



UNIVERSITE DE MONTPELLIER
CENTRE INTERNATIONAL D'ETUDES SUPERIEURES EN SCIENCES AGRONOMIQUES DE
MONTPELLIER

**Master 2 Sciences et Procédés des Agroressources pour
l'Alimentation et l'Environnement
Mention : Biologie-Agrosciences**

Caractérisation de variétés d'abricot et de mangue pour
leur aptitude à la transformation en purée et stabilisation
par déshydratation

Par

Fatou Danielle NIANG

Présenté le 09/07/2020 devant le Jury de la Commission d'Examen

Membres :

Thierry Ruiz

Stéphane Peyron

Rapporteur : Nawel Achir

Laboratoires d'accueil :

SQPOV

Qualisud

Tuteurs :

Barbara Gouble

Adrien Servent

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont à l'endroit de toute l'équipe du CIRAD, de l'Université et de l'INRAE d'Avignon qui ont eu à collaborer étroitement avec nous pour le bon déroulement du stage ;

A Barbara Gouble, Adrien Servent, Véronique Vidal, Pierre Brat et Joël Grabulos qui ont eu à m'épauler pendant la durée du confinement pour cet exercice de recherche bibliographique qui n'avait pas été du tout facile au début ;

Mention spéciale à mes tuteurs de stage qui, malgré certaines difficultés, n'ont ménagé aucun effort pour m'aider à mener à bien les travaux dans la mesure du possible et à m'épauler lors de la rédaction du rapport ; Merci pour tous ses efforts consentis ;

Merci à Adrien Servent pour sa disponibilité, son sens de l'écoute et ses conseils.



Caractérisation de variétés d'abricot et de mangue pour leur aptitude à la transformation en purée et stabilisation par déshydratation

Résumé :

Les fruits étant pour la plupart climatériques, leur durée de conservation est très courte. Ils subissent un brunissement, un flétrissement et une perte de valeur nutritive. Cause de cette difficulté de conservation ou de transport sur de longue distance, les fruits sont amenés à être stabilisés par la transformation. Lorsqu'ils sont convertis en poudre, ils deviennent conservables sur de longues durées, ils sont plus pratiques et moins coûteux à transporter et restent sources de composés bioactifs utilisables comme ingrédients dans des préparations alimentaires par exemple. Les poudres de fruits sont obtenues par l'application de technologies de séchage sur des fruits cueillis à maturité physiologique ou ayant subi une maturation climatique, ou directement sur des purées. La déshydratation met en œuvre des opérations de traitement thermique, positif ou négatif, du séchage par entraînement d'air chaud à la lyophilisation, toujours associée à des opérations de broyage.

La transformation industrielle des fruits en poudres réhydratables semble donc être une alternative cohérente à la conservation des fruits, notamment pour les productions excédentaires dans les pays du Sud. En effet, dans ces pays en développement, les fruits tropicaux occupent une part importante tant au niveau consommation locale que dans les exportations et présentent une étonnante diversité variétale. De plus, cette stabilisation permet un stockage à température ambiante, donc sans coût énergétique, et une dégradation minimale de nutriments au cours de la production en sélectionnant judicieusement les technologies appropriées et en optimisant leurs fonctionnement.

Pour mieux comprendre le comportement des poudres alimentaires lors du séchage, la notion de transition vitreuse décrivant les plages de variation de température T_g pendant le chauffage d'un produit qui passe de l'état amorphe à cristallin, est importante. L'objectif de cette étude étant donc de repérer ces transitions vitreuses pour les poudres de fruits, de voir l'impact de l'ajout de texturant pendant le séchage, de corréliser cette T_g à la teneur en eau dans le produit sec et de faire les caractérisations physico-chimiques des poudres obtenues en fonction du séchage.

Mots clés : Poudre de fruits, réhydratabilité, transition vitreuse.



Characterization of apricot and mango varieties for their aptitude for transformation into mash and stabilization by dehydration

Abstract :

The fruits being mostly climacteric, their shelf life is very short. They undergo browning, wilting and loss of nutritional value. Because of this difficulty of conservation or long-distance transport, the fruits are brought to be stabilized by processing. When they are converted into powder, they become preservable over long periods, they are more practical and less expensive to transport and remain sources of bioactive compounds usable as ingredients in food preparations for example. Fruit powders are obtained by the application of drying technologies on fruits picked at physiological maturity or having undergone climatic ripening, or directly on purees. Dehydration implements heat treatment operations, positive or negative, from drying by entrainment of hot air to freeze-drying, always associated with grinding operations.

The industrial transformation of fruit into rehydratable powders therefore seems to be a coherent alternative to fruit conservation, especially for surplus production in the countries of

the South. In fact, in these developing countries, tropical fruits occupy an important part both in terms of local consumption and exports and present an astonishing variety diversity. In addition, this stabilization allows storage at room temperature, therefore without energy cost, and minimal degradation of nutrients during production by judiciously selecting the appropriate technologies and optimizing their operation.

To better understand the behavior of food powders during drying, the notion of glass transition describing the ranges of temperature variation T_g during the heating of a product which passes from the amorphous to crystalline state, is important. The objective of this study is therefore to identify these glass transitions for fruit powders, to see the impact of adding texturing during drying, to correlate this T_g to the water content in the dry product and to make the physico-chemical characterizations of the powders obtained as a function of drying.

Keywords : Fruit powder, rehydratability, glass transition.

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 :	3
STRUCTURE D'ACCUEIL	3
1.I. L'UMR QUALISUD, le CIRAD et Avignon Université	4
1.II. L'UMR SQPOV, L'INRAE	4
1.III. PROJET DESHYFRUIT	5
CHAPITRE 2 :	6
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	6
2.I. GENERALITES SUR LA MANGUE.....	7
2.I.a Définition et composition.....	7
2.I.b Caractéristiques physico-chimiques et organoleptiques	8
2.I.c La filière mangue	8
2.II. LES PROCEDES DE STABILISATION ENZYMATIQUE DES FRUITS	9
2.II.a Blanchiment	9

2.II.b Cold Break (CB).....	10
2.II.c Hot Break (HB) ¹³	10
2.III. SECHAGE DES PRODUITS ALIMENTAIRES	10
2.IV. PROPRIETES TECHNO-FONCTIONNELLES DES POUDRES DE FRUITS.....	11
CHAPITRE 3 :	13
MATERIELS ET METHODES	13
3.I. PLANNING INITIAL DU STAGE.....	14
3.II. MATIERES PREMIERES	16
3.III. OUTILS DE RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE	16
3.IV. ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES ET SECHAGE DES MATRICES ALIMENTAIRES	17
3.IV.a Analyse de la transition vitreuse des poudres	17
3.IV.b Tri densimétrique	18
3.IV.c Déshydratation des purées de fruits sur séchoir cylindre	18
CHAPITRE 4 :	22
RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	22
4.I. TRI DENSIMETRIQUE DES MANGUES	23
4.II. RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE	24
4.III. ANALYSE DE LA TRANSITION VITREUSE	25
4.IV. LES POUDRES D'ABRICOTS	27
4.IV.a Raffinage et séchage des abricots.....	28
4.IV.b Analyses physico-chimiques réalisées	30
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	32
ANNEXES	34
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	39

LISTE DES ABBREVIATIONS

ANSES : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

APRIFEL : Agence pour la Recherche et l'Information en Fruits et Légumes

AS : Apport Satisfait

BM : Besoins Moyens

CB : Cold Break

CIRAD : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

DE : Dextrose Aquivalent

DSC : Differential Scanning Calorimetry (calorimétrie différentielle à balayage)

EFSA : European Food Safety Authority (Autorité Française de Sécurité des Aliments)

EPIC : Etablissement Public à caractère Industriel et Commercial

HB : Hot Break

INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

IR : Intervalle de Référence

LSS : Limite Supérieure de Sécurité

MD : Maltodextrine

PERSYST : Performances des systèmes de production et de transformation tropicaux

RNP : Référence Nutritionnelle pour la Population

SFR : Structure Fédérative de Recherche

SQPOV : Sécurité et Qualité des Produits d'Origine Végétale

UMR : Unité Mixte de Recherche

UERI : Unité Expérimentale de Recherche Intégrée

VNR : valeur nutritionnelle de référence

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Profil nutritionnel pour 100 g de mangue fraîche (APRIFEL)	7
Tableau 2 : Modèles mathématiques de calcul de T_g	12
Tableau 3 : Caractéristiques principales des variétés d'abricots	16
Tableau 4 : Valeurs de transition vitreuse T_g de quelques agents texturants	26
Tableau 5 : Raffinage et séchage de 6 variétés d'abricots	29
Tableau 6 : Teneur en matière sèche, pH et acidité titrable de purées et de poudres de 4 variétés d'abricot	31
Tableau 7 : Synthèse d'articles traitant des poudres de fruits	35

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Evolution du flux de chaleur spécifique en fonction de la température par DSC. Passage d'un sucre de l'état vitreux à l'état cristallin (Schuck et al 2012)	12
Figure 2 : Planning prévisionnel (issu de « trame de projet Deshyfruit pdf »)	15
Figure 3 : Gantt prévisionnel (issu de « Trame de projet Deshyfruit pdf ») ²⁶	15
Figure 4 : Sécheur à tambour	19
Figure 5 : courbe de distribution densimétrique sur 250 mangues	23
Figure 6 : Planning initial de maturation et traitement thermiques des mangues	24
Figure 7 : Courbe de transitions de phase de l'amidon soluble à teneur en eau de 20% (chauffage à 100°C/min)	25
Figure 8 : Déshydratation de la variété A4049	30

INTRODUCTION

Les fruits et les légumes ont un rôle important dans l'alimentation humaine. En effet, consommés frais, ils sont à l'origine des principaux apports journaliers (AJR) concernant par exemple certaines vitamines, minéraux essentiels, fibres, ou encore pour leurs apports en antioxydants d'origine phénoliques ou en autres substances bioactives.

Dans beaucoup de pays en voie de développement, seule une quantité limitée de fruits et de légumes frais est destinée aux marchés locaux ou à l'exportation par suite du manque d'équipements et d'infrastructures notamment en stockage réfrigéré. Les fruits frais représentent une classe de denrées extrêmement périssables et souffrent de pertes importantes pendant leur parcours d'approvisionnement notamment à cause de pourrissements, de dessèchements, de blessures dues à la mécanisation pendant le ramassage, de mauvais conditionnements ou encore de chocs durant le transport. Pour limiter ces pertes post-récoltes, une solution pourrait être l'application de procédés de transformation permettant de stabiliser les produits par différentes approches et ainsi de les adapter à une meilleure conservation.

La mangue, un fruit tropical de première importance économique, ne déroge pas à cette règle. Elle est originaire d'Asie du Sud et est très populaire dans le monde en raison de ses qualités organoleptiques et de ses caractéristiques nutritionnelles. Grâce à la diversité des variétés commerciales dont les 12 les plus commercialisées sont : Tommy Atkins, Kent, Keitt, Palmer, Amélie, Valencia, Haden, Irwin, Osteen, Maya/Aya, Kasturi/Omer, Alphonso et à ses nombreuses zones de culture, elle est commercialement quasi-présente sur toute l'année (peu de saisonnalité commerciale) avec une production annuelle de plus de 33 millions de tonnes¹.

L'abricot est le troisième fruit à noyau le plus produit (après la pêche et la prune) avec une production mondiale voisine de 4 millions de tonnes en 2016. Originaire d'Asie et déjà cultivé en Chine il y a plus de 2000 ans, sa culture s'est développée en Iran, en Arménie, en Syrie puis aux pays du pourtour méditerranéen (Turquie, Italie, France, Espagne, Afrique du Nord), avec une grande diversité de variétés. Son évolution très rapide et sa courte période de production (environ 4 mois) rendent sa commercialisation en frais difficile malgré de très bons atouts organoleptiques².

Dans ce souci de limitation des pertes post-récoltes, plusieurs techniques communes leurs sont appliquées comme par exemple, le plus communément, le séchage visant à réduire leurs teneurs en eau, d'inhiber l'action des micro-organismes et/ou à stopper les réactions enzymatiques.

Le séchage est une des principales opérations de conservation utilisées dans l'industrie alimentaire. Appliqué à la mangue ou à l'abricot, plusieurs produits se déclinent comme par exemple les fruits secs, avec ou sans addition de sulfites. Cependant, il en ressort des produits aux caractéristiques nutritionnelles et organoleptiques modifiés. Le projet «Déshyfruit » se donne, entre autres, l'objectif de déshydrater ces matières premières et de produire une poudre par un procédé de séchoir cylindrique, tout en conservant au maximum les qualités du produit initial, poudre ré-hydratable pouvant servir comme ingrédient agroalimentaire.

Ce présent travail s'articulera autour de la compréhension des phénomènes permettant d'obtenir une poudre de fruit présentant des qualités ciblées. Les paramètres pris en compte iront du degré de maturité du fruit et de son aptitude à la transformation jusqu'à l'ajout de différents auxiliaires de formulation afin d'optimiser le séchage et de proposer des solutions adaptées à l'équipement et à la matière première.

CHAPITRE 1 :
STRUCTURE D'ACCUEIL

1.I. L'UMR QUALISUD, LE CIRAD ET AVIGNON UNIVERSITE

Le CIRAD (Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement) est un EPIC (Etablissement Public à caractère Industriel et Commercial) placé sous la double tutelle du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation et du ministère de l'Europe et des Affaires étrangères. Ses activités relèvent des sciences du vivant, des sciences sociales et des sciences de l'ingénieur appliquées à l'agriculture, à l'alimentation, à l'environnement et à la gestion des territoires. Il met son expertise scientifique et institutionnelle au service des politiques publiques des pays du Sud et des débats internationaux sur les grands enjeux de l'agriculture³. Le CIRAD comprend 33 unités de recherche réparties dans trois départements scientifiques (Systèmes biologiques (Bios), Performances des systèmes de production et de transformation tropicaux (PERSYST), Environnements et sociétés (ES)). L'Unité Mixte de Recherche (UMR) Qualisud construit ses activités autour d'une démarche intégrée pour l'obtention d'aliments de qualité⁴.

L'équipe "Qualité des fruits et légumes et conservation post-récolte" de l'UMR Qualisud œuvre pour la réduction des pertes à chaque étape de la filière fruits et légumes. L'équipe est composée de chercheurs et enseignants chercheurs du CIRAD, de l'Université de la Réunion et d'Avignon Université. L'objectif de l'équipe est d'étudier par une approche intégrée les effets de conditions environnementales pré-récolte (variétés, conditions culturales) sur la qualité des fruits et légumes à la récolte et en conservation post-récolte. L'équipe développe des nouvelles technologies physiques ou biologiques appliquées en pré ou post-récolte pour augmenter la qualité et la conservation des produits végétaux frais.

1.II. L'UMR SQPOV, L'INRAE

Le centre INRAE Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) concentre ses recherches sur des enjeux spécifiques aux objets et territoires méditerranéens : agroécologie et adaptation de l'agriculture et des forêts au changement climatique, ressources hydriques, risques naturels, nutrition humaine. L'UMR SQPOV « Sécurité et Qualité des Produits d'Origine Végétale » a comme tutelles INRAE et Avignon Université. Elle est rattachée aux départements scientifiques TRANSFORM et Microbiologie de la Chaîne Alimentaire (MICA). Elle réunit 4 équipes de recherche : MicroNutriments-Réactivité et Digestion, Qualité et Procédés, SporAlim-Bactéries Sporulées dans la chaîne Alimentaire et GREEN-Eco-extraction de produits naturels.

L'UMR SQPOV contribue à reconcevoir, dans une optique d'alimentation durable, les procédés de transformation des fruits et légumes pour l'amélioration de la qualité nutritionnelle⁵. Le but

de l'équipe Qualité et Procédé est de caractériser et comprendre les mécanismes qui gouvernent l'évolution des qualités des fruits et légumes au cours des procédés de transformation et du stockage, avec un intérêt particulier pour les microconstituants : métabolites secondaires et vitamines.

1.III. PROJET DESHYFRUIT

Ce stage s'est déroulé dans le cadre d'un projet déposé auprès de la SFR (Structure Fédérative de Recherche) TERSYS associant INRAE, le CIRAD et Avignon Université. Le projet Déshyfruit vise à réduire les pertes aux champs lors des périodes de surproduction en stabilisant des purées de fruit par la transformation en poudre *via* le procédé de déshydratation sur séchoir cylindre. L'objectif général est de préciser et comprendre les phénomènes mis en œuvre ayant un impact sur les qualités sensorielle (arôme, couleur, saveur), nutritionnelle (phytomicronutriments) et texturale (réhydratabilité, granulométrie, « collant ») de la poudre de fruit finale, et ensuite d'optimiser ces différents critères en proposant des solutions adaptées à chaque matière première. Mon stage a été financé par le GIS (groupement d'intérêt scientifique) Fruits qui vise à contribuer à une innovation orientée "développement durable" par la production de connaissances scientifiques et opérationnelles⁶.

Initialement, les expérimentations prévues lors de mon stage devaient se dérouler sur les 3 sites des partenaires du projet, au début au CIRAD de Montpellier puis à Avignon, à INRAE et à l'Université. La période de confinement puis la réouverture progressive et partielle des laboratoires et locaux ont complètement modifié cette organisation. La réduction des transports et la non-réouverture des chambres d'étudiants sur INRAE n'a pas permis ma venue sur Avignon. Le co-encadrement est resté effectif par les partenaires du projet mais avec une dominante pour le CIRAD pour la réalisation des expérimentations. La mangue qui devait être mon principal modèle d'étude a dû être abandonnée (difficulté d'approvisionnement avec la crise sanitaire) et l'abricot est devenu le modèle principal pour les essais de séchage.

CHAPITRE 2 :
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

2.I. GENERALITES SUR LA MANGUE

2.I.a Définition et composition

La mangue est le fruit du manguier, grand arbre tropical de la famille des Anacardiaceae, originaire des forêts d'Inde, du Pakistan et de la Birmanie où il pousse encore à l'état sauvage. Cet arbre, de son nom scientifique *Mangifera indica*, a un feuillage persistant, dense et vert foncé. La mangue est classée comme une drupe (charnue avec une seule graine enfermée dans un endocarpe coriace)⁷ ; les variétés peuvent être très variables dans la forme, la couleur, le goût et la texture de la chair. Selon les variétés (plusieurs milliers), sa peau peut être jaune, verte ou rouge.

C'est un fruit climatérique, c'est-à-dire qui continue à mûrir après sa récolte. Il peut éventuellement aller jusqu'au pourrissement sur les étals s'il n'est pas bien conservé.

La mangue est une source de micronutriments : sa pulpe contient de la provitamine A, de la vitamine C, du β -carotène et des xanthophylles, ainsi que du sucre et des minéraux⁸.

A partir de la table de composition nutritionnelle des aliments Ciquel (2017) – ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire, de l'alimentation, de l'environnement et du travail), APRIFEL (Agence pour la Recherche et l'Information en Fruits et Légumes) a établi la composition nutritionnelle moyenne pour 100g de mangue ainsi que les VNR (Valeurs nutritionnelles de Référence) reporté dans le tableau 1⁹.

Tableau 1 : Profil nutritionnel pour 100 g de mangue fraîche (APRIFEL)

Composants	g/100g	%VNR
Eau	83	-
Protéines	0.62	1.24
Lipides	0.31	0.44
Acides gras saturés	0.073	0.37
Glucides	13.7	5.27
Sucres	11	12.22
Fibres	1.7	-
Acides organiques	0.34	-

Pour seulement 240 calories, ce fruit exotique a de vraies vertus pour la santé notamment grâce à sa richesse en vitamines B, E et C en carotène et principalement les provitamines A, en potassium et en fer. Elle permet aussi un apport en cuivre qui contribue à la fabrication des globules rouges et a un apport en fibres utile au transit et à la digestion.

A maturité de consommation, la mangue contient majoritairement des glucides (13,7 g/100g), sous forme de sucres (11 g/100g).

La mangue est riche en vitamine C (40,13 mg/100 g) et source de vitamine B9 (57 µg/100g). Elle apporte respectivement l'équivalent de 40,13%, et 28,50% des VNR. Les autres vitamines sont présentes en quantité moindre, elles représentent moins de 15% des VNR.

2.I.b Caractéristiques physico-chimiques et organoleptiques

La mangue est un fruit climatérique qui mûrit rapidement après récolte.

Sa peau se caractérise par une couleur vert foncé (stade immature, mauvaise qualité à la maturité), vert pâle (stade immature, avec qualité acceptable à maturité) à rouge ou jaune-orange (stade mûr, qualité optimale). Les caroténoïdes (carotènes et xanthophylles) sont les principaux composants responsables de la couleur jaune vif de la chair de la mangue. La fermeté est également un indicateur de la maturité du fruit, moins le fruit est ferme, plus il est proche de sa maturité.

2.I.c La filière mangue

Au niveau mondial, le continent Asiatique compte pour plus de 70 % de la production totale ; l'Inde est le premier producteur : presque 50 % des mangues du monde sont produites en Inde, avec environ 19 million de tonnes à l'export sur une production mondiale totale annuelle d'environ 33 millions de tonnes¹⁰. Suivent ensuite l'Afrique avec 17 % et l'Amérique latine avec 10 %. La Côte d'Ivoire est le premier pays africain exportateur vers l'Europe. Parmi les fruits tropicaux consommés, la mangue occupe le deuxième rang de la production mondiale, précédée par la banane⁹.

Du fait de son caractère polyembryonné et monoembryonné, une certaine instabilité variétale se crée au niveau du manguier. La libre pollinisation des arbres peut être à l'origine de nouvelles variétés. Une même souche peut donc se décliner en de multiples types de manguier selon les lieux de culture. Un millier de types ou variétés a été répertorié, sachant qu'un même type ou variété peut être dénommé de plusieurs façons selon les pays. Les 12 variétés les plus commercialisées, classées par ordre décroissant d'importance commerciale sur les marchés occidentaux sont les suivantes¹: Tommy Atkins, Kent, Keit, Palmer, Ameli, Alphonso, Chausa, Totapuri.

A partir du fruit, plusieurs procédés de transformation agroalimentaire en divers sous-produits sont faits. Elle peut s'inscrire dans un souci de conservation des excédents de récolte et de limitation des pertes aux champs pour la filière mangue surtout pour l'Afrique où elle est cependant limitée par manque d'équipements. Les technologies utilisées pour la préparation des sous-produits sont de nature chimique (sucrage pour les marmelades et les sirops concentrés) ou thermique (dessiccation pour les poudres et les pulpes séchées et l'appertisation pour les jus de fruits et les conserves en boîtes). Une large gamme de produits issus de la transformation des mangues peut être relevée dont les plus fréquents sont : les jus, nectars, cocktails et sirops ; les confitures ; les mangues séchées ; les gelées ; les conserves de purée ; les alcools et vinaigres de mangue ; le beurre de mangue et les composts.

2.II. LES PROCÉDES DE STABILISATION ENZYMATIQUE DES FRUITS

2.II.a Blanchiment

Le blanchiment, c'est-à-dire l'exposition des fruits à des températures élevées pendant quelques minutes, est une opération de contrôle décisive de leur stabilisation. C'est un traitement thermique superficiel de quelques minutes de 70 °C à 100 °C destiné à stabiliser les fruits avant leur conservation (surgélation, séchage, etc.).

Dans les méthodes traditionnelles de conservation, ce traitement par la chaleur a pour principale fonction de désactiver les enzymes susceptibles de dégrader la qualité des légumes et les fruits avec des modifications de flaveurs et/ou de couleur. Le blanchiment a un autre rôle important: réduire la charge microbienne initiale en inactivant les microorganismes sensibles à la chaleur. Les températures utilisées peuvent être létales pour les levures ainsi que pour la plupart des moisissures et des microorganismes aérobies. Bien réalisé, le blanchiment réduit la charge microbienne de 60 % à 99 %¹¹. De plus, ce traitement par la chaleur a un effet inhibiteur sur les survivants rendus moins résistants aux stress imposés par la réduction de l'aw et du pH. Par exemple, avec un traitement à l'eau bouillante à 80°C pendant 15 minutes des tranches des fruits de mangue de la variété «Kent» précédé d'un blanchiment pendant 5 minutes et d'une adjonction de sirop, Tchibozo et al. (2007)¹² soulignent une stabilisation microbienne des tranches de mangue traitées thermiquement par rapport à la mangue fraîche. Ils fournissent ainsi des techniques simples aux populations subsahariennes pour maintenir les qualités hygiéniques, gustatives et aromatiques optimales des mangues afin d'éviter des pertes après récolte.

2.II.b Cold Break (CB)¹³

Le procédé Cold Break consiste à broyer les fruits, à raffiner la purée et ensuite à la chauffer à des températures n'excédant pas 70°C. Ces températures sont suffisamment basses pour ne pas détruire les enzymes contenues dans les fruits. Quand le fruit est correctement broyé, la cellule est « décompartimentée », les contacts enzymes-substrats sont facilités et les vitesses de réaction enzymatique sont très grandes. Dans certains cas, la texture de la purée change de façon importante, elle se liquéfie, car les pectines (un des composants du squelette des cellules) sont rapidement dégradées par les enzymes endogènes (PME : pectine méthyle estérase).

2.II.c Hot Break (HB)¹³

Le procédé Hot Break quant à lui commence par un chauffage rapide vers 90-95°C des fruits et légumes intacts ou découpés en gros morceaux ; suivi d'un broyage. La filtration et le tamisage se font à chaud ; les enzymes sont alors détruites par la chaleur et la purée reste visqueuse. Dans certains cas la viscosité peut augmenter par la solubilisation de certain type de pectines.

2.III. SECHAGE DES PRODUITS ALIMENTAIRES

Le séchage est une opération unitaire qui a pour but d'éliminer l'eau qui imprègne un produit par vaporisation afin de le transformer en produit solide sec dont l'humidité résiduelle est très faible.

Il est largement utilisé dans l'industrie alimentaire et permet, entre autres, d'avoir en fin de procédé un produit dérivé qui se conserve bien tout en réduisant aussi les coûts de transport.

Le séchage permet d'allonger la durée de vie du produit ; en effet plus l'humidité résiduelle du produit diminue, plus l'eau libre disponible pour les réactions d'altération diminue, mesurée par l'activité de l'eau (aw), et décroît en dessous de l'activité minimale de développement des microorganismes ($aw < 0.65$). Néanmoins, il est conseillé d'atteindre des aw plus faibles afin d'inhiber les réactions d'altération d'origine chimique et enzymatique (oxydation des lipides, réactions de Maillards,...)¹⁴.

Plusieurs techniques, dont l'application donnera des produits dérivés différents, se distinguent.

- Séchage par entrainement/air chaud : produit humide est placé dans un courant d'air chaud et sec
- Séchage par atomisation/pulvérisation : consiste en une pulvérisation dans un courant d'air chaud de liquides sous forme de gouttelettes et qui deviennent, après évaporation instantanée de l'eau, des grains de poudre

Appliqué à la mangue, le procédé d'atomisation utilisé par Zotarelli et al. (2017)¹⁵ permet d'obtenir des poudres de mangue mais présentant une qualité moindre avec un degré d'hygroscopicité élevé, une partie de la pulpe qui adhère aux parois du séchoir; ce qui peut être dû à des différences de granulométrie et de teneur en sucres de la pulpe.

- Déshydratation sur cylindre sécheur : La matière à sécher est déposée à la surface du cylindre et encollée à l'aide de cylindres satellites qui servent aussi à réduire l'épaisseur du produit. Ils conviennent pour les produits pâteux tels que les fruits et légumes réduits en purée, les liquides concentrés.

Les flux sont intenses et la durée de traitement est faible, quelques dizaines de secondes. La dégradation des propriétés nutritionnelles est faible du fait du couple temps/température favorable.

- La lyophilisation : procédé de séchage dans lequel l'eau passe directement de l'état solide (glace) à l'état vapeur grâce à une sublimation. Le produit est d'abord congelé à des températures négatives (de -20 à -40 °C par exemple) puis placé dans une enceinte sous vide poussé.

Cette technologie est très coûteuse et reste donc limitée dans ses applications (produits sensibles, industries pharmaceutiques, café, champignons, quelques fruits etc.). Les aliments lyophilisés sont généralement d'excellentes qualités et très hygroscopiques, il faut donc éviter qu'ils ne se réhydratent en procédant à un emballage sous vide ou sous atmosphère modifiée (comme avec l'azote qui est un gaz inerte principalement utilisé pour remplacer l'oxygène dans l'emballage, empêchant ainsi l'oxydation).

2.IV. PROPRIETES TECHNO-FONCTIONNELLES DES POUDRES DE FRUITS

Au même titre que le fruit frais, la poudre de fruit possède des caractéristiques biochimiques (composition protéique, glucidique, lipidique et minérale), microbiologiques et physiques (masse volumique, granulométrie, solubilité, dispersibilité, mouillabilité, hygroscopicité, etc.) : Schuck et al. (2012)¹⁶.

Deux notions physico-chimiques préalablement nécessaires pour la maîtrise du séchage et du stockage des poudres sèches sont l'activité de l'eau et la température de transition vitreuse qui permettent de les caractériser.

La température de transition de phase (T_g) est un paramètre important à suivre sur les poudres car influençant la texture générale du produit fini. La T_g est déterminée à partir de l'analyse de

la transition vitreuse par la technique DSC. La DSC (calorimétrie différentielle à balayage) est une technique d'analyse basée sur « la mesure des variations de l'énergie thermique fournit à un échantillon par rapport à celle apportée à un corps inerte appelé témoin en conditions contrôlées (mode isotherme ou variation contrôlée de température) » (Schuck, Dolivet et Jeantet, 2012). Cette technique permet de visualiser des thermogrammes représentant l'évolution du flux thermique en fonction de la température. La vitesse de chauffage est l'augmentation T de la température par unité de temps t. Les transitions thermiques sont les changements successifs qui se produisent dans un corps dans une structure amorphe lorsqu'il est chauffé. Il s'agit :

- du changement de chaleur spécifique endothermique à T_g ;
- du changement d'état exothermique à la température de cristallisation ;
- du changement d'état endothermique à la température de fusion.

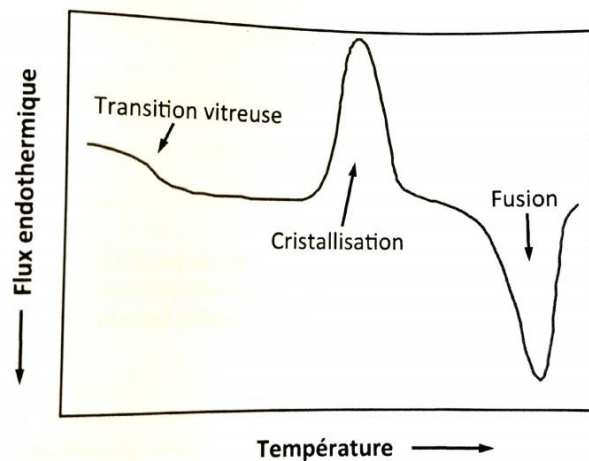


Figure 1 : Evolution du flux de chaleur spécifique en fonction de la température par DSC. Passage d'un sucre de l'état vitreux à l'état cristallin (Schuck et al 2012)

Plusieurs modèles mathématiques ont été développés pour estimer la valeur de T_g dans les poudres ; ils sont fonction de la teneur en eau (W_1) et en solides (W_2). Les équations des modèles mathématiques sont données dans le tableau 2 :

Tableau 2 : Modèles mathématiques de calcul de T_g

Modèles	Expressions
Linéaire (Ross and Karel 1991) ¹⁷	$T_g = T_{g1}W_1 + T_{g2}W_2$ $0.1 < a_w < 0.8$
Fox (1956)	$\frac{1}{T_g} = \frac{W_1}{T_{g1}} + \frac{W_2}{T_{g2}}$
Gordon and Taylor (1952) ¹⁸	$T_g = \frac{T_{g1} * W_1 + K T_{g2} * W_2}{W_1 + K W_2}$
Couchman and Karasz (1978) ¹⁹	$\ln\left(\frac{T_g}{T_{g1}}\right) = \frac{W_2 * K * \ln\left(\frac{T_{g1}}{T_{g2}}\right)}{W_1 + K * W_2}$

CHAPITRE 3 :
MATERIELS ET METHODES

3.I. PLANNING INITIAL DU STAGE

Pour atteindre les objectifs fixés lors de l'établissement du projet, un planning a été instauré en amont du début de mon stage. Il prévoyait en premier lieu de comprendre le comportement thermique des poudres (notamment poudre de mangue) pendant et après le séchage. Pour cela, il était prévu des essais de mesure de T_g (transition vitreuses) par DSC-ATG sur des purées à 3 a_w et en considérant des ajouts d'agents texturant (maltodextrines, amidons, gommés arabiques, pectines). Par la suite, il était prévu d'établir des essais similaires en fonction de 4 stades de maturité (2 stades physiologiques (vert et mûr) et 2 stades commerciaux (5 et 10 jours)). Enfin, la création d'abaques de T_g en fonction de la teneur en eau du produit ainsi que de la poudre finalement obtenue en fin de procédé nous aurait peut-être permis de piloter le procédé de séchage pour obtenir des poudres de mangue avec une qualité texturale adéquate. La dernière partie du stage visait à réaliser des essais sur pilote afin de confirmer nos données, et de réaliser une batterie d'analyses physico-chimiques pour comprendre l'impact de la technologie sur les qualités sensorielles et nutritionnelles et enfin d'essayer de réaliser une validation d'un transfert de nos données pour le cas du séchage de l'abricot. La figure 2 détaille ce planning, la notion de densité fait référence à la densité du fruit. Un autre projet au CIRAD (QuaDens) vise à mettre en évidence un lien entre la densité d'un fruit et sa maturité physiologique. Nous nous sommes servis des outils qu'ils ont développés, au cours de notre projet. Ainsi la densité haute représente un fruit immature et densité faible un fruit physiologiquement mur.

Un diagramme de Gantt prévisionnel (figure 3) illustre les dates et travaux prévus pour la première période du stage se déroulant au Cirad.

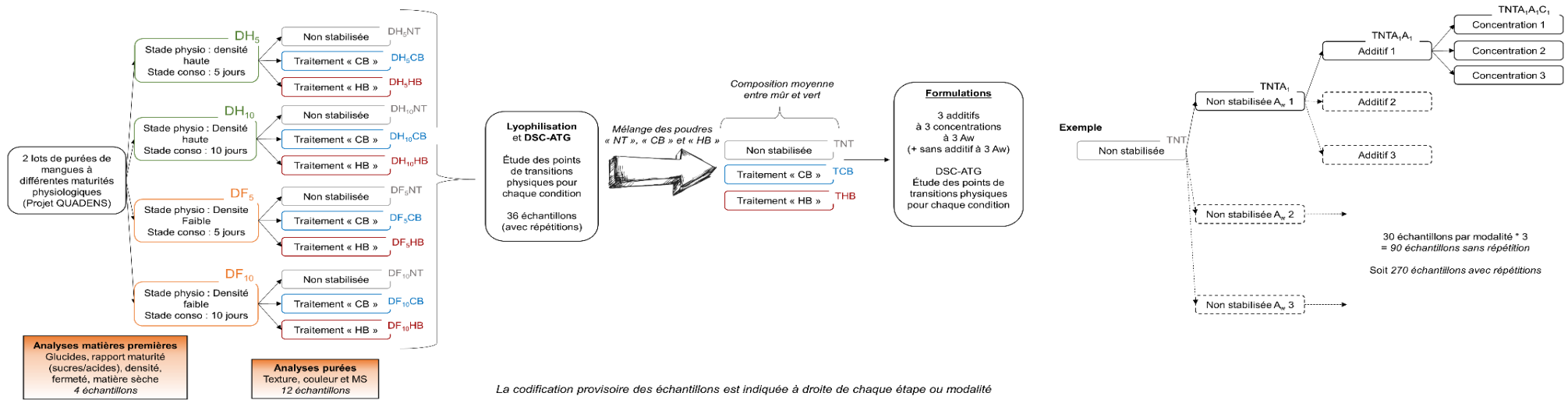


Figure 2 : Planning prévisionnel (issu de « trame de projet Deshyfruit pdf »)²⁰

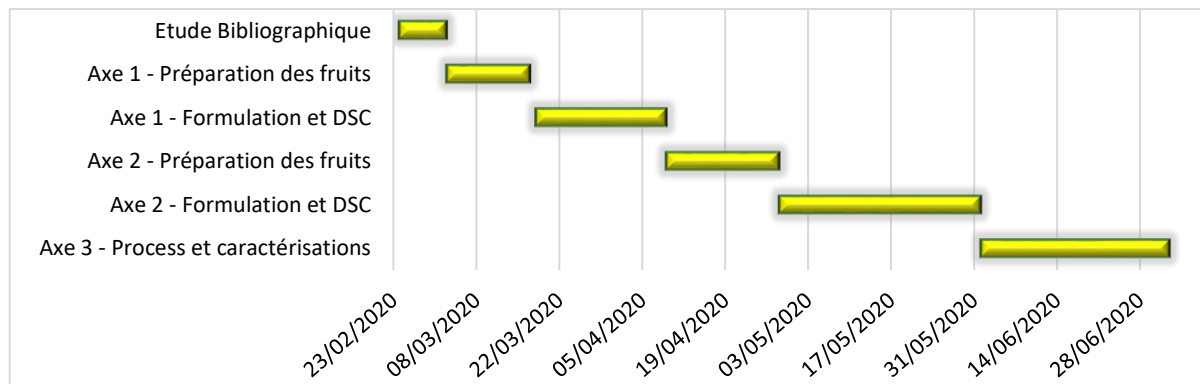


Figure 3 : Gantt prévisionnel (issu de « Trame de projet Deshyfruit pdf »)²⁶

3.II. MATIERES PREMIERES

Les mangues, de la variété Kent, provenaient du Pérou et ont été achetées au fournisseur HELFER de « Frutas de Piura S.A.C ». Conditionnées à la station EMP ACADORA DE FRUTOS TROPICALES S.A.C, elles ont été acheminées par bateau pour être réceptionnées le 11/03/2020 à St Rémy de Provence au centre CTIFL (Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes). A partir d'un lot de 250 fruits, 124 mangues ont été classées en 2 lots suivant leurs densités d ($d < 1$ et $d \geq 1$). Chacun de ces lots a été divisé en 2 parts égales pour réaliser leur maturation physiologique de 5 et 10 jours.

Concernant les abricots, 6 variétés récoltées entre le 8/06 et le 17/06/2020, par l'intermédiaire de INRAE, UMR SQPOV et unité GAFL(Génétique et Amélioration des Fruits et Légumes), ont été utilisées, en provenance de deux vergers INRAE. Le verger de Gotheron de l'Unité Expérimentale de Recherches Intégrées en arboriculture fruitière (UERI) est situé en moyenne vallée du Rhône (Drôme). Le verger de l'Amarine rattaché au GAFL est situé dans le département du Gard. Tous les abricots ont été récoltés à un stade mi- mûr à mûr.

Le tableau 3 décrit les caractéristiques principales des différentes variétés d'abricots:

Tableau 3 : Caractéristiques principales des variétés d'abricots

Variétés	N° Clone	Site	Couleur	Fermeté	Caractère acide	Typicité
Colomer	A0008	Amarine	Orange	-	Acidulé	Moyens, acides, farineux
Goldrich	A2485	Gotheron	Très orange	Compact	Acidulé	Orange, très ferme
Iranien	A3325	Gotheron	Blanche	Juteux	Doux	Blanc-vert, sucré, pas acide
-	A4049	Gotheron	Orange	Compact	-	-
Jengat	A4520	Gotheron	Très rouge	-	Acidulé	Très aromatiques, sucrés
-	A5820	Gotheron	Orange-Rouge	compact	Acidulé	Acide

3.III. OUTILS DE RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Lors de la période de confinement liée à la crise sanitaire COVID-19, mon encadrement m'a demandé de réaliser une recherche bibliographique centrée sur le comportement thermogravimétrique des poudres de fruits principalement l'évolution des T_g . Elle a été orientée sur les critères influençant l'aptitude des fruits au séchage pour obtenir une poudre réhydratable, conservable et préservant les principales propriétés nutritionnelles et sensorielles de la purée de

fruits initiale. Ce sujet, a été initié en remplacement de mon sujet initial, de ce fait les deux premières parties opérationnelles n'ont pas pu être réalisées.

De ce fait, lorsque j'ai pu reprendre en présentiel le 02/06/2020, les responsables du projet ont décidés de changer d'approche et de passer directement à l'étape de séchage sur pilote. De la même façon, la mangue a été abandonnée après les premières étapes pré-confinement car les abricots offraient une variabilité sensorielle, texturale et biochimique plus intéressante liée à leurs zones agricoles plus proches.

Pendant ma recherche bibliographique, plusieurs moteurs de recherche m'ont aidé à trouver les articles traitant de ce sujet et avec des thèmes spécifiques abordés pour plusieurs types de fruits. Ainsi, à partir d'une recherche classique sur Google ou Google Scholar, de sites comme sciencesdirect.com, Onlinelibrary.wiley.com, techniques-ingenieur.com, researchgate.net ...; et avec des thématiques ou mots clés en anglais incluant « glass transition », « powder stability », « powder technology », « mathematical modeling » ..., divers travaux sur les poudres de fruits m'ont permis d'alimenter un document en anglais présentant les procédés de déshydratation des fruits et les critères physico-chimiques des poudres obtenues.

3.IV. ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES ET SECHAGE DES MATRICES ALIMENTAIRES

3.IV.a Analyse de la transition vitreuse des poudres

Les températures de transition (T_g) des poudres sont déterminées par analyse thermique avec le DSC 8500 (Perkin Elmer, USA). Deux récipients, capsule témoin et capsule contenant l'échantillon à analyser sont placés dans un four qui chauffe selon un mode défini dans un programme incluant vitesse de chauffage, chauffage, refroidissement et bornes de température. Les capsules utilisées sont composées d'un creuset et d'un couvercle en inox. Après pesage de l'échantillon la capsule est sertie à l'aide d'une presse Perkin Elmer 139005. Une masse de poudre de 5 à 10 mg a été pesée pour chaque échantillon.

Chaque récipient contient un thermocouple relié à un ordinateur avec un logiciel qui donne les graphes de la différence de chaleur (Heat Flow) en fonction de la température. Une ligne de base est faite au préalable entre le témoin et une référence (capsule vide) dont les changements thermiques sont enregistrés; ces changements seront à chaque fois déduits pendant l'analyse des échantillons.

La machine a été utilisée en testant 2 modes d'analyse pour jouer sur l'impact de la vitesse de chauffage :

- Un chauffage classique « Scan classique » :
 - 4 minutes à -60°C ;
 - Chauffage de -60°C à 200°C à 10°C/min ;
 - Refroidissement de 200 à -60°C à 100°C/min.
- Un chauffage rapide « Hyper Scan » :
 - 4 minutes à -80°C ;
 - Chauffage de -80°C à 300°C à 100°C/min ;
 - Refroidissement de 300 à -80°C à 100°C/min

Le chauffage à vitesse rapide de 100°C s'est avéré plus efficace qu'à vitesse lente de 10°C pour repérer la plage de transition vitreuse.

Les échantillons qui ont pu être analysés sont des poudres d'agents texturant (maltodextrines et amidon soluble) secs ou éventuellement ajoutés d'eau. Des analyses de DSC sur poudres de mangue lyophilisées, d'abricots déshydratés et de gomme arabique sont prévues pour compléter les premières analyses.

3.IV.b Tri densimétrique

Le tri densimétrique, ou répartition en fonction de la densité, a été réalisé par l'estimation de cette dernière grâce à une méthode de mesure en ligne du volume avec l'outil Qua'dens. Il s'agit d'une nouvelle technologie non destructive de tri pour caractériser précocement le stade de maturité de certains fruits et pour pouvoir les répartir en lots et optimiser leur conservation.

Le fruit, placé sur un support, tourne sur lui-même dans une enceinte traversée par un laser ; le volume va ainsi être délimité et calculé avec une possible schématisation en 3D.

Une pesée préalable des fruits est nécessaire pour déterminer leur masse. Un fichier contenant les masses des fruits en fonction de leur numéro d'attribution est directement intégré au logiciel qui calcule la densité en fonction du volume qui lui est attribué.

3.IV.c Déshydratation des purées de fruits sur séchoir cylindre

La déshydratation des fruits sur séchoir cylindre implique au préalable une étape de raffinage pour pouvoir séparer la pulpe de la peau et des graines.

Le raffinage a été réalisé par une passoire/raffineuse de type Auriol PH3 dont les caractéristiques principales sont : puissance moteur (2,2 kw), vitesse maximale 910 trs/min, surface de tamisage 0,27 m². Les fruits sont projetés sur une grille poreuse dont la taille des rayons est calibrée et sont pressés par un moyeu central (hélice raclante) tournant à vitesse

constante (entre 40 et 60 trs/min) sur les parois du cylindre. Pour l'obtention de la purée d'abricots, un premier broyage (dénoyautage) a été effectué avec une grille de mailles 30/10 (3mm). La purée obtenue contenant toujours quelques impuretés solides a été raffinée à nouveau, cette fois avec une grille de mailles plus petites 10/10 (1mm).

La déshydratation des purées d'abricot s'est faite sur le sécheur à tambour de la marque « Andritz Gouda dont la pression peut aller jusqu'à 12 bars et la température jusqu'à 191°C. Le sécheur à tambour est chauffé à l'intérieur par de la vapeur et il tourne en continu ; la répartition du produit humide se fait à l'aide de rouleaux applicateurs qui tournent sur la partie supérieure du tambour. Le produit est alimenté dans l'espace entre les rouleaux applicateurs. Un film de produit est formé dans le jeu entre les rouleaux applicateurs et le tambour de séchage. Après une rotation, le couteau retire le produit séché de la surface du tambour sous forme de film ou de flocons. La figure 4 décrit l'installation du sécheur cylindre avec les éléments connexes permettant la régulation de pression, de vitesse de rotation, du débit.

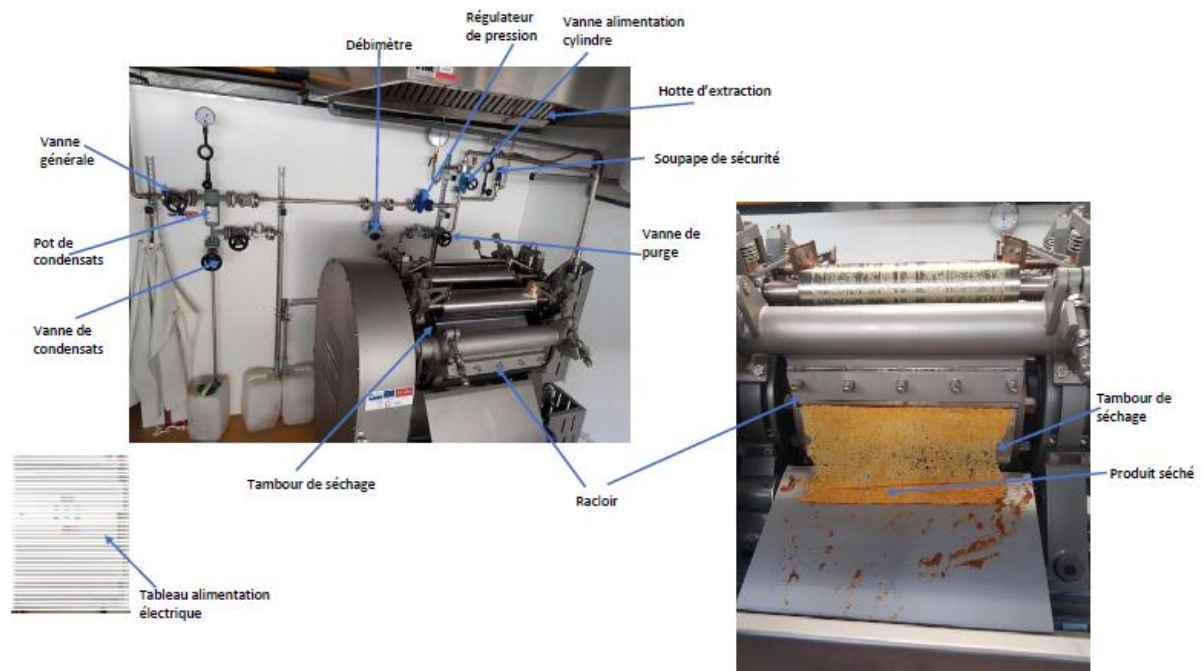


Figure 4 : Sécheur à tambour

Les films obtenus sont ensuite broyés finement à l'aide du Thermomix vorwerk avec une vitesse de broyage (vitesse des hélices) réglée entre 4,5 et 6.

- Teneur en matière sèche des purées et poudres de fruits

La teneur en matière sèche correspond à la part de solides d'un produit dont l'eau a été retirée. Elle est déterminée par séchage sous vide d'environ 1 gramme d'échantillon dans une étuve à 70 °C pendant 48h des matrices (purées et poudres) pesées dans des capsules en aluminium. Après séchage, le produit est refroidi et pesé à nouveau. Le calcul de la matière sèche se fait par le ratio entre la masse du produit séché et masse du produit non sec (masse de l'échantillon initial) selon la formule suivante :

$$\% MS = 100 - \frac{mi - mf}{mi} * 100 \quad (1)$$

Avec : m_i : masse initiale de l'échantillon + capsule avant séchage ;

m_f : masse finale de l'échantillon + capsule après séchage ;

$m_i - m_f$: masse d'eau évaporée.

- pH et Acidité Titrable

Le potentiel hydrogène (pH) correspondant à la quantité d'ions hydrogènes H_3O^+ dans une solution permet de mesurer l'activité chimique de ces ions cette solution : $pH < 7$ pour une solution acide ; $pH = 7$ pour une solution neutre et $pH > 7$ pour une solution basique.

L'acidité titrable quant à elle correspond à la somme des acides minéraux et organiques libres dans un produit ; elle est exprimée par rapport à l'acide majoritaire et dépend donc du produit analysé. Pour les purées et poudres d'abricots, elle sera exprimée en g d'acide malique (majoritaire dans les abricots ; à peu près 70% des acides totaux) pour 100g de matière fraîche.

La détermination du pH et de de l'acidité titrable est réalisée à partir du dosage pH-métrique avec de la soude 0,1N par le titrateur automatique Titroline Schott Easy (Schott,Germany) . 3 g de purée ou 1 g de poudre sont diluées avec 30 mL d'eau distillée dans des bocaux en verre d'une contenance de 50 mL. Les échantillons sont au préalable homogénéisés pendant 30 minutes avec un agitateur rotatif Reax (Heidolph, Germany). Avant le dosage, un rinçage et un étalonnage à pH 7 et pH 4 sont nécessaires pour calibrer le Titroline. L'introduction de la sonde dans l'échantillon permet de lire directement la valeur de pH ; puis le dosage de l'acidité se fait une quantité de soude versée (mL) jusqu'au pH équivalent de 8,1. L'acidité titrable (TA) est exprimée à partir de la formule suivante :

$$TA = \frac{Cb * Vb * PMA * 100}{na * PE} \quad (2)$$

Avec : C_b = concentration molaire de NaOH (mol/L)

V_b = volume de NaOH (10^{-3} mL)

PM_a : poids molaire de l'acide malique = 134 g/mol

n_a : nombres d'acidité de l'acide malique = 2

PE : prise d'essai de l'échantillon = 3g de purée ; 1g de poudre

CHAPITRE 4 :
RESULTATS ET DISCUSSIONS

4.I. TRI DENSIMETRIQUE DES MANGUES

Le tri de 250 mangues en fonction de leur densité a permis de les classer en 2 lots : l'un de basse densité (BD) c'est-à-dire présentant une densité < 1 ; et l'autre de haute densité (HD) c'est-à-dire possédant une densité ≥ 1 . Il a été prouvé par les études de Hor et al. (2020)²¹ que dans le cas de la mangue, le tri densimétrique permet de traduire son état de maturité physiologique et sa qualité nutritionnelle à maturité commerciale. Ainsi, les mangues les plus riches en nutriments seront les plus denses (HD) avec des teneurs en sucres et en arômes plus importantes que les BD et un goût final moins acide. Pour leur part les BD seront plus adaptés à la transformation qu'à la consommation.

La distribution densimétrique (fréquence en fonction de la densité) en figure 5, établie à partir de 205 fruits, montre une distribution prépondérante pour les densités 0,99 et 1. Elle informe sur le nombre de fois qu'est trouvée une classe de valeurs. Cette large distribution densimétrique (fréquence importante pour les classes entre 0,98 à 1,01) traduit les différents stades de maturité la mangue.

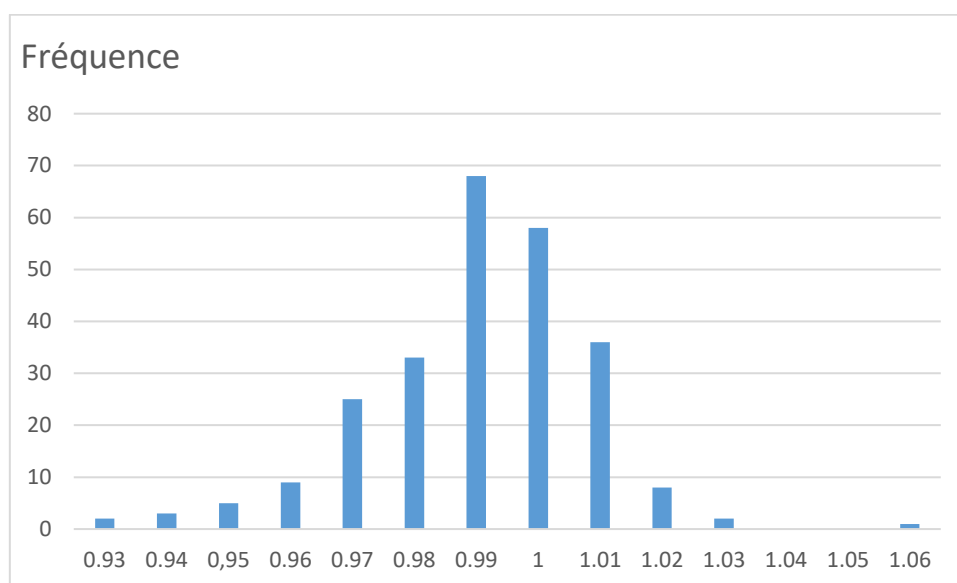


Figure 5 : courbe de distribution densimétrique sur 250 mangues

La distribution densimétrique a permis la sélection de 125 mangues réparties en 2 lots. Les densités les plus élevées pour chaque lot ont été choisies pour la maturation : un premier lot regroupant les HD de 1 à 1,02 ; et un second regroupant les BD de 0,96 à 0,99. Les mangues sont ensuite stockées pendant 5 et 10 jours en chambre froide (18 - 20°C).

La figure 6 montre le planning d'expérimentations établi en fonction du nombre de jours de maturité et des lots et avec les dates de sorties des chambres climatiques prévues.

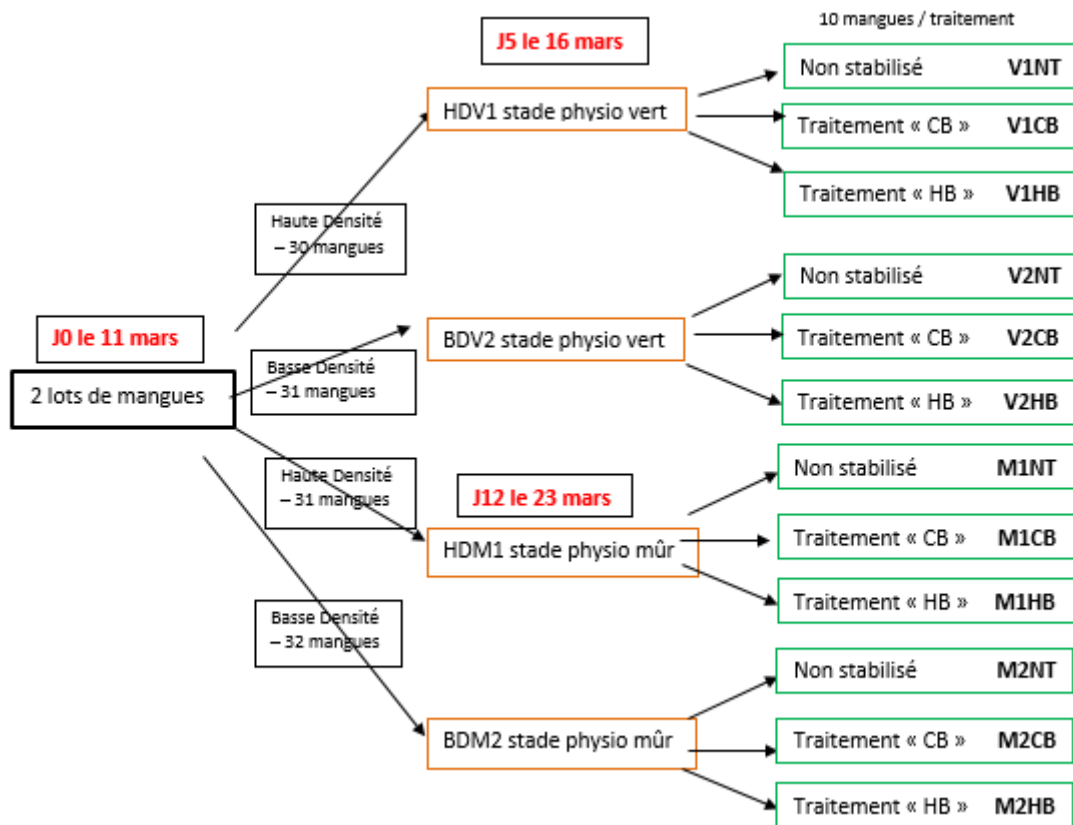


Figure 6 : Planning initial de maturation et traitement thermiques des mangues

Une caractérisation des fruits était prévue pour chaque lot de fruits avant traitement ; elle devait regrouper entre autres les mesures du degré brix, de la matière sèche, de la fermeté et de la couleur. Ces analyses et traitements thermiques des mangues n’ont pas pu être réalisés à cause de la crise sanitaire du COVID19 instaurant le confinement national.

4.II. RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Une recherche bibliographique, portant sur le traitement thermique des poudres de fruits, effectuée pendant la durée du confinement a pris la forme d’un document recensant des travaux publiés ayant pour thématique l’obtention de poudres de fruits par différentes techniques de séchage.

Dans ma recherche, j’ai pris en compte les techniques de séchage utilisées ainsi que les ajouts éventuels d’agents texturants, les caractérisations fonctionnelles des poudres obtenues notamment avec l’identification des températures de transition vitreuse (T_g), la réhydratabilité ou encore l’hygroscopicité des produits. Le tableau 7 en annexes présente une synthèse des articles les plus importants que j’ai utilisés. La majorité de ma recherche bibliographique a été adaptée pour ce rapport et est présenté dans la partie « mémoire bibliographique » en anglais.

4.III. ANALYSE DE LA TRANSITION VITREUSE

Après la période de confinement national et avec la réouverture du CIRAD, des analyses de DSC ont été réalisées sur des poudres d'agents texturants classiquement utilisés en séchage de poudres de fruits : sur des maltodextrines (MD) à 3 degrés de dextrose équivalent (4.0-7.0 DE ; 13.0-17.0 DE et 16.5-19.5 DE) ; sur de l'amidon soluble, de la gomme arabique ainsi que sur de la mangue lyophilisée. Le but de cette étape était de confirmer les résultats de la bibliographie tout en m'appropriant les techniques de mesure des T_g . Ces mesures ont été réalisées sur des poudres sèches, puis sur des poudres à teneur en eau (ou d' a_w) croissantes.

Lors de la transition vitreuse, des changements thermiques définissant le passage du matériau de l'état amorphe à cristallin apparaissent lors de ces mesures, mais ce passage n'est pas instantané, il a plutôt lieu sur une plage de températures. La méthode des tangentes à la courbe (tangentes aux points d'inflexion), illustrée par la figure 7, permet de repérer cette température T_g .

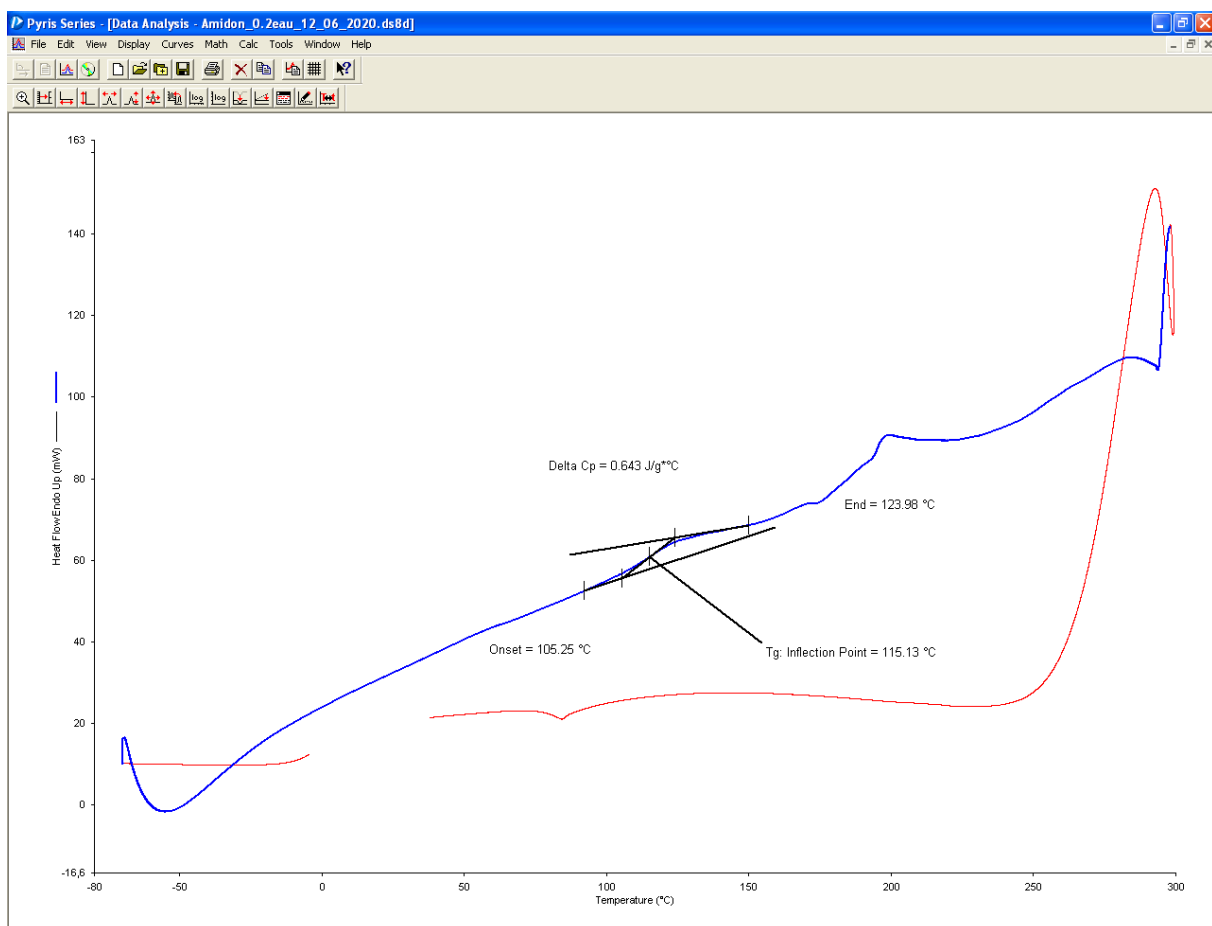


Figure 7 : Courbe de transitions de phase de l'amidon soluble à teneur en eau de 20% (chauffage à 100°C/min)

Grâce à l'acquisition des thermogrammes et à l'application de la méthode des tangentes, l'intersection avec la courbe de la tangente des points « Onset » (initiaux) et de « Endset » (finaux) nous pouvons obtenir la T_g du produit. Cette T_g pour l'amidon soluble avec 20 % d'eau a ici été mesurée à 115,13 °C.

Le tableau 4 recense les autres valeurs de T_g obtenues sur les analyses et les compare aux valeurs de la littérature.

Tableau 4 : Valeurs de transition vitreuse T_g de quelques agents texturants

Produit	Spécifications (DE)	T_g littérature (°C)	% Eau	T_g mesurée (°C)
Amidon soluble		130 (amidon insoluble) ²²	0	170
			0.01	145
			0.05	150
			0.1	125
			0.15	120
			0.2	115
			0.25	100
			0.3	90
Maltodextrine	4.0-7.0	100 (MD 47 DE) ²³	0	180
			0.01	148
			0.05	145
			0.1	140
Maltodextrine	13.0-17.0	180 (MD 11-14DE) ²²	0	165
			0.01	130
			0.05	110
			0.1	80
			0.15	69
Maltodextrine	16.5-19.5	140 (20-23DE) ²²	0	150
			0.01	135
			0.05	120

Cependant la finesse et la précision de ces mesures rendent parfois difficile l'identification des T_g ; en effet plusieurs points de changement de phase peuvent être repérés avant la cristallisation. Ceci peut être dû à la pureté du produit, aux variations du flux de chaleur entre l'échantillon et la capsule référence, ou même à l'utilisation de capsules en inox.

L'utilisation de capsules en aluminium est préconisée pour les prochaines mesures de DSC.

En général, l'utilisation d'agents d'aide au séchage comme les maltodextrines permet de faciliter le séchage en déplaçant la T_g du produit et d'obtenir une qualité de poudre optimale. Ces « aides » sont le plus souvent utilisés en atomisation ou dans les stratégies de flash drying, avec une évaporation soudaine et rapide de l'eau du produit. Normalement, plus les molécules des maltodextrines sont longues, plus elles devraient présenter une T_g élevée. Les DE les plus faibles ont les chaînes moléculaires les plus longues. Les DE traduisent le degré d'hydrolyse de l'amidon, plus l'hydrolyse est poussée, plus la proportion en sucres simples (chaînes courtes) composant la maltodextrine est élevée. Dans notre cas d'analyse, les profils thermogravimétriques par DSC confirment des T_g de maltodextrines plus élevées en fonction des DE les plus faibles. Ces T_g diminuent avec la teneur en eau, phénomène bien connu dû à l'effet plastifiant de l'eau.

Au terme de mon stage, le but est de pouvoir représenter des courbes des T_g des produits en fonction de la teneur en eau et de la quantité d'agents texturants qui nous permettraient 1) de piloter les conditions de procédés (température, temps de séjour) pour éviter les phénomènes conduisant au colmatage des rouleaux 2) de prévoir en amont la qualité texturale du produit fini. Il sera réalisé une corrélation des résultats obtenus à des valeurs de références qui seront obtenues en utilisant les modèles mathématiques établies par Ross et al. (1991), qui prennent en compte la proportion des constituants (sucres, amidon, eau, etc.) pour calculer la T_g finale d'un produit alimentaire.

4.IV. LES POUDRES D'ABRICOTS

Après la crise sanitaire de la COVID19, le projet initial a dû être modifié. Le temps limité avant la fin du stage ne permettait plus de réaliser le plan de départ, à savoir dans un premier temps l'analyse du comportement thermique des poudres (notamment poudre de mangue) pendant et après le séchage par des essais de mesure de T_g sur des purées à 3 a_w (par analogie sur des poudres lyophilisées/réhydratées) ; puis l'établissement des essais similaires en fonction de 4 stades de maturité (2 stades physiologiques (vert et mûr) et 2 stades commerciaux (5 et 10 jours) et enfin la réalisation des essais de séchage sur séchoir pilote pour confirmer les hypothèses. Le schéma a été revu pour une approche plus expérimentale, sur abricots et non plus sur mangue

pour des questions de facilité d'approvisionnement par l'INRAE d'Avignon, qui consiste à réaliser des essais de séchage, incluant des étapes de raffinage et de broyage, afin de mesurer l'impact du procédé sur la qualité nutritionnelle, organoleptique et fonctionnelle des fruits séchés en considérant des aspects de différences variétales et de degré de maturité.

4.IV.a Raffinage et séchage des abricots

Les données de raffinage et de séchage pour les 6 variétés d'abricot étudiés à ce jour sont consignées dans le tableau 5. Ce tableau regroupe les masses et rendements obtenus avec les modes de séchage utilisés.

Le séchage de la variété A4049 a donné pour les 3 modes des films de produit sec étirables et qui se décolent facilement de la paroi du tambour. Leur broyage donne de fines poudres mais la poudre issue du séchage de la purée A4049 séchée à pression de 5,5 bars et à vitesse de 4 trs/min présentait à vue d'œil une plus grande hygroscopicité par rapport aux autres.

Pour le deuxième essai de séchage avec les variétés A5820, Colomer et Jengat avec et sans ajout d'agents texturants, le film était difficile à décoller de la paroi du tambour pour les mélanges purées-agents texturant. Ceci peut s'expliquer par car l'ajout de la MD 4.0-7.0 DE et de la gomme arabique, formait dans le mélange des un réseau plus compacte, phénomène moins présent pour l'ajout de l'amidon soluble.

Avec moins de purées utilisées pour les variétés Goldrich et Iranien lors du séchage, les quantités de poudres obtenues deviennent aussi moins importantes. En début de procédé, le premier produit en sortie est sous forme de film compact qu'il n'est pas possible d'utiliser ; les rendements de séchage par rapport à la quantité de produit récupéré deviennent ainsi plus faibles comparativement aux autres essais. De plus, à pression de 4 bars, la température du tambour diminue très vite au contact du produit (pertes moins vite compensées par rapport à une forte pression) ; ce qui crée des buées sur la surface du tambour et donne en sortie de séchoir une masse de produit collant et non sec. Pour ces essais, le choix d'une pression basse a été fait pour comparer par rapport aux pressions plus fortes et à des vitesses de rotation variables. A même pression de 4 bars, les poudres de Goldrich obtenues pour des vitesses de 4 et 6 trs.min étaient collantes et difficiles à broyer. Une pression faible (4 bars), impliquant une température de séchage plus faible (130 à 135 °C), n'est pas l'idéale pour le séchage.

Tableau 5 : Raffinage et séchage de 6 variétés d'abricots

Variété/N° Clone	Date de récolte	Stockage		Date de traitement	Masse raffinée (kg)	Masse purée (kg)	Rendement raffinage (%)	Conditions de séchage	Masse purée à sécher (kg)	Masse poudre (kg)	Rendement séchage (%)
A4049	08/06/2020	15 °C	Transport le 09/06/2020 Montpellier	10/06/2020	21,7	15,58	71,80	P=5,5bars; θ=150-160°C; v _r = 4trs/min	-	-	-
								P=6,5bars; θ=165°C; v _r = 4trs/min			
								P=6,5bars; θ=165°C; v _r = 4trs/min			
A5820	12/06/2020	12 °C	Transport le 16/06/2020 Montpellier	18/06/2020	15,9	14,26	89,69	5,5bars; 4trs/min; sans texturant	4,54	0,4518	9,95
								5,5bars; 4trs/min; 10% Amidon	5,05088	0,7096	14,05
								5,5bars; 4trs/min; 20% Amidon	5,24177	0,8376	15,98
Jengat/A4520	15/06/2020	Labo	Transport le 16/06/2020 Montpellier	18/06/2020	13,9	8,26	59,42	5,5bars; 4trs/min; sans texturant	4,13	0,2255	5,46
								5,5bars; 4trs/min; 5% MD 4.0-7.0 DE	4,2095	0,5411	12,85
Colomer/A0008	15/06/2020	Labo	Transport le 16/06/2020 Montpellier	23/06/2020	19,22	15,46	80,44	5,5bars; 4trs/min; sans texturant	5,16	0,4624	8,96
								5,5bars; 4trs/min; 10% GA	5,24551	0,5861	11,17
								5,5bars; 4trs/min; 20% GA	5,3649	0,5332	9,94
Iranien/A3325	22/06/2020	-	Transport le 22/06/2020 Montpellier	23/06/2020	7,22	4,32	59,83	5bars ; 4trs/min	2,02	0,0496	2,46
								6bars ; 6trs/min	2,02	Pas de poudre	-
Goldrich/A2485	19/06/2020	GAFL (au frais)	Transport le 22/06/2020 Montpellier	23/06/2020	16,62	13,44	80,87	4bars ; 4trs/min	4,1	0,0579	1,41
								4bars ; 6trs/min (5bars; 4trs/min)	3,1	0,0449	1,45
								6bars ; 4trs/min	3	0,201	6,70
								6bars ; 6trs/min	3	0,0676	2,25

La figure 8 montre les produits obtenus lors de la déshydratation de la variété A4049.



Figure 8 : Déshydratation de la variété A4049

Au vue de ces quelques paramètres de séchage, il serait plus judicieux pour les manipulations à venir de choisir des vitesses d'entraînement des rouleaux plus faibles possibles (plus cette vitesse est faible, plus le produit sera chauffé plus longtemps) et avec une pression c'est-à-dire température de chauffage donnant un produit sec plus facilement décollable de la paroi du tambour ; tout ceci avec une plasticité et une élasticité différente en fonction du séchage.

Des analyses ultérieures sont prévues sur les poudres et les purées initiales : sucres (glucose, fructose et saccharose) et acides (acide citrique, acide malique), amidon, couleur, arômes et MIA (Matières Insolubles dans l'Alcool) ; en comparaison aussi des analyses NIRS/SPIR et aux mêmes caractérisations biochimiques sur les fruits à la récolte. Les résultats de ces analyses permettront de voir l'impact concret du séchage et du broyage sur le produit et ainsi de faire des comparaisons entre plusieurs paramètres.

4.IV.b Analyses physico-chimiques réalisées

Le tableau 6 donne les résultats préliminaires des analyses qui ont pu être effectuées après le séchage des abricots.

La teneur en matière sèche des purées d'abricot CTRL (contrôle sans ajout de texturant) montre que ces 4 variétés contiennent moins d'eau (entre 68 et 70 % pour 30 à 32 %MS) contre 87 % en moyenne pour abricot cru dénoyauté (Ciquel)²⁴. Les poudres contiennent en moyenne 5 % d'eau ; ce qui donne une fraction d'eau évaporée de 0,9655. Toutes les valeurs de pH sont assez semblables, un peu plus bas pour Colomer (A0008), l'abricot le plus acide des quatre. Les valeurs d'acidité titrable sont plus élevées dans les poudres que dans les purées initiales, avec comme pour le pH, les plus fortes valeurs pour la variété A0008/Colomer.

Tableau 6 : Teneur en matière sèche, pH et acidité titrable de purées et de poudres de 4 variétés d'abricot

Variétés/Echantillons		Analyses		
		MS (%)	pH	TA (%)
A4049	Purée	31,396	3,66	1,374
	Poudre 1	96,041	3.50	9,213
	Poudre 2	94,945	3.49	9,561
	Poudre 3	95,579	3.47	9,628
A5820	Purée CTRL	31,676	3.56	1,367
	Purée 10% amidon	34,614	3.56	1,369
	Purée 20% amidon	34,657	3,48	1,356
	Poudre CTRL	94,551	3.60	9,313
	Poudre 10% amidon	95,769	3.40	7,377
	Poudre 20% amidon	96,074	3.48	7,136
A4520	Purée CTRL	30,919	3.38	1,240
	Purée 5% MD	-	-	-
	Poudre CTRL	94,490	3.41	10,566
	Poudre 5% MD	96,534	3.45	9,360
A0008	Purée CTRL	31,379	3.14	2,778
	Purée 10% GA	32,147	3.22	2,680
	Purée 20% GA	32,423	3,16	2,803
	Poudre CTRL	93,780	3.05	21,152
	Poudre 10% GA	94,678	3.10	19,209
	Poudre 20% GA	94,813	3.27	8,087

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La maîtrise des facteurs influençant la qualité des produits transformés pendant les procédés de séchage des fruits est une étape importante pour prédire son évolution et garantir sa stabilité. Cette maîtrise des procédés passe la détermination de l'aptitude au séchage du fruit par rapport à son état physiologique, de sa composition, principalement en glucides et acides, des prétraitements thermiques visant à inhiber l'action de certaines enzymes, des changements de phase intervenant lors du chauffage du produit, de l'influence d'agents texturant sur ces changements thermiques et de l'évolution de la teneur en macro et micronutriments dans le produit final. C'est dans ce contexte que s'est inscrit le projet Désyfruit souhaitant aboutir à un outil de prédiction de l'aptitude au séchage de fruits. Cependant à cause de la crise sanitaire Covid19, l'ambition globale du projet a été revue et la déshydratation par séchoir cylindre des purées d'abricot après raffinage a été directement utilisé. Les expérimentations ont été orientées vers une optimisation des paramètres du séchoir cylindre à savoir la pression de vapeur de chauffe (donc de la température de chauffage) et la vitesse de rotation du tambour ; paramètres auxquels sont ajoutés l'effet des agents texturants tels que l'amidon, la maltodextrine et la gomme arabique. Les films obtenus en sortie de séchoir cylindre pour les purées ajoutées d'agents texturants ont été plus difficiles à étirer de la paroi du tambour, cependant elles sont plus facilement broyées pour l'obtention de poudre non collante. Pour le séchage des purées sans additifs, les films se décollaient plus facilement mais des difficultés lors du broyage étaient notables surtout pour ces poudres déshydratées sans ajout de texturant, le produit devenu collant : il était donc plus hygroscopique. Les teneurs en MS et acide titrable variaient en fonction de la variété.

A ce jour l'analyse de la transition vitreuse a pu être faite sur les 3 poudres de maltodextrine et sur l'amidon soluble sèches et à différentes teneurs en eau ; les résultats permettent de se rapprocher des données de la littérature quant à l'influence de l'eau sur les T_g , plus la teneur en eau est importante plus la T_g diminuait par rapport à celle du produit sec

Pour la période restante jusqu'à la fin de mon stage etc. des expérimentations seront conduites sur séchoir cylindre, pour juger de l'efficacité des procédés, avec parallèlement des analyses à effectuer sur purées et poudres en comparatif à la caractérisation biochimique des fruits à la récolte. Elles regrouperont la détermination des sucres simples (glucose, fructose et saccharose), des acides (acide citrique, acide malique), de l'amidon, de la couleur, des arômes et des MIA (Matières Insolubles dans l'Alcool) ; en comparaison aussi des analyses NIRS/SPIR.

Les mesures de T_g sur produits séchés pourront aussi permettre de voir l'impact des agents texturant et de leur proportion dans le mélange (poudre de fruits-agent texturant) sur les transitions de phase.

ANNEXES

Tableau 7 : Synthèse d'articles traitant des poudres de fruits

Fruits	Fruit juice / pulp composition	Drying methods	Druing aids	Moisture content (%)	Tg (Glass transition) °C	Degree of caking (%)	Hygoscopi city (%)	Other characteristic	Referenc es
Mango pulp	Moisture content from 80 to 85% % sucres : 13.1 – 13.56 of which : Sucrose (6–6.36) Fructose (2.5–2.55) Glucose (4.6-4.65) Acidity as anhydrous citric acid 0.306–0.346%	Vacuum drying (710–730 mmHg) Temperature between 65 and 70°C	Maltodextrin : 0.429 to 0.55 (kg per kg dry mango solid)	-	-	10.24–11.5	8.33 – 10.27	The oxidative degradation e.g. browning is low in the final product (vacuum sechage). Sticky point temperature (at 5% dry basis moisture content, Ts). Dispersibility (%) : 73.63–83.19. Flowability (FL, s) : 22–24.56. Sticky point temperature (at 5% dry basis moisture content, Ts) : 45.5–50.65°C.	S. Jaya, H. Das (2004) ²⁵
			Glycerol monostearate : 0.0147 to 0.0157 (kg per kg dry mango solid)						
			Tricalcium phosphate : 0.0147 to 0.0156 (kg per kg dry mango solid)						
Cactus pear juice	pH : 5.54 ± 0.44 Total soluble solids (°Brix) 15.54 ± 0.47 Titrable acidity (% citric acid) 0.175 ± 0.003 Vitamin C (mg/100 ml) 23.65 ± 0.84.	Spray drying Laboratory spray-dryer (Pulvis GB 22 model) at two inlet air temperatures (205 and 225°C), and two compressor air pressures (0.10 and 0.20 MPa)	Maltodextrin 10 DE : concentration between 18 and 23%	3.97 to 6.41	-	-	36.30 to 48.93	Ppercentage of vitamin C retention was relatively low (varied from 28 to 51%) ; vitaminC is very heat sensitive ; Slight change in total color : ΔE between 6.7 and 9.8 ; The lowest values of moisture content in powder were obtained with maltodextrin 20 DE ; The retention of moisture by the powder was greater with maltodextrin 10 DE	Rodríguez-Hernández et al (2005) ²⁶

Tableau 7 : Synthèse d'articles traitant des poudres de fruits (suite)

Fruits	Fruit juice / pulp composition	Drying methods	Druing aids	Moisture content (%)	Tg (Glass transition) °C	Degree of caking (%)	Hygoscopicity (%)	Other characteristic	References
Blueberry	Water 84.90% Total carbohydrates 13.60% Proteins 0.60% Fats 0.60% Ash 0.30%	Freeze-drying Total pressure less than 1 mtorr ; Storage temperature of 20 ° C and -93 ° C condenser temperature	-	0.00	21.79	-	-	Equilibrium moisture content increase slowly at low water activity and shows a steep rise at high relative humidity, which is a typical behavior for substances with high sugar content, including fruit products ; For samples with aw > 0.84, the glass transition phenomenon is not easy to detect	KHALLOUFI and al (2000) ²⁷
				3.50	15.45				
				7.10	-14.27				
				17.80	-43.69				
				32.9	-72.21				
Raspberry	Water 84.50% Total carbohydrates 13.40% Proteins 1.30% Fats 0.30% Ash 0.51%		-	0.0	47.63 K	-	-		
				4.40	295.00 K				
				14.60	271.00 K				
				27.10	244.43 K				
				42.50	216.00 K				

Tableau 7 : Synthèse d'articles traitant des poudres de fruits (suite)

Fruits	Fruit juice / pulp composition	Drying methods	Druing aids	Moisture content (%)	Tg (Glass transition) °C	Degree of caking (%)	Hygoscopi city (%)	Other characteristic	Referenc es
Concentrated pineapple pulp	Water 88% Sucrose 6.20% Fructose 1.60% Glucose 3.70% Acidity 0.20%	Vacuum drying at 70±2°C and 94.65–100 kPa of lowered oxygen pressure	Maltodextrin 38 DE (0.065 kg/kg of pulp) ; Tricalcium phosphate (0.015 kg/kg dry matter)	2.50	53.33 °C	-	-	Utilization of the Gordon-Taylor model to interpret the relationship between glass transition temperature and moisture content ($T_{gm} = \frac{T_{gs} * X_s + K T_{gw} * X_w}{X_s + K X_w}$) $K_{\text{pineapple}} = 0.642 X_w^{-0.5571}$ $K_{\text{mango}} = 0.548 X_w^{-0.628}$ $K_{\text{tomato}} = 1.294 X_w^{-0.4474}$ Correlation between TG and Ts (sticky point temperature) : $\Delta T = T_s - T_g = 10-20^\circ\text{C}$. For the tomato, low reduction rate of sticky point temperature due to low molecular weight of sugar ; Ts decreases with humidity as does Tg ; Moisture content of the powders immediately after drying was found to be very low (~0.1% dry basis). The powders picked up moisture while handling and their water activity increased	Jaya and Das (2007)²⁸
				3.81	45.83 °C				
				6.25	40.00 °C				
Mango pulp	Water 85% Sucrose 6.40% Fructose 2.60% Glucose 4.70% Acidity 0.30%		Maltodextrin 38 DE (0.093 kg/kg of pulp) ; Tricalcium phosphate (0.015 kg/kg dry matter)	1.88	56.15 °C				
				4.63	46.92 °C				
				7.88	38.46 °C				
Concentrated tomato pulp	Water 94% Sucrose 0.60% Fructose 1.00% Glucose 1.00% Acidity 0.60%		Maltodextrin 38 DE (0.033 kg/kg of pulp) Tricalcium phosphate (0.015 kg/kg dry matter)	1.81	51.67 °C				
				4.31	33.40 °C				
				5.75	24.17 °C				

Tableau 7 : Synthèse d'articles traitant des poudres de fruits (fin)

Fruits	Fruit juice / pulp composition	Drying methods	Druing aids		Moisture content (%)	Tg (Glass transition) °C		Degree of caking (%)	Hygoscopi-ty (%)	Other characteristic	References
Mixture of amorphous fructose (F), glucose (G) and sucrose (S).	99.5% pure molecular weight fructose and glucose 180.16 99% pure crystalline sucrose with a molecular weight of 342.30	Mixture of glucose, fructose and sucrose powders	$X_G - X_F - X_S$	1 - 0 - 0	-	T_{gH} / T_{gC}	37.45 / 33.60	-	-	Amorphous state (during cooling and called TgC) and amorphous in the rubbery liquid state (during reheating and called TgH) ; Sugar composition used in samples can be considered representative chemical composition of various sugar-rich food products such as honey, fruit and powdered vegetable juice ; the melting peak temperature regarding fructose, glucose, and sucrose were respectively, 139, 165 and 188 °C ; the binary and ternary systems exhibited only one well-defined global glass transition during cooling (TgC) and during reheating (TgH) ; The corresponding median values of TgH and TgC are for fructose 14.36 ± 0.33 °C and 6.76 ± 0.79 °C; for glucose, 37.71 ± 0.36 °C and 33 ± 0.85 °C; and for sucrose 68.47 ± 0.08 °C and 61.55 ± 0.75 °C (corresponding to those reported in the literature	Saavedra-Leos et al (2012) ²⁹
				0 - 1 - 0			14.13 / 06.20				
				0 - 0 - 1			68.41 / 61.02				
				1/2 - 1/2 - 0			21.50 / 15.36				
				1/2 - 0 - 1/2			42.17 / 40.16				
				0 - 1/2 - 1/2			35.01 / 29.21				
				2/3 - 1/3 - 0			29.72 / 27.31				
				1/3 - 2/3 - 0			19.57 / 10.51				
				2/3 - 0 - 1/3			46.73 / 39.68				
				1/3 - 0 - 2/3			47.08 / 42.45				
				0 - 2/3 - 1/3			19.45 / 10.48				
				0 - 1/3 - 2/3			43.69 / 37.61				
				2/3 - 1/6 - 1/6			34.80 / 28.05				
				1/6 - 2/3 - 1/6			19.28 / 15.01				
1/6 - 1/6 - 2/3	46.54 / 38.94										
1/3 - 1/3 - 1/3	32.40 / 28.00										

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ¹ « MANGUE - Un profil de produit de base par INFOCOMM » Nations Unies CNCUD 2015.
- ² « L'abricot : présentation, production, consommation - Interfel - Les fruits et légumes frais ».
- ³ « Le Cirad, en bref - CIRAD », disponible sur <https://www.cirad.fr/qui-sommes-nous/le-cirad-en-bref>, consulté le 08/05/2020
- ⁴ « Unités de recherche - CIRAD », disponible sur [https://www.cirad.fr/nos-recherches/unites-de-recherche/\(departement\)/performances-des-systemes-de-production-et-de-transformation-tropicaux-persyst/\(type\)/unite-mixte-de-recherche?](https://www.cirad.fr/nos-recherches/unites-de-recherche/(departement)/performances-des-systemes-de-production-et-de-transformation-tropicaux-persyst/(type)/unite-mixte-de-recherche?), consulté le 08/05/2020
- ⁵ « UMR408 Sécurité et Qualité des Produits d'Origine Végétale - Accueil UMR408 ». Disponible sur <https://www6.paca.inrae.fr/sqpov>, consulté le 08/05/2020
- ⁶ « GIS Fruits - Présentation du GIS ». Disponible sur <https://www.gis-fruits.org/Presentation-du-GIS>, consulté le 08/05/2020
- ⁷ Bally, « Mangifera Indica (Mango) » Species Profiles for Pacific Island Agroforestry www.traditionaltree.org Avril 2006.
- ⁸ Govindan, « Mango (Mangifera Indica L.), Plant Produces an Exotic Fruits on Stem; janvier 2019. »
- ⁹ « Analyse nutritionnelle Mangue »; disponible sur <http://www.aprifel.com/fiche-nutri-produit-analyse-mangue,30.html>; consulté le 25/02/2020.
- ¹⁰ « Planetoscope - Statistiques : Production mondiale de mangues », disponible sur <https://www.planetoscope.com/fruits-legumes/1481-production-mondiale-de-mangues.html>, consulté le 26/02/2020.
- ¹¹ « Technologies combinées de conservation des fruits et des légumes », disponible sur <http://www.fao.org/3/y5771f/y5771f02.htm>, consulté le 04/05/2020.
- ¹² AGASSOUNON DJIKPO TCHIBOZO Micheline, TOUKOUROU Fatiou, GANDONOU Christophe, ADEOT/ A.Z. Kifouli1, YOUSOUF Msahazi Chahoné, « Essais de conservation de la mangue à taux d'humidité élevé par la technologie des barrières » Sciences et Médecine 2007.
- ¹³ « Les procédés industriels et la mobilité des molécules colorées.pdf », Unité Sécurité et Qualité des Produits d'Origine Végétale, Avignon - INRA PACA.
- ¹⁴ « Le séchage - Génie Alimentaire », disponible sur <http://genie-alimentaire.com/spip.php?article149>, consulté le 26/02/2020.
- ¹⁵ Marta Fernanda Zotarelli, Vanessa Martins da Silva, Angelise Durigon, Miriam Dupas Hubinger, João Borges Laurindo, « Production of Mango Powder by Spray Drying and Cast-Tape Drying », 2017.
- ¹⁶ Pierre Schuck, Anne Dolivet, Romain Jeantet, « Les poudres laitières et alimentaires ; Techniques d'analyse ».
- ¹⁷ YRJÖ ROOS and MARCUS KAREL, « Water and Molecular Weight Effects on Glass Transitions in Amorphous Carbohydrates and Carbohydrate Solutions », 1991.
- ¹⁸ Gordon et Taylor SYNTHETIC RUBBERS, « Ideal Copolymers and the Second-Order Transitions of Synthetic Rubbers. i. Non-Crystalline Copolymers », 1952.
- ¹⁹ P. R. Couchman and F. E. Karasz, « A Classical Thermodynamic Discussion of the Effect of Composition on Glass-Transition Temperatures », 1977.
- ²⁰ Niang et Servent, « Trame du stage CIRAD / INRA – Projet Déshyfruit », 2020.
- ²¹ Hor et al. (2020) « Fruit Density »; A reliable indicator of sensory quality of mango.
- ²² Feillet, *Le grain de blé : Composition et utilisation* (2000).
- ²³ Bimbenet et al. («Eau, sucres et produits alimentaires») Séchage des solutions sucrées par atomisation : théorie, procédés industriels, exemples d'application.
- ²⁴ « Ciqual Table de composition nutritionnelle des aliments » Abricot, dénoyauté, cru.
- ²⁵ « Jaya et Das - 2004 - Effect of maltodextrin, glycerol monostearate and .pdf », 10.
- ²⁶ Rodríguez-Hernández et al., « Spray-Drying of Cactus Pear Juice (*Opuntia Streptacantha*) ».
- ²⁷ Khalloufi, El-Maslouhi, et Ratti, (2000) « Mathematical Model for Prediction of Glass Transition Temperature of Fruit Powders ».
- ²⁸ Jaya et Das, (2009) « Glass Transition and Sticky Point Temperatures and Stability/Mobility Diagram of Fruit Powders ».
- ²⁹ Saavedra-Leos et al. (2012) « Glass Transition Study in Model Food Systems Prepared with Mixtures of Fructose, Glucose, and Sucrose ».