène) et/ou nutritionnels (balance C, fournissant aux fruits (organes puits) les sucres nécessaires à leurs croissances).

Le premier objectif de cette étude est **d'identifier des marqueurs** qui permettraient de quantifier la chute naturelle des fruits, afin d'adapter les stratégies d'éclaircissage tout en évitant les surcharges et les sur-éclaircissages. Le second objectif, en lien avec le premier, est de **prévoir l'importance de la chute physiologique** en fonction des conditions météorologiques auxquelles l'arbre est confronté. Enfin, le dernier objectif est de **prédire les rendements et les calibres** des fruits à la récolte à partir de photographies des systèmes de production, tout ceci grâce à des logiciels développés par le Ctifl. Au final, les résultats présentés serviront à faire émerger de nouveaux axes de recherche pour les acteurs du Groupe de Travail National sur l'Eclaircissage (Ctifl et les stations régionales : CEFEL, CEHM, La Morinière, etc.).

Afin de répondre de manière optimale à ces objectifs, nous commencerons par réaliser une vue d'ensemble de l'état des connaissances actuelles sur la chute physiologique.

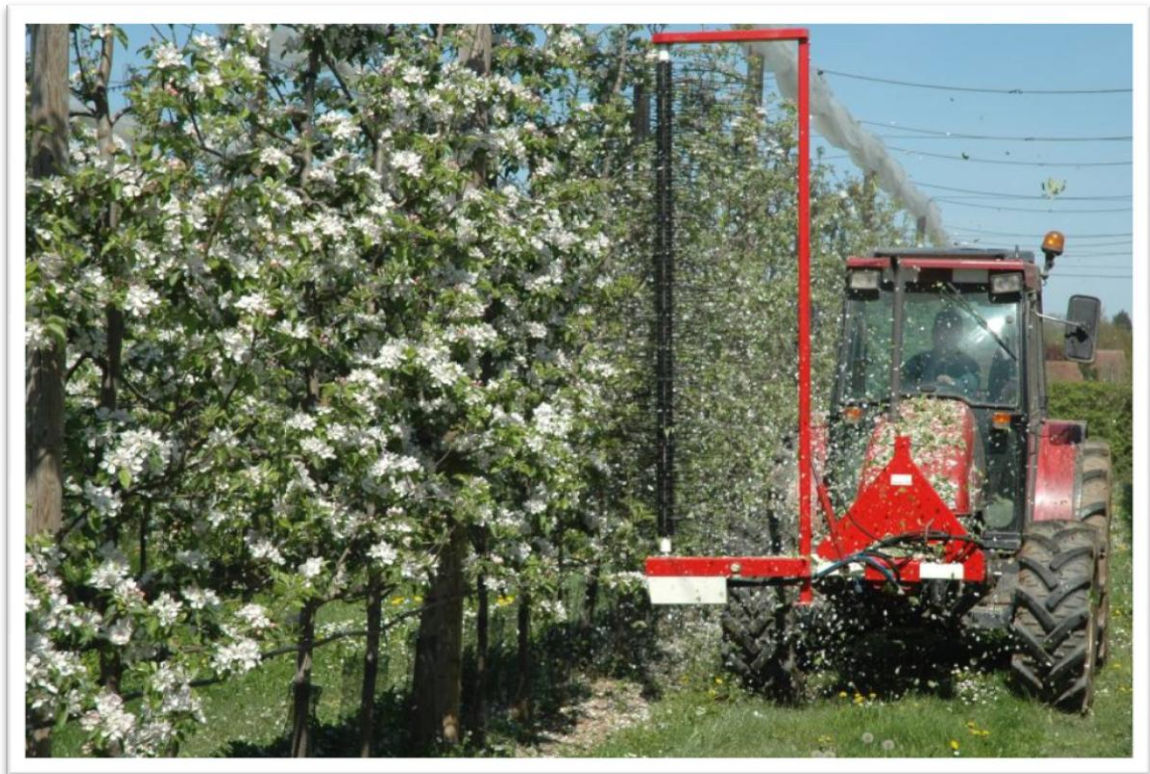


Figure 1 : Photographie (A.Marceron) de Darwin® montée sur un tracteur en pleine action d'éclaircissage mécanique en parcelle Sa

I. Synthèse bibliographique sur la chute physiologique

A. Contexte de la chute naturelle et éclaircissages

Après la nouaison, la chute physiologique est un phénomène complexe, initié par des mécanismes encore méconnus, qui se termine par l'abscission du fruit au niveau du pédicelle au mois de juin.

Notre étude se déroule pendant la période de floraison, de nouaison et du grandissement initial du fruit. Les 80 jours post floraison sont cruciaux pour la croissance et la maturité finale du fruit (Warrington *et al.*, 1999). Cette période est une période déterminante pour la croissance future du fruit, elle est contrôlée par la division cellulaire au sein du fruit ; si on arrive à augmenter cette phase en supprimant de jeunes fruits ou en améliorant les conditions de croissance, on peut augmenter le diamètre du fruit (Goffinet *et al.*, 1995). Ensuite le grossissement cellulaire semble identique pour tous les fruits (toutes les cellules ont la même taille à la récolte) ; ainsi la taille finale du fruit est souvent proportionnelle au nombre de cellules qui le composent (Austin *et al.*, 1999 ; Marguery and Sangwan, 1993 ; Corelli-Grappadelli and Lakso, 2004).

La production de pommes est très dépendante de la charge de l'arbre, une charge optimale permet d'avoir un bon rendement et une bonne qualité (Hehnen *et al.*, 2012). Si on laisse trop de fruits (charge importante), le rendement va être très important mais la qualité des fruits (diamètre) sera médiocre et réciproquement, si on laisse peu de fruits, le rendement sera faible mais d'une très bonne qualité (Siham *et al.*, 2005 ; Zarei *et al.*, 2009). Pour laisser la bonne quantité de fruits par branche, on peut se baser sur son diamètre pour savoir combien de fruits elle peut supporter (Équilifruit Mafcot ; Costa *et al.*, 2001). De plus, un excès de fruits entraîne des phénomènes d'alternance de production sur les années suivantes (Jonkers, 1979 ; Tromp, 2000 ; Wünsche, 2005).

Cette charge doit être maîtrisée efficacement si l'on souhaite conserver son verger dans une production optimale plusieurs années de suite (Robinson *et al.*, 2007). Cette maîtrise est difficile puisque pour beaucoup d'arbres fruitiers, le nombre de fleurs est très supérieur au nombre de fruits que pourrait supporter l'arbre en production. Le pommier doit nécessairement perdre des fruits (perte de 74,1% à 98,8% des fleurs d'après Stover, 2000). D'après les écrits de Theophrastus (Zhu, 2010), philosophe grec, cela fait plus de 2000 ans que l'Homme est obligé de réguler la charge en faisant chuter manuellement les fruits. Dans les années 1940, des essais sur un fongicide menés par MacDaniels et Hildebrand en verger ont montré par accident les effets éclaircissants du dinitro-o-cresylate du fait de son effet anti-germinatif sur le pollen (Dennis, 2000). Cette première molécule d'éclaircissage s'est diffusée (DNOC ou Elgetol®), ensuite il y a eu l'apparition d'ANA vers 1945, puis BA dans les années 1975 (Dennis, 2000).

Ensuite en 1990, une méthode différente est apparue en Allemagne avec une machine qui éclaircit de manière mécanique les fleurs (pour réduire le potentiel floral). La Darwin® (Figure 1) a commencé par être utilisée en Agriculture Biologique mais elle est très utile en vergers conventionnels en association avec des éclaircissantes chimiques (Dorigoni *et al.*, 2008 ; Schielin, 2012). Ces principaux avantages sont : sa modularité (intensité de rotation des fils et avancement du tracteur ajustables), son efficacité visuelle rapide, sa rapidité d'exécution (jusqu'à 12 km/h), son utilisation en toutes conditions climatiques et surtout son action très précoce (Kelderer *et al.*, 2009 ; Dorigoni *et al.*, 2010 ; Schielin, 2012). Les principaux inconvénients sont : la précocité de l'action (risques en cas de gel), l'inaccessibilité du cœur de l'arbre pour les fils et les risques de propagation de maladies par les blessures provoquées par le passage de la Darwin® (Bertschinger *et al.*, 1998 ; Dorigoni *et al.*, 2010).

Avec le durcissement de la réglementation de l'Union Européenne, les molécules permettant l'éclaircissage se raréfient (Ethephon, ANA, BA) et elles sont souvent utilisées combinées pour assurer une meilleure efficacité (ANA-BA) (Ferré, 2004). La qualité d'un traitement dépend : de la molécule choisie, mais aussi de la date d'application (Bregoli *et al.*, 2006), des conditions météorologiques (température et humidité influant sur la pénétration du produit dans la plante ; Schönherr *et al.*, 2000 ; Wertheim, 2000), de la variété (Kosina, 2008), de l'âge du verger (Treder, 2010) ou de la vigueur des arbres (Racskó, 2006). Les mécanismes des interactions entre molécules sont encore incompris (Guak *et al.*, 2009), ainsi que les interactions qui existent entre ces traitements et le climat (effet très important en cas de chaleur ; Calderón-Zavala *et al.*, 2004).

De même, les effets combinés avec d'autres techniques, comme l'ombrage, pourraient modifier l'impact du traitement (Lakso *et al.*, 2001(a)) ou n'avoir aucune interaction (Stopar., 2006), comme c'est le cas pour l'incision du tronc (Pretorius *et al.*, 2004). La prévision n'est pas chose facile lorsque l'on étudie des phénomènes très complexes.

Même si ces molécules peuvent avoir une certaine variabilité (Janick, 1979), elles ont des effets éclaircissants très bénéfiques. Les principaux avantages sont la diminution de la charge et l'augmentation du calibre (Yuan and Greene, 2000(a)) et l'amélioration du retour à fleurs (Byers, 2002(a)). Les principaux inconvénients avec la variabilité sont la présence de fruits pygmées (calibres très petits à la récolte) (Bukovac *et al.*, 2008) et des fruits de qualité inférieure (taux de sucres plus faibles ; Zarei *et al.*, 2009). Il existe aussi des molécules qui permettent d'effectuer le contraire de l'éclaircissage (Prohexadione-Ca : Régalis®) ; en bloquant le développement végétatif et en réduisant les émissions d'éthylène, elles permettent donc une meilleure alimentation en sucres des fruits, permettant ainsi leur rétention (Rademacher *et al.*, 2004).

Suivant la méthode d'éclaircissage utilisée (chimique, mécanique ou manuel), le stade phénologique est différent au moment de l'intervention : avant la floraison (E2), pendant la floraison (F1-F2), au stade 12 mm et au stade 30 mm (Bertschinger *et al.*, 1998). Plus l'éclaircissage est précoce, plus les avantages précédemment cités sont nombreux (Meland, 2009 ; Hehnen *et al.*, 2012), par exemple avec l'utilisation de la Darwin®.

Mais cette machine ne peut pas s'utiliser seule (Dorigoni *et al.*, 2008 ; Schielin, 2012), il faut souvent compléter l'éclaircissage mécanique avec des traitements chimiques. Il est nécessaire de comprendre les réactions de l'arbre au passage de Darwin® et de trouver ensuite un indicateur qui soit assez précoce (avant le stade 15 mm) pour que les producteurs puissent adapter leur traitement chimique en fonction de la chute naturelle prédite.

Quelle soit naturelle ou provoquée, la chute physiologique semble être induite par les mêmes mécanismes (postulat souvent implicite). Est-il possible de trouver les facteurs influençant sa chute afin de définir des indicateurs permettant de la prévoir ?

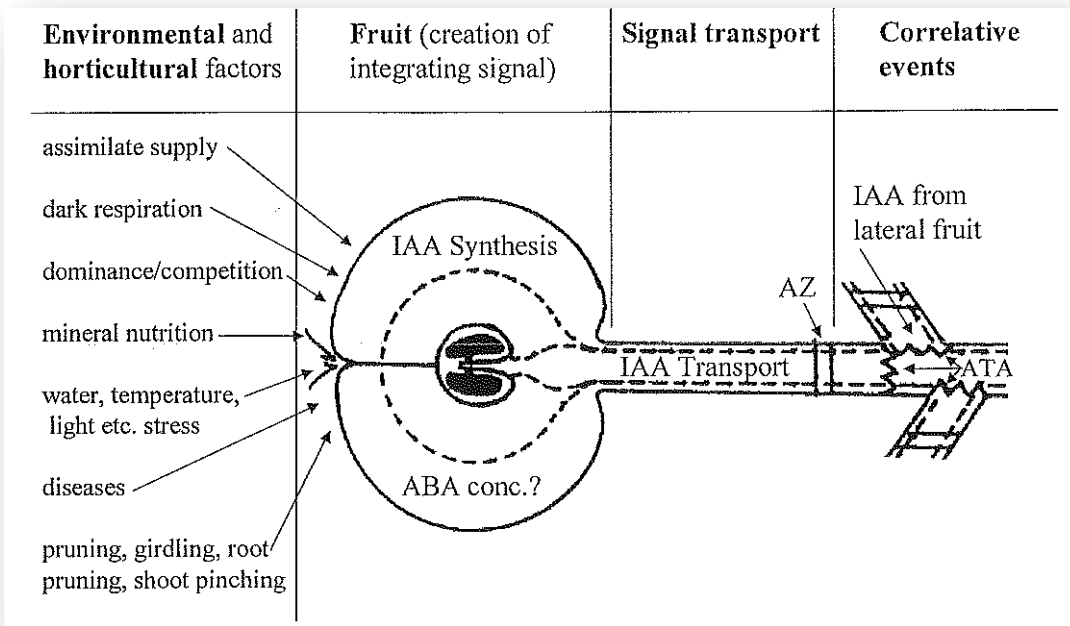


Figure 2 : Illustration provenant de Bangerth, 2004, expliquant les facteurs pouvant influencer les mécanismes de chute physiologique

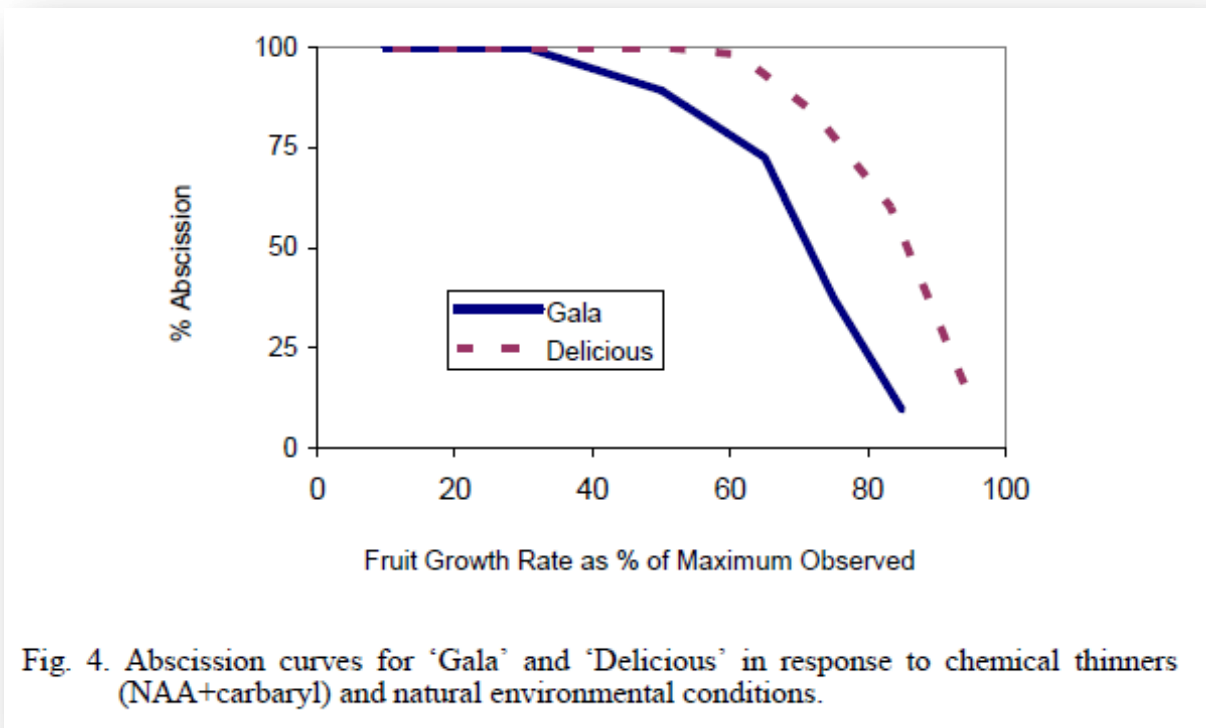


Fig. 4. Abscission curves for 'Gala' and 'Delicious' in response to chemical thinners (NAA+carbaryl) and natural environmental conditions.

Figure 3 : Illustration provenant de Lakso *et al.*, 2006(a) expliquant le lien entre la croissance relative et le pourcentage d'abscission (hypothèse : chute probable à 75 % si la croissance relative est inférieure à 60-70 %)

B. Facteurs influençant la chute physiologique

Pour expliquer la chute physiologique, des explications multiples et variées (Figure 2) sont données (Dennis, 2002 ; Kolaric, 2010). Deux théories l'expliquent, à la fois de manière complémentaire et/ou exclusive : une théorie hormonale (l'équilibre auxine/éthylène ; Roberts *et al.*, 2000) et une théorie nutritionnelle (compétition pour les assimilats ; hypothèse menée par Lakso).

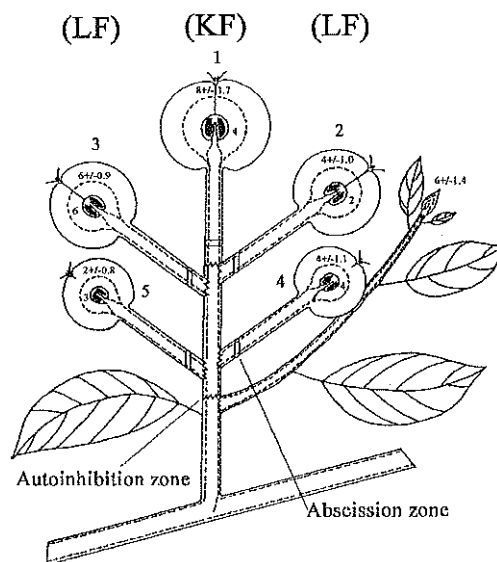
- L'auxine a un effet positif sur le développement cellulaire, bloquant toute abscission si l'hormone est en concentration suffisante. Par contre, l'éthylène est un activateur de l'abscission pour tous les organes pouvant chuter (feuilles et fruits). Une balance hormonale (auxine/éthylène) existe et conduit à la chute si cette balance est en faveur de l'éthylène. Le nombre de pépins (zone de production d'auxine et de GA) influence positivement la balance hormonale (Eccher *et al.*, 2008).
- La compétition nutritionnelle entre les fruits, que ce soit par blocage du transport de nutriments ou par réduction des forces puits des fruits, est une hypothèse très défendue (arrêt de la croissance en absence de sucres puis abscission du pétiole). C'est pour cela que l'on peut penser que l'inhibition de la photosynthèse (conditions climatiques maussades ou traitements chimiques couvrant en Agriculture Biologique ; Talamini do Amarante *et al.*, 2008 ; Roussos and Gasparatos, 2009) est un acteur de la chute nutritionnelle.

Les différences, pouvant expliquer la chute d'après Bangerth, 2000, sont l'âge des fruits (compté en heures dès la fécondation des ovules), le nombre de pépins (efficacité de la fécondation), la proximité et la vigueur de la pousse de bourse et enfin le nombre et la position des fruits dans le corymbe. Les explications présentes dans la bibliographie sont multiples et peuvent se classer dans les thématiques suivantes :

- L'influence de la surface foliaire ; la croissance des jeunes fruits ; la couleur des pédicelles ; l'impact des pépins ; l'effet des émissions d'éthylène ; le taux de sucres et les conditions météorologiques.

Tout d'abord, la surface foliaire est très importante pour produire des fruits (Ferré, 2004) puisque selon les variétés, le nombre de feuilles pour produire un fruit de taille optimale est variable (Casierra Posada *et al.*, 2007). Ceci explique, avec les réserves dans le tronc et les racines, que de jeunes arbres aient des rendements inférieurs à des arbres plus âgés ayant une structure végétative plus importante, leur permettant une meilleure interception lumineuse (Robinson and Lakso, 1989 ; Kappel and Brownlee, 2001 ; Jung and Choi, 2010). On a aussi pu montrer que la surface foliaire à un temps donné (stade E2) est différente suivant les variétés (Annexe II) : ceci fait une différence pour l'impact du passage de Darwin® sur la surface foliaire et ce qui est important pour la répartition des nutriments entre les fruits (Goldschmidt and Lakso, 2005). Bangerth en 2005 a montré qu'il y avait une corrélation entre le fruit (chute ou taux de sucres) et la surface foliaire de la pousse de bourse (Monney *et al.*, 2012). Dans ce sens, le retrait de feuilles de rosette ou de la pousse de bourse (Proctor and Palmer, 1991 ; Iglesias *et al.*, 2003) provoque la chute des fruits par abscission.

En 1992, Lakso and Corelli Grappadelli ont montré que l'abscission était corrélée à la croissance des petits fruits. Sur cette base, Lakso *et al.*, en 2006(a) a pu démontrer qu'un fruit à faible croissance allait obligatoirement chuter. Sur le graphique (Figure 3), on s'aperçoit que si la croissance relative du fruit est inférieure à 60-70 % de la croissance relative maximale enregistrée sur la période, alors il a plus de 75 % de chances de chuter (Lakso *et al.*, 2006(b)). C'est pourquoi, comme expliqué dans Lehnert, 2010, on a suivi l'évolution du diamètre des petits fruits.



Scheme of a “standard apple” fruit cluster. Numbers outside the fruit represent the ranking in PD hierarchy. Numbers inside the fruit give ng IAA export and seed number respectively. Note the influence of primigenic dominance and number of seeds on IAA export. Also, the bourse shoot tip contributes 6 ng of IAA to the total export of the cluster and thus ATA. Wavy lines indicate areas of ATA (taken from Bangerth, 2000).

Figure 4 : Illustration provenant de Bangerth, 2004 présentant les différentes parties de notre objet d'étude : le corymbe composé d'un fruit principal, de fruits axillaires, des feuilles de rosette, la pousse de bourse et ses feuilles.

Il est connu qu'une couleur rouge ou jaune du pédicelle est un marqueur de la chute des fruits (Utah Colorado, 2012) mais cela n'a été que peu étudié. Par contre, Drazeta *et al.*, 2004(a&b) a étudié finement les vaisseaux du pédicelle et leurs conductances afin de chercher un lien avec l'abscission des fruits. Le pédicelle est la zone où se passe le phénomène de lyse cellulaire (zone centrale pour l'abscission, Figure 4) qui va provoquer la chute du fruit ; c'est donc une zone importante à étudier.

Bangerth, 2005 a beaucoup étudié les pépins des jeunes fruits pour comprendre l'abscission : l'auxine libérée par les pépins bloque la chute des fruits. Ceci explique qu'il y ait plus de pépins dans les fruits qui tiennent que dans ceux qui chutent (Yuan and Greene, 2000(a)). Le nombre de pépins est influencé par les hormones éclaircissantes (augmentation du nombre de pépins avortés) et le nombre de feuilles peut en modifier leurs actions : plus on augmente le nombre de feuilles, plus on augmente le nombre de pépins viables (Yuan and Greene, 2000(b)). Il est donc important d'étudier le nombre de pépins et aussi leur viabilité.

L'éthylène a de multiples utilisations dans la conservation et le mûrissement des pommes. Chez les fruits climactériques lors de l'abscission et du mûrissement, il y a émission d'éthylène (Blanpied, 1972). Cette émission se fait au niveau de la peau du fruit et même du pédicelle (Agatsuma *et al.*, 1973 ; Rudell *et al.*, 2000 ; Sun *et al.*, 2009). Bangerth, 2000, a démontré que pour la chute des petits fruits aussi il y avait une émission d'éthylène. Lors de l'abscission suivant les traitements chimiques, il existe une réponse différentielle suivant les molécules appliquées puisqu'elles agissent de manière plus ou moins directe sur l'émission d'éthylène (McArtney, 2002 & 2011). L'étude cherche à montrer s'il est possible de repérer des différences entre les modalités et les multiples situations des corymbes. De manière optimale, en suivant la quantité d'éthylène dégagée, il faudrait être capable de savoir combien cela ferait chuter de fruits dans un corymbe.

Si l'on considère l'hypothèse nutritionnelle de la chute physiologique, il est intéressant d'étudier les molécules carbonées produites par la photosynthèse : les sucres qui vont produire la matière sèche carbonée (Lakso and Johnson, 1990). L'étude des sucres et des acides dans les petits fruits peut se révéler intéressante : les fruits allant chuter après ombrage (mise en place par l'utilisation de bâches sombres, provoquant la chute : Bepete and Lakso, 1998) ont très peu de glucose et d'acide ascorbique (Stopar *et al.*, 2001). Par contre sans ombrage, les fruits qui vont chuter ont un taux de sucres plus important (Abruzzesse *et al.*, 1995) et leurs pédicelles ont un fort taux de sorbitol et de fructose (Berüter and Droz, 1991). Le sorbitol, marqueur de l'activité enzymatique associée et donc de l'activité globale, peut se révéler important à mesurer pour suivre le comportement du fruit (Nosarszewski *et al.*, 2004 ; Archbold *et al.*, 2011). Il existe aussi un gradient de sucres entre le fruit central (souvent plus âgé) et les fruits extérieurs (Marguery and Sangwan, 1993). Suivant les molécules testées ou les modalités suivies, les résultats semblent différents, pourtant ce critère est essentiel dans la chute des fruits.

Les facteurs météorologiques peuvent influencer les phénomènes biologiques de la floraison (Janick, 1993) à la récolte (Wünsche, 2005) et donc permettre de comprendre les interactions plante-environnement. La température est le facteur le plus étudié en ce qui concerne les études sur la croissance des fruits (Calderón-Zavala *et al.*, 2004) et sur la chute physiologique (Byers, 2002 ; Robinson and Lakso, 2011). D'autres données climatiques comme la lumière (Byers *et al.*, 1990 ; Bepete and Lakso, 1998) ou l'humidité (Kaack and Pederson, 2010) peuvent expliquer l'abscission, la qualité des fruits ou les rendements à la récolte. Une étude globale va être menée afin de déterminer quelles données climatiques impactent sur la chute physiologique.

II. Démarche générale

Les objectifs de cette étude sont de **prévoir la chute physiologique** des jeunes fruits, pour d'une part **améliorer les stratégies d'éclaircissage** et pour d'autre part **prédire la charge de l'arbre** à la récolte.

D'après les connaissances bibliographiques actuelles, les pistes permettant d'expliquer la chute physiologique sont :

- d'une part, des mécanismes de régulation endogènes que l'on souhaite étudier avec notre plan d'expérience,
- d'autre part, des facteurs externes dont les conditions climatiques qui sont analysées à partir des données globales des années passées,
- et de plus, la chute peut tout à fait être corrélée à de simples indicateurs physiologiques très différents.

La démarche de l'étude a été d'explorer ces trois pistes en essayant pour chacune de développer un modèle de prédiction. En fonction de la piste explorée, le modèle ne s'est pas construit de la même manière.

Il existe deux grandes catégories de modèles pour étudier les mécanismes biologiques complexes. En premier les modèles dits empiriques ou corrélatifs, basés sur un raisonnement intuitif simple (la lumière induit la croissance), ont souvent des objectifs limités et leur structure mathématique est minimaliste. Ensuite les modèles explicatifs, mécanistiques ou physiologiques, très complexes du fait de l'intégration des processus du système étudié dans le modèle mathématique, peuvent permettre d'expliquer des mécanismes complexes du fonctionnement des plantes.

Dans la bibliographie, les zones et les échelles d'étude sont très variables, pouvant aller du pépin du fruit à l'arbre tout entier. Il est donc nécessaire de fixer une unité d'étude nous permettant de recouper tous les éléments que l'on va précisément étudier ensuite. La zone à étudier a été prise assez large et est l'ensemble ([Figure 4](#)) «rameau avec les feuilles de rosette, les fruits, la pousse de bourse et ses feuilles» ([Bangerth, 2004](#)).

Pour finir, une petite citation de Georges E.P., professeur en science des systèmes « tous les modèles sont faux. Quelques uns sont utiles » ([Goldschmidt and Lakso, 2005](#)) ; en espérant que les recherches effectuées ici seront utiles !

A. Tester l'intérêt respectif de 4 approches

1. Approche 1 : modèle physiologique de type mécanistique

a) *La compétition nutritionnelle : le rapport feuille/fruit...*

De nombreux écrits (Proctor and Palmer, 1991 ; Iglesias *et al.*, 2003) expliquent que la chute physiologique est différente suivant le rapport feuille/fruit = nombre de feuilles (ou surface foliaire) présentes pour chaque fruit. Ceci est principalement une explication nutritionnelle, puisque la présence d'une forte production de photoassimilats (liée à une forte surface foliaire) à proximité du fruit va être bénéfique pour la croissance de ce dernier et donc son maintien. Par conséquent, la quantité de sucres, d'amidon ou d'acides est plus important lorsque le rapport feuille/fruit est élevé (McQueen *et al.*, 2004 ; Casierra-Posada *et al.*, 2007 ; Cittadini *et al.*, 2008). Il a été montré que pour 'Fuji', pour produire un fruit de 300 g, il faut environ 55 feuilles (ce nombre est différent pour chaque variété ; Koike *et al.*, 2003 ; Ferré, 2004).

Ce rapport a même des conséquences sur la floraison de l'année suivante (Beers *et al.*, 1987), le chargement en amidon est plus rapide dans les tiges des pousses de bourse au cours du printemps (McQueen *et al.*, 2004) et il y a faible présence d'hormone gibbérellique GA en cas de faible charge (Stutte and Gage, 1990 ; Callejas and Bangerth, 1997 ; Dennis and Neilsen, 1999 ; Bangerth, 2005), tout ceci permettant une bonne induction florale des bourgeons.

Il faut donc essayer de faire varier ce rapport dès la floraison par le passage de Darwin®. On sait déjà que Darwin® va modifier le nombre de fleurs présentes sur le corymbe (Annexe III) et le nombre total de corymbes (par extinction ce qui est appréciable pour un bon équilibre, Lauri *et al.*, 2004 ; Schielin, 2012), mais la surface foliaire détruite est encore inconnue. Il est important d'étudier la surface foliaire de manière précise afin de bien considérer le rapport feuille/fruit. C'est pourquoi on utilise deux méthodes : une méthode destructive qui consiste à scanner la surface foliaire des corymbes prélevés et une méthode d'analyse photographique pour juger de la surface de vert (couleur des feuilles) occupée dans la photographie grâce à un logiciel. Mais surtout on va étudier comment le rapport feuille/fruit pourrait nous aider à prédire le nombre de fruits qui vont chuter.

b) *... provoque des différentiels de croissance...*

Lakso a basé sa modélisation de la chute des fruits sur une hypothèse de chute : quand un fruit ne grossit pas assez vite, il a une forte probabilité d'être considéré par son modèle comme ayant chuté. Plus précisément, lorsque le différentiel de croissance (croissance relative sur 3-5 jours) est inférieur à 60-70 % du fruit qui grossit le plus vite, le fruit chutera (Lakso *et al.*, 2006(b)). Le pourcentage est un facteur qui peut varier suivant la variété ou l'année étudiée (Lakso *et al.*, 2007).

Il est nécessaire de suivre le plus précisément possible la croissance des fruits afin de valider cette hypothèse (comme présentée dans Lehnert, 2010) et d'étudier quel est le pourcentage dans l'expérimentation de cette année sur Lanxade.

c) ... et des différentiels en teneurs en sucres

Des différences ont été montrées sur la quantité de sucres dans les petits fruits en fonction de leur localisation (Marguery and Sangwan, 1993) ou de leur éventuelle chute (Abruzzesse *et al.*, 1995). Pourquoi ne pas réaliser une hypothèse permettant de connaître à l'avance la viabilité d'un fruit en fonction de sa quantité de sucres, comme cela a été fait avec la croissance du fruit ?

Comme cela est obligatoirement une mesure destructive, il faut baser l'analyse probable de chute sur une autre variable déjà validée dans la bibliographie (la croissance relative, Lakso *et al.*, 2006(b)) qui a été validée lors de l'essai.

2. Approche 2 : modèle climatique de type corrélatif

Les conditions environnementales peuvent avoir un grand impact sur la chute physiologique ou sur la fécondation. Par exemple, la température contrôle la division cellulaire (Austin *et al.*, 1999 ; Wünsche, 2005) ; le rayonnement (Byers *et al.*, 1990 ; Lakso *et al.*, 1995 ; Robinson and Lakso, 2011(a&b)) va modifier la balance carbone ; et les précipitations vont influencer la pollinisation, tout ceci modifie le potentiel de chute des fruits.

L'objectif est de trouver des corrélations globales entre les conditions météorologiques et les phénomènes biologiques de l'éclaircissage naturel. Ces données sont analysées suivant différents lieux géographiques afin d'étudier l'effet seul des conditions météorologiques.

3. Approche 3 : modèle global d'estimation de la charge

L'objectif final est de combiner différents modèles déjà existants et celui en création afin d'avoir un outil global de prévision capable de donner une estimation de la quantité et de la qualité à la récolte.

PRÉVAQUI est un logiciel de prévision utilisé dans les années 1990 afin d'estimer les rendements, ce qui permettait aux grandes structures telles que les coopératives de calculer le nombre de cueilleurs, de palox, la capacité en froid et d'estimer le temps nécessaires à la récolte.

Méc@vision est un logiciel d'aide au pilotage de l'éclaircissage du pommier, il permet à partir d'analyses d'images d'estimer le nombre de boutons « roses au stade E2 », d'estimer le potentiel de floraison et de compter les pommes à partir du stade 25 mm. Cette technique permet d'augmenter le nombre de répétitions de comptage (et donc la justesse) sans alourdir la quantité de travail.

Dans l'objectif d'un modèle complet de gestion de la production dès la floraison, on a étudié quelles pourraient être les applications de ces logiciels afin d'améliorer le logiciel en développement. Cela permettrait de prédire la chute à venir et la charge à la récolte.

Tableau 1 : Présentation des caractéristiques de vitesse de passage du tracteur et de rotation des fils pour les modalités de la Darwin®

| Modalité | Vitesse de rotation des fils | Vitesse d'avancement du tracteur |
|-----------------|------------------------------|----------------------------------|
| Darwin® 30 % | 220 ^{tr/min} | 7 _{km/h} |
| Darwin® 50 % | 270 ^{tr/min} | 7 _{km/h} |
| Darwin® 70 % | 400 ^{tr/min} | 7 _{km/h} |

Tableau 2 : Description des modalités effectuées dans la parcelle Sa

| Nom donné | Modalités | Description | Darwin® | Rang | Nb de blocs |
|-------------------------|-----------------|--|---------|-------|-------------|
| Témoin | T0-T7 | Témoin non traité | | 33 | 8 |
| Darwin® 50 % | T1-T3-T6 | Témoin Darwin® Passage Darwin® 50 % (7 km 280 tr/min) | 50 % | 32&42 | 8 |
| Effeillage | T2 | Suppression des 1ères feuilles du corymbe sans toucher à la pousse de bourse (après Darwin®) | 50 % | 34 | 4 |
| Darwin® 30 % | T4 | Darwin® faible intensité Passage Darwin® 30 % | 30 % | 36 | 4 |
| Darwin® 70 % | T5 | Darwin® forte intensité Passage Darwin® 70 % | 70 % | 38 | 4 |
| Effleurage | T8-T9 | Retrait manuel de 50 % des fleurs | | 40 | 8 |

4. Approche 4 : recherche d'indicateurs en vue de modélisation

Dans la bibliographie, beaucoup de pistes peuvent être suivies afin de prédire de manière simple la chute des fruits. Le choix s'est porté sur les mesures les plus simples et les moins contraignantes en vue d'une utilisation possible par la suite par le producteur.

Tout d'abord, l'étude du pédicelle que ce soit par sa couleur, sa vascularisation ou sa taille peut avoir son importance (Utah Colorado, 2012).

Ensuite l'émission d'éthylène a été observée lors de tout phénomène d'abscission (Blanpied, 1972) ; mais cette émission permettrait-elle de prédire l'intensité de la chute physiologique ?

Finalement les pépins ayant un rôle important dans la production d'hormones AIA ou AG (Dennis and Neilsen, 1999 ; Bangerth, 2005), permettront-ils de prévoir la chute des fruits *a priori* ?

B. Le dispositif général

La tenue du verger a été optimale, sans stress hydrique diminuant la photosynthèse (Jie *et al.*, 2010), sans stress nutritionnel et principalement azoté (Szücs and Kállay, 2008), et sans trop de pressions de pathogènes (Taylor and Whitelaw, 2001) qui auraient pu provoquer une chute non voulue des fruits et modifier les résultats.

La parcelle Sa est une parcelle de pommiers conduite en mur fruitier de variété Gala Brookfield® sur porte-greffe Pajam1® exposée Nord-Sud, plantée en 2005. La densité de plantation est de 2800 arbres/ha avec un espacement entre les rangs de 3,5 m, une hauteur de mur de 3,0 m et une épaisseur de mur de 80 cm en bas et 60 cm en haut.

La mise en place du dispositif expérimental a été motivée dans la création du protocole dans le but d'étudier en priorité le rapport feuille/fruit dans la parcelle Sa (Annexe VI). Les modalités ont été choisies en conséquence pour étudier l'impact de Darwin® (Figure 1) sur la surface foliaire et l'association de Darwin® avec des éclaircissants chimiques. L'utilisation de Darwin® s'est faite sous conditions contrôlées afin de réaliser des modalités très différentes (Tableau 1). Les modalités sont au nombre de 6 (Tableau 2). Les modalités ont été dispersées par blocs de 3 arbres ayant le même taux de floraison (Annexe V) et la même taille de tronc. L'étude s'est portée sur 200 corymbes floraux par bloc (soit 60-70 corymbes par arbre) en ce qui concerne la chute des fruits et sur 53 corymbes par modalité en ce qui concerne la croissance des fruits et de la pousse de bourse.

Face aux conditions climatiques exceptionnelles de 2012 (gel printanier lors de la floraison, le 17 avril), aucun traitement chimique n'a été appliqué dans la parcelle Sa. En effet, le pommier pendant sa période de floraison (phases F1 et F2) et juste après pendant la période de chute des pétales (phase G) est très sensible au gel printanier dès la température de - 2,2 °C (Mathieu *et al.*, 2008). Il ne restait même pas 5 % des fruits sur les arbres après la chute de nouaison. Il a donc fallu se tourner sur une autre parcelle n'ayant reçu aucun traitement d'éclaircissage mécanique.

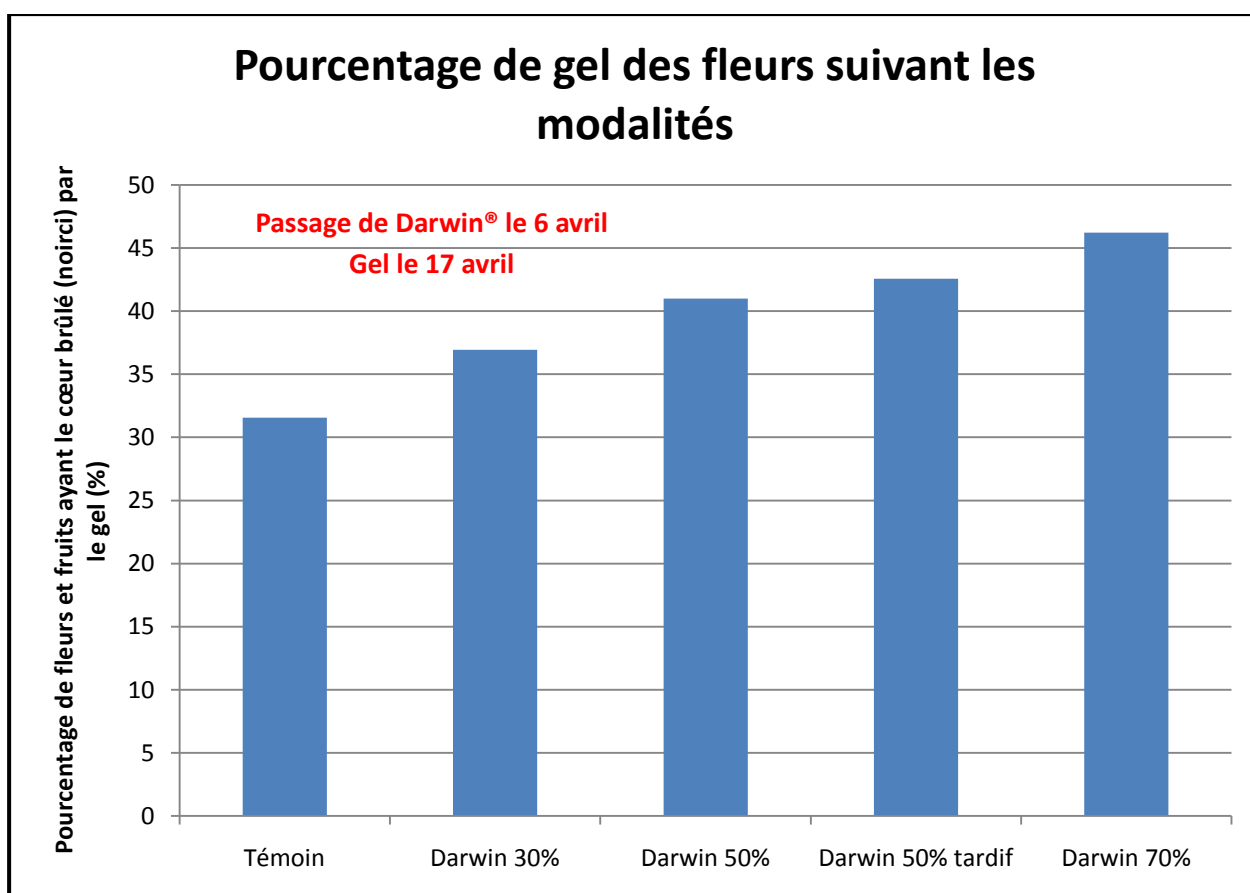


Figure 5 : Effet du gel (pourcentage de fruits brûlés au cœur) suivant les modalités de passage de la Darwin, mesuré une semaine après le gel

Un résultat intéressant est sorti de l'épisode de gel : les fleurs et les jeunes fruits ont été plus sensibles au gel après passage de Darwin® (Figure 5). Ceci doit s'expliquer par le stress provoqué par la destruction des fleurs et par l'augmentation de l'exposition des fleurs au gel à cause de l'élimination des feuilles.

Un calendrier des actions mises en œuvre sur les parcelles est détaillé en Annexe VI.

Ces modalités auraient dues être suivies (sur la parcelle Sa mais elles ont été faites sur Ra à cause du gel) de manière très précise avec la batterie de tests suivant :

- comptage du nombre de fruits,
- mesure de la surface foliaire,
- étude de la croissance des fruits et des pousses de bourse,
- mesure de l'émission d'éthylène des corymbes,
- étude du nombre et du poids des pépins des fruits,
- mesure de la vascularisation des fruits et pédicelles,
- étude de la couleur des pédicelles.

La parcelle Ra (Annexe VII) est une ancienne parcelle d'étude de porte-greffes, de variété Galaxy® (X6716) sur porte-greffes Pajam1® et Pajam2®. La conduite est en axe et la parcelle a été plantée en 2001. Elle a donc été utilisée dans un second temps pour étudier plus particulièrement la chute de juin puisqu'elle était très chargée en fruits (grâce à par un système antigel par aspersion). Seulement 3 modalités ont pu être effectuées en Ra : témoin, l'utilisation d'éclaircissants chimiques (ANA-BA) et l'utilisation de Régalis®. L'action d'ANA-BA est principalement d'augmenter la chute des fruits en augmentant les phénomènes d'abscission (réponses hormonale et nutritionnelle ; Zhu, 2011). Régalis® est un produit commercial utilisé pour réduire la croissance végétative, ce qui doit permettre une meilleure rétention des fruits (hypothèse émise d'après la thèse nutritionnelle ; Rademacher *et al.*, 2006).

En ce qui concerne l'approche 3, des données d'éclaircissage et météorologiques gracieusement fournies par les chercheurs donnent une vue d'ensemble climatique de quatre sites éloignés (le Cefel, près de Montauban ; le CEHM, près de Montpellier ; le Ctifl de Balandran, près de Nîmes ; le Ctifl de Lanxade, près de Bergerac et La Morinière, au Sud de Tours).



Figure 6 : Photographie (A.Marceron) du matériel nécessaire à l'analyse du taux de sucres des fruits

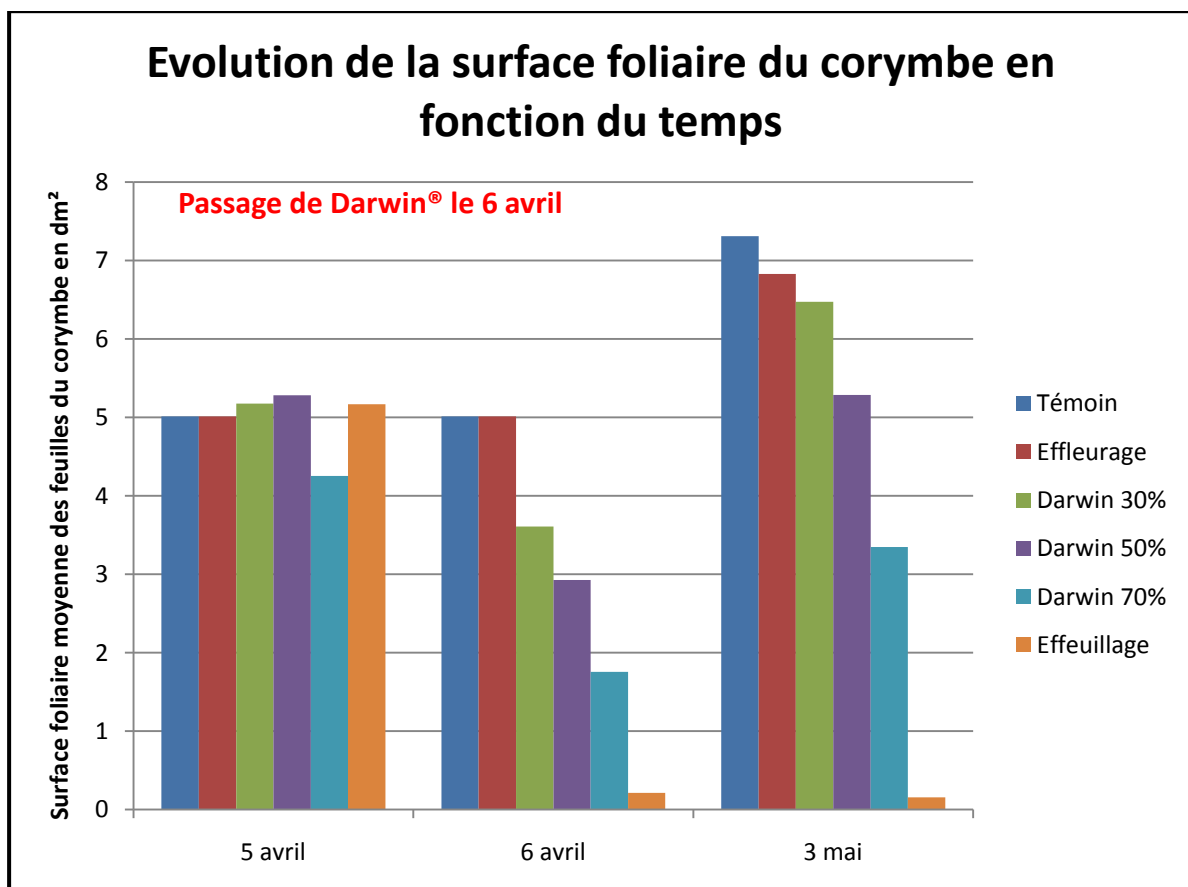


Figure 7 : Histogramme montrant l'évolution de la surface foliaire du corymbe (mesurée par planimétrie) en fonction du temps (passage de Darwin® le 6 avril)

III. Approche 1 : modèle physiologique de type mécanistique

A. Mesures et observations

La mesure de la surface foliaire s'est exclusivement faite en Sa dès la floraison jusqu'à la chute des fruits, avec un pas de temps de 2 semaines (**Annexe VI**). 20 corymbes ont été prélevés (choisis entre 1 m et 2 m de hauteur sur la surface du mur fruitier) par modalité initialement prévue, ce qui peut faire varier les échantillons de 20 à 60 corymbes analysés. Les surfaces des feuilles du corymbe et de la pousse de bourse ont été mesurées à l'aide d'un aplanimètre (AM300 Portable Leaf Area Meter : http://www.adc.co.uk/Products/AM300_Portable_Leaf_Area_Meter).

La mesure du diamètre des fruits a été faite sur 40 corymbes par modalité dans la parcelle Ra (ce qui représentent au total 650 fruits). L'appareil utilisé est un pied à coulisse digital, de précision $d = 0,01$ mm. Les mesures sont effectuées 2 fois par semaine après la chute de nouaison (chute naturelle puisqu'aucun traitement n'a été effectué avant le stade 12 mm). Les corymbes possédaient en moyenne 4,5 fruits ($\pm 0,7$ fruits) au départ de la manipulation. La croissance moyenne des fruits en 2012 sur Galaxy® (X6716) en Ra est de 0,7 mm par jour, celle-ci pouvant varier suivant les conditions climatiques.

Le taux de sucres est étudié sur des fruits congelés (température de -18 °C dans le congélateur) de manière hebdomadaire. L'étude est réalisée sur 50 fruits prélevés sur l'arbre et 20 fruits prélevés au sol par modalité par semaine.

L'appareil utilisé est un réfractomètre numérique de poche "Pocket PAL-1" (http://www.atago.net/english/products_pal.php), ayant une précision de 0,1 % Brix sur une échelle de 0 à 53 % Brix. Les mesures ont été faites sur le liquide issu du pressage des fruits congelés (**Figure 6**). L'indice Brix mesure la fraction de saccharose contenue dans un liquide en utilisant le phénomène de réfraction de la lumière (plus le liquide est concentré en saccharose, plus la réfraction est importante).

B. La compétition nutritionnelle : le rapport feuille/fruit...

On peut tout d'abord étudier la surface foliaire en fonction du temps tout en dissociant la pousse de bourse et le corymbe (**Figure 7**). La surface foliaire du corymbe n'évolue que peu dans le temps car aucune nouvelle feuille n'est formée. De plus, les feuilles du corymbe détruites par Darwin® ne peuvent pas se régénérer et l'impact de Darwin® se conserve dans le temps sur la surface foliaire du corymbe.

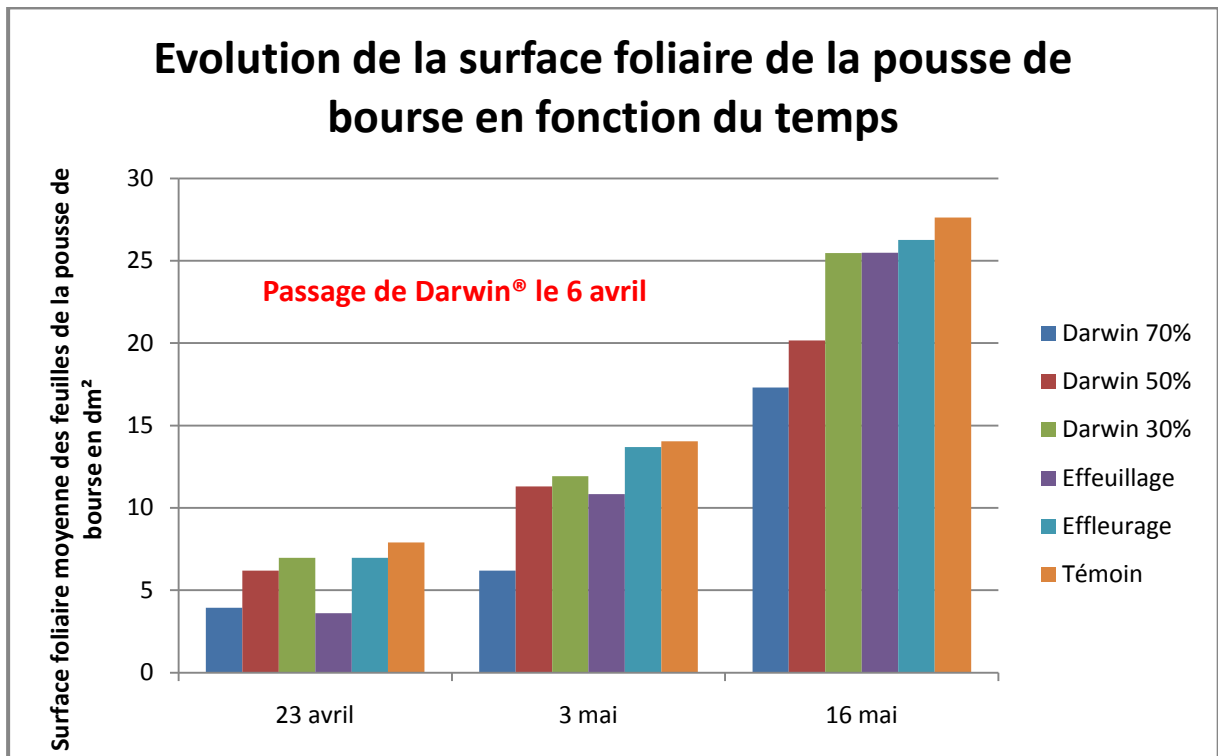


Figure 8 : Histogramme de la surface foliaire de la pousse de bourse mesurée par aplanimétrie en fonction du temps pour les modalités de Sa

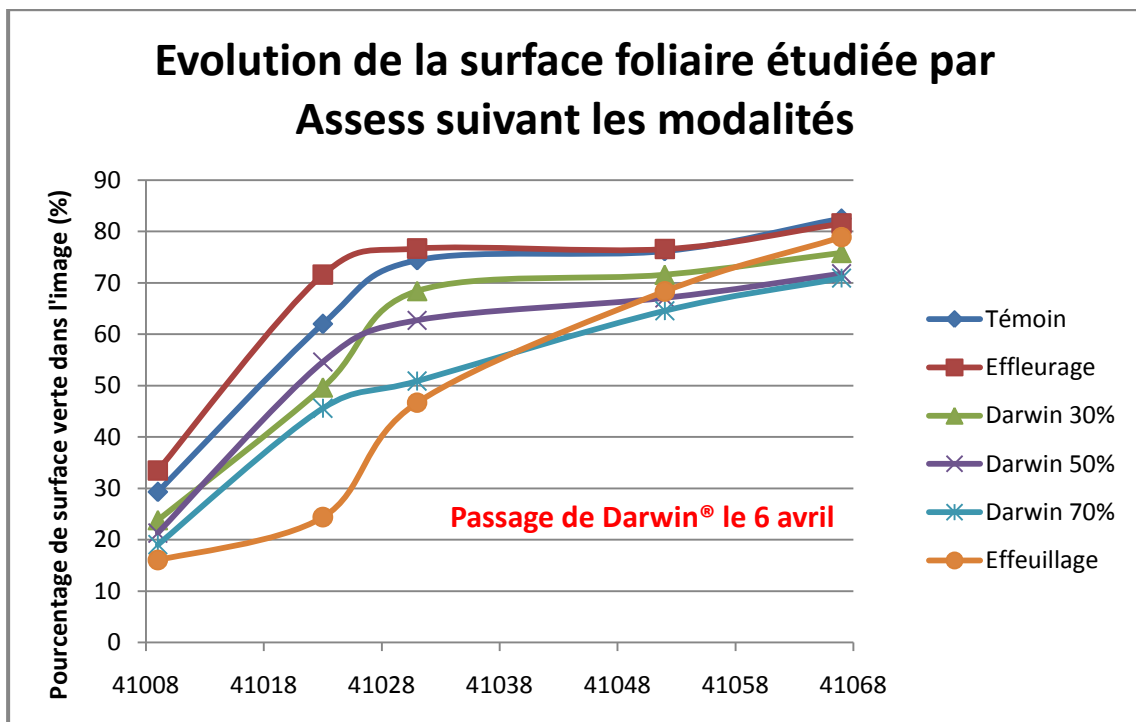


Figure 9 : Graphique de la surface foliaire mesurée avec un logiciel d'analyse d'images Assess_{2,0}® pour la parcelle Ra

Par contre, en ce qui concerne la pousse de bourse, la réaction à l'éclaircissage mécanique est différente comme on peut l'analyser dans la **Figure 8**. Si la pousse de bourse n'est pas détruite, la surface foliaire de la pousse de bourse augmente de la même manière que le témoin. Ce n'est pas la diminution de la surface foliaire du corymbe qui provoque une diminution de la croissance de la pousse de bourse par chute de l'activité photosynthétique (la modalité effeuillage possède une surface foliaire de la pousse de bourse équivalente au témoin). Par contre, la destruction de l'apex ou de la pousse de bourse entière produit une réduction de la croissance en moyenne des pousses de bourse étudiées. Cependant pour les pousses de bourse non détruites, la croissance semble être accrue à cause du stress et de l'absence d'organe source de carbone (**Annexe VIII**).

L'analyse de la surface foliaire pourrait se faire beaucoup plus rapidement par l'utilisation d'analyse de photographies, en mesurant la quantité de pixels verts (entre les couleurs 115 et 150) grâce au logiciel Assess_{2.0}® (Image Analysis Software for Disease Quantification). Avec le mode d'analyse de surface, on peut obtenir le pourcentage de surface de feuilles occupée par m² de mur fruitier (**Figure 9**).

Par contre, ces mesures ont été effectuées sur la parcelle Sa et elles ont pu être modifiées par l'action du gel. Avec la chute de la quasi-totalité des fruits, il n'y a eu que peu de compétition pour la croissance des pousses de bourse. Il serait intéressant de réitérer cette mesure lors d'une année avec une charge plus importante.

Le résultat de l'analyse d'image donne une image d'ensemble de l'évolution de la surface foliaire totale, ce qui correspond à la somme de la surface foliaire du corymbe et de la pousse de bourse. On observe encore que l'impact du passage de Darwin® provoque une réduction de la surface foliaire.

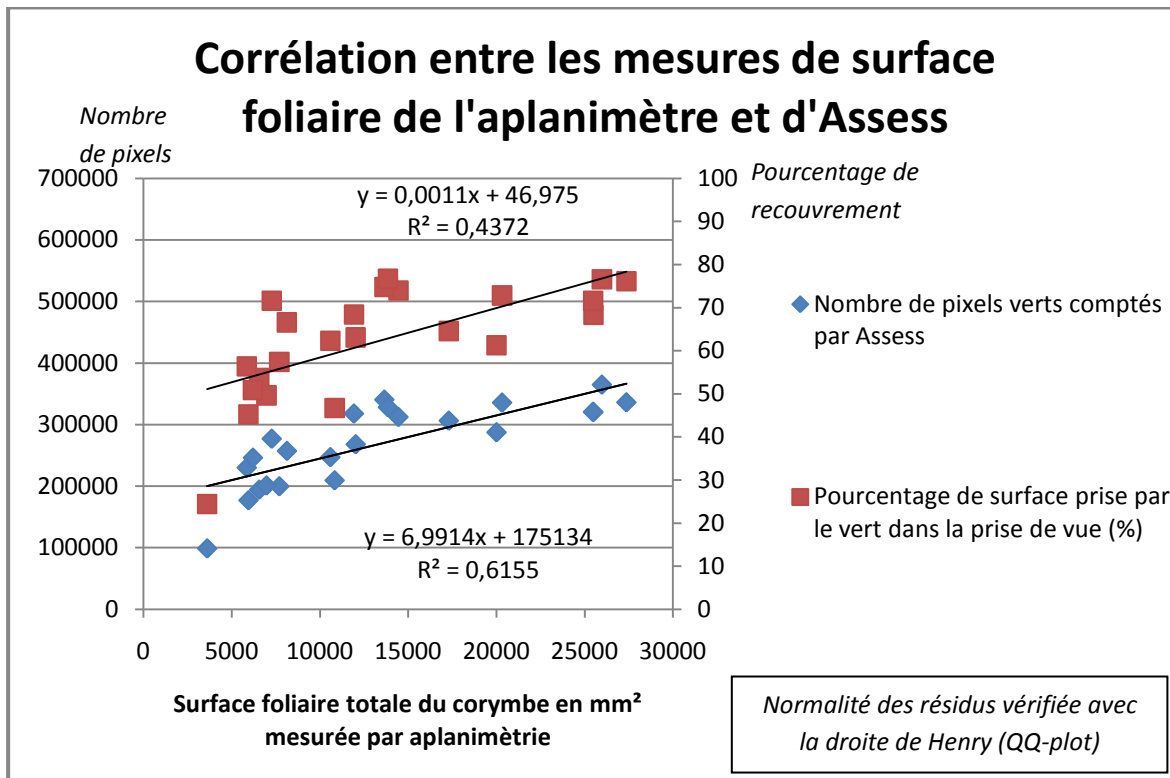


Figure 10 : Graphique des corrélations entre les deux mesures différentes de la surface foliaire dans la parcelle Sa sur différentes modalités à différentes dates

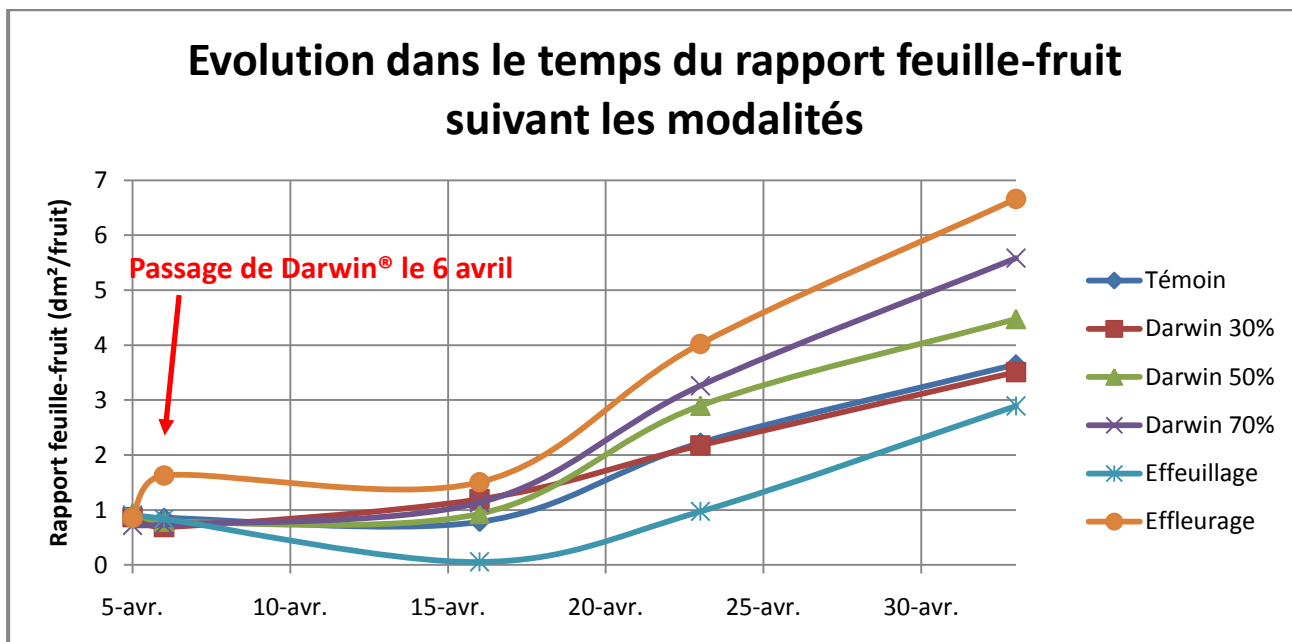


Figure 11 : Graphique montrant l'évolution du rapport feuille/fruit dans la parcelle Sa suivant les modalités étudiées (ayant subi du gel)

Dans l'avenir, il sera possible d'utiliser l'analyse d'images pour étudier la surface foliaire en développement. Il faut bien évidemment comprendre que ce sont des mesures très différentes qui n'ont pas le même sens : l'une est la réalité biologique du feuillage et l'autre est une estimation par projection sur un plan. Mais la tendance foliaire semble s'accorder puisque les corrélations sont bonnes (Figure 10).

Pour aller plus loin, il pourrait être étudié la surface foliaire utile (vert foncé du feuillage) et la surface foliaire en développement (vert clair) suivant l'intensité du vert des feuilles, en utilisant le logiciel. On pourrait ainsi dégager la surface productrice (organe source) et la surface en croissance (organe puits) afin d'étudier la balance carbone.

Le rapport feuille/fruit se calcule avec la formule suivante :

$$\text{Rapport feuille/fruit} = \frac{\text{surface foliaire moyenne totale du corymbe (en dm}^2\text{)}}{\text{nombre de fruits moyen du corymbe}}.$$

L'évolution du rapport feuille/fruit est présentée dans la Figure 11. Le rapport feuille/fruit n'est que peu différent après le passage de Darwin® mais quand les feuilles se développent, on peut observer des écarts qui se creusent. Cependant il a été impossible d'étudier l'impact du rapport feuille/fruit sur la chute physiologique à cause du gel, puisque tous les fruits sont tombés pour toutes les modalités.

L'hypothèse faite par le rapport feuille/fruit est que le passage de Darwin® va provoquer une rétention des fruits par corymbe plus importante (les fruits ayant plus de surface foliaire à disposition pour les nourrir). C'est un ressenti que l'on retrouve chez les producteurs, ils pensent que cette augmentation du rapport feuille/fruit et/ou le stress provoqué par le passage de Darwin® conduisent à un phénomène de rétention accrue. Ce phénomène cause quelques problèmes par la suite pour l'efficacité des molécules éclaircissantes (moindre efficacité après passage de Darwin®) : c'est une approche à envisager pour la poursuite de l'étude du rapport feuille/fruit.

Un résultat en lien avec ce ressenti est que Darwin® augmente la croissance végétative des pousses de bourse (Annexe VIII), probablement par sa diminution de la surface foliaire (une croissance plus forte est initiée afin de revenir à une surface foliaire optimale). De plus, les fruits, qui sont sur le même corymbe qu'une pousse de bourse à forte croissance, ont tendance à moins chuter (Annexe IX). C'est vrai qu'il y a compétition entre les fruits et la pousse de bourse en cas de stress carboné (Lakso, 2011) mais sinon c'est une répartition gagnant-gagnant pour les organes puits.

Ce qu'il faut retenir de cette partie, c'est que l'impact de Darwin® dure sur toute la période cruciale pour la chute et la croissance du fruit. Darwin® provoque une diminution de la surface foliaire mais une augmentation du rapport feuille/fruit. Par contre, un effet de rétention des fruits peut apparaître après le passage de Darwin®.

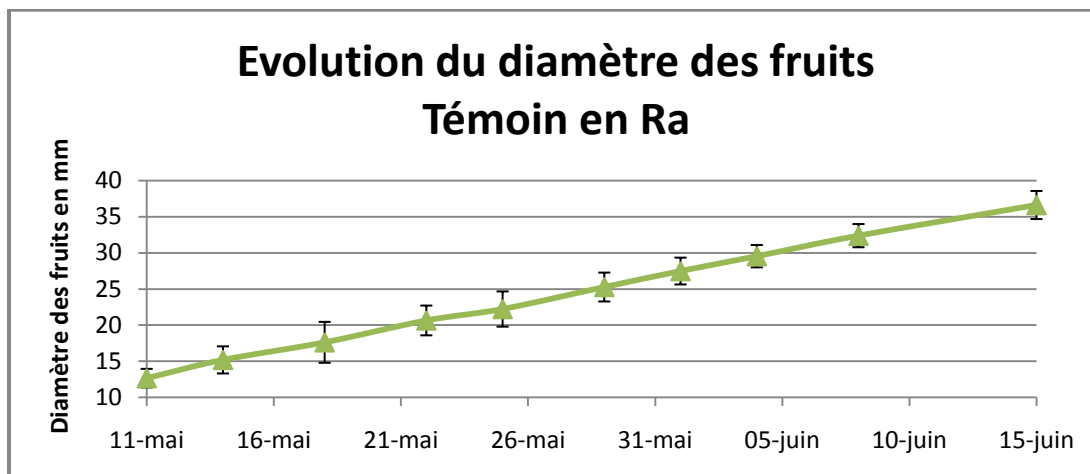


Figure 12 : Evolution du diamètre des fruits en parcelle Ra pour la modalité Témoin en fonction du temps (avec barres d'écart-type)

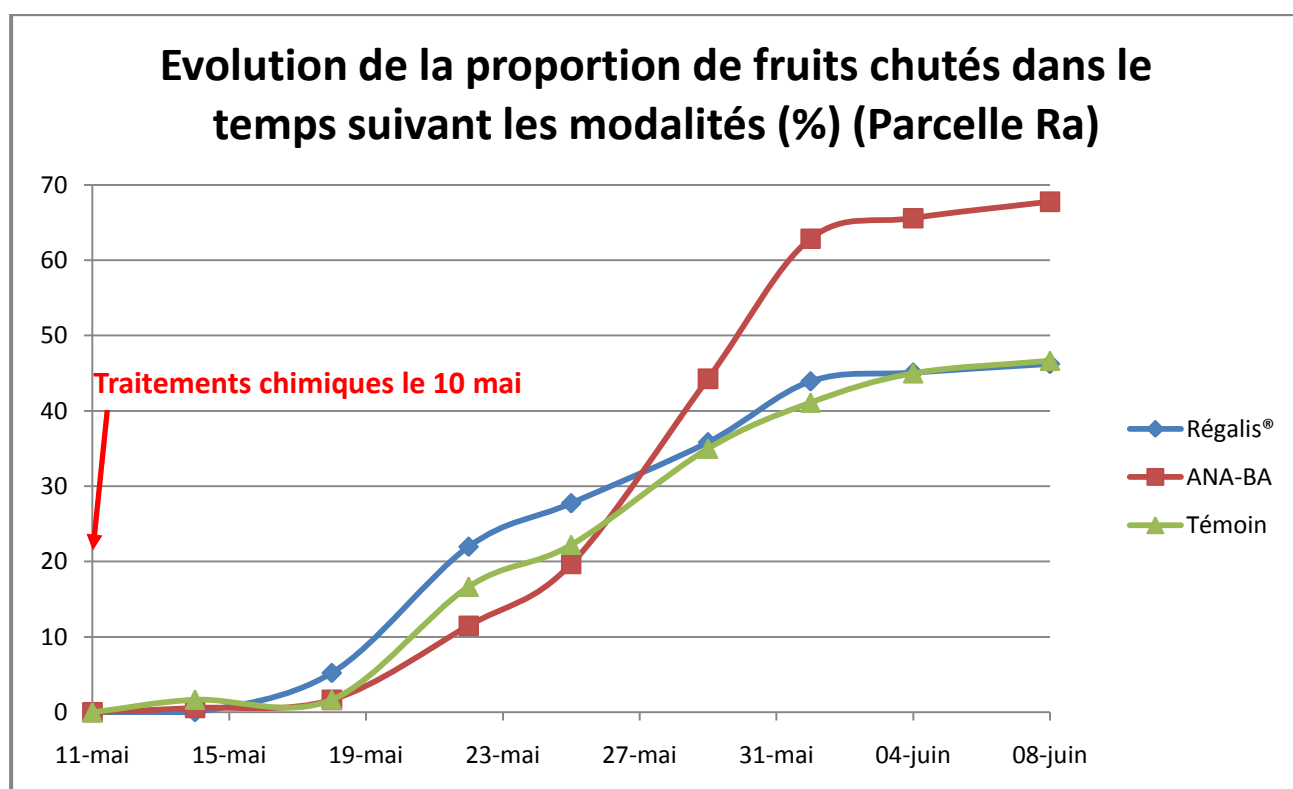


Figure 13 : Graphique montrant la proportion de fruits chutés en fonction du temps pour la parcelle Ra pour les trois modalités étudiées

C. ... provoque des différentiels de croissance...

En 2012, la croissance moyenne des fruits a varié de 0,84 mm/jour après la nouaison à 0,53 mm/jour après la fructification (Figure 12). Il n'y a pas de différence de croissance entre les modalités mais les chutes n'ont pas la même intensité, ni le même timing : les fruits chutent moins et plus tôt pour le témoin et Régalis® alors que pour ANA-BA, la chute est plus importante mais intervient plus tardivement (Figure 13).

Si l'on étudie par régression linéaire (script et explications en Annexe X) les facteurs influençant la chute, il apparaît clairement que la variable grossissement des fruits joue un rôle important. La croissance du fruit est négativement corrélée à la chute mais ce n'est pas une relation directe, c'est probablement une conséquence de mécanismes plus complexes (Tableau 3). Les variables 'Taille du fruit' et 'Pourcentage de croissance' sont corrélées négativement à la chute puisqu'elles sont positivement corrélées à la croissance du fruit.

Par contre, la position du fruit au sein du corymbe (numérotée du centre en suivant la spirale d'implantation) n'a pas d'influence sur la chute du fruit dans cette étude, tout comme dans Marini, 2003. Même si souvent le fruit central est plus gros, il a tout autant de chances de chuter si sa croissance n'est pas suffisante.

Tableau 3 : Résultat de la régression linéaire de l'effet sur la chute des variables mesurées avec la croissance relative pour les fruits de la parcelle Ra

| Régression par régression linéaire | Estimate | STD. Error | t value | Pr(> t) | |
|--|----------|------------|---------|----------|-----|
| (Intercept) | 1,19159 | 0,75004 | 1,589 | 0,1121 | |
| Croissance Relative en 3 jours | -8,93066 | 1,88314 | -4,742 | 2,11e-06 | *** |
| Position dans le corymbe | 0,14668 | 0,10416 | 1,408 | 0,1591 | |
| Pourcentage de croissance par rapport au fruit le plus rapide du corymbe | -0,06096 | 0,02887 | -2,111 | 0,0347 | * |
| Taille du fruit (mm) | -0,37111 | 0,16499 | -2,249 | 0,0245 | * |

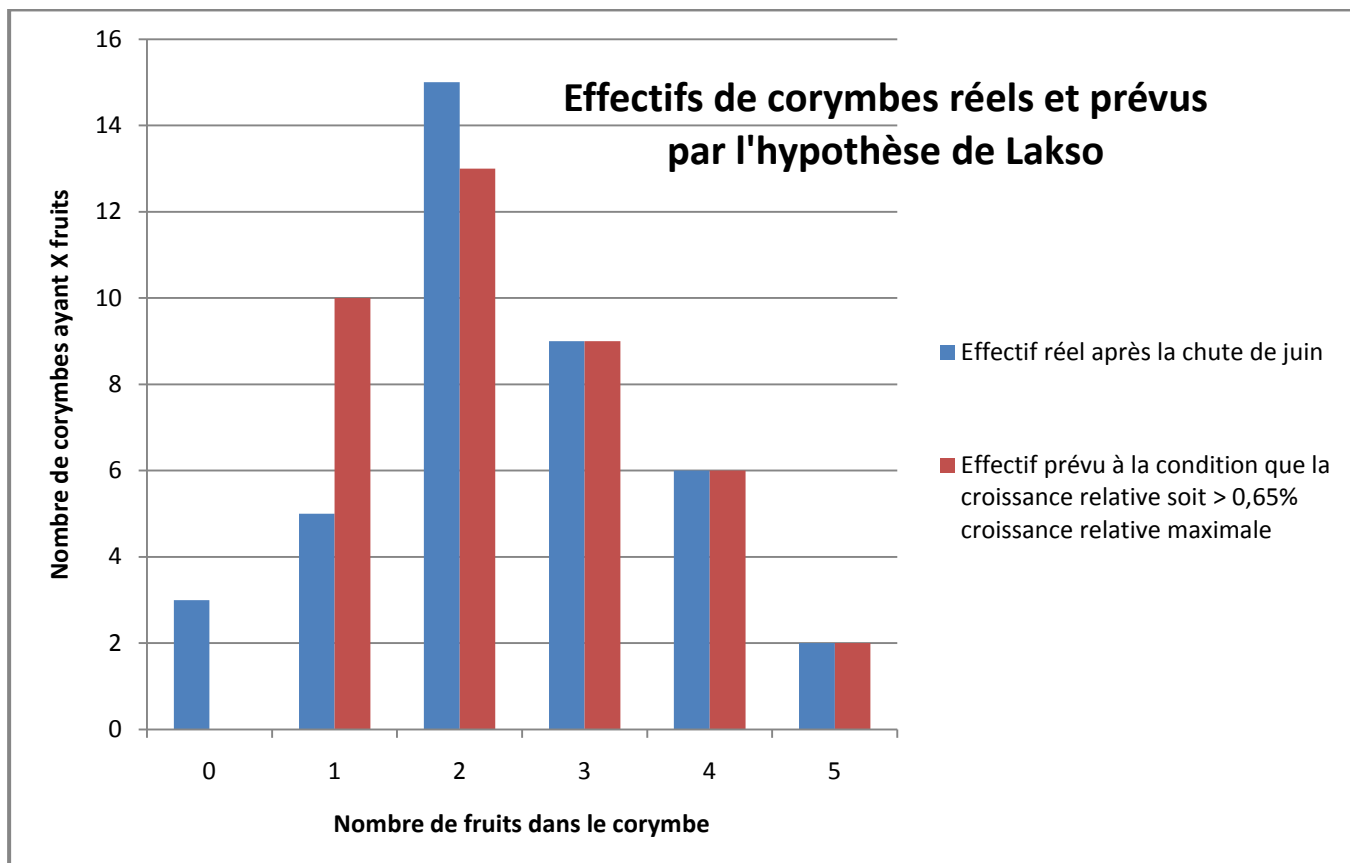


Figure 14 : Histogramme des résultats d'un simple modèle de prédiction basé sur la croissance maximale relative au sein du corymbe pour la parcelle Ra

Tableau 4 : Coefficients de la modélisation par Lda de la chute par les variables mesurées avec la croissance relative et la matrice de confusion de la modélisation

| Modélisation par Lda | Coefficients de modélisation | Matrice de confusion moyenne | |
|--|------------------------------|------------------------------|-------------------|
| Croissance Relative | -1,0370794 | Prédit chutés | Prédit non chutés |
| Position dans le corymbe | 0,1479703 | Chutés | 43,1 |
| Pourcentage de croissance par rapport au fruit le plus rapide du corymbe (%) | -1,8086959 | Non chutés | 7,1 |
| Taille du fruit (mm) | -2,0482496 | | 10,8 |
| | | | 29,0 |

La prédiction de Lakso est que si la croissance relative du fruit est inférieure à 60-70 % de la croissance relative maximale enregistrée, alors le fruit chutera (il y a eu une incertitude sur le choix maximum dans l'arbre ou dans le corymbe). En utilisant l'hypothèse maximum dans l'arbre, la prévision de chute fut très (voire trop) importante (il ne restait que 10 % des fruits finaux dans notre essai) mais ceci n'est pas explicitement mentionnée dans la publication de Lakso. Par contre, on a trouvé la meilleure prédiction (Figure 14) lorsque la limite de chute se trouvait à 65 % de la croissance relative maximale au sein du corymbe et pas au sein de l'arbre. Cependant, cette méthode pose un problème car il n'y a aucun corymbe sans fruit, puisque le fruit qui grandit le plus vite est la référence du corymbe et à ce titre, il ne peut pas tomber. Mais c'est une piste à suivre avec intérêt. Dans la réalisation de ce modèle, même si ce n'est pas complètement défini, Lakso prendrait la valeur moyenne de croissance des fruits et en fonction de cette valeur par rapport au maximum de croissance, il fera chuter un pourcentage plus ou moins grand de fruits : cette méthode n'a pas été testée dans cet essai par manque d'informations sur la méthode.

Tout comme dans Sané *et al.*, 2012, aucune différence de croissance relative n'a été montrée entre des corymbes ayant plus ou moins de fruits. Par contre, un corymbe bien exposé, en partie terminale d'une branche et avec un environnement dégagé, a potentiellement une meilleure croissance relative que les autres.

Il est nécessaire d'acquérir un procédé plus sûr pour vérifier la validité de l'hypothèse de Lakso. On utilise sous R® un package nommé « lda » qui permet de faire de la prédiction (Annexe XI). Sur un sous-ensemble, le logiciel crée un algorithme qui est censé prévoir une réaction en fonction des variables indiquées. Cet algorithme se base sur une population de départ et ensuite le logiciel teste la prédiction sur d'autres parties de la population tirées de manière aléatoire. Ceci donne ensuite le pourcentage d'erreurs d'affectation des individus dans le bon groupe indiquant la fiabilité de la prédiction.

Les coefficients du modèle (Tableau 4) ne sont pas affectés dans le même ordre de valeur puisque la taille semble avoir la plus grande importance dans le modèle de prédiction. En tout cas, la position sur le corymbe n'a pas sa place dans la prédiction : l'effet position n'est pas prouvé ici non plus. Si l'on regarde la matrice de confusion moyenne, on s'aperçoit que l'erreur du modèle est $\frac{10,8 + 7,1}{90} =$ d'environ 20 %. De plus, les erreurs proviennent à la fois sur des fruits devant chuter (ne chutant pas dans le modèle : 7,1 %) et des fruits chutant (ne chutant pas dans la réalité : 10,1 %).

Quand on utilise la prédiction en la testant sur un jeu de données n'ayant pas servi à créer le modèle (et ceci en effectuant une boucle pour tester 100 fois notre modèle de prédiction sur des échantillons différents de la population ; voir Annexe XII), on obtient une erreur de prédiction sur 20 % (+/- 2,6 %) de la population en moyenne en utilisant les variables ci-dessus et une erreur de 22 % (+/- 3,3 %) en utilisant seulement la variable Croissance Relative. L'erreur peut sembler importante mais la prédiction d'un phénomène si complexe ne peut bien évidemment reposer que sur une seule variable comme la croissance.

Par contre, ceci donne une bonne estimation de la chute à 20 % près. Il faudra vérifier que la prédiction puisse s'appliquer sur une autre année en renouvelant les mesures l'année prochaine.

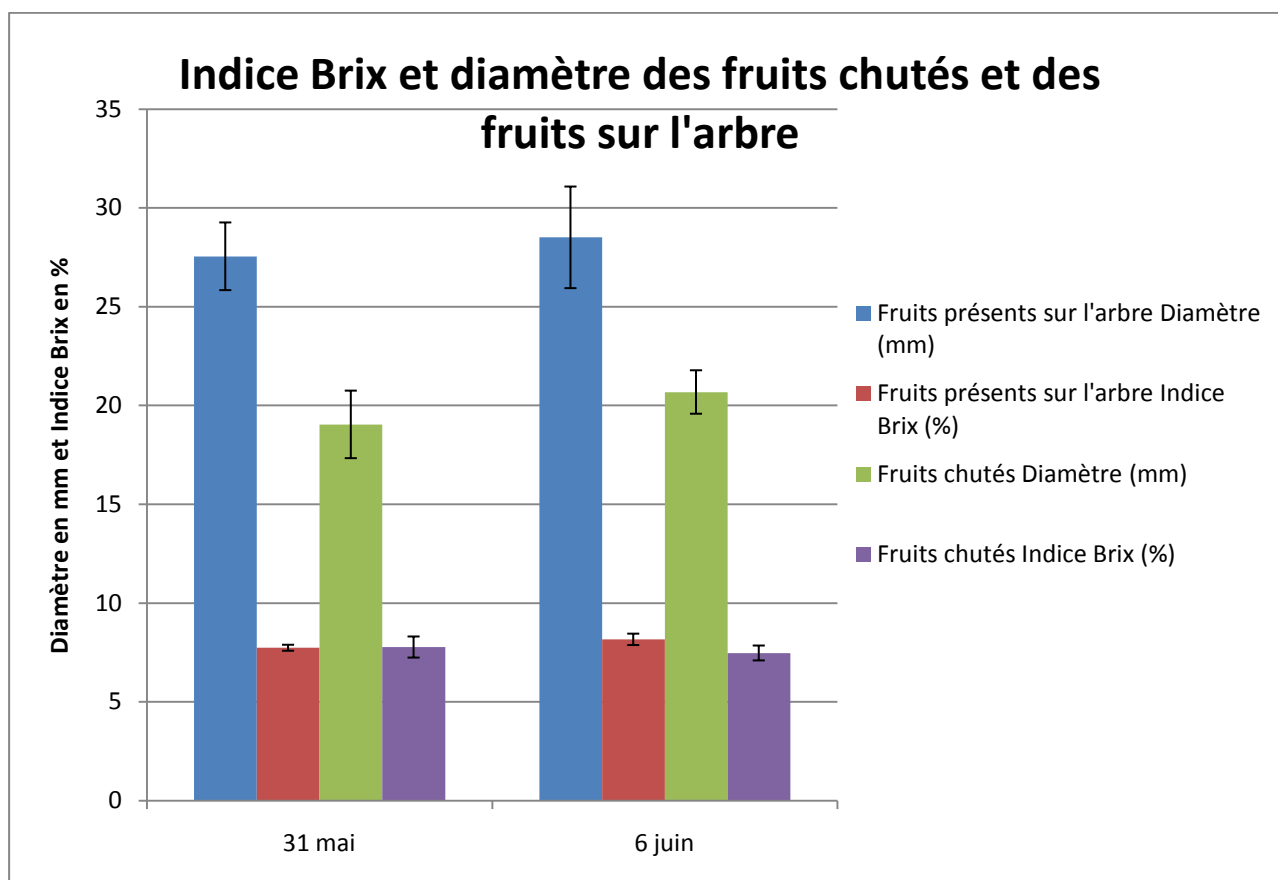


Figure 15 : Histogramme présentant le diamètre et l'indice Brix mesurés sur les fruits prélevés chutés ou sur l'arbre en parcelle Ra puis congelés

Tableau 5 : Résultats de la régression linéaire de la chute en fonction des variables suivantes : le diamètre, l'indice Brix, la différence d'indice Brix avec le minimum en indice Brix du corymbe et la position du fruit dans le corymbe

| Régression linéaire de chute | Estimate | STD. Error | t value | Pr(> t) | |
|--|-----------|------------|---------|----------|-----|
| (Intercept) | -38,29416 | 14,12749 | -2,711 | 0,006716 | ** |
| Diamètre du fruit | -1,01229 | 0,29026 | -3,487 | 0,000488 | *** |
| Indice Brix | 7,30663 | 2,15780 | 3,386 | 0,000709 | *** |
| Différence avec l'indice Brix minimum du corymbe | 0,01833 | 2,29103 | 0,008 | 0,993618 | |
| Position dans le corymbe | 0,23879 | 0,33596 | 0,711 | 0,477229 | |

D. ... et des différentiels en teneurs en sucres

Les premiers résultats montrent que les fruits qui chutent sont plus petits que les fruits qui restent sur l'arbre, probablement à cause d'un arrêt de croissance. Par contre graphiquement, il n'y a pas de différence significative entre la moyenne des indices Brix des fruits chutés et de ceux qui restent sur l'arbre (Figure 15). Ceci peut s'expliquer par les différences environnementales entre les corymbes : les fruits d'un même corymbe ont quasiment la même valeur d'échelle Brix, par contre d'un corymbe à l'autre il est possible de trouver des différences importantes (jusqu'à 1 % en indice Brix). Cependant les différences d'échelle Brix intra-corymbes expliquent la chute, un fruit ayant un taux de sucres plus élevé que les autres fruits du corymbe risque de chuter (donc au sein du corymbe, les fruits qui vont chuter ont un taux de sucres plus élevé, *Abruzzese et al., 1995*).

En ce qui concerne le taux de sucres avant la chute de juin, du fait du prélèvement, on ne sait pas si le fruit allait ou non chuter par la suite. Dans la partie précédente, il vient d'être démontré que la taille du fruit a une influence sur la chute. Donc en réalisant une hypothèse de chute en fonction de la taille, il a été possible d'étudier la relation entre l'indice Brix et la chute physiologique (de manière indirecte, avec l'hypothèse qu'un fruit trop petit dans un corymbe a de grandes chances de tomber).

En analysant les variables pouvant influencer la chute (Tableau 5), on retrouve évidemment le diamètre du fruit mais aussi l'indice Brix. Cependant la différence au sein du corymbe n'explique pas la chute de juin, pourtant cela semblait important.

Lors d'une analyse plus fine par prévision (Lda, voir Annexe XI) (Tableau 6), l'indice Brix et la différence intra-corymbe apparaissent plus importants que le diamètre pour la décision du modèle. Cette modélisation possède de meilleurs résultats que la précédente avec les croissances relatives puisqu'il n'y a en moyenne que 10 % (+/- 11 %) d'erreurs (sur 100 prévisions de 100 corymbes). Le modèle a tendance à ne pas faire chuter des fruits qui devrait chuter (matrice de confusion), ceci peut provenir de l'hypothèse de départ sur la chute des fruits en fonction de leur taille.

En utilisant uniquement l'indice Brix, on obtient une prévision moins bonne et équivalente à celle de la croissance relative (avec 16 % (+/- 9 %) d'erreurs dans le choix du groupe par le modèle sur 100 prévisions de 100 corymbes).

Tableau 6 : Coefficients de la modélisation par Lda de la chute par les variables mesurées avec le taux de sucre et la matrice de confusion moyenne du modèle

| Modélisation par Lda | Poids dans le modèle | Matrice de confusion moyenne | | |
|--|----------------------|------------------------------|---------------|-------------------|
| | | | Prédit chutés | Prédit non chutés |
| Diamètre du fruit | -0,320303607 | | | |
| Indice Brix | 1,620954998 | Chutés | 61 | 9 |
| Différence avec l'indice Brix minimum du corymbe | 0,519596629 | Non chutés | 1 | 29 |
| Position dans le corymbe | 0,005298212 | | | |

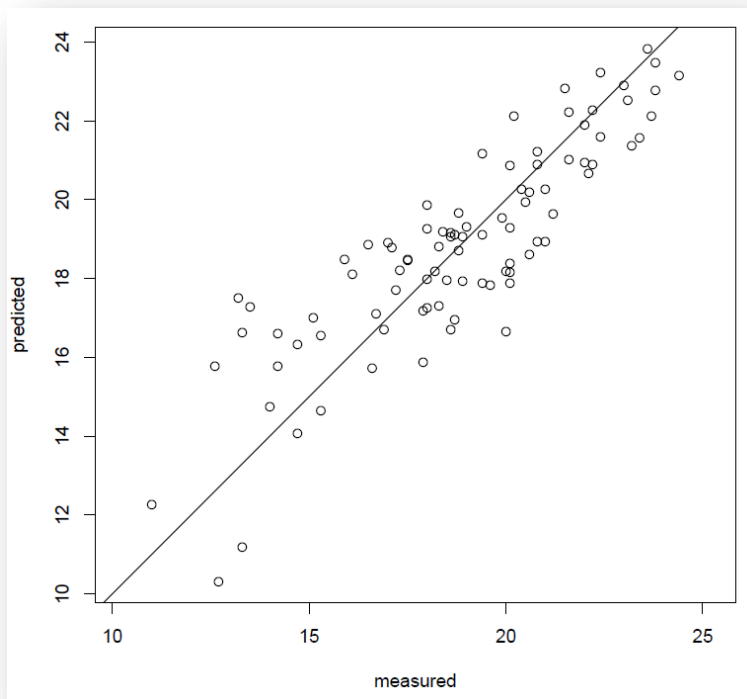


Figure 16 : Représentation graphique de la corrélation entre les valeurs prédites (predicted) et réelles (measured) pour la prédiction par pls du diamètre en fonction des variables de l'indice Brix

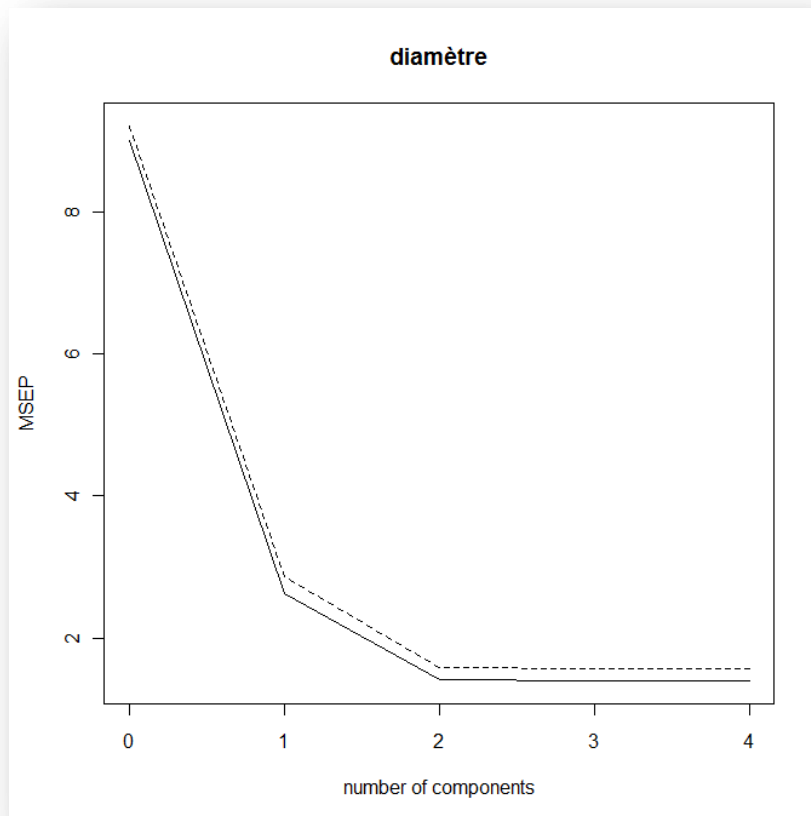


Figure 17 : Résultat graphique de l'impact des composantes sur la qualité (Mean Squared Error of Prediction) de la prédiction du diamètre

E. Etude des interactions entre ces facteurs

L'étude des interactions entre les indicateurs étudiés est importante afin de savoir s'ils sont directement liés et si leurs mesures et leurs analyses ne sont pas redondantes dans l'étude de la chute physiologique.

Certaines études montrent que le taux de sucres est directement lié à la surface foliaire à disposition (Yuan and Greene, 2000 ; Siham *et al.*, 2005 ; Casierra-Posada *et al.*, 2007 ; Cittadini *et al.*, 2008 ; Greene, 2008 ; Monney *et al.*, 2012). C'est un fait physiologique, si le fruit (organe puits) dispose de plus de feuilles (organes sources) pour produire des sucres, alors il devrait avoir une relation de causalité entre ces deux facteurs.

De même, on peut considérer que le diamètre du fruit va être favorisé par un important feuillage à disposition (Ferree and Palmer, 1982 ; Cittadini *et al.*, 2008). Il existe une relation d'équilibre entre les fruits et les feuilles (corrélation positive du nombre de fleurs et du nombre de feuilles ; Lauri *et al.*, 1996) et même au niveau architectural de l'arbre (Lauri *et al.*, 2010).

Ces relations vérifiées dans la bibliographie doivent pouvoir se vérifier expérimentalement (par exemple, si on avait eu les résultats après le passage de Darwin®). Par contre, la relation entre le diamètre du fruit et son taux de sucres n'est pas évidente au niveau métabolique ou bibliographique (problème dans la prise en compte du phénomène de dilution). Si on augmente la surface foliaire, on augmente à la fois le taux de sucres et le diamètre du fruit (Cittadini *et al.*, 2008). Pourtant on ne peut pas dire qu'il y a une forte corrélation entre les sucres et le diamètre (Tableau 7). Cela montre bien que de manière indirecte, il y a un lien entre ces variables sans qu'elles soient totalement reliées.

Si l'on souhaite rechercher un lien plus fort entre le diamètre et les variables d'indice Brix et le positionnement du fruit, on peut utiliser une modélisation par Pls (Annexe XIII). Au vue de la Figure 16, la prédiction du diamètre manque de précision mais la modélisation permet de relier assez facilement ces variables.

La modélisation en Pls avec l'indice Brix et la différence avec le minimum en indice Brix permet d'expliquer 84% du diamètre sans avoir besoin d'utiliser la date et la position qui sont des variables inutiles d'après le graphique expliquant la qualité du modèle en fonction du nombre de composantes en son sein (composantes 3 et 4, Figure 17). Les variables taille du fruit et taux de sucres sont reliées puisqu'elles décrivent l'évolution du fruit au cours de sa croissance (Yuan and Greene, 2000 ; Siham *et al.*, 2005 ; Casierra-Posada *et al.*, 2007). De même, la surface foliaire rentre en compte dans ces variables en étant le fournisseur des sucres permettant ensuite la croissance.

Tableau 7 : Résultat de la régression linéaire entre le diamètre et l'indice Brix

| Régression linéaire du Diamètre | Estimate | Std.Error | t-value | Pr(> t) | |
|---|----------|-----------|---------|----------|-----|
| (Intercept) | 39,09632 | 8,46204 | 4,620 | 3,11e-05 | *** |
| Différence avec l'indice Brix minimum du corymbe | -2,51459 | 1,65228 | -1,522 | 0,1349 | |
| Indice Brix | -2,79290 | 1,17087 | -2,385 | 0,0212 | * |

F. Bilan

Les problèmes de gel rencontrés cette année n'ont pas permis de recouper toutes les variables qu'il aurait été préférable d'étudier. Par contre, les résultats montrent que les mesures faites, même indépendantes, ont un rôle ou sont un indicateur de la chute physiologique.

S'il était possible de réaliser une étude complète des variables étudiées sur le même matériel végétal, cela permettrait de créer une prévision avec un pourcentage d'erreurs beaucoup plus faible que ceux (cf. Tableaux précédents) qui ont été présentés.

En combinant ces variables, il serait possible d'améliorer grandement la précision. Par exemple, en mesurant la taille des fruits (à deux dates proches) pour obtenir la croissance relative puis en prélevant les fruits afin de mesurer leur taux de sucres, une prévision fine pourrait être effectuée sur le taux de fructification, suivant des modalités de floraison ou d'éclaircissage mécanique conduisant à une forte ou faible chute suivant la charge.

Tableau 8 : Localisation et précisions sur les sites étudiés pour l'éclaircissage

| Station | Localisation | Climat | Variété |
|-----------------|--------------|-------------------|---------------------|
| Cefel | Montauban | Semi-continentale | Royal Gala® |
| CEHM | Montpellier | Méditerranéen | Galaxy® |
| Ctifl Balandran | Nîmes | Méditerranéen | Pink Lady® |
| Ctifl Lanxade | Bergerac | Semi-continentale | Brookfield® Baigent |
| La Morinière | Tours | Océanique dégradé | Brookfield® Baigent |

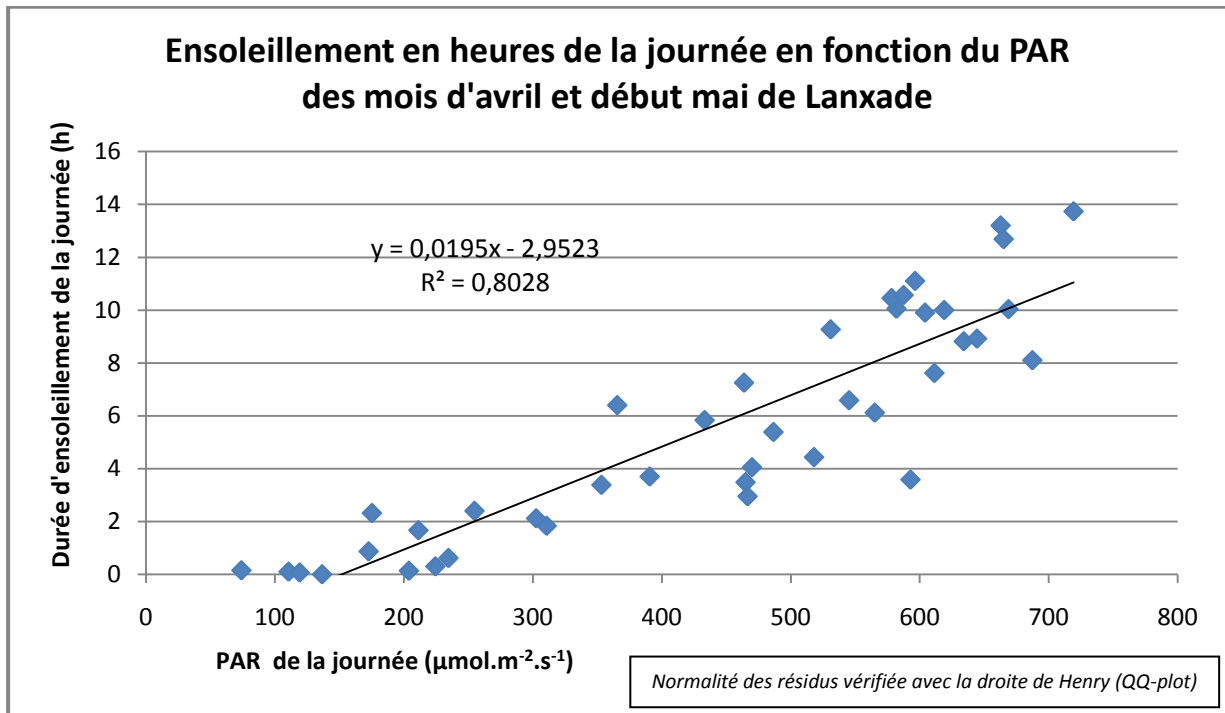


Figure 18 : Graphique corrélant deux estimations de quantités de lumière : le PAR et la durée d'enselement (1 point représente une date)

IV. Approche 2 : modèle climatique de type corrélatif

La principale difficulté de ce travail est la recherche de données météorologiques fiables, tout en étant assez précises. La solution a été d'utiliser la base de données agroclimatique « Celsius » (regroupant 120 stations en France) et les archives météorologiques des aéroports qui regroupent des données de températures, de vent, de précipitations et de nébulosité (les principaux sites utilisés sont les suivants : <http://www.infoclimat.fr/> et <http://www.meteociel.fr/>).

Les données sur l'éclaircissage des pommiers proviennent de lieux différents, en conduites en verger différentes et surtout de variétés différentes. Le **Tableau 8** explique les différences géographiques et variétales des données récupérées. Par contre, la grande inconnue est la date de floraison suivant les années, ainsi l'hypothèse effectuée est que le mois d'avril comprenait le stade F2 et les premières phases de division cellulaire si importantes.

Le principal biais fait dans les mesures météorologiques est l'assimilation du PAR (Photosynthetically Active Radiation : rayonnement photosynthétiquement actif) par la durée d'ensoleillement de la journée (**Figure 18**). Le PAR a été mesuré juste au dessus des haies fruitières par une station Watchdog 1450 (<http://www.sdec-france.com/centrales-acquisition-donnees-meteo-watchdog.html>) avec une barre de 6 capteurs PAR délivrant un signal moyenné sur une minute toutes les 5 minutes.

Les mesures moyennées de la station ont été comparées aux données météorologiques du site de l'aéroport de Bergerac. On peut étudier indirectement l'impact du PAR sur l'éclaircissage du pommier grâce à l'ensoleillement (**Figure 19**). Il paraît essentiel que les conditions d'éclairement soient bonnes lors des premières phases de croissance du fruit pour que son alimentation en sucres soit suffisante afin de grossir suffisamment.

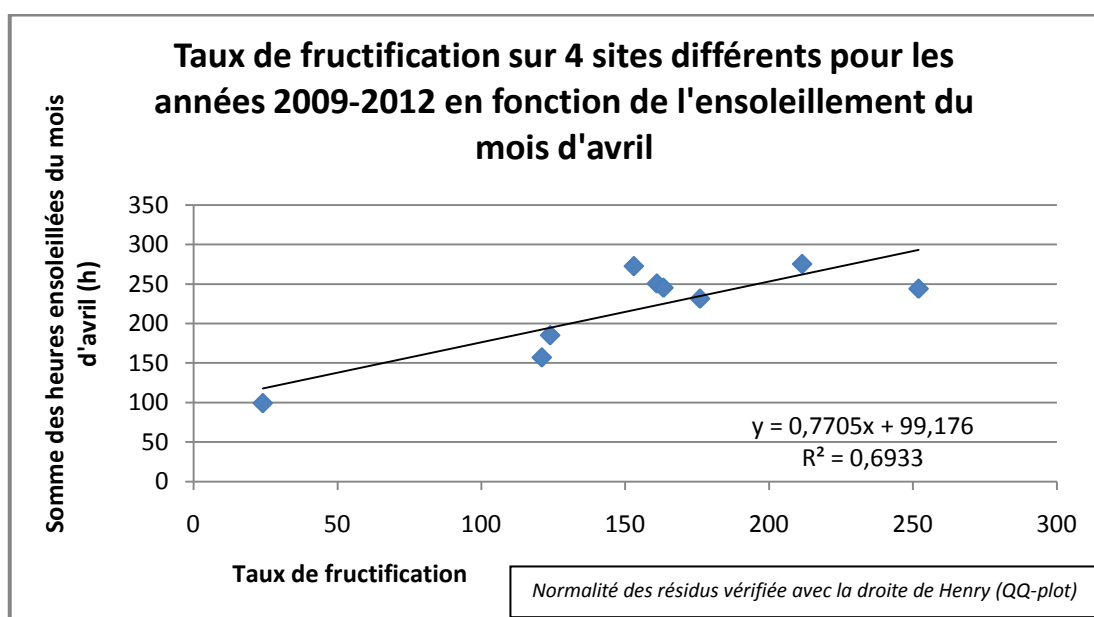


Figure 19 : Graphique corrélant le taux de fructification en fonction de la somme d'heures d'ensoleillement au mois d'avril pour les sites étudiés

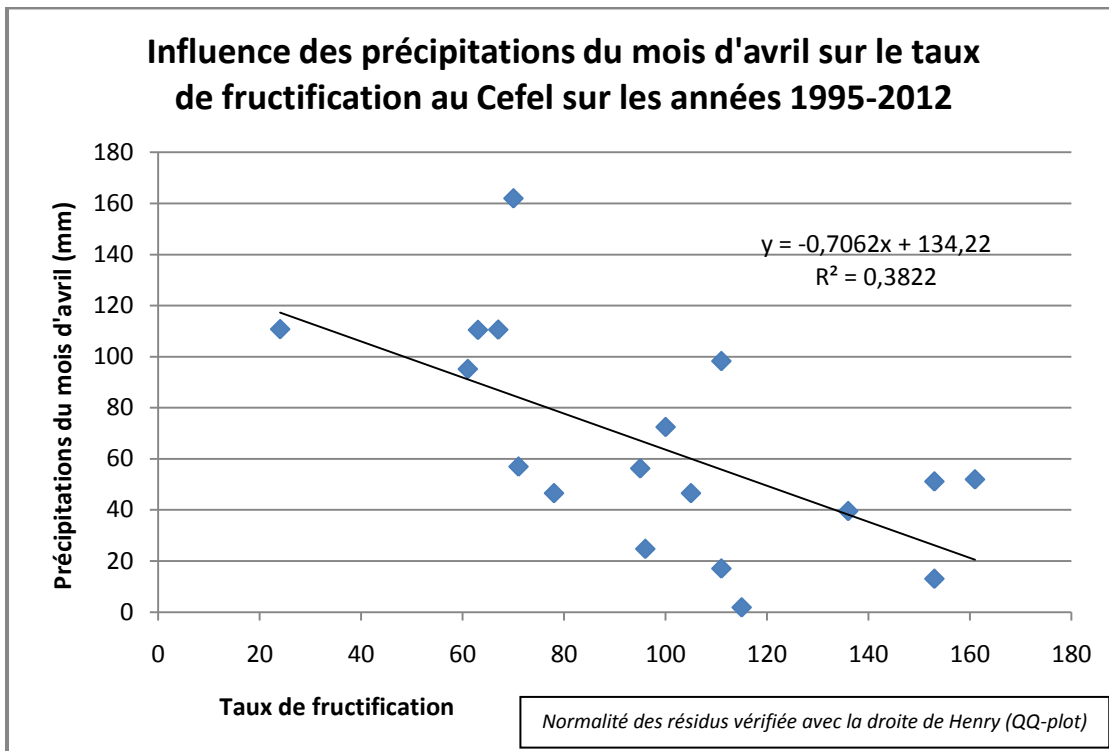


Figure 20 : Graphique corrélant sur 17 ans le taux de fructification avec la somme des précipitations du mois d'avril pour les sites étudiés

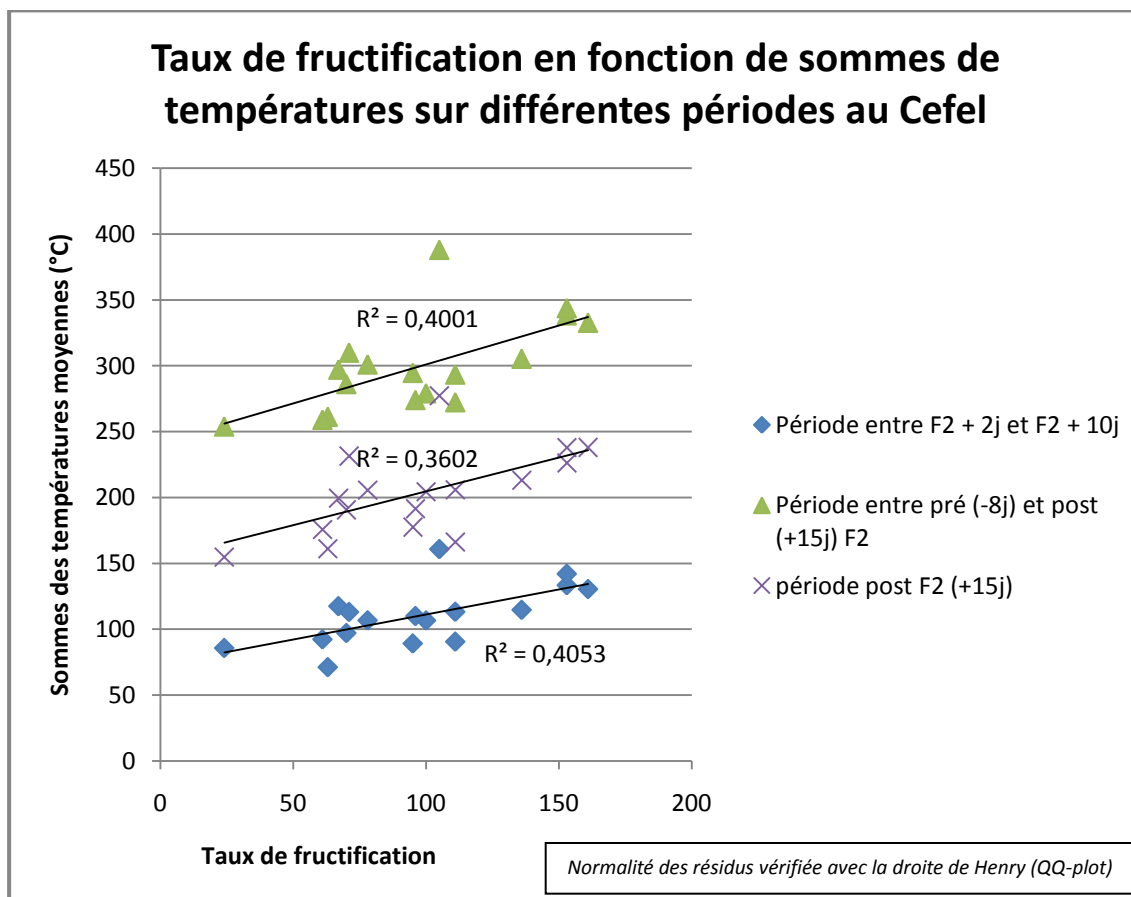


Figure 21 : Graphique des corrélations existantes entre le taux de fructification et les sommes de températures au mois d'avril (données du Cefel) sur le centre de Montauban

Il a pu être montré que le vent pendant le mois d'avril n'influait aucunement la chute des jeunes fruits du pommier. Par contre, les précipitations du mois d'avril sont corrélées négativement à la chute de juin (2 mois après) à travers le taux de fructification. Les données ont montrées qu'il y a corrélation si l'on étudie seulement un site (le Cefel, [Figure 20](#)) ou si l'on regroupe les 4 autres sites ([Annexe XIV](#)).

Les précipitations vont diminuer le taux de fécondation par lessivage des pistils et empêcher les abeilles de réaliser leur œuvre pollinisatrice (un indicateur indirect du taux de pollinisation est la quantité de miel produite par les abeilles ; [Schielin, 2012](#)). De plus, si l'on observe des précipitations au printemps, elles sont souvent présentes longtemps et empêchent toute forte photosynthèse. Ces précipitations révèlent une mauvaise croissance de départ et un nombre faible de pépins en moyenne qui vont provoquer une chute de juin importante.

Les deux prochains graphiques ont été réalisés grâce à la précision et à l'étude faite par Jean-François Saint-Hilary du Cefel en ce qui concerne la date de floraison.

Le premier ([Annexe XV](#)) représente le suivi des températures moyennes au moment de la pleine floraison (stade F2) pour trois années très différentes en ce qui concerne leur taux de fructification. Il semble que la température avant la floraison n'ait que peu d'influence sur la chute de juin, par contre, les températures dans les semaines suivant la floraison paraissent essentielles en ce qui concerne la chute des fruits. La fructification évolue de manière proportionnelle aux sommes des températures dans cet essai mais si la température est excessive la nuit, cela peut provoquer une chute des fruits par la suite ([Calderón-Zavala et al., 2004](#)).

Le second ([Figure 21](#)) permet de localiser la zone d'importance pour le futur fruit au moment de la floraison. La période pré-floraison seule n'explique en rien le taux de nouaison ou de fructification ensuite. Par contre, la somme des températures, sur des périodes post floraison (de 0 à 15 jours ou entre 2 et 10 jours) et sur la période - 8 jours à + 15 jours par rapport à F2, est corrélée positivement au taux de fructification (et aussi au taux de nouaison). La croissance optimale des petits fruits, la pollinisation et la fécondation des ovules se fait bien évidemment à partir de températures seuils (qui n'ont pas pu être déterminées à cause de la faiblesse du nombre de mesures) qui doivent être de l'ordre de 12 °C ; les relevés de températures peuvent permettre de prévoir la date de floraison ([Janick, 1993](#) ; [Legave et al., 2008](#)).

Afin de traiter ces données de manière optimale, on a cherché à étudier s'il était possible de réaliser, à partir d'un faible jeu de données, un modèle météorologique de prévision de la chute physiologique.

Il s'est basé sur les variables :

- sommes des températures minimales, moyennes et maximales du mois d'avril,
- somme des précipitations en avril,
- somme des heures d'ensoleillement en avril,
- site de l'étude.

Tableau 9 : Résultat de la régression linéaire sur le taux de fructification en fonction des conditions météorologiques du mois d'avril pour tous les sites

| Régression linéaire du taux de fructification | Estimate | Std.Error | t-value | Pr(> t) |
|--|------------|------------|---------|----------|
| (Intercept) | 533,936423 | 148,805841 | 3,588 | 0,0697 . |
| Somme des températures moyennes | -0,530960 | 0,428721 | -1,238 | 0,3412 |
| Somme des températures minimales | -0,550761 | 0,496737 | -1,109 | 0,3830 |
| Somme des températures maximales | -0,002679 | 0,199868 | -0,013 | 0,9905 |
| Somme des heures d'ensoleillement | 0,490464 | 0,166603 | 2,944 | 0,0986 . |
| Somme des précipitations | -1,163094 | 0,774801 | -1,501 | 0,2721 |

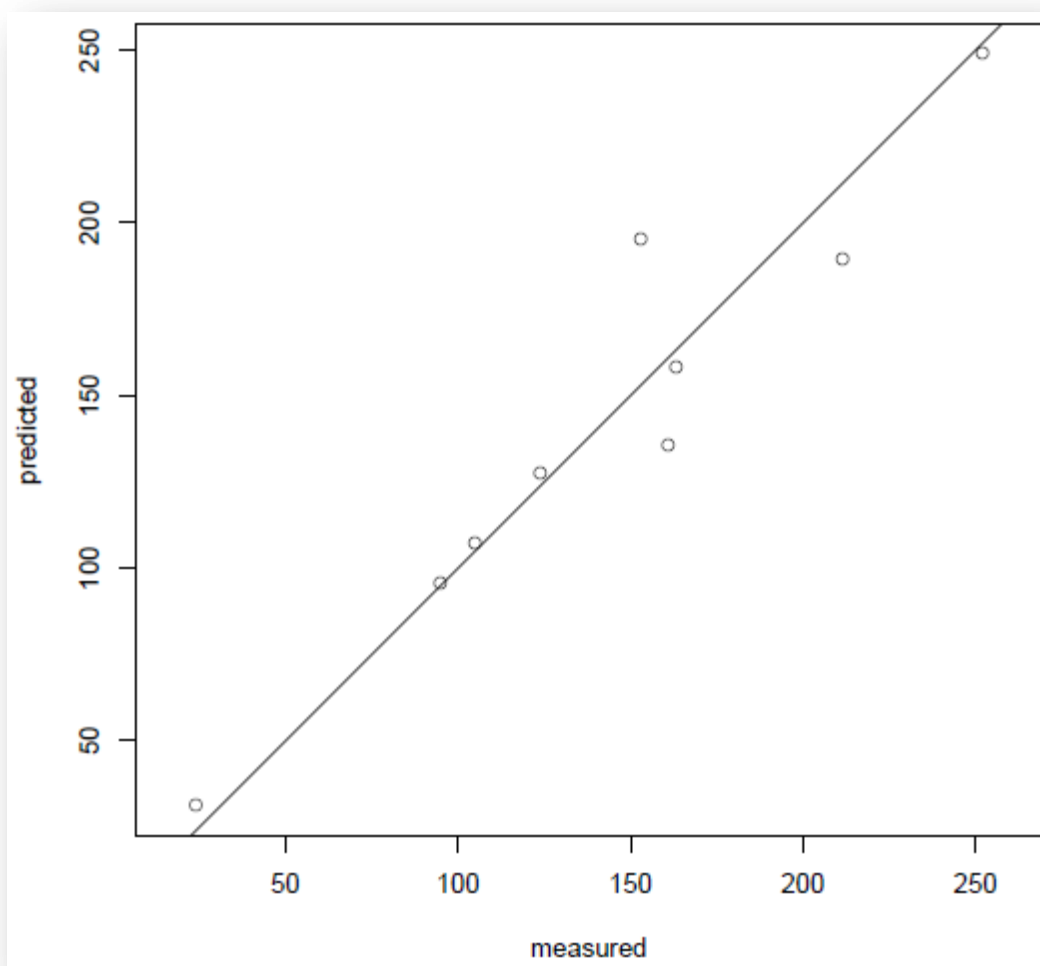


Figure 22 : Représentation graphique des valeurs prédites et mesurées dans le modèle de prédiction du taux de fructification par les données météorologiques

Il a été testé l'effet des degrés-jours (Ashley Kulhanek, 2009 ; Kaack and Pederson, 2010) pour étudier l'effet des températures minimales et maximales mais les résultats ne montrent pas de bonnes corrélations. Par contre, la température minimale (ou la température de nuit) semble montrer plus d'intérêt dans notre étude et dans la bibliographie (Byers, 2002 (a)).

Avec une simple régression linéaire, les résultats (Tableau 9) n'indiquent rien de significatif (au seuil de 5 %) en ce qui concerne le taux de fructification final. La somme des températures moyennes, minimales ou maximales, la somme des heures d'ensoleillement et la somme des précipitations (mm) du mois d'avril ne montrent pas de corrélation linéaire avec le taux de fructification.

Ensuite en utilisant une modélisation en Pls (Annexe XIII puisque le taux de fructification est une variable quantitative), on observe que les valeurs prédites (predicted) et les valeurs mesurées (measured) sont proches et sont sur la courbe de modélisation (Figure 22). La qualité de la prédiction n'est pas parfaite mais l'écart type d'erreur de prédiction (RMSEP : Mean Squared Error of Prediction) est très proche des 5 %.

Ensuite les taux de fructification et de nouaison peuvent être expliqués à 95,76 % et 93,56 % respectivement par les variables météorologiques (Tableau 10) : les précipitations, l'ensoleillement et les températures du mois d'avril.

Tableau 10 : Résultats montrant l'importance des variables dans la prédiction des taux de fructification et de nouaison à partir des données météorologiques

| Modélisation Pls du taux de fructification | Composante 1 : précipitations | Composante 2 : ensoleillement | Composante 3 : Tmax | Composante 4 : Tmoy | Composante 5 : Tmin | Composante 6 : Site |
|---|-------------------------------|-------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| X (identification au sein de la population) | 85,83 | 95,51 | 97,62 | 99,61 | 100,0 | 100,00 |
| Taux de fructification | 25,60 | 53,33 | 74,33 | 87,62 | 91,6 | 95,76 |
| Modélisation Pls du taux de nouaison | Composante 1 : précipitations | Composante 2 : ensoleillement | Composante 3 : Tmax | Composante 4 : Tmoy | Composante 5 : Tmin | Composante 6 : Site |
| X | 86,59 | 95,51 | 96,83 | 99,61 | 100,0 | 100,00 |
| Taux de nouaison | 34,74 | 50,90 | 74,36 | 79,99 | 83,3 | 93,56 |

Cette prévision en fonction des données climatiques globales dans le mois de la floraison permet d'avoir une bonne estimation de ce qu'il faut attendre comme réaction des fruits aux produits de traitements ensuite.

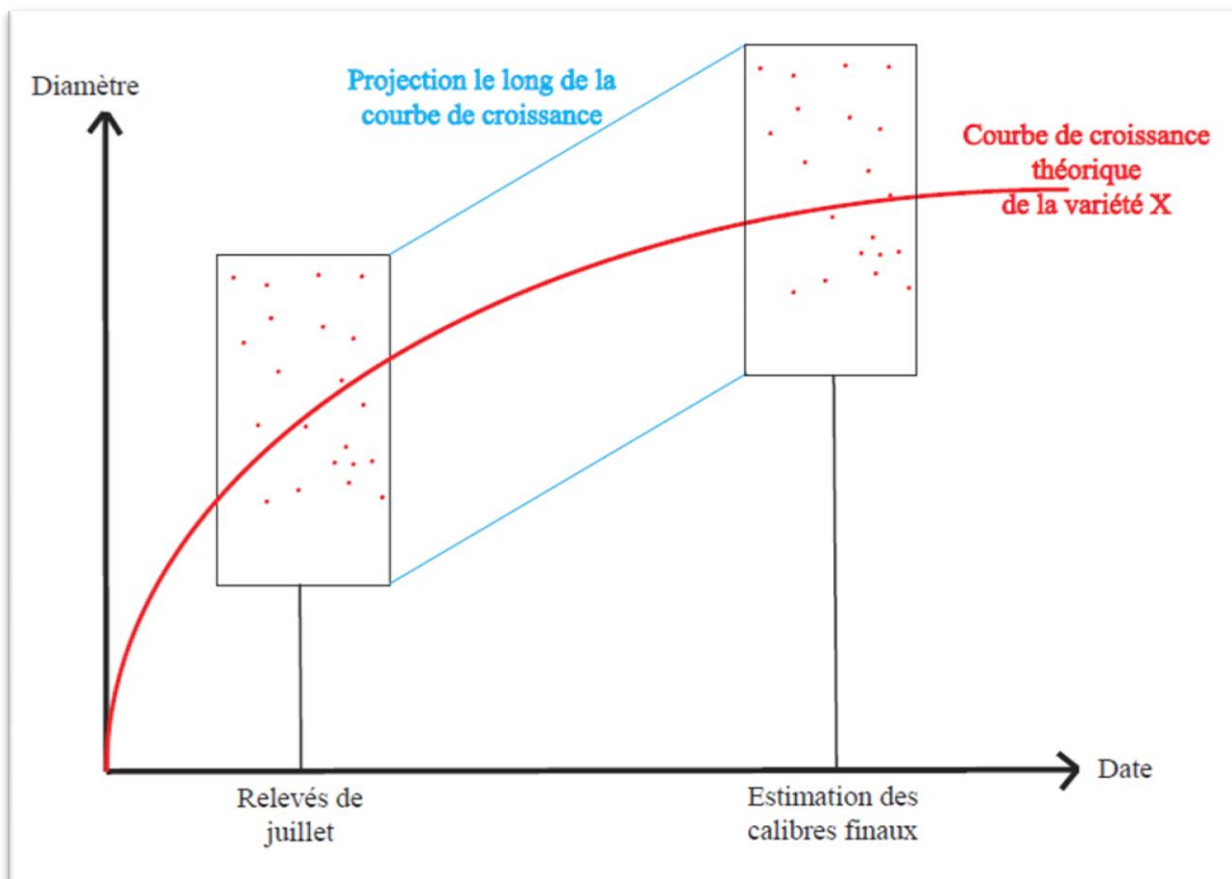


Figure 23 : Schématisation du principe de calcul de prévision de récolte de PRÉVAQUI

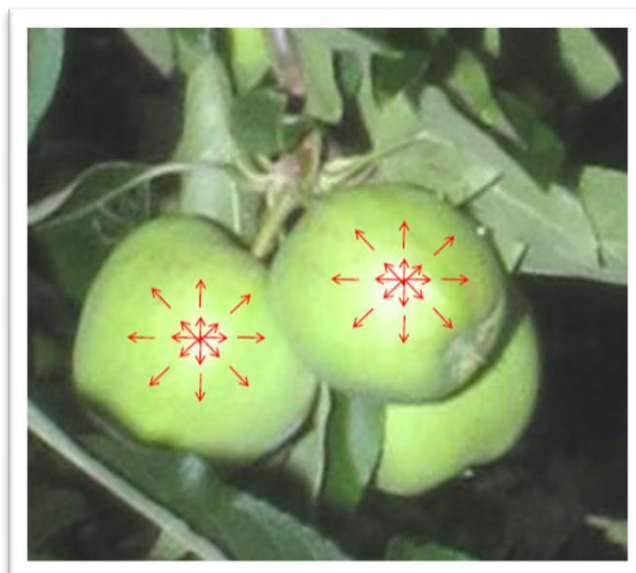


Figure 24 : Photographie (A.Marceron) de la réflexion lumineuse sur des pommes

V. Approche 3 : modèle global d'estimation de la charge

A. Présentation des outils d'analyse : PRÉVAQUI et Méc@vision

1. PRÉVAQUI (Vaysse, P. and Reynier, P., (1996). *Prévision de récoltes*, ouvrage Ctifl, Réf. 24617, 54p)

Le logiciel PRÉVAQUI a été créé dans les années 1990 afin de répondre à une contrainte des producteurs. Ils ont pour obligation dès la fin du mois de juillet de prédire quels seront les rendements de leurs vergers et de les fournir à Prognosfruit (cette année en France à Toulouse du 2 au 4 août). Le logiciel se base sur un calcul simple :

Rendement = nombre moyen de fruits par arbre x poids moyen des fruits x nombre d'arbres

Le nombre moyen de fruits / arbre était compté manuellement jusqu'à présent voire même estimé à l'œil. Maintenant on va pouvoir utiliser Méc@vision.

Le poids moyen des fruits à la récolte pouvait s'estimer en fonction des années passées mesurées au Ctifl (comme dans [Atay et al., 2009](#)). Ce qu'a apporté PRÉVAQUI, c'est la prédiction des calibres à la récolte à partir des calibres mesurés en juillet ([Marini, 2001](#)). Les calibres mesurés en juillet se répartissent dans l'espace autour de la courbe de croissance théorique du fruit (spécifique à chaque variété, [Opara, 2000](#)) et sont renvoyés par translation à leurs calibres à la récolte ([Figure 23](#)). On peut ainsi calculer les échelles de calibre à la récolte. Ensuite il existe une relation poids/calibre pour chaque variété qui permet de calculer le poids moyen en fonction des calibres moyens (principale source de variabilité dans les résultats ; [De Silva et al., 2000](#)).

L'extrapolation au verger se fait simplement en fonction de la densité de plantation des arbres. On a ainsi une bonne estimation des calibres et des rendements de la parcelle sans avoir à réaliser un modèle très complexe (par exemple, de production de biomasse par simulation de croissance nocturne et diurne, [Fishman and Génard, 1998](#)).

L'hypothèse faite par le logiciel est l'absence d'interaction du mois de juillet à la récolte entre la croissance du fruit et les conditions météorologiques et/ou l'âge du verger. De même pour la relation poids/calibre, il ne doit y avoir que des interactions avec le nombre de cellules des fruits (et donc suivant les conditions météorologiques de sa formation ; [Corelli-Grappadelli and Lakso, 2004](#)).

2. Méc@vision

Le logiciel Méc@vision est en développement depuis 3 ans maintenant dans le cadre d'un projet Casdar (réduction des intrants) sur l'éclaircissage du pommier. Ce logiciel devrait permettre de simplifier et fiabiliser les comptages (en augmentant les répétitions) en vue d'améliorer les éclaircissages mécanique et chimique. Tout comme Assess®, il peut permettre d'analyser les couleurs rouge et blanche afin de compter le nombre de boutons floraux (stade boutons rouges E2) ou l'intensité de la floraison (stade F2 suivant la quantité de blanc) ou compter les pommes.

L'un des principes de localisation des pommes est basé sur sa circularité puisque lorsque le flash frappe un fruit, la lumière reflétée est dispersée dans toutes les directions ([Figure 24](#)). Pour repérer ce phénomène, le logiciel utilise la transformée Hough radiale (technique de reconnaissance de formes inventée en 1962 par Paul Hough, très utilisée en analyse d'images). Le comptage peut être très précis suivant l'environnement direct du fruit ; s'il est en partie recouvert par des feuilles cela peut provoquer des oublis de comptage du logiciel.

Bien évidemment les prises de vue sont faites à distance fixe de l'arbre, sur une surface fixe de l'arbre (grâce à un cadre de 1 m² de surface) et avec les mêmes réglages de l'appareil photo et du flash (ISO 200, Vitesse d'obturation 1/3200^{ème}, Diaphragme F8, Flash Speedlite 580 EXII intensité maximum).

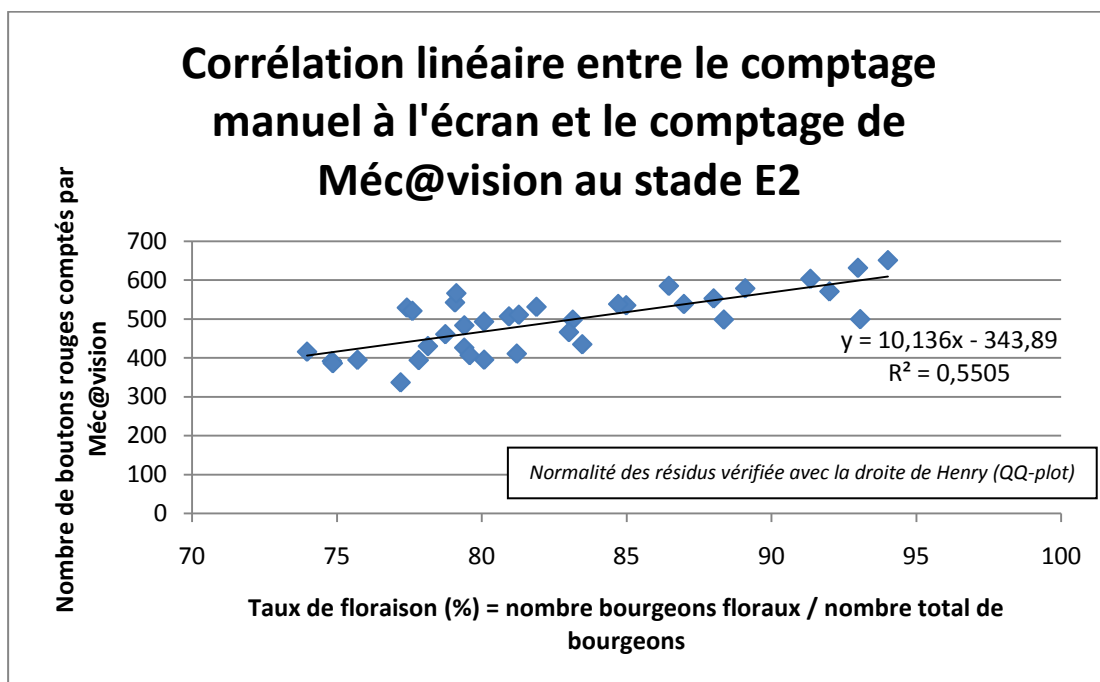


Figure 25 : Représentation graphique de la corrélation existante entre le comptage manuel à l'écran et celui effectué par Méc@vision lors de la phase pré-floraison (stade E2 en parcelle Sa)



Figure 26 : Photographie (A.Marceron) après utilisation de Méc@vision qui a repéré les pommes (cercles jaunes), éliminé les feuilles ayant reflétées la lumière (cercles rouges) et comptabilisé le nombre total de pommes

L'automatisation du logiciel est en cours de réalisation afin de ne plus avoir à passer manuellement les photos dans le logiciel. Le but est de laisser le logiciel traiter un dossier de photographies de la parcelle et donner les résultats de comptage et de diamètre sous base de données.

B. Résultats et prévisions pour l'avenir

Au stade E2 ou boutons rouges (Figure 25), le comptage des boutons rouges par Méc@vision est corrélé au comptage manuel sur les photos mais surtout au taux de floraison. Ceci peut facilement donner un ordre d'idée de l'importance de la floraison avant même l'ouverture des boutons.

$$\text{Taux de floraison} = \frac{\text{nombre de bourgeons floraux}}{\text{somme des bourgeons floraux et végétatifs}}$$

Par contre, contrairement aux années précédentes, il n'y a pas de corrélation entre le nombre de boutons floraux et le nombre de pixels blancs comptés par Méc@vision. A cause de l'étalement de la floraison (temps maussade) et suivant l'ouverture, l'orientation ou la fanaison des fleurs, celles-ci ne possèdent pas continuellement le même nombre de pixels blancs dans le plan du mur (lorsque l'on prend des prises de vue). De plus au sein d'un corymbe, la floraison aussi est décalée dans le temps, ce qui peut provoquer ensuite des différences de tailles des fleurs (Bangerth, 2000).

Méc@vision (Figure 26) repère les fruits (cercles jaunes) même s'ils se trouvent en partie masqués derrière des feuilles, il repère aussi des feuilles ayant reflété la lumière et les élimine à cause de leur non-circularité (cercles rouges). La précision de la mesure dépend principalement du diamètre du fruit (Figure 27), mais aussi de quelques conditions météorologiques (vent, pluie). A partir du 14 juin, les différences de comptage sont inférieures à 10 fruits et les corrélations ont des coefficients supérieurs à 0,9 ; permettant une bonne estimation en comptage par Méc@vision.

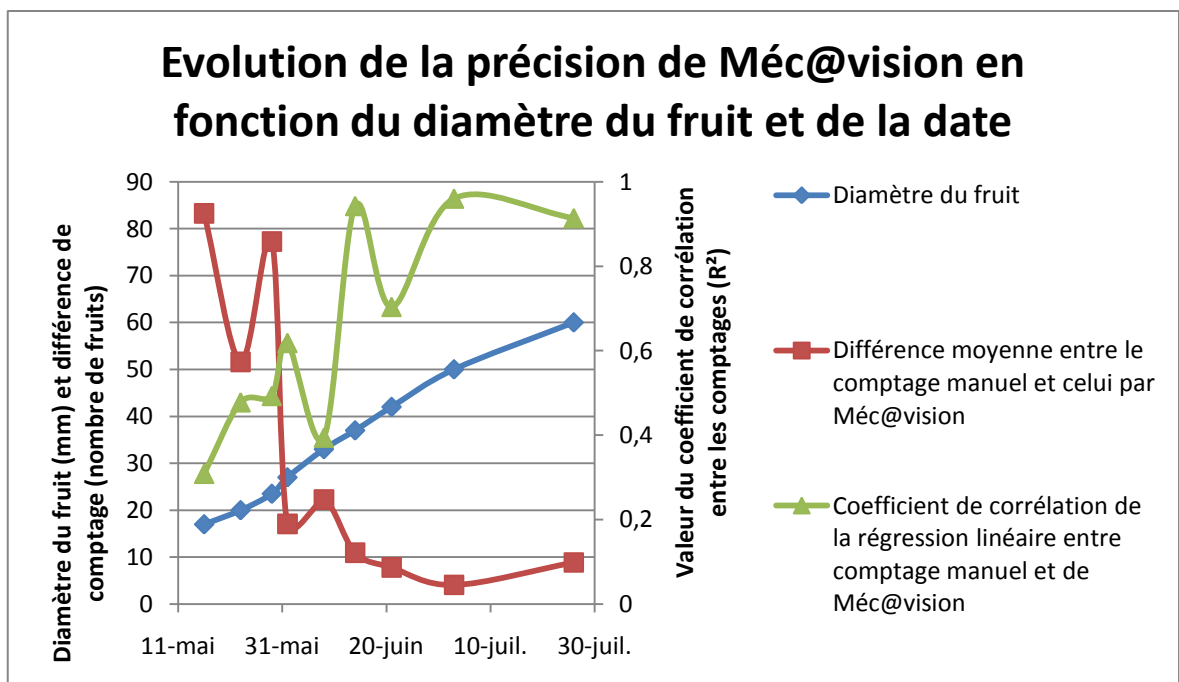


Figure 27 : Représentation graphique de la précision de comptage de Méc@vision

En ce qui concerne PRÉVAQUI, les résultats sur les prévisions de rendements et les rendements réels ne peuvent être présentés à l'écrit puisque les fruits n'ont pas été récoltés. Si les résultats sont intéressants à développer, ils seront présentés lors de l'oral.

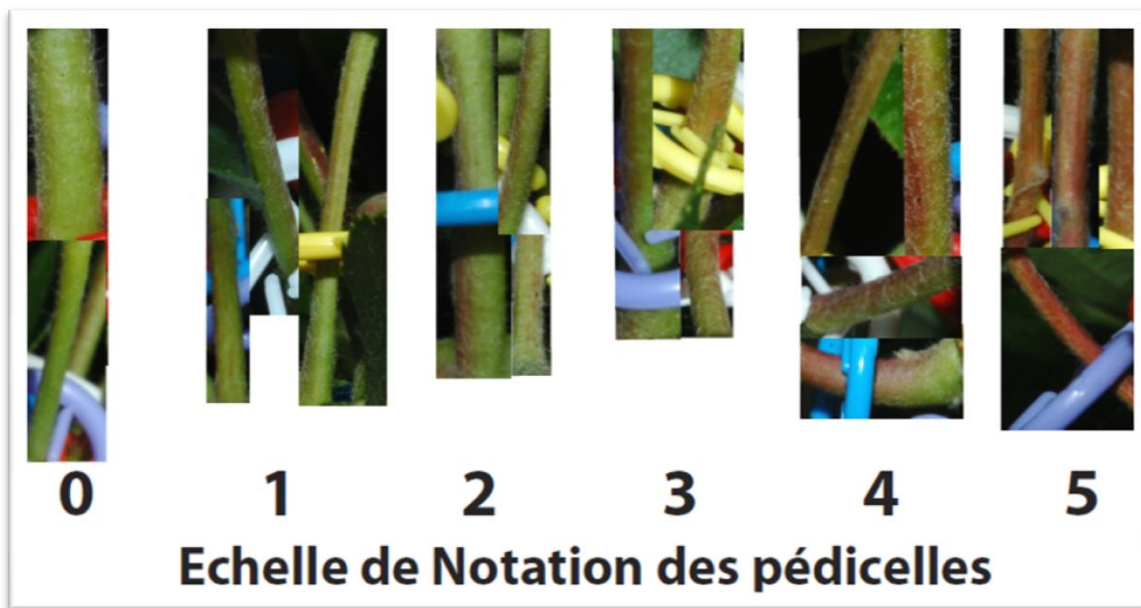


Figure 28 : Montage photographique (A.Marceron) servant d'échelle lors de la notation de la coloration rouge des pédicelles de la parcelle Ra

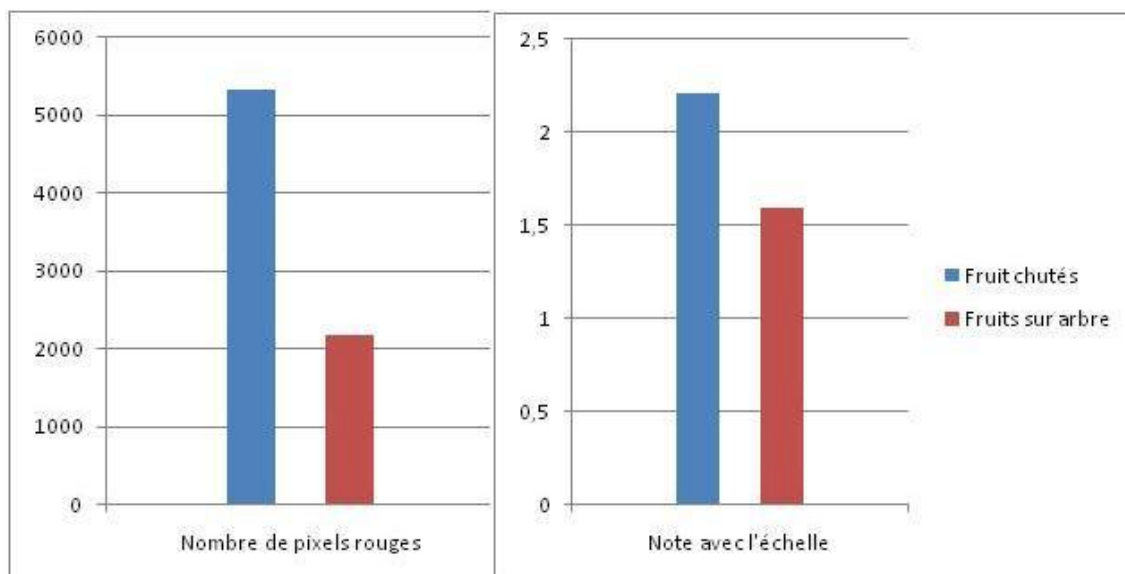


Figure 29 : Représentations graphiques du nombre de pixels rouges (à gauche) et de la note moyenne sur l'échelle pour des fruits ayant résistés ou non à la chute physiologique (photographies prises le 18 mai)

VI. Approche 4 : recherche d'indicateurs en vue de modélisation

Au niveau du producteur, s'il était possible d'avoir un unique indicateur simple à étudier qui permettrait d'évaluer la chute naturelle, ce serait parfait. L'étude d'un seul indicateur est plutôt réductrice, mais si son estimation est correcte sans être parfaite, elle est suffisante.

A. Couleur des pédicelles

1. Méthodes de mesures

Des photographies ont été prises pour pouvoir juger objectivement la couleur des pédicelles. Les photos ont été prises une fois par semaine à partir de la chute de nouaison. Elles ont été prises sur les corymbes que l'on suivait pour le diamètre avec la même prise de vue et les mêmes réglages (ISO 200).

L'analyse des pédicelles a été faite de deux manières différentes : de manière arbitraire par un logiciel (Assess 2.0 "Image Analysis Software for Plant Disease Quantification") et de manière subjective avec une notation par une échelle de couleur. Le logiciel a permis de mesurer la surface que représentaient les pixels rouges (numéro couleur 80). L'échelle de couleurs (Figure 28) faite par cette analyse est la suivante : 0 pour un pédicelle totalement vert et 5 pour un pédicelle complètement rouge.

2. Résultats

De manière globale (Figure 29), les fruits allant chuter possèdent plus de pixels rouges (150% de pixels en plus) et paraissent plus rouges (note supérieure de 0,5). Pourtant si on réalise une régression linéaire, il n'y a pas de corrélation entre la pigmentation et la chute du fruit.

En utilisant l'outil de prédiction sous R® (Lda), la coloration en pixels et la notation visuelle de la couleur donnent une prédiction avec en moyenne 45 % d'erreurs. La qualité de ce critère pour la prédiction est très remise en cause.

Ce qui paraît plus clair sur la coloration du pédicelle est le fait qu'un corymbe avec un environnement lumineux (ensoleillé) possède une coloration plus importante qu'un corymbe dans l'ombre, ceci n'a pu qu'être remarqué sans être quantifié dans cette étude ; c'est aussi valable pour le fruit (Jung and Choi, 2010).

De plus au niveau variétal, il devrait exister un grand différentiel en fonction de la couleur, de la date d'apparition et de la surface colorée ; ce qui peut poser de gros problèmes pour généraliser ce critère de prévision.



Figure 30 : Photographie (A.Marceron) d'un pochon à éthylène utilisé au départ pour capturer les émissions d'éthylène

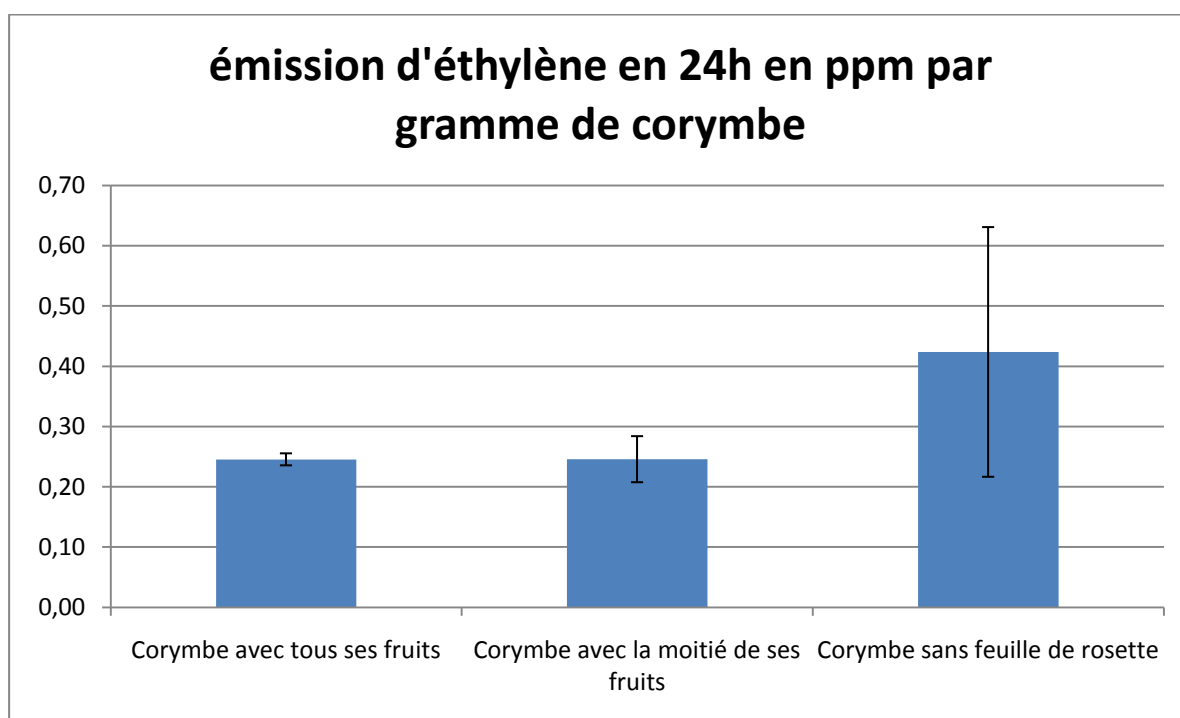


Figure 31 : Histogramme des émissions d'éthylène après le passage de Darwin® en parcelle Sa

B. Dégagement d'éthylène

1. Méthodes de mesures

Pour réaliser les mesures d'émission d'éthylène, il n'a pas été possible de réaliser des mesures aussi précises (au niveau tissulaire) que dans la bibliographie (Beyer and Morgan, 1970 ; Blanpied, 1972). Cependant l'objet d'étude est le corymbe entier, c'est pourquoi la précision au niveau tissulaire n'est peut-être pas nécessaire. L'utilisation d'un analyseur d'éthylène Absoger EASI-1 permet de mesurer C_2H_4 sur une plage de mesure de 0,01 ppm à 100 ppm. Afin d'utiliser au mieux les potentialités de la machine et d'étudier des émissions assez faibles, il a fallu créer un protocole expérimental adapté à notre échelle d'étude et à nos modalités.

Les premiers tests furent de mettre des pochons étanches sur des branches (4-5 corymbes) en verger pendant 24 h (Figure 30) et d'étudier le contenu gazeux de la poche. Les résultats préliminaires n'ont pas montré de différence d'émission entre des corymbes avec ou sans fruit chutant à la nouaison (Figure 31). Par contre, l'ordre d'idée des valeurs est semblable à la bibliographie sur l'action de Darwin® (Kong et al., 2009). Pourtant on était censé trouver déjà des différences à la nouaison suivant le taux de chute (Dal Cin, 2005) : mais le gel ayant provoqué la chute de quasi tous les fruits, cela a dû niveler les émissions de C_2H_4 .

De plus, cette méthode provoque un stress environnemental autour des corymbes à cause des pochons (augmentation de l'humidité et de la température, diminution du taux de CO_2). Ensuite en ce qui concerne la chute de juin, cette méthode ne nous a pas permis de prédire que telle ou telle branche allait perdre plus de fruits qu'une autre.

Une autre méthode a été testée pour vérifier la validité de la machine : elle consiste à cueillir 15 corymbes et à les enfermer dans un pochon étanche pour ensuite suivre toutes les heures les émissions de gaz. Cette méthode avait été utilisée en 2011 au CEFEL par Jean-François Saint-Hilary, donnant déjà des résultats très prometteurs. Elle permet de montrer de grandes variations d'émission d'éthylène entre les modalités.

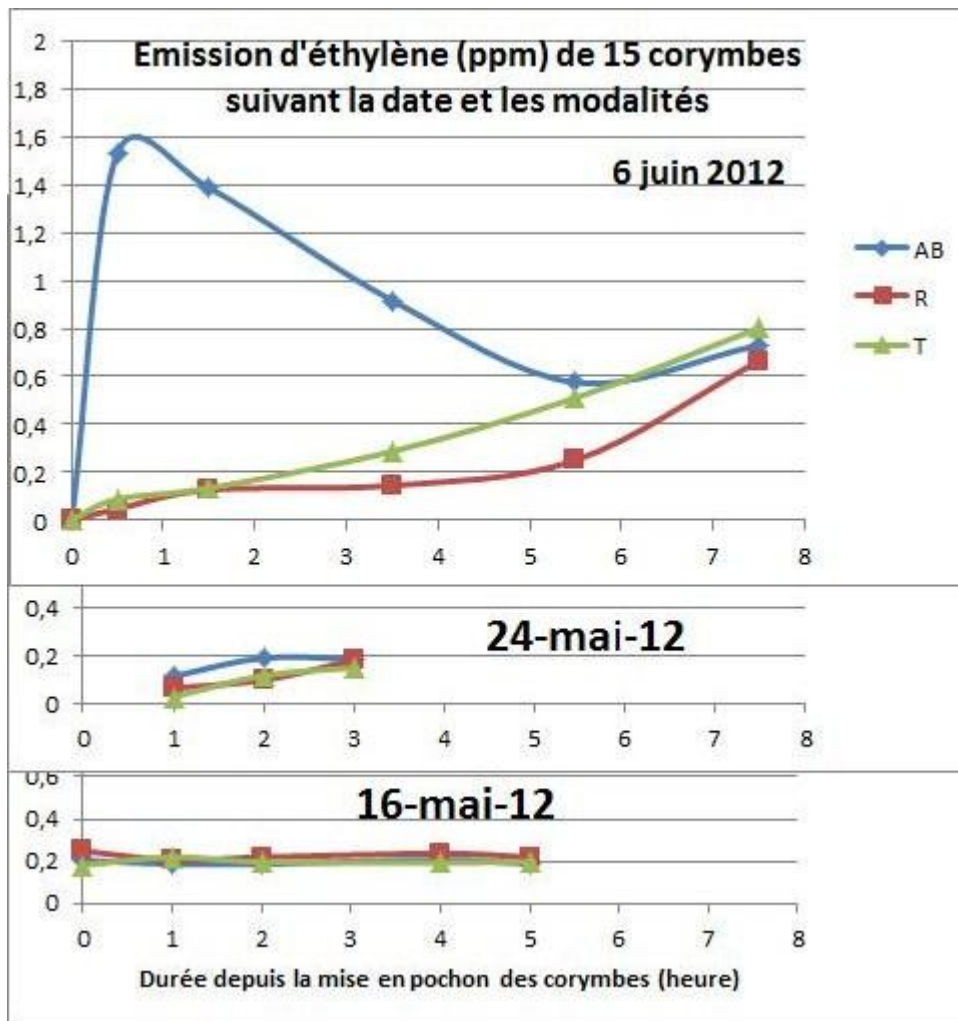


Figure 32 : Représentations graphiques des émissions d'éthylène de 15 corymbes après prélèvement à trois dates différentes après traitements chimiques (le 10 mai)

2. Résultats

Après prélèvement, les corymbes dégagent de l'éthylène puisqu'ils sont en stress hydrique. Quand ils sont déjà en production d'éthylène pour faire chuter les fruits, ils en produisent encore plus (Figure 32). La modalité AB (traitement avec ANA-BA) a provoqué une production d'éthylène 8 fois supérieure à la normale. Ceci se retrouve dans la bibliographie puisque BA provoque une surproduction d'éthylène (McArtney, 2002).

La méthode permet bien de repérer les corymbes qui vont perdre plus ou moins de fruits (la modalité AB perdra plus de fruits). Cependant cette production n'apparaît qu'en juin lors de l'abscission (Blanpied, 1972 ; donc il ne peut-être en aucun cas un indicateur de prévision. C'est un effet qui arrive *a posteriori* (« a later effect » selon Bangerth, 2005) des mécanismes internes.

C. Pépins

1. Méthodes de mesures

La mesure des pépins a été faite sur les fruits sur l'arbre et sur les fruits chutés toutes les semaines à partir de la nouaison (sur 50 fruits par modalité). Il a été mesuré le nombre de pépins par fruit, le nombre de pépins viables et avortés, le poids du fruit, le poids des pépins viables et quelques fois le diamètre du fruit. La balance avait une précision de $d = 0,001$ g.

2. Résultats

Il existe une corrélation positive entre le poids du fruit et le poids des pépins viables (Figure 33), ce qui est assez logique : plus le fruit est gros (poids), plus les pépins se sont développés aussi. C'est encore vrai si l'on étudie le poids moyen des pépins ; plus le poids moyen est élevé, plus le fruit est gros.

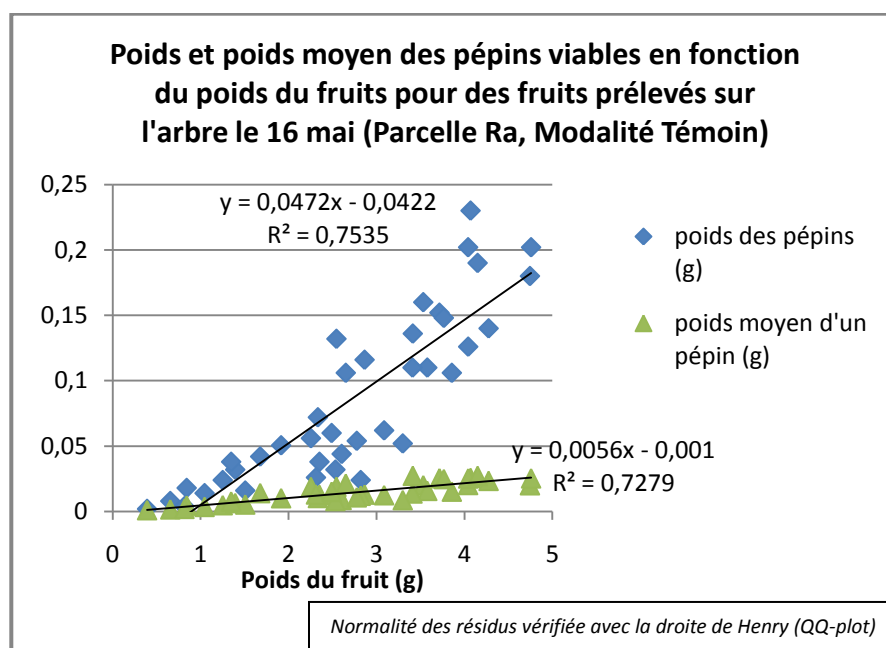


Figure 33 : Représentation graphique des corrélations entre le poids ou le poids moyen des pépins et le poids du fruit

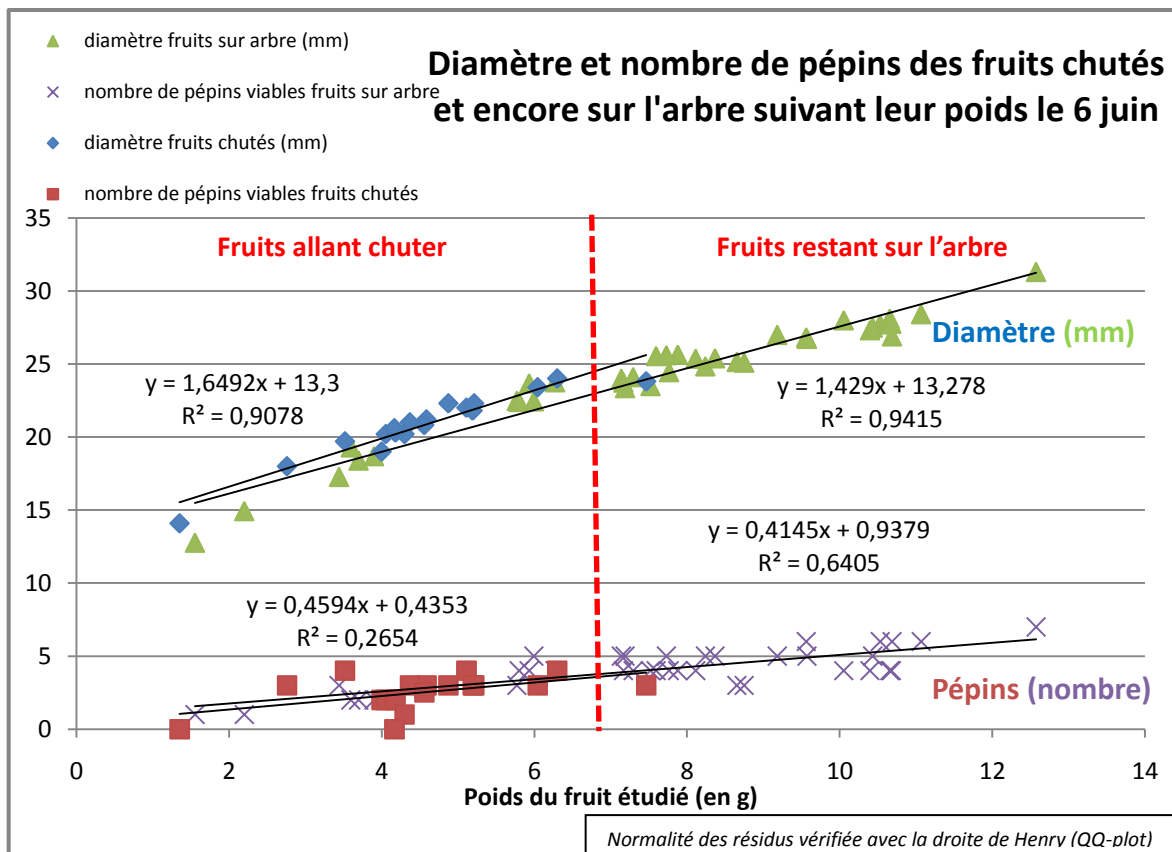


Figure 34 : Représentation graphique du diamètre et du nombre des pépins pour les fruits chutés et encore sur l'arbre (Parcelle Ra)

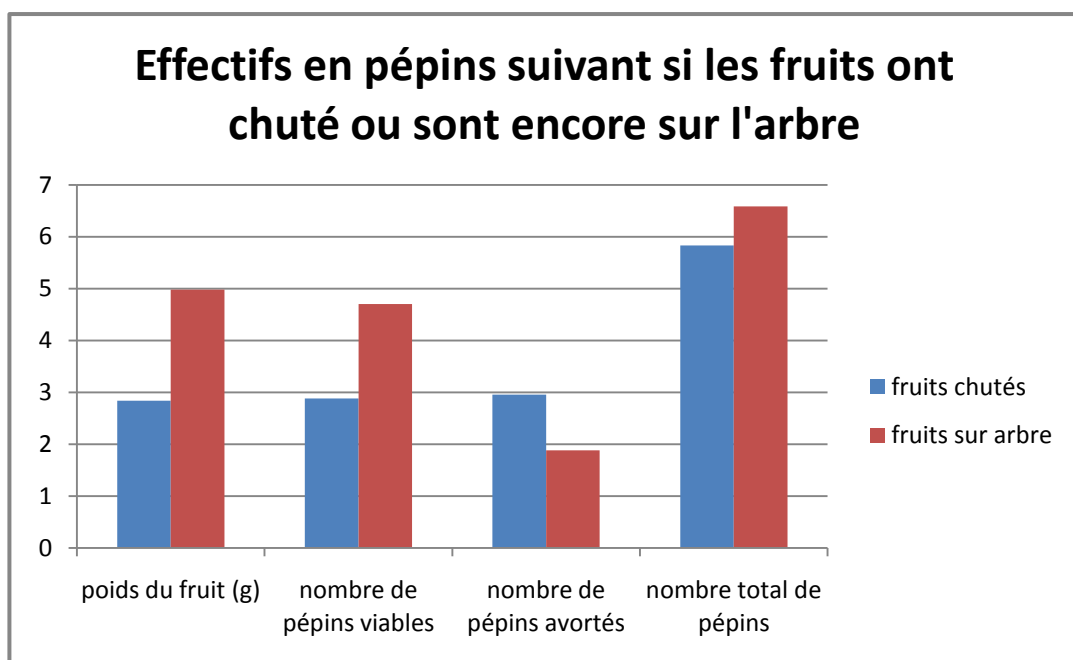


Figure 35 : Histogramme du poids du fruit, du nombre de pépins viables, avortés ou total pour les fruits chutés ou ceux sur l'arbre

Plus il y a de pépins viables, plus le fruit est gros (corrélation existante dans la bibliographie [Yuan and Greene, 2000\(b\)](#) et visible sur la [Figure 34](#)).

Tout comme le poids, le diamètre est corrélé positivement au nombre de pépins viables ([Figure 34](#)). Bien évidemment les fruits plus petits ayant moins de pépins « attirent » par la force de puits moins de carbohydrates à cause d'un nombre inférieur de pépins.

Les fruits chutés possèdent en moyenne moins de pépins viables que les fruits restant sur l'arbre ; quasiment deux pépins de moins en moyenne ([Figure 35](#)). Par contre, le nombre total de pépins (somme des pépins viables et avortés) est identique (montré dans [Yuan and Greene, 2000\(a\)](#)). Dans la bibliographie, on retrouve cela dans [Yuan and Greene, 2000\(b\)](#), il y a modification du rapport pépins viables / pépins avortés, après traitement chimique, sans pour autant modifier le nombre total de pépins (celui-ci étant fixé par la fécondation lors de la pollinisation). Dans les conditions naturelles, la sélection se fait de la même manière ; les fruits ayant peu de pépins viables ont plus de chance de chuter.

Autre résultat très intéressant, c'est le rapport poids/diamètre ([Figure 36](#)). Il est beaucoup plus faible pour les fruits ayant chutés et aussi ceux qui vont chuter pendant et avant la chute (en juin) que ceux qui vont rester sur l'arbre. L'explication la plus probable de cette perte de poids est la déshydratation (perte d'eau par la peau) des fruits en chute ou l'extraction de l'eau et des nutriments avant la chute (afin de récupérer au maximum les réserves qui avaient été accumulées dans le fruit). Ce rapport s'il peut être mesuré en verger après la nouaison de manière non destructive (plutôt difficile pour la pesée) pourrait être un indicateur précoce de redirection des substances du fruit avant sa chute.

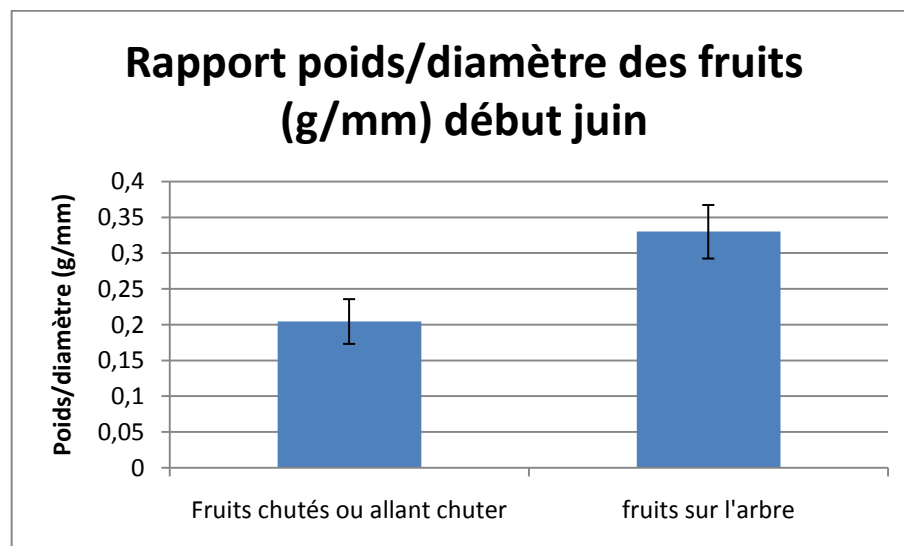


Figure 36 : Relation entre le poids et le diamètre différente suivant les fruits pour la parcelle Ra toute modalité confondue

Tableau 11 : Régression linéaire du poids du fruit en fonction du nombre de pépins viables et avortés pour la modalité Témoin de la parcelle Ra

| Régression linéaire du poids du fruit | Estimate | Std.Error | tvalue | Pr(> t) | |
|---------------------------------------|----------|-----------|--------|----------|-----|
| (Intercept) | 2,86702 | 0,58435 | 4,906 | 2,09e-06 | *** |
| Nombre de pépins viables | 0,44352 | 0,09879 | 4,489 | 1,28e-05 | *** |
| Nombre de pépins avortés | -0,30273 | 0,11647 | -2,599 | 0,0101 | * |

Tableau 12 : Régression linéaire de la chute en fonction du poids et du nombre de pépins viables et avortés pour la modalité Témoin de la parcelle Ra

| Régression linéaire de la chute probable | Estimate | Std.Error | tvalue | Pr(> t) | |
|--|----------|-----------|--------|----------|-----|
| (Intercept) | 1,90923 | 0,61326 | 3,113 | 0,001850 | ** |
| Nombre de pépins avortés | 0,08430 | 0,11017 | 0,765 | 0,444138 | |
| Nombre de pépins viables | -0,35954 | 0,10906 | -3,297 | 0,000979 | *** |
| Poids du fruit | -0,32134 | 0,08784 | -3,658 | 0,000254 | *** |

Tableau 13 : Résultat des coefficients affectés aux variables de mesure des pépins par modélisation par Lda sur la chute et sa matrice de confusion moyenne

| Modélisation par Lda | Coefficients du modèle | Matrice de confusion moyenne | | | |
|--------------------------|------------------------|------------------------------|---------------|-------------------|----|
| Poids du fruit | -0,24144813 | . | Prédit chutés | Prédit non chutés | |
| Nombre de pépins viables | -0,31036595 | . | Chutés | 61 | 9 |
| Nombre de pépins avortés | 0,08690076 | . | Non chutés | 1 | 29 |

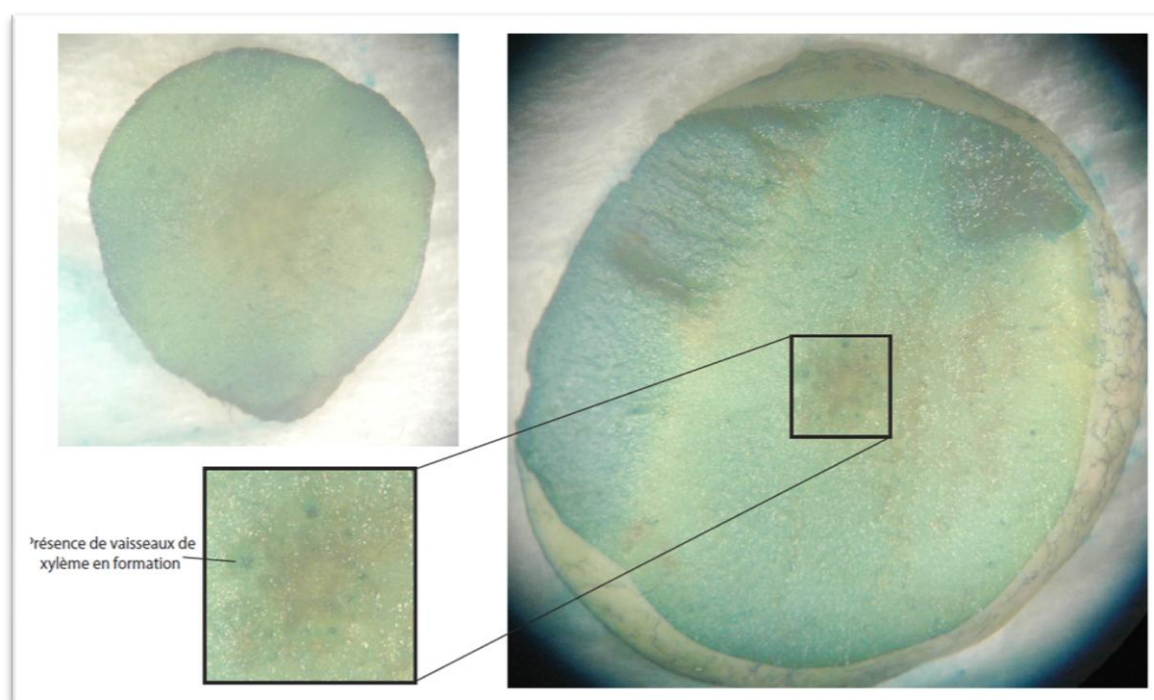


Figure 37 : Photographies (A.Marceron) de coupes colorées au bleu de méthylène de fruits allant (à gauche) ou non (à droite) chutés

Il existe une corrélation entre le poids du fruit et le nombre de pépins au sein de celui-ci (**Tableau 11**) : corrélation positive avec le nombre de pépins viables et corrélation négative avec le nombre de pépins avortés. Pourtant certains n'ont montré aucune corrélation entre ces variables (Abruzzese *et al.*, 1995 ; Lee Ward, 2004).

Par la même méthode, il est possible de montrer le lien entre une chute probable (critère choisi en fonction de la taille du fruit, voir partir sur la croissance du fruit) et les variables poids et nombre de pépins viables du fruit (**Tableau 12**).

C'est pourquoi il a été décidé d'essayer de modéliser ces variables afin de prédire la chute (**Tableau 13**). Tout comme précédemment en modélisation Lda, le pourcentage d'erreurs est plutôt élevé (27 % (+/- 10 %) d'erreurs de classification dans le bon groupe) mais la modélisation renseigne sur l'importance de ces variables dans le phénomène de chute physiologique.

Bien évidemment, un nombre important de pépins viables évite une chute du fait de la production par ceux-ci de GA (acide gibbérellique) bloquant l'abscission (Dennis, 1976 ; Callejas and Bangerth, 1997 ; Prang *et al.*, 1997 ; Greene, 2000 ; Schröder and Bangerth, 2006). Par contre, cet acide gibbérellique a un effet négatif sur le développement des bourgeons floraux puisqu'il inhibe leur formation. En conséquence, une forte présence de fruits (donc d'acide gibbérellique) provoque un mauvais retour à fleur l'année suivante et en définitive une forte alternance (Stutte and Gage, 1990 ; Dennis and Neilsen, 1999 ; Koutinas *et al.*, 2010).

D. Vascularisation

1. Méthodes de mesures

Afin d'étudier la vascularisation comme dans Drazeta *et al.*, 2004(a et b) des coupes ont été faites dans les petits fruits et dans les pédicelles. Ensuite les coupes ont été rincées dans de l'eau de javel, puis plongées dans un bain au bleu de méthylène pendant 2 heures et finalement rincées à l'eau de javel avant d'être montées sur une lame et étudiées à la loupe binoculaire ou au microscope faible grossissement.

2. Résultats

Le bleu de méthylène est censé colorer les éléments lignifiés, dans notre cas uniquement les vaisseaux du xylème. Le problème est l'absence de vaisseaux après la nouaison, puisque la différenciation cellulaire n'apparaît que plus tard. La coloration n'a que peu fonctionné.

Le principal résultat est que les fruits en retard de croissance (plus petits en taille), sont aussi en retard en ce qui concerne la différenciation en vaisseaux du xylème. Ce qui apparaît (**Figure 37**) nettement est l'absence ou la moindre présence de vaisseaux dans les petits fruits.

A noter : il n'y a pas de différence notable entre les modalités de Ra.

Le protocole expérimental n'était pas adapté à notre recherche d'indicateur. Par contre, les essais menés à Angers (INRA) sur la remontée de fluide dans le pétiole ou le fruit auraient donné de bons résultats. Dans ce cas, après analyse des résultats avec eux, pourquoi ne pas utiliser cet indicateur par la suite puisqu'il est directement relié à l'apport des carbohydrates ?

VII. Discussion générale

Malgré le gel printanier de 2012, les résultats obtenus lors de ce stage sont très complets et ont permis de balayer un large éventail d'hypothèses en ce qui concerne la chute physiologique et l'évaluation de la charge des arbres. Les résultats précédemment présentés vont permettre de diriger les futures recherches en les orientant vers les pistes ayant montré les potentiels les plus importants.

Les modèles explicatifs (ou mécanistiques) sont ceux qui donnent les meilleurs résultats après une saison d'expérimentation :

Le rapport feuille/fruit est la seule piste qu'il n'est pas possible de valider ou d'invalider puisque le gel a fait chuter quasiment tous les fruits. Il ne pouvait pas y avoir d'impact de ce rapport après une contrainte aussi forte que le gel. Cependant si l'on doit poursuivre l'étude dans ce sens, il faudrait réaliser des modalités ayant plus de variations dans le rapport feuille/fruit. Pour les modalités Témoin et de Darwin®, les rapports feuille/fruit étant proches, ils ne permettent pas d'étudier l'impact du rapport sur la chute physiologique. Pour cela, il faut créer des modalités avec la suppression manuelle de fleurs et de feuilles à différentes intensités.

Pour l'étude de la croissance relative des jeunes fruits par corymbe, les résultats sont très prometteurs et permettent d'estimer la chute *a posteriori*. Ce qu'il faut faire maintenant, c'est réitérer ces mesures afin de pouvoir juger de l'efficacité de la prévision *a priori* sur une autre année. Par contre, l'essai sur d'autres variétés doit se faire avec précaution, car il risque d'y avoir des différences inter-variétés en ce qui concerne la croissance (Lakso *et al.*, 2006(b)).

De même, l'indice Brix, taux de sucres des jeunes fruits par corymbe, est un indicateur prometteur. Mais il n'a été utilisé que sur un courte période, sur une seule variété et sur une année particulière. Il faut à nouveau tester cet indicateur en réitérant l'expérience sur d'autres années et pourquoi pas sur d'autres variétés. Il a déjà été montré comme utilisable dans Abruzzesse *et al.*, 1995.

Par contre, les modèles corrélatifs simples basés sur un indicateur ont donné des résultats beaucoup moins bons :

La couleur des pédicelles est un marqueur n'ayant pas montré de grand intérêt au vu des résultats. Pourtant l'analyse des couleurs s'est faite de manière subjective avec une échelle de couleur et aussi de manière objective avec l'utilisation d'un logiciel d'analyse d'images mais sans résultat utilisable. Donc il ne paraît pas utile de continuer d'autres mesures dans ce sens.

De même pour les émissions d'éthylène qui arrivent beaucoup trop tard pour que ce soit un indicateur de prévision. Elles pourraient tout au plus être estimées d'une manière indirecte lors de la chute la propension que les fruits auraient à tomber mais ce n'est même pas certain (Walsh and Solomos, 1987).

La vascularisation n'a pas donné de vrai résultat faute d'une méthodologie adaptée. Si le Ctifl a l'occasion de réaliser à nouveau des mesures de vascularisation, il serait important de s'informer sur les méthodes qui ont permis à l'INRA d'Angers de faire une étude similaire.

Cependant, compter les pépins est une méthode qui a été en partie validée par la mesure de la croissance. Mais si l'on pouvait réaliser à nouveau des mesures en faisant varier la pollinisation afin de réaliser un comptage des pépins tout en étudiant le taux de chute ensuite, cela permettrait d'identifier pleinement l'importance de cet indicateur.

En somme, le comptage des pépins, du taux de sucres, de la croissance et du rapport feuille/fruit sont des mesures à poursuivre dans les années qui viennent sur plusieurs variétés et sur différentes modalités de pollinisation. Les prévisions de la chute physiologique qui combinerait au moins deux des indicateurs précédents auront un taux d'erreurs bien plus faible et pourront probablement réaliser des estimations précises pour des cas très différents.

Pour le modèle corrélatif climatique global, les résultats sont très fructueux et permettent d'obtenir une estimation globale de taux de fructification qui doit pouvoir posséder une bonne précision (< 5 %). Maintenant il est important de conserver de manière précise les relevés météorologiques ainsi que les données biologiques sur la chute des fruits. Dans l'objectif de réaliser un travail complet sur cette approche, il faudrait se mettre d'accord entre centres d'expérimentation afin de réaliser les mêmes mesures météorologiques (températures, PAR et précipitations) et expérimentales (pour éviter des incertitudes sur les dates de floraison et des absences de données de floraison, nouaison et fructification). L'association des données sur différentes variétés et différents sites devrait permettre d'étudier, plus finement que dans notre étude, les facteurs climatiques, afin de les classer en fonction de leurs interactions et de leur importance. Il faudrait ensuite combiner de manière subtile les facteurs climatiques (PAR, températures, précipitations) pour réaliser un modèle climatique global complet.

Dans la partie du modèle corrélatif de prévision de récolte, Méc@vision avec sa précision de comptage avant floraison peut faire partie des entrées du modèle afin de déterminer le potentiel de floraison en présence. De plus, en l'utilisant sur les fruits en croissance en association avec PRÉVAQUI, il permettra de confirmer les estimations faites par les autres modèles sur le nombre de fruits présents et sur leurs tailles.

L'utilisation combinée des modèles explicatifs et corrélatifs, des mesures d'indicateurs précis sur le terrain, des analyses de prévisions météorologiques et des prédictions de récolte, permettra d'étudier finement les productions afin de leur permettre d'optimiser leurs systèmes de culture. S'il est nécessaire d'étudier l'action des molécules éclaircissantes dans nos modèles, il suffira d'intégrer ceux déjà existants (pour l'éthephon, [Koen and Jones, 1985](#)). L'objectif final étant de concaténer ces modèles pour obtenir une prédiction de récolte avant même la floraison des arbres (grâce aux prévisions météorologiques à long terme).

Un travail de synthèse sur chaque partie de l'expérimentation a été effectué afin de décrire de manière précise les manipulations réalisées, les avancées possibles dans cette thématique d'étude et les objectifs en expérimentation pour les années suivantes.

De nouvelles recherches font avancer les connaissances sur la chute physiologique, par exemple [Botton *et al.*, 2011](#) a développé un modèle transcriptomique et métabolique de l'abscission qui permettra de mieux comprendre des cascades de phénomènes non mesurables. En Suisse, ils ont trouvé un nouvel indicateur pour prédire la chute par mesure du rayonnement du fruit (Near Infrared Measurements) avec l'outil PHAZIR NIR-Spectrometer ([Gölles *et al.*, 2012](#)) donnant des résultats intéressants.

Sitographie :

Agreste, 2007. Agreste - Enquête sur la structure des vergers en 2002 et 2007, 2 pages, <http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/verger2008T7.pdf> (consulté le 1/06/2012).

Agreste, 2010. Les importations de jus soutiennent la consommation de fruits. Agreste Synthèses – Fruits – Juin 2012 – n° 2012/118, 10 pages, http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf_synthese1181007.pdf (consulté le 1/06/2012).

Agreste, 2012. En 2012, marché délicat pour les fruits à pépins. Agreste Synthèses – Fruits – Juin 2012 – n° 2012/179, 4 pages, <http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/conjsynt179201206frui.pdf> (consulté le 1/06/2012).

Belrose, Inc, 2010. World Apple Review - 2010 Edition. <http://www.e-belrose.com/2010WorldAppleReview.html> (consulté le 1/06/2012).

Ephy, 2008. Intrans retiré: SEVIN L 85. <http://e-phy.agriculture.gouv.fr/spe/6600190-3143.htm> (consulté le 1/06/2012).

Bibliographie :

Abruzzese, A., Mignani, I. and Cocucci, S.M., 1995. Nutritional Status in Apples and June Drop. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 120(1):71-74.

Agatsuma, M. and Tamura, T., 1973. Change in the chemical compositions of apple fruit. Faculty of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo, Japan 57(3):331-340.

Archbold, D.D., Nosarzewski, M., WU, B. and Vuppapapati, P., 2011. Does Availability of Soluble Carbohydrate Reserves Determine Apple Fruit Set? *Acta Horticulturae* 903: IX International Symposium on Integrating Canopy, Rootstock and Environmental Physiology in Orchard Systems, pp. 795-801.

Ashley Kulhanek, B.A., 2009. User-Friendly Methods for Timing Integrated Pest Management Strategies: An Analysis of Degree-Day Models and Biological Calendars. Chapter 1: A history of Phenology: A review of an Agricultural Prediction Tool: Past, Present, and Future. Thesis of the Ohio State University 2009, 109 p.

Atay, E., Pirlak, L. and Atay, N., 2009. Determination of Fruit Growth in Some Apple Varieties. *Journal of Agricultural Sciences* 16:1-8.

Austin, P.T., Hall, A.J., Gandar, P.W., Warrington, I.J., Fulton, T.A. and Halligan, E.A., 1999. A Compartment Model of the Effect of Early-season Temperatures on Potential Size and Growth of 'Delicious' Apple Fruits.

Bangerth, F.K., 2000. Abscission and thinning of young fruit and their regulation by plant hormones and bioregulators. *Plant Growth Regulation* 31:43-59.

Bangerth, F.K., 2004. Internal Regulation of Fruit Growth and Abscission. *Acta Horticulturae* 636: Key Processes in the Growth and Cropping of Deciduous Fruit and Nut Trees, pp. 235-248.

Bangerth, F.K., 2005. A More Holistic View on the Hormonal Interactions among Different Organs in a Fruit Tree. *Acta Horticulturae* 671: IX International Pear Symposium, pp. 25-36.

Beers, E.H., Hull, L.A. and Grimm, J.W., 1987. Relationships Between Leaf: Fruit Ratio and Varying Levels of European Red Mite Stress on Fruit Size and Return Bloom of Apple. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 112(4):608-612.

Bepete, M. and Lakso, A.N., 1998. Differential Effects of Shade on Early-season Fruit and Shoot Growth Rates in 'Empire' Apple. *HortScience* 33(5):823-825.

Bertschinger, L., Stadler, W., Stadler, P., Weibel, F. and Schumacher, R., 1998. New methods of environmentally safe regulation of flower and fruit set and of alternate bearing of the apple crop. *Acta Horticulturae* 466: II Workshop on Pome Fruit, pp. 65-70.

Berüter, J. and Droz, Ph., 1991. Studies on locating the signal for fruit abscission in the apple tree. *Scientia Horticulturae* 46:201-214.

Beyer, E.M. and Morgan, P.W., 1970. A Method for Determining the Concentration of Ethylene in the Gas Phase of Vegetative Plant Tissues. *Plant Physiology*, 46:352-354.

Blanpied, G.D., 1972. A Study of Ethylene in Apple, Red Raspberry, and Cherry. *Plant Physiology* 49:627-630.

Botton, A., Eccher, G., Forcato, C., Ferrarini, A., Begheldo, M., Zermiani, M., Moscatello, S., Battistelli, A., Velasco, R., Ruperti, B. and Ramina, A., 2011. Signaling Pathways Mediating the Induction of Apple Fruitlet Abscission. *Plant Physiology* 155:185-208.

Bregoli, A.M., Fabbroni, C., Vancini, R., Galliano, A. and Costa, G., 2006. Results obtained on the efficacy of 6-BA alone, and in combination with other thinning agents from different apple producing areas of northern Italy. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research*, 14:23-38.

Bukovac, M.J., Sabbatini, P., Schwallier, P.G. and Schroeder, M., 2008. Characterizing the Interaction between NAA and BA on Apple Fruit Abscission and Development. *HortScience* 43(6):1794-1801.

Byers, R.E., Barden, J.A., Polomski, R.F., Young, R.W. and Carbaugh, D.H., 1990. Apple Thinning by Photosynthetic Inhibition. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 115(1):14-19.

Byers, R.E., 2002(a). Influence of Temperature and Darkness on Apple Fruit Abscission and Chemical Thinning. *Journal of Tree Fruit Production* 3(1):41-54.

Byers, R.E. and Carbaugh, D.H., 2002(b). Effects of Thinning Time on Yield, Fruit Size, and Return Bloom of 'York' and 'Golden Delicious' Apple Trees. *Journal of Tree Fruit Production* 3(1):55-62.

Calderón-Zavala, G., Lakso, A.N. and Piccioni, R.M., 2004. Temperature Effects on Fruit and Shoot Growth in the Apple (*Malus domestica*) Early in the Season. *Acta Horticulturae* 636: Key Processes in the Growth and Cropping of Deciduous Fruit and Nut Trees, pp. 447-453.

Callejas, R. and Bangerth, F., 1997. Is auxin export of apple fruit an alternative signal for inhibition of flower bud induction? *Acta Horticulturae* 463: VIII International Symposium on Plant Bioregulation in Fruit Production, pp. 271-276.

Casierra-Posada, F., Puerto, J.I.R. and Cárdenas-Hernández, J., 2007. La relación hoja :fruto afecta la producción, el crecimiento y la calidad del fruto en duraznero (*Prunus persica* L. Batsch, cv. 'Rubidoux'). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín* 60(1):3657-3669.

Cittadini, E.D., van Keulen, H., de Ridder, N., Vallés, M., Rodríguez, M. and Peri, P., 2008. Effect of Fruit-to-Leaf Area Ratio on Fruit Quality and Vegetative Growth of 'Bing' Sweet Cherry Trees at Optimal Leaf Area Index. *Acta Horticulturae* 795 V International Cherry Symposium, pp. 677-680.

Corelli-Grappadelli, L. and Lakso, A.N., 2004. Fruit Development in Deciduous Tree Crops as Affected by Physiological Factors and Environmental Conditions. *Acta Horticulturae* 636: Key Processes in the Growth and Cropping of Deciduous Fruit and Nut Trees, pp. 425-441.

Costa, G., Corelli-Grappadelli, L. and Bucchi, F., 2001. Studies on apple fruit abscission and growth as affected by cytokinins. *Acta Horticulturae* 557: VII International Symposium on Orchard and Plantation Systems, pp. 243-251.

Dal Cin, V., Danesin, M., Boschetti, A., Dorigoni, A. and Ramina, A., 2005. Ethylene biosynthesis and perception in apple fruitlet abscission (*Malus domestica* L. Borck).

- De Silva, H.N., Hall, A.J., Cashmore, W.M. and Tustin, D.S., 2000. Variation of Fruit Size and Growth within an Apple Tree and its Influence on Sampling Methods for Estimating the Parameters of Mid-season Size Distributions. *Annals of Botany*, 86:493-501.
- Dennis, F.G., 1976. Gibberellin-like Substances in Apple Seeds and Fruit Flesh. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 101(6):629-633.
- Dennis, F.G. and Neilsen, J.C., 1999. Physiological Factors Affecting Biennial Bearing in Tree Fruit: The Role of Seeds in Apple. *HortTechnology* July-September 9(3):317-322.
- Dennis, F.G., 2000. The history of fruit thinning. *Plant Growth Regulation* 31:1-16.
- Dennis, F.G., 2002. Mechanisms of Action of Apple Thinning Chemicals. *HortScience* 37(3):471-474.
- Dorigoni, A., Dallabetta, N. and Lezzer, P., 2008. Le alternative al carbaryl per il diradamento del melo. *L'Informatore Agrario* 9:52-55.
- Dorigoni, A., Lezzer, P., Micheli, F., Dallabetta, N. and Pasqualini, J., 2010. Diradare il melo a macchina: cosa sapere per farlo bene. *L'Informatore Agrario* 22:63-68.
- Dražeta, L., Lang, A., Cappellini, C., Hall, A.J., Volz, R.K. and Jameson, P.E., 2004(a). Vessel differentiation in the pedicel of apple and the effects of auxin transport inhibition. *Physiologia Plantarum* 120:162-170.
- Dražeta, L., Lang, A., Hall, A.J., Volz, R.K. and Jameson, P.E., 2004(b). Causes and Effects of Changes in Xylem Functionality in Apple Fruit. *Annals of Botany* 93:275-282.
- Eccher, T., Hajnajari, H., Di Lella, S. and Elli, A., 2008. Gibberellin Content of Apple Fruit as Affected by Genetic and Environmental Factors. *Acta Horticulturae* 774: International Symposium on Endogenous and Exogenous Plant Bioregulators, pp.221-227.
- Ferré, G., 2004. L'éclaircissage du pommier. *Centre Expérimental Horticole de Marsillargues*, 32 p.
- Ferree, D.C. and Palmer, J.W., 1982. Effect of Spur Defoliation and Ringing during Bloom on Fruiting, Fruit Mineral Level and Net Photosynthesis of 'Golden Delicious' Apple. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 107(6):1182-1186.
- Fishman, S. and Génard, M., 1998. A biophysical model of fruit growth: simulation of seasonal and diurnal dynamics of mass. *Plant, Cell and Environment* 21:739-752.
- Goffinet, M.C., Robinson, T.L. and Lakso, A.N., 1995. A comparison of 'Empire' apple fruit size and anatomy in unthinned and hand-thinned trees. *Journal of Horticultural Science* 70(3):375-387.
- Goldschmidt, E.E. and Lakso, A.N., 2005. Fruit tree models: scope and limitations. *Information and Communication Technology (ICT) Development and Adoption: Perspectives of Technological Innovation*, pp. 1-19.
- Gölles, M., Widmer, A., Stier, K. and Baumgartner, D., 2012. Predicting Natural Fruit Drop in Apple. *Agroscope Changins-Wädenswil*, poster 2012.

- Greene, D.W., 2000. Reducing Floral Initiation and Return Bloom in Pome Fruit Trees-Applications and Implications. HortTechnology October-December 10(4):740-743.
- Greene, W.G., 2008. The effect of Repeat Annual Applications of Prohexadione-calcium on Fruit Set, Return Bloom, and Fruit Size of Apples. HortScience 43(2):376-379.
- Guak, S., Kim, E.J., Kook, J.R and Choi, D.G., 2009. MaxCel® as a Postbloom Thinner for 'Hongro' and 'Fuji' Apples. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 50(3):181-187.
- Hehnen, D., Hanrahan, I., Lewis, K., McFerson, J. and Blanke, M., 2012. Mechanical flower thinning improves fruit quality of apples and promotes consistent bearing. Scientia Horticulturae, 134:241-244.
- Iglesias, D.J., Tadeo, F.R., Primo-Millo, E. and Talon, M., 2003. Fruit set dependence on carbohydrate availability in citrus trees. Tree Physiology 23:199-204.
- Janick, J., 1979. Chemicals Thinning of Apples. Horticultural Reviews 1:270-302.
- Janick, J., 1993. Bloom Delay in Deciduous Fruits. Horticultural Reviews 15:97-144.
- Jie, Z., Yuncong, Y., Streeter, J.G. and Ferree, D.C., 2010. Influence of soil drought stress on photosynthesis, carbohydrates and the nitrogen and phosphorus absorb in different section of leaves and stem of Fugi/M.9EML, a young apple seedling. African Journal of Biotechnology, 9(33):5320-5325.
- Jones, K.M., Bound, S.A., Oakford, M.J. and Gillard, P., 2000. Modelling thinning of Pome fruits. Plant Growth Regulation 31:75-84.
- Jonkers, H., 1979. Biennial bearing in apple and pear: a literature survey. Scientia Horticulturae 11:303-317.
- Jung, S.K. and Choi, H.S., 2010. Light penetration, growth, and fruit productivity in 'Fuji' apple trees trained to four growing systems. Scientia Horticulturae 125:672-678.
- Kaack, K. and Pedersen, H.L., 2010. Prediction of Diameter, Weight and Quality of Apple Fruit (*Malus domestica* Borkh.) cv. 'Elstar' using Climatic Variables and their Interactions. European Journal of Horticultural Science, 75(2):60-70.
- Kappel, F. and Brownlee, R., 2001. Early Performance of 'Conference' Pear on Four Training Systems. HortScience 36(1):69-71.
- Kelderer, M., Lardschneider, E. and Casera, C., 2009. Macchine per diradare il melo alla prova di efficacia. L'Informatore Agrario 8:54-57.
- Koen, T.B. and Jones, K.M., 1985. A model of ethephon thinning of Golden Delicious apples. Journal of Horticultural Science 60(1):13-19.
- Koike, H., Tamai, H., Ono, T. and Shigehara, I., 2003. Influence of Time of Thinning on Yield, Fruit Quality and Return Flowering of 'Fuji' Apple. Journal of the American Pomological Society 57(4):169-173.
- Kolaric, J., 2010. Abscission of young apple fruits (*Malus domestica* Borkh.): a review. Agricultura 7:31-36.
- Kong, T., Damerow, L. and Blanke, M., 2009. Einfluss selektiver mechanischer Fruchtbehangsregulierung auf Ethylensynthese als Stressindikator sowie Ertrag und Fruchtqualität bei Kernobst. Erwerbsobstbau 51(2) :39-53.

Kosina, J., 2008. Response of Two Apple Cultivars to Chemical Fruit Thinning. *Acta Horticulturae 774: International Symposium on Endogenous and Exogenous Plant Bioregulators*, pp.283-286.

Koutinas, N., Pepelyankov, G. and Lichev, V., 2010. Flower induction and flower bud development in apple and sweet cherry. *Biotechnology & Biotechnological Equipment* 24(1):1549-1558.

Lakso, A.N. and Johnson, R.S., 1990. A simplified dry matter production model for apple using automatic programming simulation software. *Acta Horticulturae 276 : II International Symposium on Computer Modelling in Fruit Research and Orchard Management*, pp. 141-149.

Lakso, A.N. and Corelli Grappadelli, L., 1992. Implications of pruning and training practices to carbon partitioning and fruit development in apple. *Acta Horticulturae 332: WOCCMAP I - Medicinal and Aromatic Plants Conference*, pp. 231-239.

Lakso, A.N., Corelli Grappadelli, L., Barnard, J. and Goffinet, M.C., 1995. An exponential model of the growth pattern of the apple fruit. *Journal of Horticultural Science* 70(4):389-394.

Lakso, A.N., Robinson, T.L., Goffinet, M.C. and White, M.D., 2001(a). Apple Fruit Growth Responses to Varying Thinning Methods and Timing. *Acta Horticulturae 557: VII International Symposium on Orchard and Plantation Systems*, pp.407-412.

Lakso, A.N., White, M.D. and Tustin, D.S., 2001(b). Simulation modeling of the effects of short and long-term climatic variations on carbon balance of apple trees. *Acta Horticulturae 557: VII International Symposium on Orchard and Plantation Systems*, pp. 473-480.

Lakso, A.N., Greene, D.W. and Palmer, J.W., 2006(a). Improvements on an Apple Carbon Balance Model. *Acta Horticulturae 707: VII International Symposium on Modelling in Fruit Research and Orchard Management*, pp. 57-61.

Lakso, A.N., Robinson, T.L. and Greene, D.W., 2006(b). Integration of Environment, Physiology and Fruit Abscission via Carbon Balance Modeling – Implications for Understanding Growth Regulator Responses. *Acta Horticulturae 727: X International Symposium on Plant Bioregulators in Fruit Production*, pp. 321-326.

Lakso, A.N., Robinson, T.L. and Greene, D.W., 2007. Using an Apple Tree Carbohydrate Model to Understand Thinning Responses to Weather and Chemical Thinners. *New York Fruit Quarterly* 15(3):16-19.

Lakso, A.N., 2011. Early Fruit Growth and Drop – the Role of Carbon Balance in the Apple Tree. *Acta Horticulturae 903: IX International Symposium on Integrating Canopy, Rootstock and Environmental Physiology in Orchard Systems*, pp. 733-742.

Lauri, P.E., Térouanne, E. and Lespinasse, J.M., 1996. Quantitative Analysis of Relationships between Inflorescence Size, Bearing-axis, Size and Fruit-set – An Apple Tree Case Study. *Annals of Botany* 77:277-286.

Lauri, P.E., Willaume, M., Larrive, G. and Lespinasse, J.M., 2004. The Concept of Centrifugal Training in Apple Aimed at Optimizing the Relationship between Growth and Fruiting. *Acta Horticulturae 636: Key Processes in the Growth and Cropping of Deciduous Fruit and Nut Trees*, pp. 35-42.

- Lauri, P.E., Kelner, J.J., Trottier, C. and Costes, E., 2010. Insights into secondary growth in perennial plants: its unequal spatial and temporal dynamics in the apple (*Malus domestica*) is driven by architectural position and fruit load. *Annals of Botany* 105:607-616.
- Lee Ward, D., 2004. Factors Affecting Preharvest Fruit Drop of Apple. Thesis in Virginia Polytechnic Institute and State University. Chapter One – Literature Review pp. 1-23 & pp. 92-103.
- Legave, J.M., Farrera, I., Alméras, T. and Calleja, M., 2008. Selecting models of apple flowering time and understanding how global warming has had an impact on this trait. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* 83:76-84.
- Lehnert, R. 2010. Effective fruit thinning: How to know when you've thinned enough. *Good Fruit Grower*, April-15th 2010.
- Marguery, P. and Sangwan, B.S., 1993. Sources of variation between apple fruits within a season, and between seasons. *Journal of Horticultural Science* 68(2):309-315.
- Marini, R.P., 2001. Estimating Mean Fruit Weight and Mean Fruit Value for Apple Trees: Comparison of Two Sampling Methods with the True Mean. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 126(4):503-510.
- Marini, R.P., 2003. Fruitlet size and position within the cluster influence apple fruitlet susceptibility to chemical thinners. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* 78(6):813-820.
- Mathieu, V., Gleizer, B., Breisch, H., Bouchez, G. and Berthoumieu, J.F, 2008. Le risque du gel de printemps : Expérimentation en cellules climatiques. *Infos-Ctifl-n :°247* p.33-36 et n :°248 p.22-25.
- McArtney, S.J., 2002. Ethylene Evolution from Detached Apple Spurs in Response to Chemical Thinners. *HortScience* 37(4):662-665.
- McArtney, S.J., 2011. Effects of 1-aminocyclopropane carboxylic acid on the rate of ethylene release from detached fruiting spurs and on fruit abscission in apple. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* 86(6):640-644.
- McQueen, J.C., Silvester, W.B. and Green, T.G.A., 2004. Carbohydrate Allocation in Apple Stems Can Be Altered by Fruit Load. *Acta Horticulturae* 636: Key Processes in the Growth and Cropping of Deciduous Fruit and Nut Trees, pp. 267-273.
- Meland, M., 2009. Effects of different crop loads and thinning times on yield, fruit quality, and return bloom in *Malus X domestica* Borkh. 'Elstar'. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology: ISAFRUIT Special Issue* 117-121.
- Monney, P., Sinoquet, H., Sonohat, G., Potel, A.M. and Lauri, P.E., 2012. Pommiers digitalisés pour mesurer l'influence du microclimat lumineux sur la qualité des fruits. *Revue suisse de Viticulture, Arboriculture, Horticulture* 44(2):122-129.
- Nosarszewski, M., Clements, A.M., Downie, A.B. and Archbold, D.D., 2004. Sorbitol dehydrogenase expression and activity during apple fruit set and early development. *Physiologia Plantarum* 121:391-398.
- Opara, L.U., 2000. Fruit Growth Measurement and Analysis. *Horticultural Reviews* 24:374-425.

- Prang, L., Stephan, M., Schneider, G. and Bangerth, F., 1997. Gibberellin signals originating from apple fruit and their possible involvement in flower induction. *Acta Horticulturae* 463: VIII International Symposium on Plant Bioregulation in Fruit Production, pp. 235-241.
- Pretorius, J.J.B., Wand, S.J.E. and Theron, K.I., 2004. Fruit and Shoot Growth Following Combined Girdling and Thinning of 'Royal Gala' Apple Trees. *Acta Horticulturae* 636: Key Processes in the Growth and Cropping of Deciduous Fruit and Nut Trees, pp. 401-407.
- Proctor, J.T.A. and Palmer, J.W., 1991. The role of spur and bourse leaves of three apple cultivars on fruit set and growth and calcium content. *Journal of Horticultural Science*, 66(3):275-282.
- Racsó, J., 2006. Crop Load, Fruit Thinning and their Effects on Fruit Quality of Apple (*Malus domestica* Borkh.). *Journal of Agricultural Sciences, Debrecen*, 2006/24, p. 29-34.
- Rademacher, W., 2004. Chemical Regulation of Shoot Growth in Fruit Trees. *Acta Horticulturae* 653: IX International Symposium on Plant Bioregulators in Fruit Production, pp. 29-32.
- Rademacher, W., Spinelli, F. and Costa, G., 2006. Prohexadione-Ca : Modes of Action of a Multifunctional Plant Bioregulator for Fruit Trees. *Acta Horticulturae* 727: X International Symposium on Plant Bioregulators in Fruit Production, pp. 97-106.
- Roberts, J.A., Whitelaw, C.A., Carranza-Gonzalez, Z.H. and McManus, M.T., 2000. Cell Separation Processes in Plants-Models, Mechanisms and Manipulation. *Annals of Botany*, 86:223-235.
- Robinson, T.L. and Lakso, A.N., 1989. Light interception, yield and fruit quality of 'Empire' and 'Delicious' apple trees grown in four orchard systems. *Acta Horticulturae* 243 IV International Symposium on Research and Development on Orchard and Plantation Systems, pp.175-184.
- Robinson, T.L., 2007. Common Mistakes in Planting and Establishing High-Density Apple Orchards. *New York Fruit Quarterly* 15(4).
- Robinson, T.L. and Lakso, A.N., 2011(a). Predicting Chemical Thinner Response with a Carbohydrate Model. *Acta Horticulturae* 903: IX International Symposium on Integrating Canopy, Rootstock and Environmental Physiology in Orchard Systems, pp. 743-750.
- Robinson, T.L. and Lakso, A.N., 2011(b). Advances in Predicting Chemical Thinner Response of Apple Using a Carbon Balance Model. *New York Fruit Quarterly* 19(1):15-20.
- Rosa, U.A., Cheetancheri, K.G., Gliever, C.J., Lee, S.H., Thompson, J. and Slaughter, D.C., 2008. An electro-mechanical limb shaker for fruit thinning. *Computers and Electronics in Agriculture*, 61(2):213-221.
- Roussos, P.A. and Gasparatos, D., 2009. Apple tree growth and overall fruit quality under organic and conventional orchard management. *Scientia Horticulturae* 123:247-252.

- Rudell, D.R., Mattinson, D.S., Fellman, J.K. and Mattheis, J.P., 2000. The Progression of Ethylene Production and Respiration in the Tissues of Ripening 'Fuji' Apple Fruit. *HortScience* 35(7):1300-1303.
- Sané, F., Guillermin, P., Mauget, J.C. and Delaire, M., 2012. Effects of Fruit Load and Intra-Inflorescence Competition of Fruits on Apple Growth during Fruit Development. *Acta Horticulturae* 932: XXVIII International Symposium on Plant Physiology from Cell to Fruit Production System, pp. 179-186.
- Schielin, M., 2012. Experience of mechanical thinning around the Bodensee. *European Fruitgrowers Magazine* 2012-03:20-21.
- Schönherr, J., Baur, P. and Uhlig, B.A., 2000. Rates of cuticular penetration of 1-naphthylacetic acid (NAA) as affected by adjuvants, temperature, humidity and water quality. *Plant Growth Regulation* 31:61-74.
- Schröder, M. and Bangerth, F., 2006. The Possible 'Mode of Action' of Thinning Bioregulators and its Possible Contribution to the Understanding of 'Thinning Variability' in Apples. *Acta Horticulturae* 727 : X International Symposium on Plant Bioregulators in Fruit Production, pp. 437-443.
- Siham, M., Bussi, C., Lescourret, F., Genard, M ;, Habib, R. and Gilreath, J., 2005. Pruning intensity and fruit load influence on vegetative and fruit growth in 'Alexandra' peach. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society* 118:266-269.
- Stopar, M., Resnik, M. and Pongrac, V.Z., 2001. Non-structural carbohydrate status and CO₂ exchange rate of apple fruitlets at the time of abscission influenced by shade, NAA or BA. *Scientia Horticulturae* 87:65-76.
- Stopar, M., 2006. Thinning of 'Fuji' apple trees with ethephon, NAD and BA, alone and in combination. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research*, 14:39-45.
- Stover, E., 2000. Relationship of Flowering Intensity and Cropping in Fruit Species. *HortTechnology* October-December 10(4):729-732.
- Stutte, G.W. and Gage, J., 1990. Gibberellin Inhibits Fruit Abscission Following Seed Abortion in Peach. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 115(1):107-110.
- Sun, L., Bukovac, M.J., Forsline, P.L. and van Nocker, S., 2009. Natural variation in fruit abscission-related traits in apple (*Malus*). *Euphytica* 165:55-67.
- Szücs, E. and Kállay, T., 2008. Interaction of nutrient supply and crop load of apple trees (*Malus domestica* Borkh.). *International Journal of Horticultural Science* 14(1-2):33-35.
- Talamini do Amarante, C.V., Steffens, C.A., Mafra, A.L. and Albuquerque, J.A., 2008. Yield and fruit quality of apple from conventional and organic production systems. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 43(3):333-340.
- Taylor, J.E. and Whitelaw, C.A., 2001. Signals in abscission. *New Phytologist* 151:323-339.
- Treder, W., 2010. Crop loading studies with 'Jonagold' apple tree. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research*, 18(1):59-69.

Tromp, J., 2000. Flower-bud formation in pome fruits as affected by fruit thinning. *Plant Growth Regulation*, 31:27-34.

Utah-Colorado, 2012. The Utah-Colorado Commercial Tree Fruit Guide - Thinning Apple Fruit. A publication by Utah State University Extension and the Western Colorado Research Center, 178 p.

Walsh, C.S. and Solomos, T., 1987. Ethylene Evolution by Apple Fruits during their Early-Season Growth and Development. *Scientia Horticulturae* 32:203-211.

Warrington, I.J., Fulton, T.A., Halligan, E.A. and de Silva, H.N., 1999. Apple Fruit Growth and Maturity are Affected by Early Season Temperatures. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 124(5):468-477.

Wertheim, S.J., 2000. Developments in the chemical thinning of apple and pear. *Plant Growth Regulation*, 31:85-100.

Wünsche, J.N., Lakso, A.N. and Robinson, T.L., 1995. Comparison of Four Methods for Estimating Total Light Interception by Apple Trees of Varying Forms. *HortScience* 30(2):272-276.

Wünsche, J.N., 2005. Crop Load Interactions in Apple. *Horticultural Reviews* 31:231-290.

Yuan, R. and Greene, D.W., 2000(a). 'McIntosh' apple fruit thinning by benzyladenine in relation to seed number and endogenous cytokinin levels in fruit and leaves. *Scientia Horticulturae* 86:127-134.

Yuan, R. and Greene, D.W., 2000(b). Benzyladenine as a chemical thinner for 'McIntosh' apples. II. Effects of benzyladenine, bourse shoot tip removal, and leaf number on fruit retention. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 125(2):177-182.

Zarei, M., Baninasab, B., Ramin, A.A. and Pirmoradian, M., 2009. Fruitlet Chemical Thinners Affect Yield, Fruit Quality, and Leaf and Fruit Mineral Composition of 'Soltani' Apple. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 50(5):401-405.

Zhu, H., 2010. Investigation of regulatory mechanisms of chemical-mediated fruit thinning in apple (*Malus x domestica* Borkh.). Thesis in Virginia Polytechnic Institute and State University. Chapter 1 – Introduction and Literature Review, pp.1-16.

Zhu, H., Dardick, C.D., Beers, E.P., Callanhan, A.M., Xia, R. and Yuan, R., 2011. Transcriptomics of shading induced and NAA-induced abscission in apple (*Malus domestica*) reveals a shared pathway involving reduced photosynthesis, alterations in carbohydrate transport and signaling and hormone crosstalk. *BMC Plant Biology* 11:138.

Annexes :

Annexe I : Stades phénologiques du pommier d'après Fleckinger (source : Réseau FREDON-FDGDON Rhône-Alpes)

Le POMMIER

stades phénologiques d'après Fleckinger



A
Bourgeon d'hiver



B
Début de gonflement



C
Gonflement apparent



C3



D
Apparition des boutons floraux



D3



E

Les sépales laissent voir les pétales



E2



F
1ère fleur



F2
Pleine floraison



G
Chute des 1ers pétales



H
Chute des derniers pétales

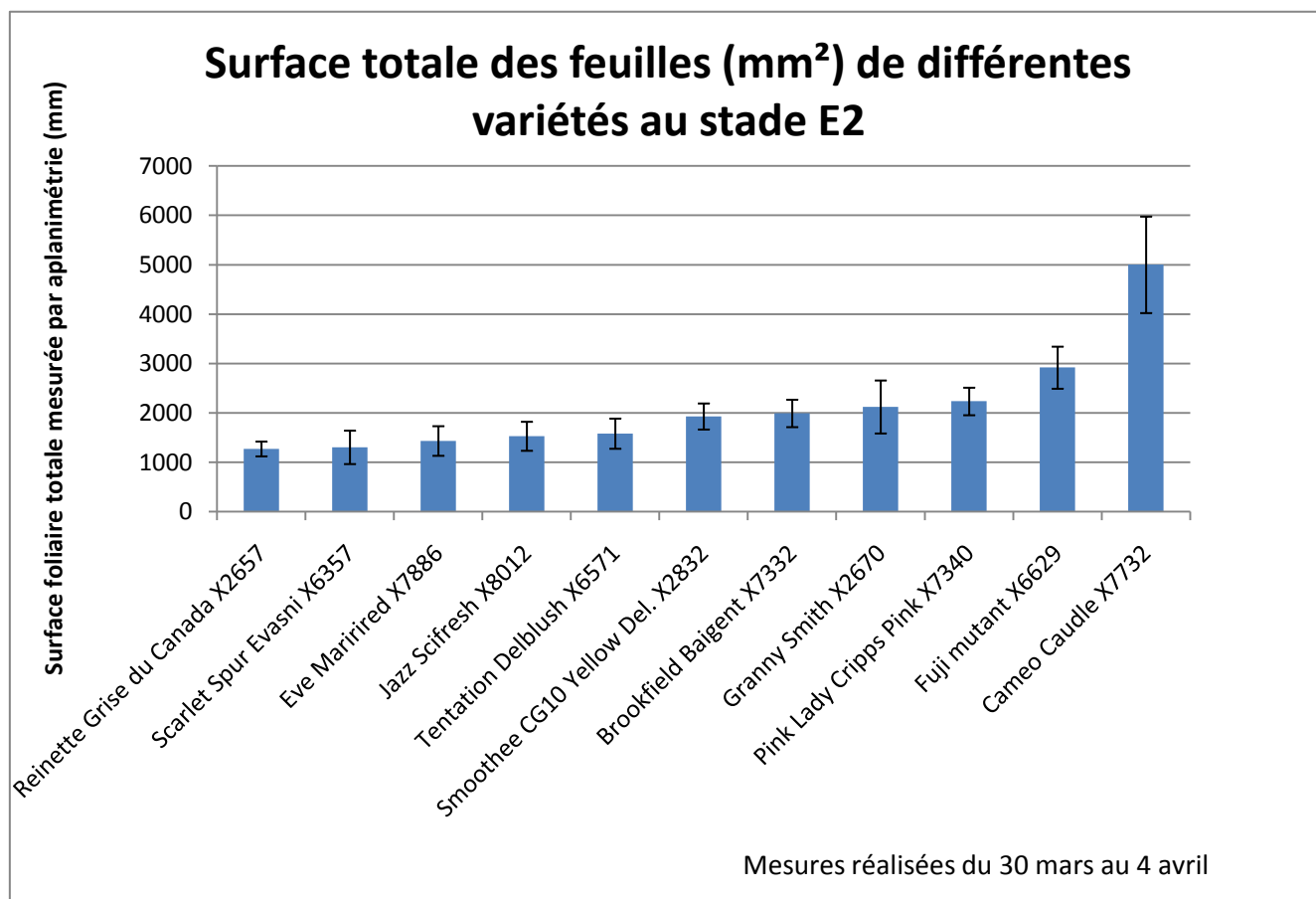


I
Nouaison



J
Grossissement des fruits

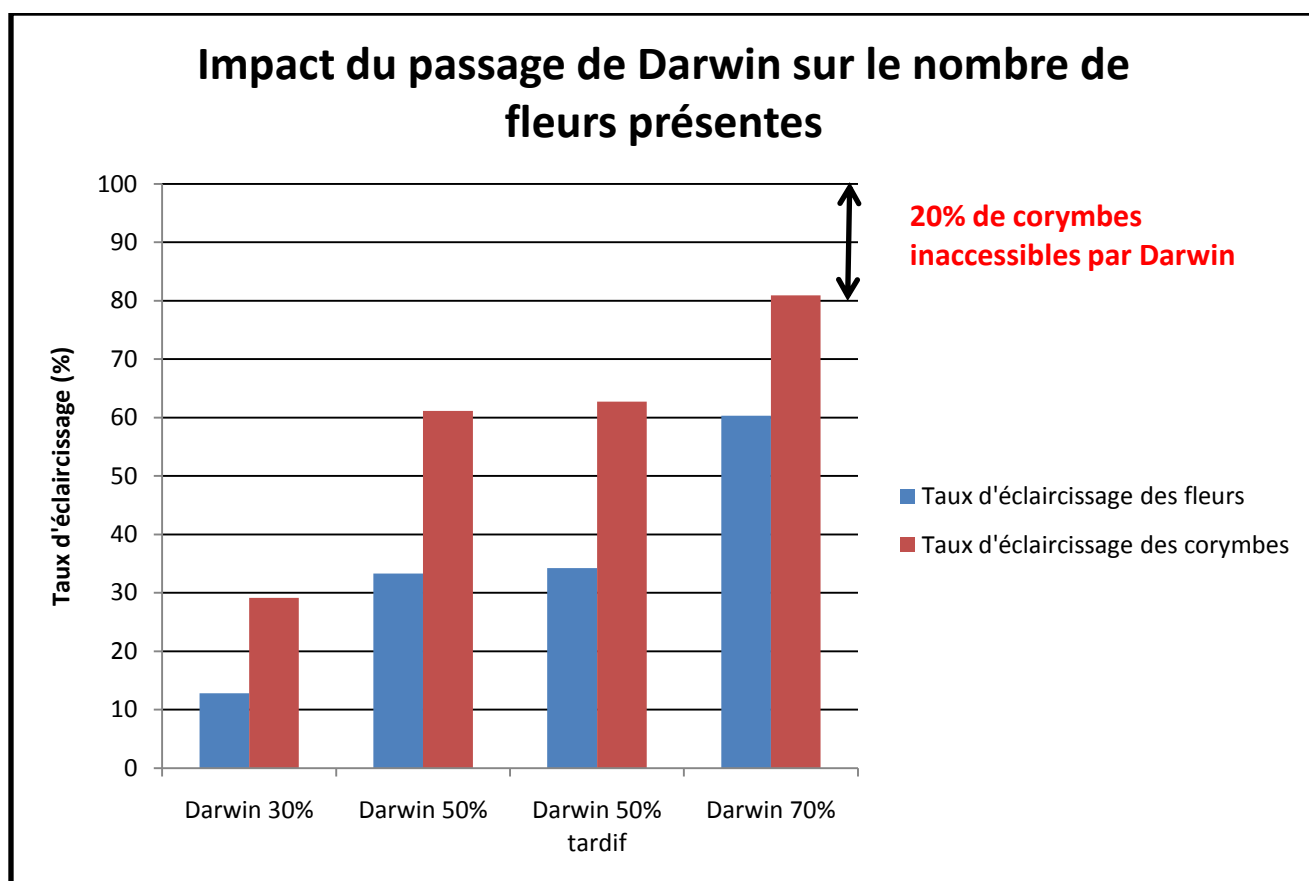
Annexe II : Représentation graphique de la surface foliaire de toutes les feuilles du corymbe mesurée pour différentes variétés au même stade (E2) à l'aide d'un aplanimètre



Annexe III : Impact de Darwin® sur les fleurs suivant l'intensité de la machine

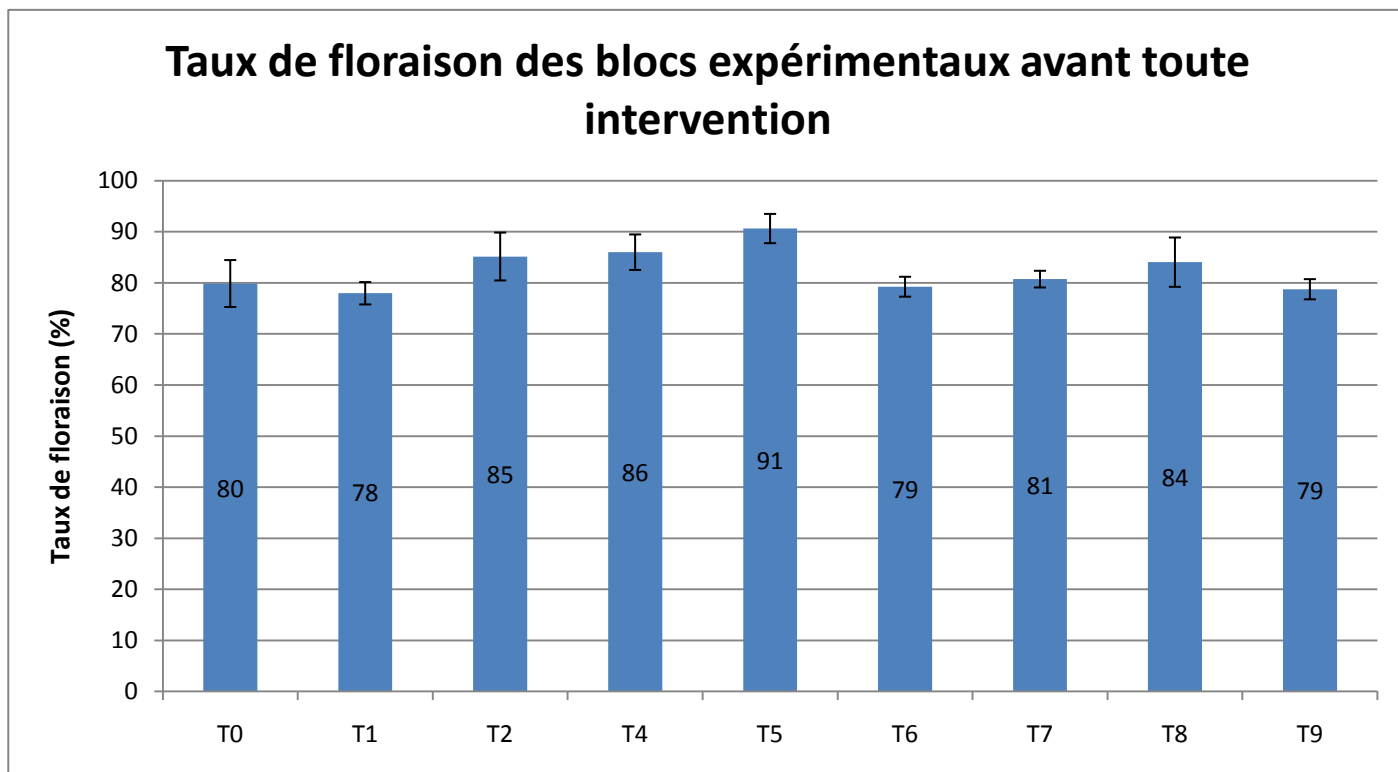
$$\text{Taux d'éclaircissage des fleurs} = \frac{\text{nombre de fleurs chutées}}{\text{nombre de fleurs avant passage de Darwin®}}$$

$$\text{Taux d'éclaircissage des corymbes} = \frac{\text{nombre de corymbes touchés}}{\text{nombre total de corymbes}}$$



Annexe V : Taux de floraison initial des différentes modalités avant passage de la Darwin®

$$\text{Taux de floraison (\%)} = \frac{100 \times \text{nombre de bourgeons floraux}}{\text{nombre total de bourgeons (floraux + végétatifs)}}$$

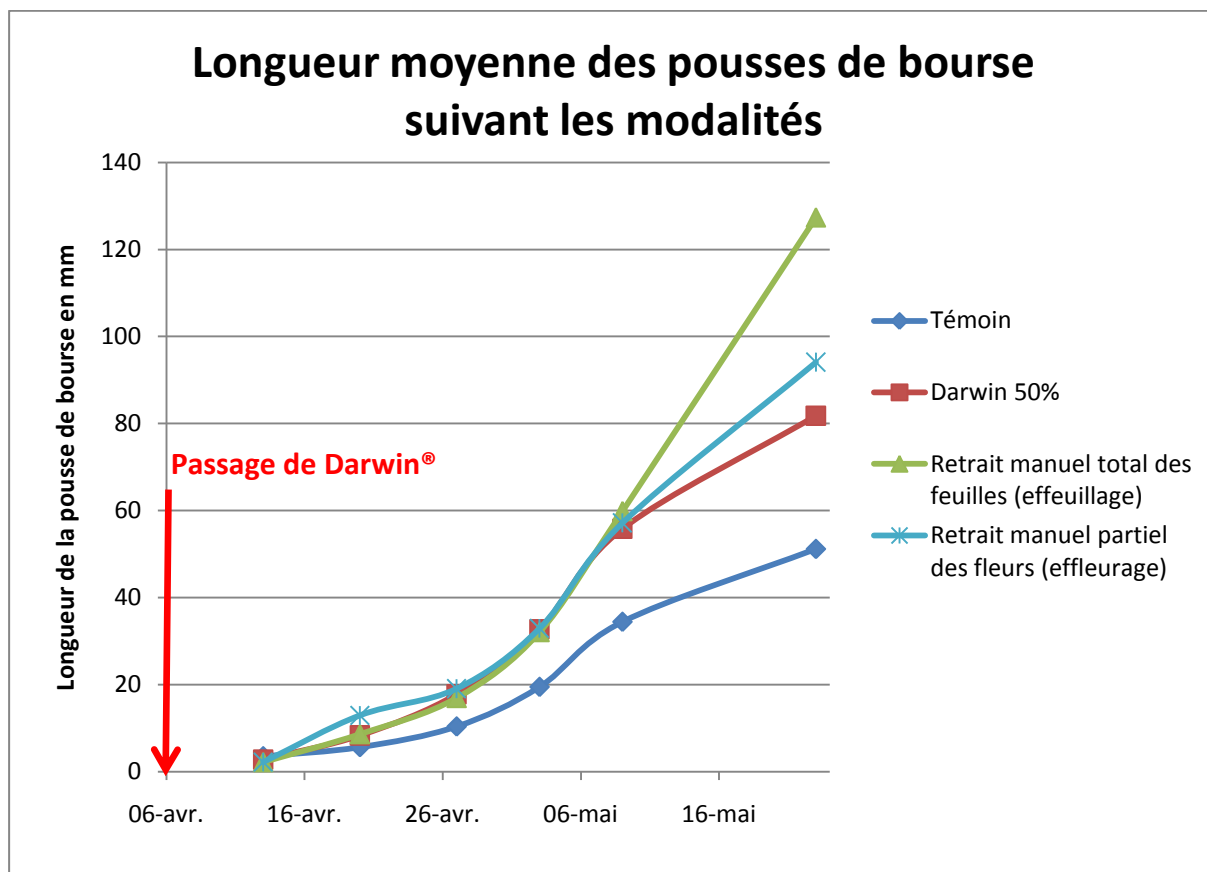


Annexe VI : Calendrier des mesures respectives sur les 2 parcelles

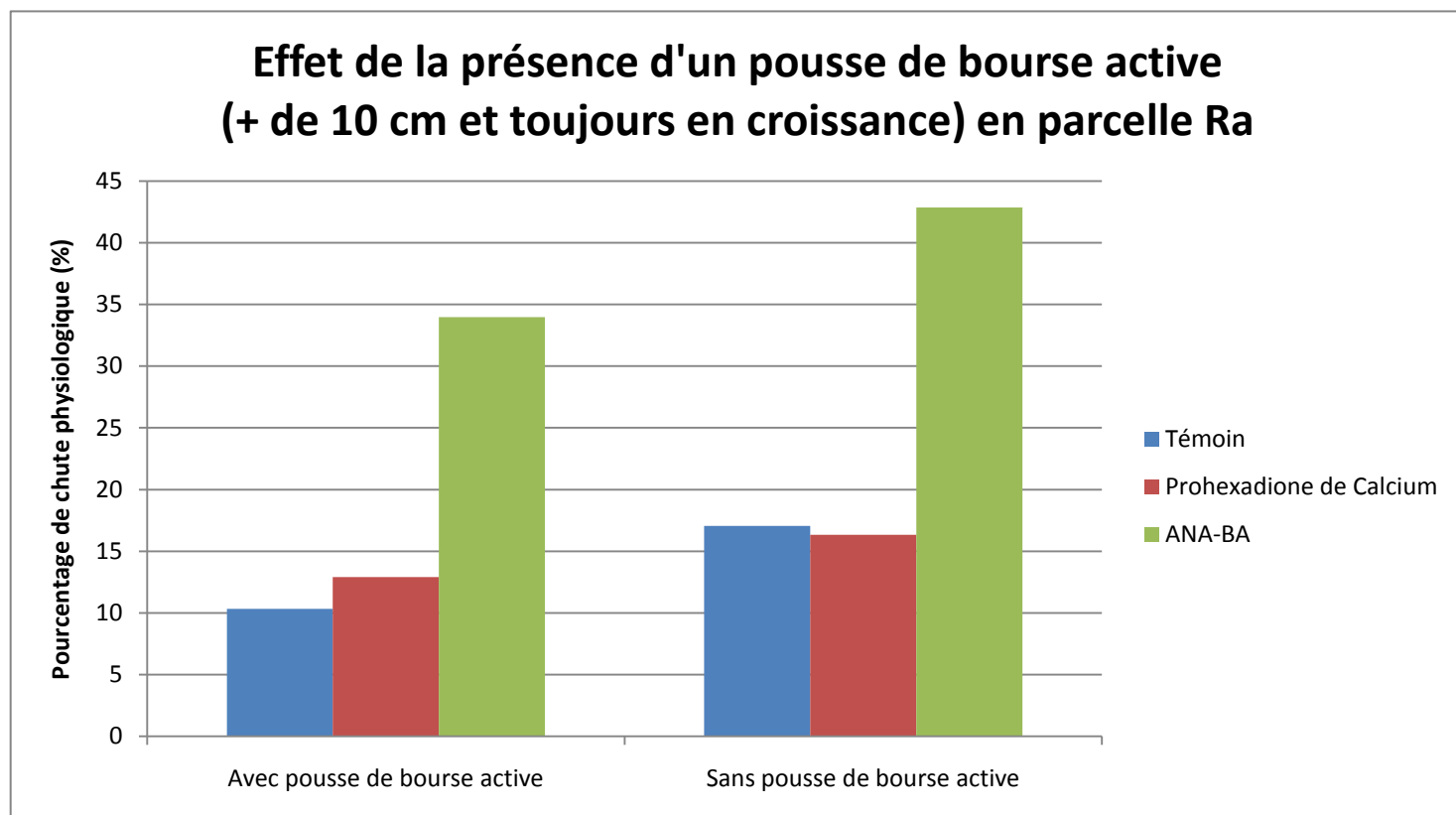
| Mesure effectuée | 2-avr. | 3-avr. | 4-avr. | 6-avr. | 10-avr. | 11-avr. | 12-avr. | 16-avr. | 17-avr. | 19-avr. | 20-avr. | 23-avr. | 24-avr. | 26-avr. | 27-avr. | 2-mai | 3-mai | 4-mai | 7-mai | 9-mai | 10-mai | 11-mai | 14-mai | 15-mai | 16-mai | 18-mai | 22-mai | 24-mai | 25-mai | 29-mai | 30-mai | 31-mai | 1-juin | 4-juin | 6-juin | 7-juin | 8-juin | 9-juin | 10-juin | 11-juin | | | | | |
|--|---|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|--|---|--|--|--|
| Comptage organes floraux | ■ | ■ | ■ | | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | | | | | ■ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Photographie avec Mécavision | | | | ■ | ■ | | | ■ | | | | | ■ | | | ■ | | | ■ | | | ■ | ■ | | | ■ | ■ | ■ | ■ | | | ■ | | | | ■ | | | | | | | | | |
| Mesure de la surface foliaire par aplanimétrie | | | | ■ | | | ■ | ■ | | | | ■ | | | | | ■ | | | | | | | | ■ | | | | | | | | | | | | | | | | | ■ | | | |
| Prélèvement de petits fruits pour congélation (après nouaison) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ■ | | | ■ | | | | | ■ | | | | | | | | | | | | |
| Photographie de pédicelles et de fruits sur des corymbes fixées | | | | | | | | | | | | | ■ | | | ■ | | | | | ■ | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | ■ | | | ■ | | | | | | | | | |
| Mesure du poids des pépins et des fruits | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ■ | | ■ | | | | ■ | | | | | | | | | | | | | |
| Mesure de la taille des fruits et de la longueur des pousses de bourse | | | | | | | | | | | ■ | | | | ■ | | ■ | | | | | ■ | ■ | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | ■ | | | | | | | | | | | |
| Mesure de l'éthylène dégagé | | | | ■ | | | ■ | ■ | | | | | | ■ | | | ■ | | | | | | | | ■ | | | ■ | | | | ■ | | | | | | | | | | | | | |
| Mesure de la température | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mesure du PAR | Mesures réalisées sur la Parcelle Sa (95% chutes dues au gel) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Mesures réalisées sur la Parcelle Ra | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mesure de l'irrigation | Mesures réalisées sur la Parcelle Sa (95% chutes dues au gel) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Mesures réalisées sur la Parcelle Ra | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

etc...

Annexe VIII : Représentation graphique de la croissance des pousses de bourse après passage de Darwin® mesurée avec un pied à coulisse sur 40 corymbes par modalité en parcelle Sa



Annexe IX : Chute différentielle des fruits suivant la présence ou l'absence d'une pousse de bourse active en parcelle Ra (Régalis = Prohexadione de Calcium)



Annexe X : Script et explication de la régression linéaire

Le script est assez simple, on utilise la fonction `lm` afin de réaliser la régression linéaire, puis on demande dans la seconde ligne d'afficher les résultats avec les coefficients.

```
> RegLin <- lm(diamètre ~ date + différence.avec.min + indice.Brix + position, data=Data)
> summary(RegLin)
```

Les résultats sont présentés sous forme de tableau :

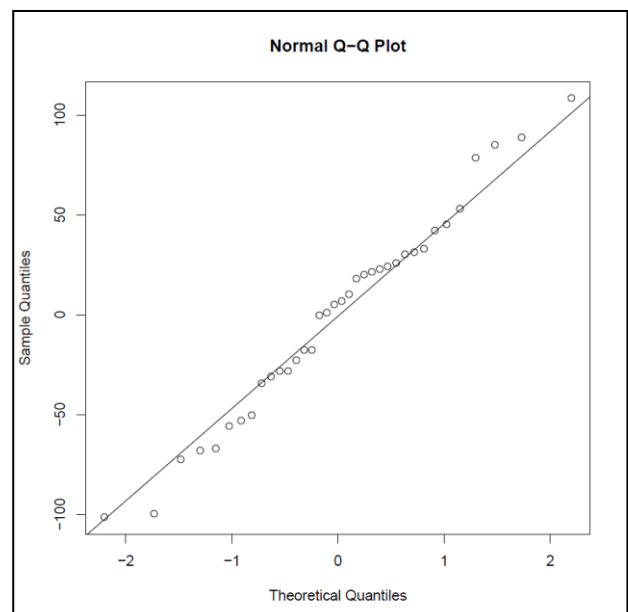
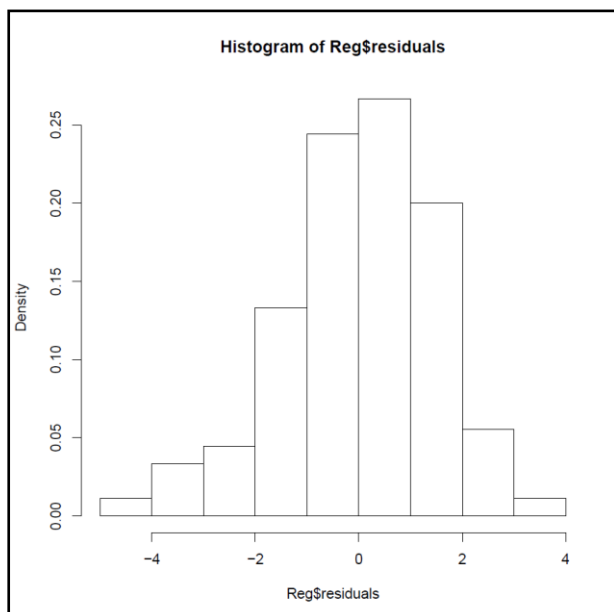
| Régression linéaire du Diamètre | Estimate | Std.Error | t-value | Pr(> t) | |
|--|----------|-----------|---------|----------|-----|
| (Intercept) | 39.09632 | 8.46204 | 4.620 | 3.11e-05 | *** |
| Différence avec l'indice Brix minimum du corymbe | -2.51459 | 1.65228 | -1.522 | 0.1349 | |
| Indice Brix | -2.79290 | 1.17087 | -2.385 | 0.0212 | * |
| Position dans le corymbe | -0.02185 | 0.18665 | -0.117 | 0.9073 | |

Les 't-values' représentent les tests de Student de nullité des coefficients : si la valeur est proche de 0, la variable n'a pas d'influence sur le modèle. La corrélation existe quand la probabilité, qu'il y ait des valeurs en dehors de la régression, est faible (quand $\text{Pr}(>|t|)$ est inférieure à 5%) ; on peut ainsi regarder directement la présence ou non d'étoile. Ensuite pour savoir si la corrélation est positive ou négative, il suffit de regarder le signe affecté au coefficient de la variable régressée.

La signification des étoiles se fait à partir de cette échelle des probabilités :

```
0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

L'hypothèse à vérifier pour que le test soit valable est : la normalité des résidus. Pour cela, il suffit d'étudier la répartition des résidus avec le script « `hist(RegLin$residuals, Freq=F)` » et vérifier que la répartition est gaussienne (cf histogramme suivant) ou d'utiliser le script `QQ-plot` et vérifier que les résidus sont sur la droite de Henry (cf `QQ-plot` suivant).



Annexe XI : Script et explication de l'analyse Lda

Cette analyse par prédiction s'utilise pour prédire une variable qualitative (le fruit va chuter : oui ou non) à partir de variables quantitatives.

Standardiser les valeurs avec R Commandeur dans : Données / Gérer les variables /

```
#### Analyse discriminante sur tous les échantillons
library(MASS)
modele<-lda(chute~.,data=don1[,5:9])
plot(modele)
predict(modele)$class
table(predict(modele)$class,don1[,5])
sum(predict(modele)$class!=don1[,5])/nrow(don1)*100
predict(modele)$x
hist(predict(modele)$x)
```

```
###Permet d'identifier les variables prédictives les plus influentes en fonction de leur
contribution au modèle suivant leur coefficient respectif
modele$scaling
```

```
##### Prédiction avec tirage au hasard du jeu de calibration (150 échantillons) puis
validation sur une sélection autre que le jeu de validation
tirage<- sample(1:dim(don1)[1], 150, replace=FALSE)
calib<-don1[tirage,]
valid<-don1[-tirage,]
modele<-lda(chute~.,data=calib[,5:9])
pp<-predict(modele,valid[,5:9])$x
pclass<-predict(modele,valid[,5:9])$class
table(pclass,valid[,5])
Erreur<-sum(pclass!=valid[,5])/nrow(valid)*100
```

Finalemnt **Erreur** calcule l'erreur de la prédiction en fonction du nombre d'éléments ayant été classé dans le mauvais groupe.

Ce qu'il faut retenir des coefficients du modèle, c'est que plus le coefficient est élevé, plus la variable influence la modèle. Pour connaître si la variable influence négativement la chute (plus le diamètre est important, moins le fruit chute) ou positivement la chute (plus l'indice Brix est élevé, plus le fruit risque de chuter), il suffit de regarder le signe du coefficient.

| Modélisation de la chute par Lda | Poids dans le modèle |
|----------------------------------|----------------------|
| Diamètre du fruit | -0.320303607 |
| Indice Brix | 1.620954998 |

Annexe XII : Script de l'utilisation d'une boucle dans la prédiction

La boucle permet d'obtenir l'erreur moyenne de la prédiction sur 100 prédictions. Le compteur i fait tourner 100 fois le script Lda. Ensuite les valeurs d'erreurs sont sommées dans T puis on obtient la moyenne en divisant par 100.

P est la matrice qui somme toutes les matrices de confusion ainsi en divisant par 100 chaque terme, on obtient la matrice de confusion moyenne.

V mesure l'écart entre les valeurs d'erreurs calculées à chaque tour et la moyenne d'erreurs trouvée à la boucle précédente.

```
somme<-0
T<-0
P<- c(0,0) %o% c(1,1)
v<-0
for (i in 1:100){
```

SCRIPT LDA

```
P <- P + pc
T <- T + sum
v <- v + abs(sum-moyenne)
somme<- somme + 1

}
T
v
moyenne<- T/100
moyenne
P
sum
```

Annexe XIII : Script et explication de l'analyse Pls

L'analyse par prédiction Pls s'utilise pour prédire une variable quantitative (diamètre) en fonction de variables quantitatives.

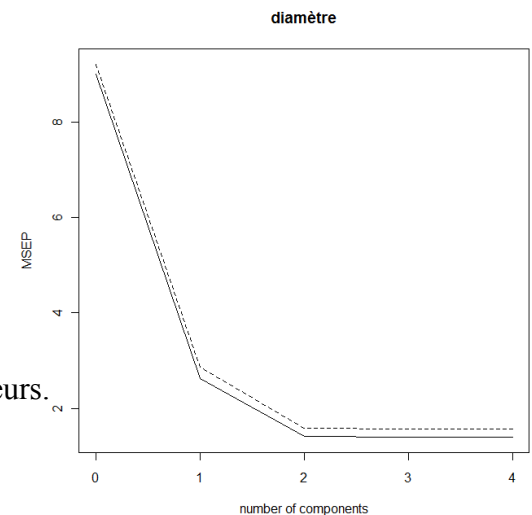
// cette partie permet de trouver le nombre de composantes optimal pour la création du modèle

```
library(pls)
modele.pls <- plsr(diamètre~. , ncomp=2,data=Dataset, scale=TRUE, validation="CV")
msepcv.pls <- MSEP(modele.pls, estimate=c("train","CV"))
plot(msepcv.pls, col=1, )
```

Si le MSEP (Mean Squared Error of Prediction) ne diminue plus lorsque l'on augmente le nombre de composantes dans le modèle, il est inutile de rajouter des composantes.

// cette partie permet d'explicitier le modèle et représenter les erreurs.

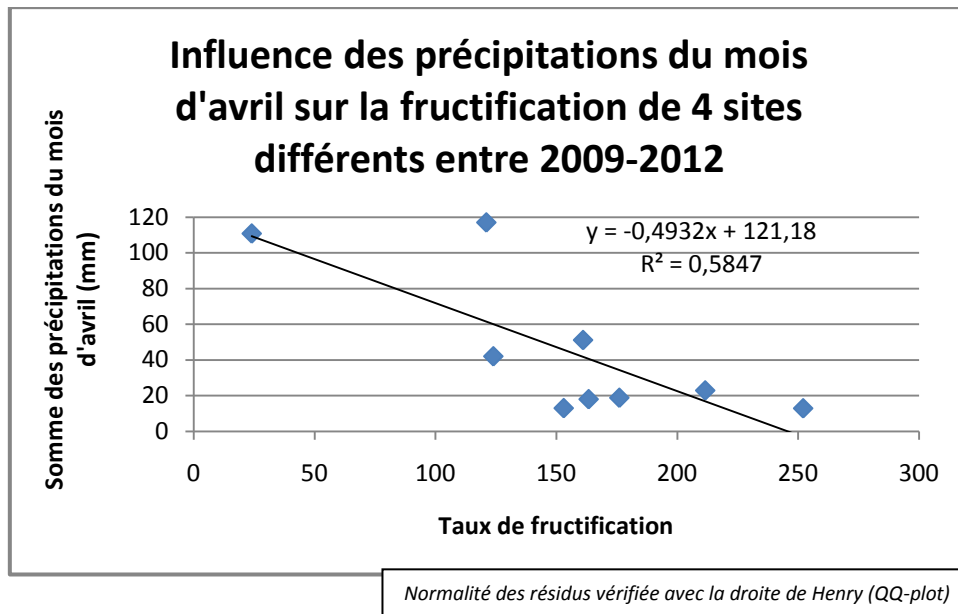
```
summary(modele.pls)
res.pls <- residuals(modele.pls)
plot(res.pls[,4] , pch=15, cex=.5, ylab="Résidus", main="")
abline(h=c(-2,0,2), lty=c(2,1,2))
```



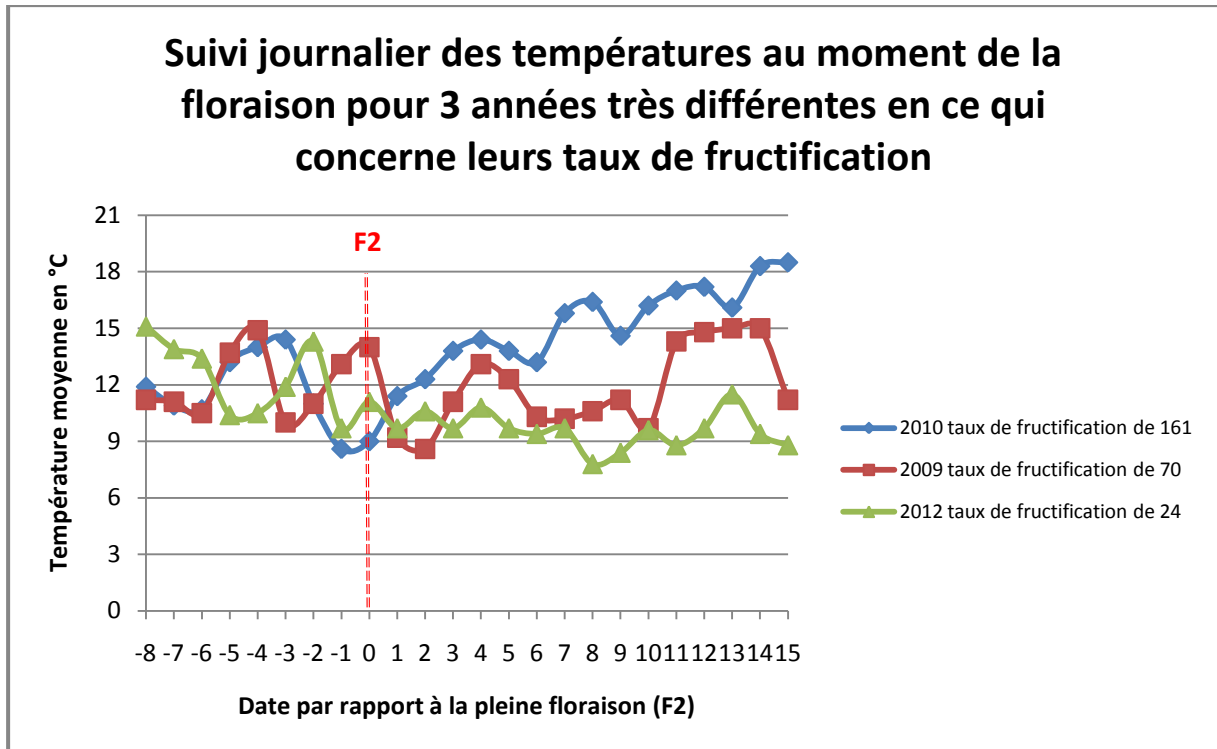
Les différentes variables qui sont dans le modèle sont classées suivant leur explication de la variance du modèle. Plus une variable explique la variabilité, plus la variable est importante pour le modèle (cf tableau).



| Pourcentage de variance expliquée du diamètre | Indice Brix | différence d'indice Brix avec le minimum |
|---|-------------|--|
| X | 42.09 | 67.15 |
| diamètre | 70.95 | 84.34 |

Annexe XIV : Représentation graphique corrélant le taux de fructification à la somme des précipitations reçues au mois d'avril par les parcelles pour les 4 sites étudiés



Annexe XV: Représentation graphique de l'évolution des températures moyennes de 3 années différentes pour leur taux de fructification (données du Cefel)



| | | |
|--|---|---|
|  | <u>Diplôme</u> : Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences Horticoles et du Paysage <u>Spécialité</u> : Horticulture <u>Spécialisation / option</u> : Gestion Durable du Végétal <u>Enseignant référent</u> : Jean-Charles MICHEL | |
| <u>Auteur(s)</u> : Antoine MARCERON <u>Date de naissance</u> : 25-02-1989 | <u>Organisme d'accueil</u> : Ctifl <u>Adresse</u> : Centre de Lanxade |  |
| <u>Nb pages</u> : 35 <u>Annexe(s)</u> : 15 | 41, Route Nebouts | |
| <u>Année de soutenance</u> : 2012 | 24130 PRIGONRIEUX <u>Maître de stage</u> : Laurent ROCHE | |
| <u>Titre français</u> : De la nouaison à la récolte : modèles de prévision et indicateurs de la chute physiologique du pommier (<i>Malus domestica</i> Borkh.) | | |
| <u>English Title</u> : Young apple fruits fall markers and June drop modelling | | |
| <u>Résumé</u> : Beaucoup de recherches ont été effectuées sur la chute physiologique des fruits mais aucune n'a permis d'expliquer complètement la variabilité des chutes dites de juin. Les éclaircissages mécanique, chimique ou manuel ont tous pour but de diminuer la charge pour augmenter la qualité des fruits à la récolte et éviter l'alternance. Mais ces techniques ne sont pas parfaites et sont soumises aux aléas climatiques et à des variables encore inconnues. L'objectif de l'étude est double : à la fois identifier des marqueurs précurseurs de la chute du fruit et débiter des recherches afin de créer un modèle de prévision de la chute physiologique puis de la charge de l'arbre. Les indicateurs qui ont été étudiés sont la couleur des pédicelles, les émissions d'éthylène des pousses de bourse et le nombre des pépins. Les modèles qui ont été analysés sont : un modèle nutritionnel basé sur le rapport feuille/fruit, la croissance relative et le taux de sucres des fruits ; un modèle climatique basé sur les températures, l'ensoleillement et les précipitations ; et un modèle d'estimation global de la charge à partir de logiciels d'analyse d'images. Les résultats de cette étude ont permis de mettre en évidence les indicateurs les plus significatifs et les modèles les mieux adaptés pour les études futures de la chute physiologique. En combinant ces méthodes d'analyse, il sera bientôt possible de prévoir de manière plus précise la chute des fruits dans l'objectif de mieux gérer l'utilisation des produits phytosanitaires d'éclaircissage. | | |
| <u>Abstract</u> : Nowadays researches didn't allow to explain the June drop complexity. Young fruits fall is very variable depending on the weather, the thinning methods and unknown variables. The aim of this study was to identify the early young apple fruits fall markers and examine predicting models of June drop. The pedicel color, the bourse shoot ethylene emissions and the apple seeds number were studied as markers. Three models were analyzed: a nutritional model based on the leaf/fruit ratio, on the average growth rate and on the fruit sugar rate; a climatic model based on the temperatures, on the sun radiations and on the rains; and a global prediction model to forecast apple tree load based on photos analyzing softwares. The results made it possible to select some markers and models. More studies will be followed on this selection to develop a complete predicting model which will permit to moderate the thinning chemicals using. | | |
| <u>Mots-clefs</u> : chute de juin, physiologique, pommier, <i>Malus</i> , indicateurs précoces, modèles de prévision, couleur des pédicelles, émissions d'éthylène, pépins, rapport feuille/fruit, croissance relative, taux de sucres, météorologiques, charge. | | |
| <u>Key Words</u> : June drop, fruit drop, apple tree, <i>Malus</i> , early markers, prediction models, pedicel color, ethylene emissions, seeds, leaf/fruit ratio, average growth rate, fruit sugar rate, climatic, tree load. | | |