

SOMMAIRE

| | |
|---|----|
| <i>INTRODUCTION</i> | 1 |
| <i>PRESENTATION DU CIRAD</i> | 2 |
| 1 <i>Présentation générale</i> | 2 |
| 2 <i>Le CIRAD à La Réunion</i> | 3 |
| 2.1 <i>Présentation</i> | 3 |
| 2.2 <i>Le pôle agroalimentaire</i> | 4 |
| <i>PRESENTATION DU PROJET</i> | 5 |
| 1 <i>Contexte de l'étude</i> | 5 |
| 2 <i>Objectifs du stage</i> | 6 |
| 3 <i>Plannings</i> | 6 |
| 3.1 <i>Planning prévisionnel</i> | 7 |
| 3.2 <i>Planning réel</i> | 7 |
| <i>ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE</i> | 8 |
| 1 <i>Données générales sur la culture de la mangue</i> | 8 |
| 1.1 <i>Description du manguier et de son fruit</i> | 8 |
| 1.2 <i>Utilisation de la mangue</i> | 10 |
| 2 <i>Evolution physiologique et biochimique de la mangue lors de son développement sur le plant</i> | 11 |
| 2.1 <i>Cycle de croissance</i> | 11 |
| 2.2 <i>Développement morphologique de la mangue</i> | 11 |
| 2.3 <i>Evolution biochimique de la mangue</i> | 12 |
| 3 <i>Physiologie du mûrissement et évolution biochimique de la mangue en post-récolte</i> | 14 |
| 3.1 <i>La respiration</i> | 14 |
| 3.2 <i>L'éthylène</i> | 15 |
| 3.3 <i>Evolution des critères biochimiques de base de la mangue</i> | 17 |
| <i>MATERIELS ET METHODES</i> | 18 |
| 1 <i>Echantillonnage</i> | 18 |
| 2 <i>Conditions expérimentales</i> | 18 |
| 3 <i>Récolte et préparation des échantillons</i> | 19 |
| 4 <i>Mesures des intensités respiratoires</i> | 19 |
| 4.1 <i>Manipulation</i> | 19 |
| 4.2 <i>Expression des résultats</i> | 20 |
| 5 <i>Mesures morphologiques et analyses physico-chimiques</i> | 21 |
| 5.1 <i>Mesures morphologiques</i> | 21 |
| 5.2 <i>Préparation des échantillons</i> | 21 |
| 5.3 <i>Mesure de la matière sèche</i> | 22 |
| 5.4 <i>Mesure de l'extrait sec soluble</i> | 22 |
| 5.5 <i>Mesure du pH et de l'acidité titrable</i> | 22 |
| 5.6 <i>Protocoles d'extraction et de dosage des sucres</i> | 23 |
| 5.7 <i>Protocoles d'extraction et de dosage de l'amidon</i> | 25 |
| 5.8 <i>Protocoles d'extraction et de dosage des acides organiques</i> | 27 |
| 5.9 <i>Protocoles d'extraction et de dosage des cations</i> | 29 |
| 5.10 <i>Protocoles d'extraction et de dosage de l'ACC libre et de l'ACC total</i> | 30 |

| | |
|--|-----------|
| <i>RESULTATS ET DISCUSSION : évolution biochimique de la mangue à la récolte.....</i> | <i>33</i> |
| 1 <i>Croissance morphologique des fruits</i> | <i>33</i> |
| 2 <i>Evolution du taux de matière sèche</i> | <i>34</i> |
| 3 <i>Evolution de la concentration en glucides.....</i> | <i>34</i> |
| 3.1 <i>Extrait sec soluble</i> | <i>34</i> |
| 3.2 <i>Sucres majeurs</i> | <i>35</i> |
| 3.3 <i>Amidon</i> | <i>37</i> |
| 4 <i>Evolution du pH, de l'acidité titrable et de la teneur en acides organiques</i> | <i>38</i> |
| 4.1 <i>pH et acidité titrable.....</i> | <i>38</i> |
| 4.2 <i>Acides organiques.....</i> | <i>39</i> |
| 5 <i>Evolution de la teneur en minéraux.....</i> | <i>40</i> |
| 5.1 <i>Le potassium</i> | <i>40</i> |
| 5.2 <i>L'ammoniac, le calcium, le sodium et le magnésium</i> | <i>41</i> |
| 6 <i>Evolution de l'intensité respiratoire</i> | <i>42</i> |
| 7 <i>Evolution de la teneur en ACC</i> | <i>43</i> |
| <i>RESULTATS ET DISCUSSION : évolution biochimique de la mangue en conservation en fonction de son stade de maturité</i> | <i>44</i> |
| 1 <i>Vitesse d'évolution des mangues en post-récolte.....</i> | <i>44</i> |
| 2 <i>Relations entre l'intensité respiratoire, le stade climactérique et l'indice de maturité corrigé</i> <i>44</i> | <i>44</i> |
| 3 <i>Evolution de la concentration en glucides.....</i> | <i>46</i> |
| 3.1 <i>Extrait sec soluble et sucres totaux</i> | <i>46</i> |
| 3.2 <i>Amidon</i> | <i>47</i> |
| 4 <i>Evolution du pH, de l'acidité titrable et de la teneur en acides organiques</i> | <i>48</i> |
| 4.1 <i>pH.....</i> | <i>48</i> |
| 4.2 <i>Acidité titrable</i> | <i>48</i> |
| 4.3 <i>Acides organiques.....</i> | <i>49</i> |
| 5 <i>Evolution du rapport sucres/acides</i> | <i>50</i> |
| 6 <i>Evolution des teneurs en ACC et MACC</i> | <i>51</i> |
| 6.1 <i>Relation ACC/éthylène/intensité respiratoire</i> | <i>51</i> |
| 6.2 <i>Evolution de la teneur en ACC libre.....</i> | <i>52</i> |
| 6.3 <i>Evolution de la teneur en MACC.....</i> | <i>53</i> |
| <i>DISCUSSION GENERALE SUR L'ETUDE</i> | <i>55</i> |
| 1 <i>L'influence de la disponibilité en apports carbonés.....</i> | <i>55</i> |
| 2 <i>La crise climactérique.....</i> | <i>55</i> |
| 3 <i>L'évolution de l'ACC et du MACC</i> | <i>56</i> |
| 4 <i>Les perspectives de recherche</i> | <i>56</i> |
| <i>CONCLUSION.....</i> | <i>58</i> |
| <i>BIBLIOGRAPHIE.....</i> | <i>59</i> |
| <i>RECAPITULATIF DES FIGURES ET GRAPHIQUES.....</i> | <i>62</i> |
| <i>ANNEXES</i> | <i>64</i> |

INTRODUCTION

Pour se fournir en produits végétaux, les consommateurs bénéficient aujourd'hui de larges possibilités grâce au développement des échanges entre les marchés internationaux. Les produits proposés peuvent ainsi avoir une origine de production géographique différente de leur lieu de vente. C'est notamment le cas des fruits tropicaux, de plus en plus présents sur les marchés européens. L'engouement croissant des consommateurs pour les fruits tropicaux s'explique aussi par le développement du tourisme, qui permet de découvrir et d'apprécier de nouvelles saveurs.

Avec une production dépassant les 30 millions de tonnes, le manguier *Mangifera indica* L. est l'une des espèces fruitières les plus cultivées dans le monde. Il occupe la 5^{ème} position derrière les agrumes, le raisin, la banane et la pomme. La part des exportations a été multipliée par 5 en 10 ans et dépasse 550 000 t, tous marchés confondus. La situation en Europe reflète ce dynamisme, avec 120 000 t importées en 2000 en Europe (Loeillet *et al.*⁽¹⁶⁾). La mangue est ainsi de plus en plus présente sur les marchés européens. En combinant les différentes zones de production (*cf. Annexe 1*) aux différentes variétés, il est possible de commercialiser des mangues toute l'année.

A La Réunion, le potentiel de production de mangues reste comparativement modeste, mais atteint aujourd'hui 3 500 t par an. Les vergers de manguiers occupent en 2001 plus de 350 ha de terres agricoles situées essentiellement dans l'Ouest du département (*cf. Annexe 2*) et le manguier est la troisième espèce fruitière arboricole sur l'île après le litchi et les agrumes. La variété Lirfa représente le quart des surfaces plantées en mangues à La Réunion. Elle répond aux critères commerciaux de l'exportation qui a augmenté rapidement depuis ces dernières années, passant de 2 tonnes en 1997 à plus de 100 tonnes actuellement (SUAD⁽²⁸⁾).

La maîtrise de la qualité des mangues représente par conséquent un enjeu important pour la poursuite du développement de cette production à La Réunion. Il est donc indispensable de savoir si l'aptitude à la conservation et les techniques de mises en marché utilisées garantiront une qualité finale correcte, capable à la fois de répondre aux exigences du marché et de faire face à la concurrence. Or, obtenir et maintenir des niveaux de qualité satisfaisants impliquent une connaissance et une maîtrise de tous les stades du fruit, de sa croissance à sa maturation. En effet, si la qualité du fruit est en grande partie déterminée par les conditions de croissance sur pied, un lien doit être fait entre cette qualité initiale, liée aux conditions agronomiques, et la préservation de cette qualité, liée à la récolte et aux techniques de conservation/maturation appliquées par la suite. Cette étude porte donc sur la caractérisation biochimique de la mangue avant et après la récolte.

PRESENTATION DU CIRAD

1 PRESENTATION GENERALE

Le CIRAD (Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement) est un organisme scientifique français spécialisé en recherche agronomique appliquée aux régions chaudes. Il a pour mission de contribuer au développement agricole des pays tropicaux et subtropicaux par des recherches, des réalisations expérimentales, des actions de formation et de l'information scientifique et technique en France et à l'étranger. Ses activités recouvrent les domaines des sciences agronomiques, vétérinaires, forestières et agroalimentaires.

Le champ d'action du CIRAD est important puisqu'il couvre plus de 90 pays d'Afrique, d'Asie, du Pacifique, d'Amérique latine et d'Europe. Les chercheurs du CIRAD sont répartis dans 50 pays et travaillent au sein de structures nationales de recherche ou en appui à des opérations de développement.

Le CIRAD dispose aussi d'un dispositif de recherche important basé en France :

- à Montpellier, en région parisienne et en Corse,
- dans les DOM/TOM : Guadeloupe, Martinique, Guyane, Réunion, Nouvelle Calédonie, Mayotte, Polynésie française.

L'effectif du CIRAD est d'environ 1800 personnes dont la moitié sont des cadres. Son budget annuel est de 152 millions d'euros, dont plus de la moitié provient de fonds publics.

Le CIRAD s'organise autour de 26 programmes répartis dans les 7 départements suivants :

- Cirad-ca : cultures annuelles
- Cirad-cp : cultures pérennes
- Cirad-emvt : élevage et médecine vétérinaire
- Cirad-forêt : forêts
- Cirad-tera : territoire, environnement et acteurs
- Cirad-amis : amélioration des méthodes pour l'innovation scientifique
- **Cirad-flhor : productions fruitières, légumières et horticoles**

dont les champs d'activité sont :

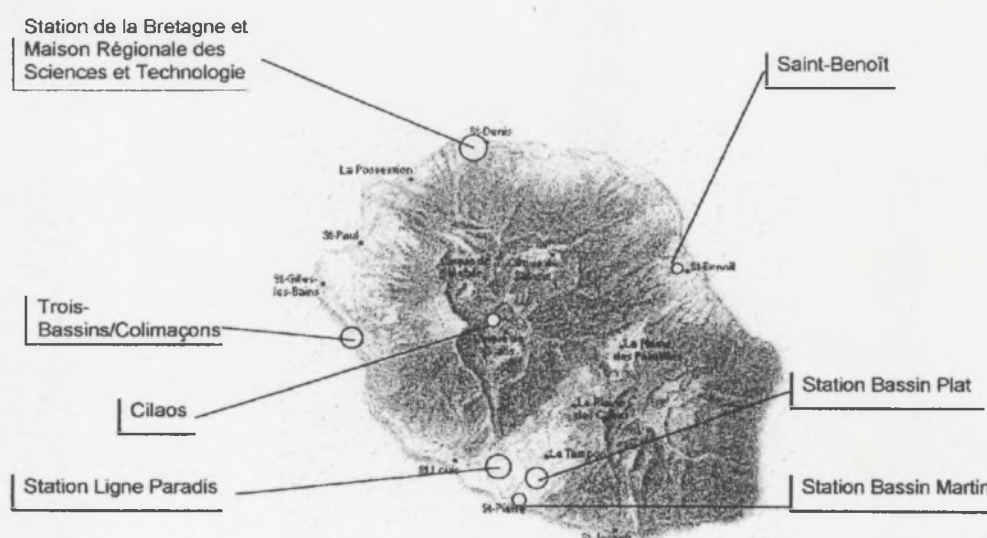
- **Agroalimentaire**
- **Agronomie**
- **Biotechnologie et ressources génétiques végétales (Biotrop)**
- **Economie, politique et marchés (Ecopol)**
- **Modélisation des plantes (Amap)**
- **Protection des cultures**

2 LE CIRAD A LA REUNION

2.1 Présentation

Actuellement, le CIRAD de La Réunion compte un effectif de 186 agents dont 52 chercheurs, 54 techniciens et 62 collaborateurs, auxquels viennent s'ajouter 18 Volontaires civils à l'Aide Technique et thésards ainsi que 80 stagiaires. Ces agents sont répartis sur différents sites (cf. Figure 1).

Figure 1 : Implantation du CIRAD à La Réunion



Les activités du CIRAD-Réunion sont structurées en 6 pôles de compétences répartis dans les diverses stations de la Réunion :

- *Canne à sucre* : amélioration de la production des zones cannières, amélioration des techniques culturales, modèles de fonctionnement biophysique et outils de diagnostic.
- *Fruits, légumes et plantes aromatiques* : amélioration de la production de fruits, amélioration des cultures maraîchères, amélioration des plantes aromatiques.
- *Agriculture durable, environnement et forêt* : systèmes sous couvertures végétales et diversification végétale, gestion des exploitations, des organisations et des territoires, gestion des déchets organiques, végétation ligneuse et paysages.
- *Elevage* : production et gestion des ressources fourragères, valorisation des ressources alimentaires dans les systèmes d'élevage laitier, études des facteurs de risque d'infertilité en élevage bovins laitiers.
- *Agroalimentaire* : transformation des produits carnés (viandes, produits de la pêche et de l'aquaculture), valorisation des productions végétales.

2.2 Le pôle agroalimentaire

L'industrie réunionnaise doit, à l'heure actuelle, répondre à une double nécessité : mieux valoriser les matières premières agricoles pour les marchés locaux et prendre en compte la qualité totale pour affronter la concurrence sur les marchés internationaux. Pour cela, l'acquisition et la reconnaissance d'une expertise forte dans ce domaine porteur à la Réunion sont nécessaires. Elles dépendent de la coexistence d'une formation et d'une recherche de qualité, indispensables pour le développement local et régional. La partie agroalimentaire du CIRAD-Réunion s'est implantée à la MRST (Maison Régionale des Sciences et de la Technologie) et a signé en 1994 un accord avec l'Université et la Chambre de Commerce et d'Industrie de la Réunion afin d'engager des collaborations fortes sur ce thème.

Les deux projets du pôle agroalimentaire sont les suivants :

- **Transformation des produits carnés :**
 - Amélioration du procédé de fabrication du porc boucané
 - Innovation en matière de traitement des produits animaux
 - Optimisation des produits de salaison de volaille

- **Caractérisation et traitement post-récolte des productions végétales :**
 - **Caractérisation et aptitude à la transformation des productions locales et régionales**
 - Conservation en frais des produits végétaux
 - Transformation à petite échelle

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier **Jacques Joas** de m'avoir permis de réaliser mon projet de fin d'étude au sein de son département et de m'avoir apporté de précieux conseils scientifiques.

Je souhaite remercier tout particulièrement **Yanis Caro** pour sa collaboration scientifique, technique et méthodologique, mais aussi pour sa bonne humeur et sa disponibilité.

Je remercie aussi **Antoine Collignan**, responsable du Pôle Agroalimentaire, pour son accueil et sa gentillesse.

J'adresse également mes remerciements à l'ensemble du personnel du CIRAD, que ce soit le personnel installé à la Maison Régionale des Sciences et de la Technologie ou celui de la station La Bretagne, pour ses conseils et son aide tout au long de mon stage, et plus particulièrement **Isabelle Torinière** pour sa contribution efficace et sa patience, **Elodie Arnaud** pour son enthousiasme ainsi que **Patrick Légier**, **Jocelyn Idmond** et **Jean-Dolin Mouny-Latchimy** pour leur accueil et leur appui scientifique au laboratoire des sols.

Merci aussi à **M. Briantais**, directeur de la DGCCRF, ainsi qu'à tout son personnel, notamment **Alexin Pajanaye** qui m'a beaucoup appris sur l'HPLC mais aussi sur la culture créole.

Un grand merci aux stagiaires **Sylvain Deswarte**, **Romain Ioos** et **Carole Leverrier** pour leur soutien et leur amitié au travail comme à la case.

Merci également à tous ceux que j'ai rencontrés et qui ont rendu mon séjour à La Réunion fort agréable.

Enfin, merci à **Rougaille** et **Mafate** pour leur miaulements quotidiens.

PRESENTATION DU PROJET

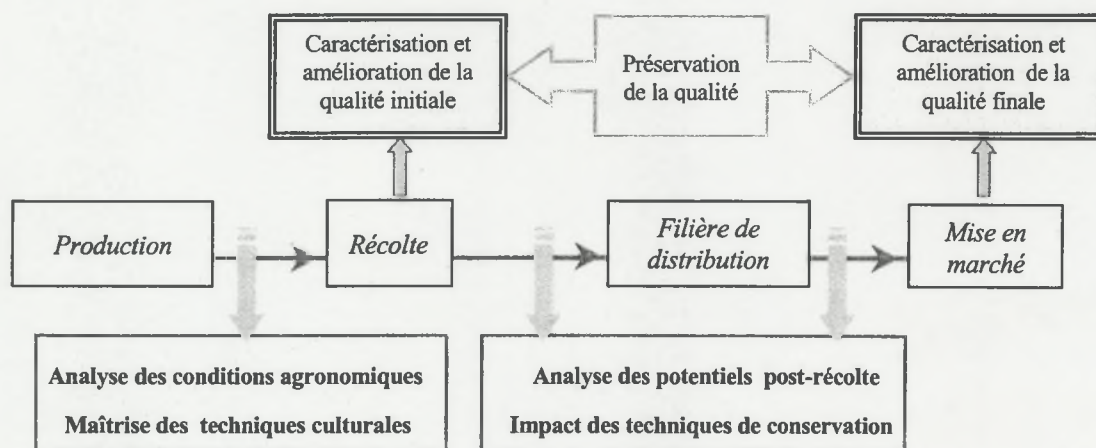
1 CONTEXTE DE L'ETUDE

Le CIRAD a mis en place, au sein du département FLHOR, un programme de recherche sur le manguiier à la Réunion portant sur l'amélioration de la production et la valorisation du fruit. Des travaux sont menés :

- par l'équipe du pôle fruits-maraîchage et plantes aromatiques, situé à Saint Pierre, sur l'architecture de l'arbre, l'état hydrique de la plante et la qualité des fruits ;
- par l'équipe du pôle agroalimentaire, situé à Saint Denis, sur la caractérisation biochimique de la mangue et son aptitude à la conservation.

Il est intéressant d'associer l'étude des conditions culturales qui vont définir la croissance des fruits à celle de leur comportement post-récolte (cf. Figure 2).

Figure 2 : Elaboration et préservation de la qualité



La qualité est acquise au champ, elle peut être préservée ou détruite selon l'itinéraire technique post-récolte. Toutefois, la notion de qualité n'est pas la même selon le devenir du produit.

La qualité commerciale fait référence :

- au potentiel de conservation,
- à l'esthétique,
- à l'intégrité sanitaire,
- aux aspects organoleptiques.

La qualité pour la transformation fait référence :

- à l'aptitude technologique,
- aux aspects organoleptiques, sachant que par le biais des additifs il est possible de « rectifier » la texture, le rapport sucres/acides, la force aromatique, etc.

2 OBJECTIFS DU STAGE

Cette étude vient en appui au projet d'amélioration et de diversification des cultures maraîchères et fruitières mené par le CIRAD. Elle complète les observations réalisées en 2001 et 2002 (Fréhaut⁽¹⁾ et Robbe⁽²¹⁾) et vient en appui à un travail de thèse engagé par le CIRAD. L'objectif de cette thèse est de mieux comprendre quels sont les mécanismes impliqués dans la croissance et l'élaboration de la qualité organoleptique des fruits chez le manguier (Léchaudel⁽¹²⁾).

L'objectif général est d'évaluer les caractéristiques des mangues à la récolte ainsi que leur aptitude à la conservation, afin de définir et maîtriser le stade optimal de récolte. L'évolution biochimique des mangues est donc étudiée non seulement au cours de leur mûrissement au champ (à différents moments de récolte) mais aussi au cours de leur conservation (à différents moments post-récolte).

Pour cela, différentes mesures sont réalisées sur des échantillons congelés (pH, acidité, dosage des sucres, de l'amidon, des acides organiques, des cations) et les résultats obtenus sont couplés à des mesures spécifiques du métabolisme de maturation (dosage de l'acide 1-aminocyclopropane-1-carboxylique libre et complexé en malonyl-ACC, mesure du dégagement d'éthylène) afin de relier les mécanismes physiologiques impliqués dans la maturation au développement du fruit et aux facteurs environnementaux.

De plus, une étude est menée sur l'influence de conditions contrastées en alimentation carbonée (10 feuilles par fruit ou 100 feuilles par fruit) sur le développement et la maturation des mangues, afin d'appréhender la variabilité de la qualité au niveau de l'arbre.

L'originalité de cette étude est qu'elle se place en charnière des deux approches agroalimentaire et agronomique de la qualité de la mangue, en intégrant la notion de connaissance de la qualité initiale du fruit dans une optique de conservation. En effet, les expériences de conservation se font très souvent sur des fruits dont les caractéristiques initiales ne sont pas déterminées. Or, comme le montre la figure précédente (*Figure 2*), il devient de plus en plus évident que la conservation ne doit pas être considérée comme une opération unitaire mais comme partie intégrante du processus de production.

3 PLANNINGS

Le laboratoire d'analyses du Pôle Agroalimentaire du CIRAD ne dispose pas encore de l'ensemble du matériel nécessaire à toutes les analyses prévues. Différents laboratoires internes ou externes au CIRAD sont donc sollicités ce qui nécessite l'établissement d'un planning précis en préambule aux manipulations. Pour cela, il faut :

- estimer le temps d'extraction et le temps de dosage que requiert chaque manipulation,
- se renseigner sur les dates de disponibilité des appareils et/ou des intervenants pour chaque type d'analyse.

Le planning prévisionnel ci-dessous a alors été élaboré grâce au logiciel « Microsoft Project ».

3.1 Planning prévisionnel

| N° | Nom de la tâche | Durée | Février | Mars | Avril | Mai | Juin | Juillet | Août | Septembre |
|----|----------------------------------|----------|---------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|-----------|
| 1 | Bibliographie | 10 jours | 03/03 | 14/03 | | | | | | |
| 2 | Extraction des sucres | 13 jours | | 17/03 | 02/04 | | | | | |
| 3 | Analyses des sucres | 14 jours | | 03/04 | 22/04 | | | | | |
| 4 | Extraction des acides organiques | 10 jours | | | 23/04 | 06/05 | | | | |
| 5 | Analyses des acides organiques | 8 jours | | | 07/05 | 16/05 | | | | |
| 6 | Extraction des cations | 5 jours | | | | 19/05 | 23/05 | | | |
| 7 | Analyses des cations | 5 jours | | | | 26/05 | 30/05 | | | |
| 8 | Extraction et dosage de l'amidon | 13 jours | | | | 02/06 | 18/06 | | | |
| 9 | Extraction ACC | 10 jours | | | | 09/06 | 20/06 | | | |
| 10 | Dosages ACC | 10 jours | | | | | 23/06 | 04/07 | | |
| 11 | pH et acidité titrable | 5 jours | | | | | 07/07 | 11/07 | | |
| 12 | Analyse des résultats | 10 jours | | | | | | 14/07 | 24/07 | |
| 13 | Rédaction du rapport et poster | 25 jours | | | | | | 28/07 | | 29/08 |

3.2 Planning réel

| N° | Nom de la tâche | Durée | Février | Mars | Avril | Mai | Juin | Juillet | Août | Septembre |
|----|--|----------|---------|-------|-------|-------|-------|---------|------|-----------|
| 1 | Bibliographie | 8 jours | 03/03 | 12/03 | | | | | | |
| 2 | Extraction des sucres | 12 jours | | 13/03 | 26/03 | | | | | |
| 3 | Analyses des sucres | 13 jours | | 31/03 | 16/04 | | | | | |
| 4 | Extractions des acides organiques | 8 jours | | | 17/04 | 26/04 | | | | |
| 5 | Extraction des cations | 5 jours | | | 29/04 | 05/05 | | | | |
| 6 | Extraction ACC libre | 12 jours | | | 06/05 | 21/05 | | | | |
| 7 | Dosage ACC libre | 10 jours | | | | 22/05 | 04/06 | | | |
| 8 | Analyses des cations | 5 jours | | | | 03/06 | 09/06 | | | |
| 9 | Extraction ACC total | 1 jour | | | | 10/06 | 10/06 | | | |
| 10 | Dosage ACC total | 12 jours | | | | | 16/06 | 01/07 | | |
| 11 | Analyses des acides organiques | 20 jours | | | | 20/05 | 23/06 | | | |
| 12 | Extraction et dosage de l'amidon (sous-traité) | 30 jours | | | | | 23/06 | 01/08 | | |
| 13 | matière sèche, pH et acidité titrable | 7 jours | | | | | 08/07 | 16/07 | | |
| 14 | Analyse des résultats | 19 jours | | | | | 24/06 | 18/07 | | |
| 15 | Rédaction du rapport et poster | 30 jours | | | | | | 21/07 | | 29/08 |

Dans l'ensemble, le planning prévisionnel a été respecté.

Les premières manipulations ayant pris moins de temps que prévu, l'ordre des manipulations a été quelque peu changé, les différents laboratoires ne pouvant pas nous accueillir avant les dates convenues.

L'analyse des acides organiques, réalisée à la Direction Générale de la Concurrence, de la Consommation et de la Répression des Fraudes (DGCCRF), a pris plus de temps que prévu car des problèmes liés à la colonne de l'HPLC (High Performance Liquid Chromatography) sont survenus. Afin de ne pas perdre de temps par rapport au planning, les analyses concernant l'ACC ont alors été réalisées par Isabelle Torinière, technicienne de laboratoire nouvellement recrutée par le CIRAD. Cette aide m'a été précieuse puisque j'ai pu bénéficier de davantage de temps au final pour l'analyse des résultats et la rédaction de mon rapport.

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1 DONNEES GENERALES SUR LA CULTURE DE LA MANGUE

1.1 Description du manguiers et de son fruit

Le manguiers appartient à la famille des Anacardiaceés. Cette famille contient 75 genres. Parmi ces genres, le genre *Mangifera* comprend 69 espèces et la majorité des fruits consommés appartiennent à l'espèce *Mangifera indica*.

Le manguiers est un arbre fruitier de taille moyenne (10 à 40 mètres). Sa croissance est rapide et favorisée par un sol profond et bien drainé, et un emplacement au soleil et à l'abri du vent. La multiplication a lieu par semis de graines fraîches après avoir enlevé la cosse. La floraison a lieu après la saison sèche. Les fruits et les fleurs se développent sous forme d'inflorescences terminales (cf. Figure 3).

Figure 3 : Manguiers, fleurs et fruits du manguiers (Source CIRAD)

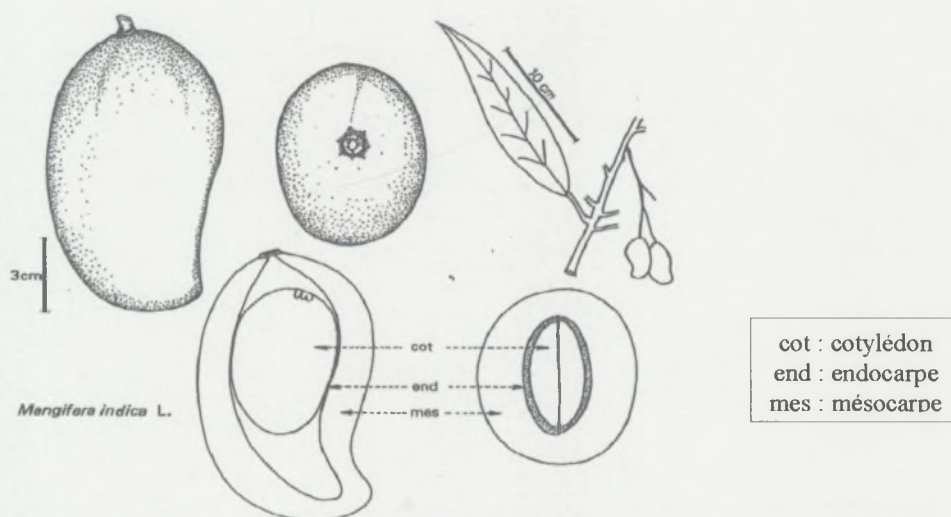


Le fruit est habituellement récolté à un stade physiologiquement mature mais non mûr. Malheureusement, les données disponibles sont insuffisantes pour déterminer des indicateurs de maturité basés sur la croissance du fruit ainsi que sur des paramètres physiques et chimiques. Les paramètres utiles pour déterminer la maturité de récolte du fruit font référence à des caractéristiques chimiques (acidité, teneurs en glucides, en constituants phénoliques, etc.) ou physiques, tels que la forme et la taille, la surface et la couleur de la peau. Une combinaison de tous ces paramètres couplée à une expérience acquise sur le terrain sont nécessaires et varient selon les variétés. (Lakshminarayana⁽⁹⁾)

La mangue est un fruit à mésocarpe charnu (cf. Figure 4). La mangue est ronde, ovale ou réniforme selon les variétés. Son poids varie entre 250 g et 1,4 kg. Sa peau lisse et mince est verte, jaune ou écarlate. Elle est teintée de rouge, de violet, de rose ou de jaune orangé à maturité. Sa chair jaune orangée est souvent douce comme celle de la pêche, ce qui lui a valu le surnom de

« pêche des tropiques ». Les variétés sont parfois fibreuses mais plus souvent onctueuses, fondantes, juteuses, sucrées et parfumées. La pulpe des fruits adhère à un noyau imposant, de forme plus ou moins aplatie. (site Internet⁽³¹⁾)

Figure 4 : Morphologie structurale de la mangue (Trisonthi⁽³⁰⁾)



Il existe plus de 1000 variétés de mangues différentes. La variété utilisée pour notre étude est le cultivar Lirfa, connue localement sous le nom de « Early Gold » ou mangue américaine. Elle possède les caractéristiques suivantes :

- originaire de Pine Island en Floride (1943),
- fruit de taille moyenne, de forme ronde à oblique, de couleur jaune-rouge, à chair orangée au goût de pêche, d'abricot, sans fibres et fondante,
- variété très précoce (récolte avant la période cyclonique de novembre à janvier),
- peu sensible à l'antracnose et à la bactériose,
- adaptée aux régions côtières. (SUAD⁽²⁸⁾)

Lors de la maturation, cette variété de mangue passe du stade vert à violet puis, au niveau de l'apex, une décoloration jaune-orangé apparaît. C'est le stade dit « point jaune » qui sert de référence aux producteurs pour la récolte (cf. Figure 5).



Figure 5 : Lirfa « point jaune »

Les principaux constituants de la mangue sont l'eau, les glucides, les protides, les lipides, les minéraux, les pigments, les tannins et les vitamines (cf. Figure 6).

Avec un apport énergétique de 60 kilocalories (251 kiloJoules) aux 100 grammes, la mangue fait partie des fruits moyennement caloriques : elle se situe entre la pomme et la cerise. Cette valeur énergétique dépend largement des glucides (ou sucres) du fruit. Le taux de glucides dépend aussi de la variété : les mangues originaires d'Afrique semblent en général un peu plus riches en glucides que celles provenant d'Amérique.

Protides et lipides sont bien sûr très peu abondants dans la mangue, comme dans la plupart des fruits frais.

Les acides organiques, qui interviennent avec les sucres dans l'équilibre de la saveur, restent assez peu abondants.

Par contre, les substances aromatiques et odorantes de la mangue sont abondantes et complexes. Elles appartiennent aux groupes des aldéhydes, des esters et des alcools-esters volatiles. Elles atteignent leur optimum lorsque le fruit est à pleine maturité. Elles confèrent à la mangue sa saveur très typée, rappelant à la fois l'abricot, l'ananas, la pêche, la rose, avec une légère touche de figue.

Différents pigments donnent à la pulpe du fruit sa couleur jaune orangé plus ou moins foncé : les xanthophylles (pigments jaunes), les anthocyanes (pigments rouges et violacés), les flavonols (pigments jaunes), les caroténoïdes (pigments jaunes et orangés). Certains de ces pigments possèdent des propriétés vitaminiques : les anthocyanes et les flavonols ont des propriétés "vitamine P", les caroténoïdes constituant la provitamine A.

Deux vitamines sont présentes en quantités importantes : la provitamine A et la vitamine C.

Quant aux minéraux, ils sont moyennement abondants, bien diversifiés et largement dominés par le potassium.

Les fibres, constituées de cellulose, prolongent le noyau et l'insèrent étroitement dans la pulpe. Par sélection, on a pu obtenir aujourd'hui des mangues dans lesquelles ces prolongations fibreuses sont beaucoup plus discrètes que dans les variétés d'origine.

Figure 6 : Valeurs nutritionnelles de la pulpe de mangue indienne mûre (Gopalan *et al.*, 1971, cité par Subramanyam *et al.*⁽²⁹⁾)

| Composant | Quantité pour 100 g de pulpe | Composant | Quantité pour 100 g de pulpe |
|---------------------|------------------------------|-------------|------------------------------|
| Portion consommable | 74 g | Fer | 1,3 mg |
| Eau | 81 g | Calcium | 14 mg |
| Protides | 0,6 g | Carotène | 2743 µg |
| Lipides | 0,4 g | Thiamine | 0,08 mg |
| Glucides | 16,9 g | Riboflavine | 0,09 mg |
| Fibres | 0,7 g | Phosphore | 16 mg |
| Minéraux | 0,4 g | Vitamine C | 16 mg |

1.2 Utilisation de la mangue

La mangue est principalement consommée fraîche. Elle est utilisée dans l'élaboration de jus de fruit, sirops, boissons alcoolisées, confitures, desserts, glaces, chutney. Elle peut aussi être servie en accompagnement de viandes blanches.

Dans de nombreux pays, elle est utilisée également en médecine traditionnelle comme vermifuge. Le manguier a aussi des propriétés diurétiques et laxatives. Il traite l'hypertension artérielle.

2 EVOLUTION PHYSIOLOGIQUE ET BIOCHIMIQUE DE LA MANGUE LORS DE SON DEVELOPPEMENT SUR LE PLANT

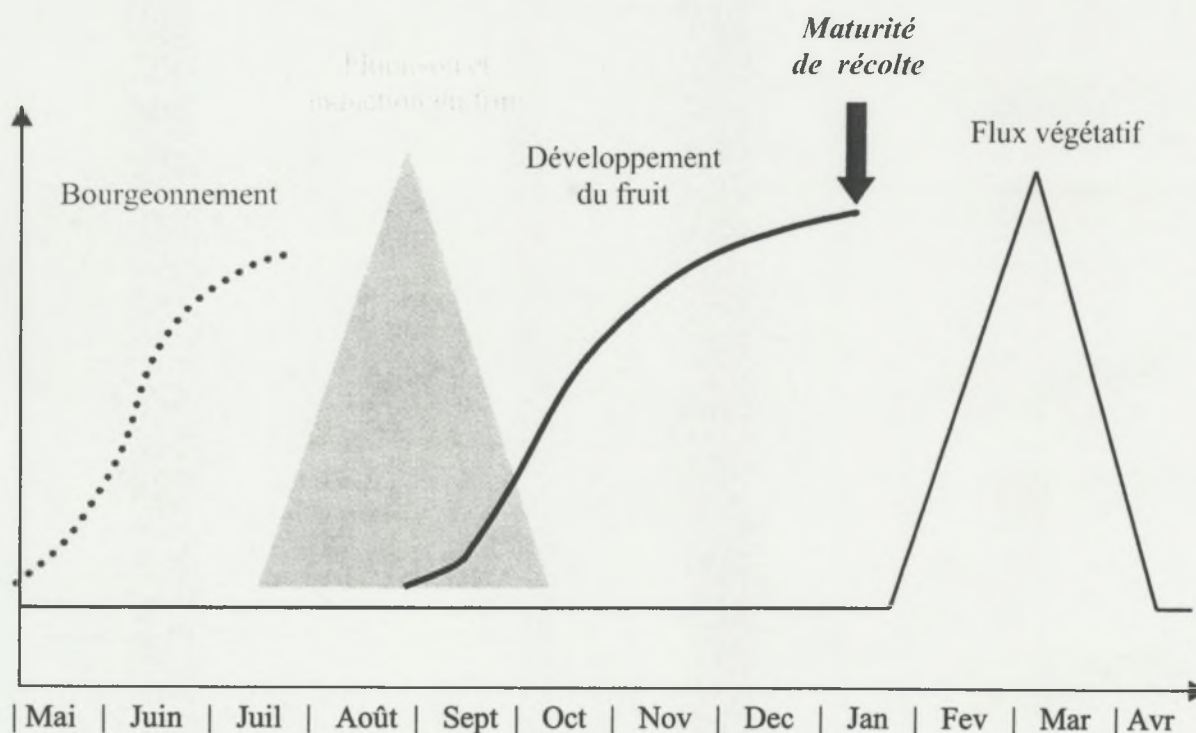
2.1 Cycle de croissance

Dans l'hémisphère sud, la floraison des manguiers et l'induction des fruits a lieu du mois de juillet au mois d'octobre (cf. Figure 7). Généralement, deux à trois floraisons se produisent chaque saison et la période de récolte se déroule de décembre à avril.

Le cycle de vie de la mangue a été partagé en quatre stades (Subramanyam *et al.*⁽²⁹⁾) :

- le stade **juvénile**, jusqu'à la troisième semaine après fertilisation de la fleur, caractérisé par une multiplication cellulaire importante et rapide,
- le stade **adolescent**, période de croissance maximale due au grossissement cellulaire,
- le stade de **maturité**, où le fruit atteint sa crise climactérique et commence à mûrir,
- le stade **sénescent** durant lequel la mangue développe son goût et ses arômes pour atteindre sa maturité de consommation avant de se dégrader.

Figure 7 : Cycle phénologique théorique de la mangue



2.2 Développement morphologique de la mangue

La croissance du fruit peut être suivie avec des indicateurs morphologiques tels que la longueur, le diamètre, la circonférence, le poids, le volume, la couleur ou la forme du fruit. L'étude de ces indicateurs sur le cultivar Alphonso a montré que la mangue croît rapidement à partir de la cinquième semaine après induction du fruit, puis son développement ralentit entre la 9^{ème} et la 14^{ème} semaine : sa croissance suit donc une courbe sigmoïde. (Subramanyam *et al.*⁽²⁹⁾)

2.3 Evolution biochimique de la mangue

Les changements de composition du fruit pendant sa croissance et son développement sont des facteurs déterminants de la qualité.

2.3.1 L'eau

L'eau est primordiale au développement du fruit, elle participe au maintien des structures, au grossissement cellulaire et permet les mouvements cellulaires et le déroulement du métabolisme.

Le taux d'humidité de la mangue est faible pendant la phase juvénile du fruit (70%), atteint un maximum pendant la phase de grossissement cellulaire (86%), décroît légèrement, puis reste constant jusqu'à maturité. Le taux d'humidité de la mangue est moins grand dans la peau que dans la chair à tous les stades de maturité sur le plant. (Subramanyam *et al.*⁽²⁹⁾)

2.3.2 Les glucides

Les principaux glucides présents dans les végétaux comprennent les oses, les diholosides, les polyholosides et les hétérosides. Les oses les plus répandus sont les pentoses comme le ribose, et les hexoses comme le glucose et le fructose.

Les glucides solubles (sucres) jouent un rôle important dans les propriétés organoleptiques des fruits puisque la saveur résulte de la balance sucres/acides organiques dans le fruit.

Le saccharose (diholoside), qui est la forme la plus fréquente de transport des glucides dans la sève élaborée, se forme à partir du glucose-1-P et du fructose-6-P.

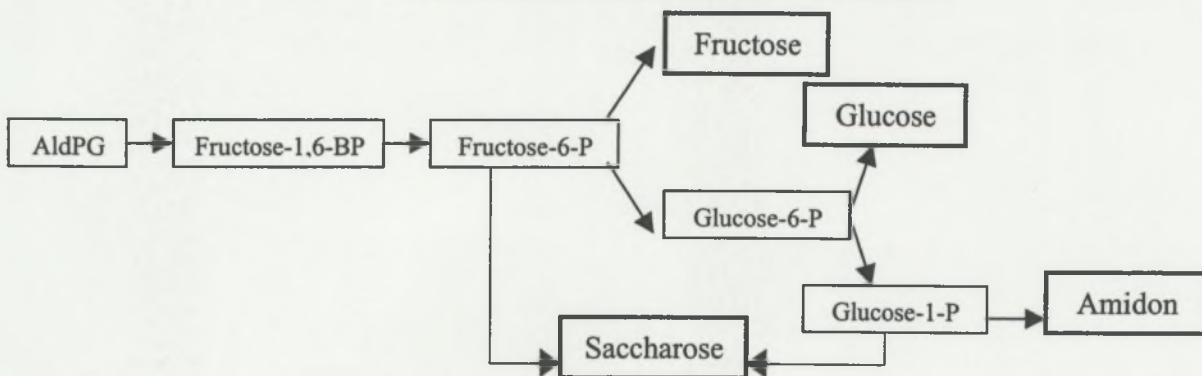
L'amidon (polyholoside) est la forme de réserve la plus répandue. A l'hydrolyse, il redonne d'abord du maltose, puis très vite du glucose.

Les glucides résultent de l'assimilation du dioxyde de carbone par les feuilles des végétaux via la photosynthèse. Celle-ci s'effectue par étapes avec formation de produits intermédiaires, notamment de NADPH (nicotinamide-adénine-dinucléotide phosphate) et d'ATP (adénosine-5'-triphosphate). Le pouvoir réducteur du NADPH est utilisé pour diverses réactions de réduction et, parmi elles, la réduction du phosphoglycérate (APG) en aldéhyde phosphoglycérique (AldPG). Cette réaction fait partie du cycle de Calvin (*cf. Annexe 3*) et conduit à la biosynthèse de glucides.

En effet, à partir de l'AldPG, les hexoses suivants sont synthétisés (*cf. Figure 8*) :

- Fructose-6-P qui par déphosphorylation va donner le fructose,
- Glucose-6-P qui par déphosphorylation va donner le glucose,
- Glucose-1-P qui va former l'amidon et qui, avec le fructose-6-P, va former le saccharose.

Figure 8 : Biosynthèse des glucides dans les végétaux



Les glucides sont les principaux métabolites substrats des voies cataboliques (glycolyse, cycle de Krebs, cycle des pentoses, phosphorylations oxydatives). Ces voies permettent de fournir de l'énergie et des matériaux nécessaires aux cellules. (Heller⁽⁴⁾)

Les sucres représentent une grande proportion des solides solubles dans la mangue mûre (Subramanyam *et al.*⁽²⁹⁾).

Pendant la croissance, l'amidon s'accumule puis, pendant le mûrissement, il est complètement hydrolysé et les sucres réducteurs sont synthétisés en saccharose (Leley *et al.*⁽¹³⁾).

2.3.3 Les acides organiques

Les acides organiques proviennent du cycle de Krebs (*cf. Annexe 4*), ils sont formés par une suite de réactions dont le premier élément est l'acide pyruvique qui est issu de la glycolyse.

Dans les fruits, les acides di- et tri-carboxyliques sont présents en quantité non négligeable. Très généralement à l'état libre ou en mélange, les plus communs dans la mangue sont les acides malique, citrique, pyruvique, oxalique, tartrique et succinique.

Leur teneur, relativement faible dans les fruits très jeunes, augmente lors de la période de grandissement cellulaire pour diminuer à la maturation du fait de leur oxydation mais aussi de leur utilisation comme précurseur des sucres et des protéines. (Heller⁽⁵⁾)

L'acidité titrable diminue lors du développement et de la maturation de la mangue, mais les acides organiques présentent des comportements différents et l'acidité est variable selon les variétés (Mitra et Baldwin⁽¹⁹⁾).

2.3.4 Les éléments minéraux

Le végétal, comme tous les êtres vivants, a un besoin absolu d'éléments minéraux qui participent à ses structures et contribuent à ses activités. Ils sont classés, selon leur importance pondérale, en deux groupes :

- les macroéléments, présents à des taux de l'ordre de quelques ‰ à quelques % (azote, potassium, calcium, magnésium, soufre, phosphore, sodium) ;
- les oligoéléments, présents à des taux inférieurs à 1‰ (fer, manganèse, zinc, cuivre, aluminium, bore...etc.).

Les chimistes classent les éléments en deux catégories : les éléments métalliques qui ont en commun un ensemble de propriétés physiques et chimiques, et les éléments non métalliques qui n'ont pas ces propriétés. Parmi les macroéléments qui nous intéressent, le potassium, le sodium, le calcium et le magnésium appartiennent à la première catégorie. Ils sont absorbés sous forme de cations par les poils absorbants des racines des végétaux et ils interviennent dans la cellule sous cette forme, libres ou complexés.

Les différents cations ont des rôles variés dans la plante. Ils activent certaines enzymes (potassium, calcium, magnésium), jouent un rôle dans l'osmorégulation (potassium, calcium), diminuent la perméabilité cellulaire (calcium), etc. (Heller⁽⁴⁾)

Les minéraux sont importants pour les différentes activités métaboliques des tissus vivants et d'autant plus dans le cas des fruits qui montrent une intense activité pendant leur

mûrissement. Les déficiences ou excès en minéraux ne se traduisent pas seulement par une diminution de la productivité, certains symptômes de carence ou de toxicité se manifestent par une altération visible des fruits.

3 PHYSIOLOGIE DU MURISSEMENT ET EVOLUTION BIOCHIMIQUE DE LA MANGUE EN POST-RECOLTE

La vie des fruits se caractérise par un phénomène important. En effet, quand certaines conditions sont remplies, elle comprend une phase originale, marquée par une série de phénomènes dont certains sont familiers à tous (changements de couleur, de saveurs, production de composés volatils, etc.) et qui traduisent des variations métaboliques au niveau cellulaire : c'est la maturation. Celle-ci commence très généralement bien après la phase de croissance par divisions cellulaires, à la fin de la croissance par grandissement cellulaire. Ainsi définie, elle correspond au terme anglais *ripening* et met l'accent sur l'acquisition de l'ensemble des qualités dites organoleptiques caractérisant le fruit mûr, agréable à consommer. (Hartmann⁽³⁾) Ces changements biochimiques dépendent à la fois de la variété et du stade de maturité des mangues à la récolte (Subramanyam *et al.*⁽²⁹⁾).

3.1 La respiration

Les premiers travaux sur la physiologie des fruits ont montré que la plupart, cueillis et placés dans des conditions constantes et définies, présentaient au cours de leur maturation une intensification de leurs échanges gazeux respiratoires. Le rejet de dioxyde de carbone mais aussi l'absorption d'oxygène croissent jusqu'à un maximum, appelé par Kidd et West maximum climactérique, puis ils diminuent jusqu'à la mort.

En 1960, Biale classe les fruits en deux catégories. Certains, comme la pomme, la poire, l'avocat et la banane présentent une crise respiratoire liée à la maturation : ce sont les fruits climactériques. Chez d'autres, comme la cerise, l'orange ou le citron, cette crise n'existe pas : ce sont les fruits non climactériques. (Hartmann⁽³⁾)

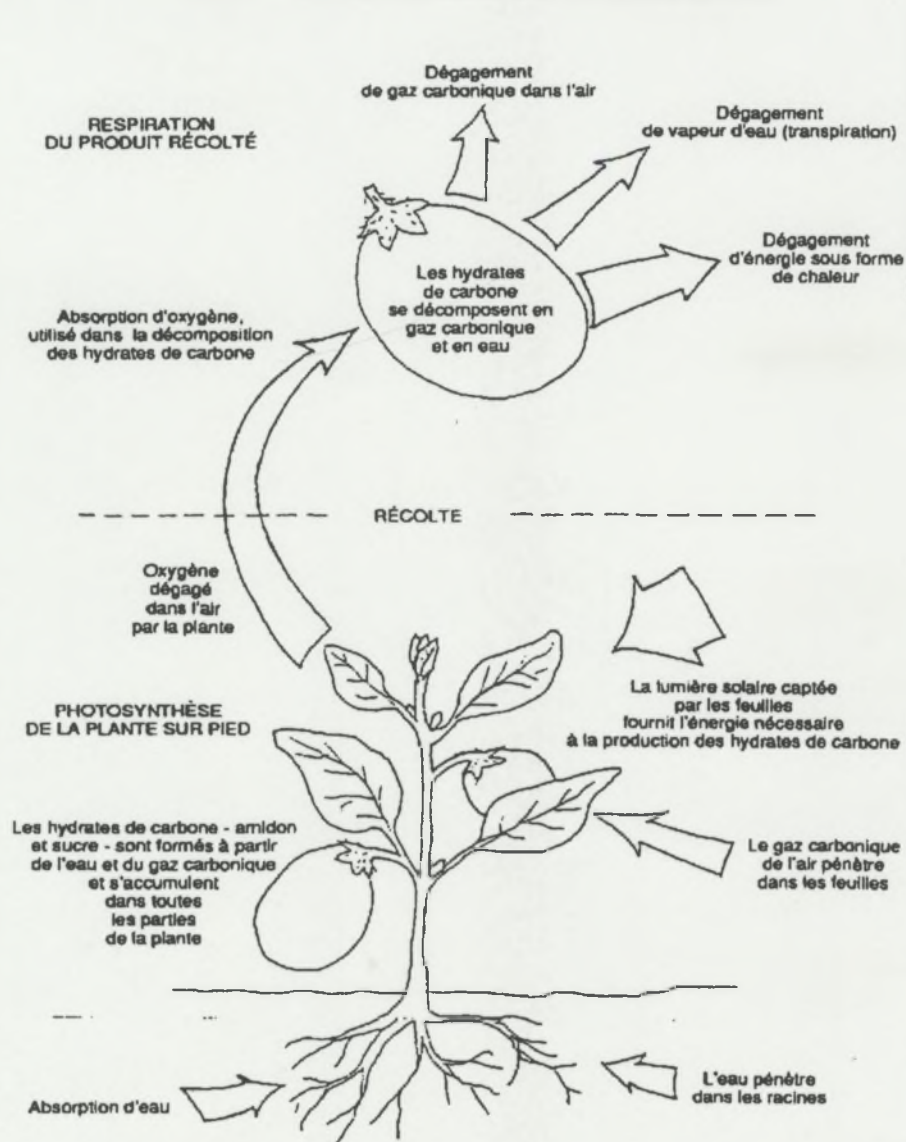
Les mangues appartiennent à la catégorie des fruits climactériques. Leur respiration a été divisée en 4 phases distinctes basées sur des changements observables en post-récolte :

- Une **phase pré-climactérique**, quand les fruits sont verts et fermes et que le dégagement de CO₂ est faible.
- Une **croissance climactérique**, quand une augmentation progressive de l'émission de CO₂ est observée alors que les fruits sont encore verts et fermes.
- Une **crise climactérique**, marquée par un pic de dégagement de CO₂. Les fruits, à ce stade, ont tendance à changer de couleur, à devenir moins fermes et à développer une odeur caractéristique de la variété.
- Une **phase post-climactérique**, quand l'émission de CO₂ montre une rapide tendance à diminuer. Les fruits développent alors une couleur et une odeur attractives.

La sénescence amorcée continue, le fruit épuise ses réserves, devient sensible aux infections dues aux micro-organismes et finit par pourrir. (Subramanyam *et al.*⁽²⁹⁾)

La respiration climactérique pendant le mûrissement du fruit a un grand impact sur la durée de conservation puisque ce phénomène puise dans les réserves métaboliques (*cf. Figure 9*).

Figure 9 : Schéma de la respiration des végétaux



3.2 L'éthylène

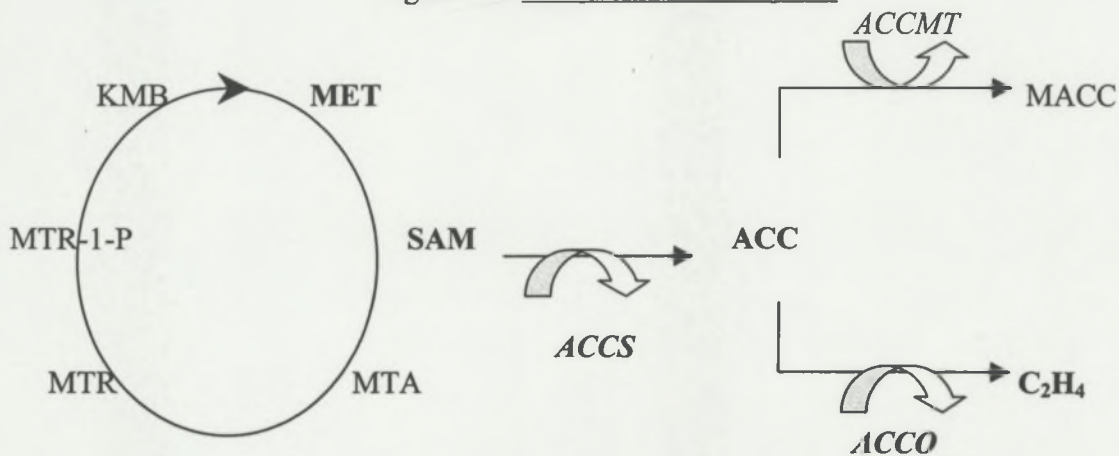
Les fruits climactériques ont la particularité d'émettre au cours de leur maturation d'importantes quantités d'un régulateur de croissance de nature gazeuse : l'éthylène. Les fruits non climactériques sont également capables de synthèse éthylénique. Mais cette synthèse est beaucoup moins intense et les quantités d'éthylène émises sont très réduites. (Hartmann⁽³⁾)

L'éthylène peut être obtenu à partir de plusieurs composés (méthionine, acide linoléique, b-alanine, acide acrylique, éthane, éthanol, etc.) et selon plusieurs mécanismes réactionnels, ce qui a rendu difficile la mise en évidence de son précurseur biologique et ce n'est que très récemment que les étapes de la biosynthèse d'éthylène ont été mises au jour (cf. Figure 10). Il est aujourd'hui

admis que la méthionine est le précurseur biologique majeur de l'éthylène chez les plantes supérieures.

La première étape correspond à la conversion de la méthionine en S-adenosylméthionine (SAM) par incorporation d'ATP (cf. Annexe 5). La SAM ainsi formée est ensuite transformée en acide 1-aminocyclopropane-1-carboxylique (ACC) qui est le précurseur direct de l'éthylène. Les enzymes intervenant dans la chaîne de biosynthèse de l'éthylène chez les plantes sont : l'ACC synthétase et l'ACC oxydase (site Internet⁽³²⁾). L'ACC peut, par ailleurs, être converti en malonylACC par l'ACC N-malonyltransférase. Le MACC serait métaboliquement inerte (Latché *et al.*⁽¹¹⁾).

Figure 10 : Biosynthèse de l'éthylène



Cycle méthyionine :

MET : méthionine, **SAM** : S-adenosylméthionine, **MTA** : méthylthioadénosine, **MTR** : 5-méthylthioribose, **MTR-1-P** : 5-méthylthioribose-1-phosphate, **KMB** : acide 2-keto-4-méthylthiobutyrique.

Synthèse éthylène :

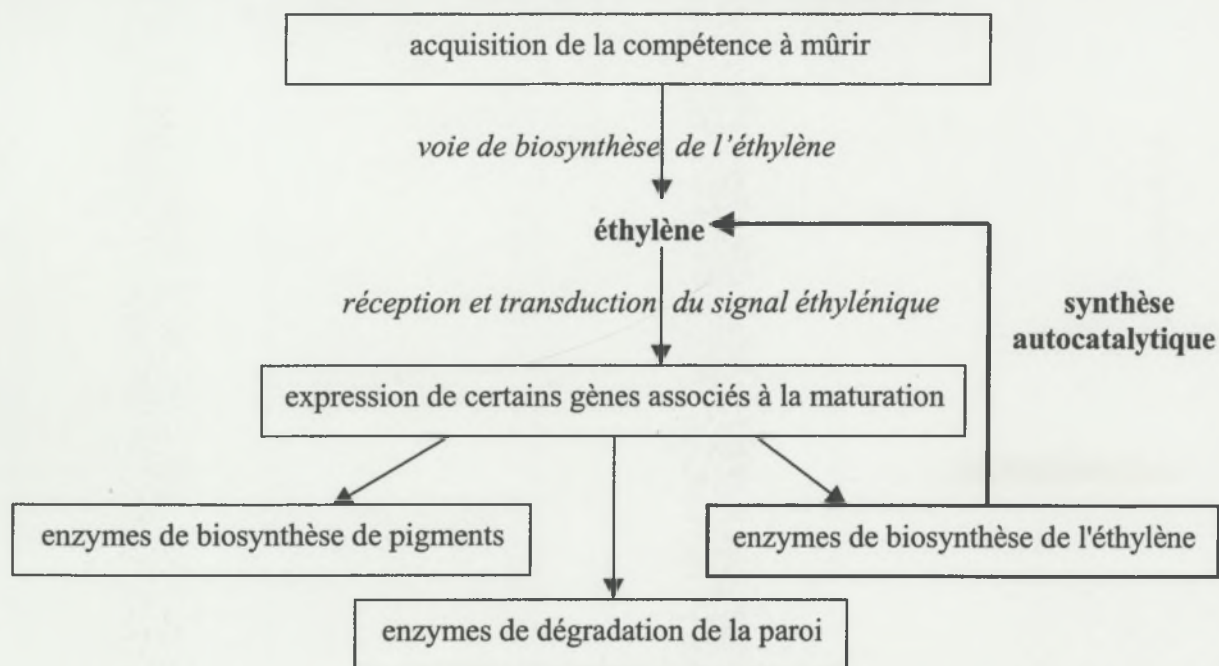
ACC : acide 1-aminocyclopropane-1-carboxylique, **C₂H₄** : éthylène, **MACC** : malonyl-ACC, **ACCS** : ACC synthétase, **ACCO** : ACC oxydase, **ACCMT** : ACC N-malonyltransférase.

La chaîne de réception et de transduction du signal éthylénique suppose la fixation de l'éthylène sur un récepteur, suivie de phosphorylations successives et d'interactions protéines-protéines, aboutissant à l'expression de gènes impliqués dans les processus de développement, en particulier de la maturation des fruits (cf. Figure 11).

L'acquisition de la compétence à répondre à l'éthylène et à synthétiser de l'éthylène de façon autocatalytique ne se produit qu'à partir d'un certain stade de développement de la plante. Ces considérations physiologiques soulignent le risque d'une récolte trop précoce.



Figure 11 : Actions et rétro-contrôles de l'éthylène



3.3 Evolution des critères biochimiques de base de la mangue

3.3.1 L'eau

La plupart des cellules végétales contiennent des quantités très importantes d'eau et la cueillette provoque la suppression de l'apport d'eau par les racines, tandis que la transpiration n'est pas stoppée. Les conséquences en sont importantes. D'une part, le poids de matière fraîche diminue (or il sert de référence pour établir le prix de vente). D'autre part, d'un point de vue physiologique, l'eau a une place importante dans la vie de la cellule : elle est à l'origine de la turgescence des tissus, facteur essentiel de qualité. Passé un certain seuil, la turgescence diminue, les fruits flétrissent et les conditions de stress hydrique peuvent avoir des conséquences réelles sur le métabolisme cellulaire. (Hartmann⁽³⁾)

3.3.2 Les glucides

Lors de la maturation, l'hydrolyse de l'amidon en maltose puis en glucose se traduit logiquement par une augmentation de la teneur en sucres totaux et une diminution de la teneur en amidon dans les mangues (Kalra et Tandon⁽⁷⁾).

3.3.3 Les acides organiques

L'acidité titrable des mangues diminue après leur récolte (Selvaraj *et al.*⁽²⁴⁾). La concentration en acides organiques diminue quand les fruits mûrissent et, en général, les taux de citrate et succinate chutent progressivement pendant le mûrissement tandis que le malate montre des variations différentes selon les cultivars (Mitra et Baldwin⁽¹⁹⁾).

MATERIELS ET METHODES

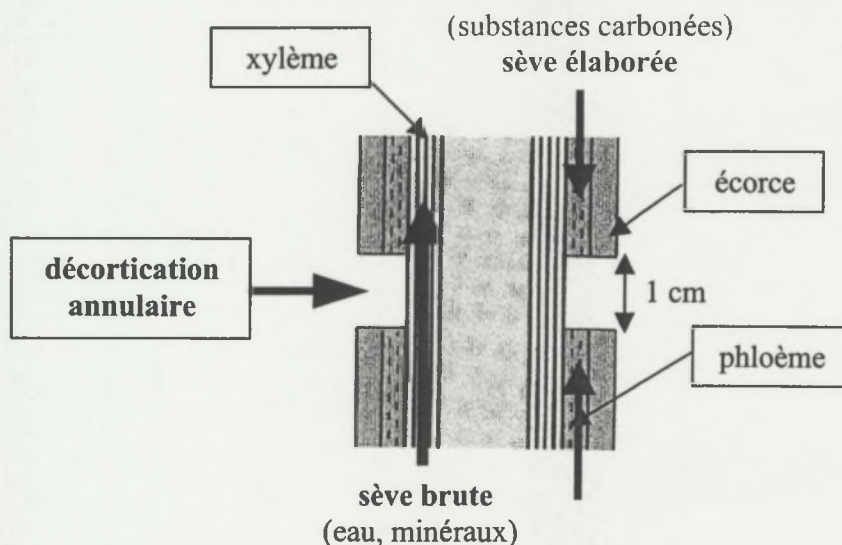
1 ECHANTILLONNAGE

L'échantillonnage des mangues a été effectué dans le cadre de la thèse de doctorat de M. Léchaudel. Les mangues ont été cultivées sur la parcelle MA06 de la station Bassin Plat. C'est un verger de manguiers « Lirfa » greffés et plantés en 1985 à la densité 6×5m. Les fruits sont choisis en fonction de leur taille afin d'avoir un échantillonnage le plus homogène possible.

2 CONDITIONS EXPERIMENTALES

Afin de pouvoir contrôler la charge du rameau en fruit et son alimentation carbonée, les rameaux de manguiers subissent une décortication annulaire (suppression de l'écorce et du phloème sur 1 cm de long). La sève brute circule normalement, mais la sève élaborée ne migre plus (cf. Figure 12). Le rameau fonctionne en autarcie en terme de nutriments. Les fruits se développent dès lors uniquement à partir des substances produites par les réactions photosynthétiques et des assimilats contenus dans les feuilles et le rameau.

Figure 12 : Schéma explicatif de la décortication annulaire



Pour étudier l'influence de la fourniture en assimilats, les rameaux sont préparés selon deux traitements :

- 10 feuilles par fruit (= 10 fe/fr),
- 100 feuilles par fruit (= 100 fe/fr), ratio à partir duquel il a été montré qu'il n'y a pas de contraintes pour le fruit.

On appelle charge en fruit faible le traitement 100 feuilles/fruit, et charge en fruit forte le traitement 10 feuilles/fruit.

3 RECOLTE ET PREPARATION DES ECHANTILLONS

Les manguiers ont eu une floraison simultanée qui a eu lieu le 20 août 2002. Les premières mangues ont été cueillies le 27 novembre 2002, c'est à dire 14 semaines après la floraison des manguiers. La campagne de prélèvement s'est étalée sur 5 semaines (6 semaines pour les 10 fe/fr), la dernière récolte des 100 fe/fr étant réalisée 19 semaines après la floraison et correspondant au stade de récolte habituellement pratiqué par les producteurs réunionnais (stade « point jaune »).

Nous disposons normalement de 3 échantillons soumis au traitement « 10 feuilles par fruit » et de 3 échantillons soumis au traitement « 100 feuilles par fruit » pour chacun des 5 stades de récolte et chacune des 5 durées de conservation (à 20°C, afin de suivre leur évolution en conditions ne perturbant pas leur métabolisme). Malgré un nombre de fruits marqués supérieur aux besoins de l'étude, il y a eu des chutes importantes et il n'a pas été possible de récolter assez de fruits pour suivre l'évolution en maturation des mangues au dernier stade de récolte pour le ratio 10 fe/fr ; seule la caractérisation des fruits à la récolte a pu être réalisée.

Sur chacun des 150 échantillons, des mesures de concentrations en sucres, acides organiques, amidon et ACC ainsi que des mesures de pH, acidité titrable, extrait sec soluble et matière sèche sont réalisées.

4 MESURES DES INTENSITES RESPIRATOIRES

L'activité métabolique des fruits a été appréciée par la mesure de leur intensité respiratoire (consommation de O₂ et dégagement de CO₂), analysée par chromatographie en phase gazeuse (CPG).

4.1 Manipulation

Le suivi des intensités respiratoires (IR) est réalisé en plaçant les fruits dans une enceinte étanche et en mesurant l'enrichissement du milieu en dioxyde de carbone et son appauvrissement en oxygène.

Pour cela, des enceintes en inox de 18 litres contenant les mangues à étudier sont raccordées à un système d'injection multivoies lui-même raccordé à un chromatographe en phase gazeuse. Le système fonctionne en circuit fermé et 6 enceintes peuvent être suivies alternativement et de façon continue (purge du volume mort d'injection par de l'air ambiant entre chaque analyse d'enceinte). Le brassage de l'atmosphère gazeuse de l'enceinte s'effectue à l'aide de la pompe du système multivoies pendant 5 minutes en préambule à l'analyse. Puis, à l'aide d'une électrovanne, une aliquote du mélange gazeux est injectée dans le chromatographe et analysée. Pour éviter que les modifications de l'atmosphère affectent le métabolisme des fruits, le confinement ne dure que quelques heures et l'enrichissement en CO₂ ne dépasse jamais 10 000 ppm.

4.1.1 Principe de la chromatographie en phase gazeuse

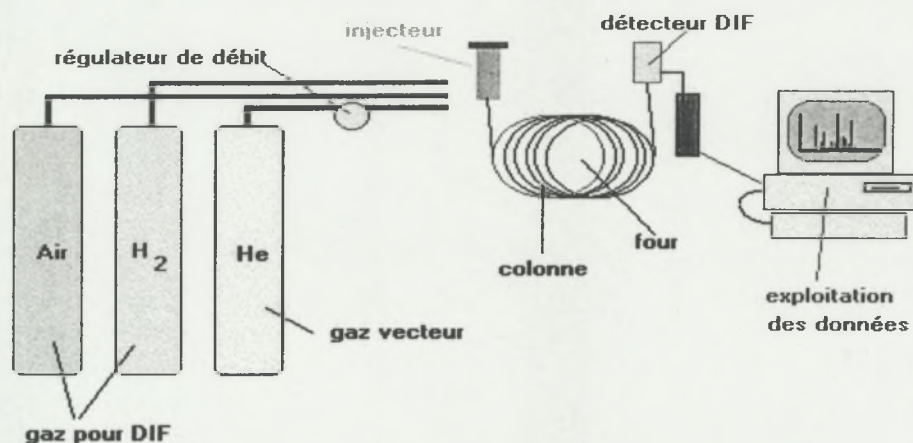
La chromatographie est une technique d'analyse séparative et quantitative développée depuis le début du 20^{ème} siècle et qui est très utilisée de nos jours.

La CPG s'applique à des échantillons gazeux ou susceptibles d'être vaporisés sans décomposition dans l'injecteur. La phase mobile est alors un gaz, appelé gaz vecteur, qui balaie en permanence la colonne. Cette dernière, placée dans un four thermostaté, est un tube de faible section enroulé sur lui-même et contenant la phase stationnaire. Un grand choix de détecteurs permet l'analyse sélective et parfois l'identification de mélanges très complexes.

Le plus usuel des détecteurs en analyse organique est le détecteur à ionisation de flamme (DIF) (cf. Figure 13). L'éluat pénètre dans une flamme obtenue par combustion d'hydrogène et d'air. Les composés organiques forment alors des ions collectés par deux électrodes, entre lesquelles on applique une différence de potentiel. La valeur du courant recueilli est alors enregistrée et transmise par un électromètre.

Si la phase stationnaire est un liquide non ou peu volatil, possédant des propriétés de solvant vis-à-vis des composés à séparer, on parle de chromatographie gaz-liquide ou chromatographie de partage. Si la phase stationnaire est un solide absorbant (silice, alumine, zéolites ou autres polymères adsorbants), c'est de la chromatographie gaz-solide ou chromatographie d'adsorption.

Figure 13 : Schéma d'un appareil de CPG avec un détecteur à ionisation de flamme



4.1.2 Conditions expérimentales

L'appareil de CPG utilisé (Agilent M200) est équipé de deux fours indépendants, deux colonnes et deux détecteurs.

Pour le dosage du CO₂ : colonne poropak type B, 8 m. Analyse à 60°C avec comme gaz vecteur l'hélium (25 psi). Détecteur DIF.

Pour le dosage de l'O₂ : colonne à tamis moléculaire MS5A, 4 m. Analyse à 55°C avec comme gaz vecteur l'argon (21 psi). Détecteur TCD (catharomètre).

L'appareil est étalonné régulièrement avec un gaz comprimé étalon : 9,73% O₂, 9,70% CO₂, 21,6 ppm C₂H₄.

4.2 Expression des résultats

Soit une masse de fruit m (en g) placée dans une enceinte de volume V_e (en l), la mesure de la densité d permet de calculer le volume du fruit V_f ($V_f = m/d$). Toutefois, dans la pratique, on simplifie en considérant que $V_f = m$ (soit $d = 1$).

Le volume mort utile est : $V_u = V_e - V_f$.

Les concentrations obtenues (en O₂ ou en CO₂) sont exprimées en ppm.

L'évolution de la concentration du gaz considéré (O₂ ou CO₂) dans l'enceinte est suivie dans le temps. Avec le logiciel d'intégration, on trace la relation : [gaz]_{enceinte} = f (temps en h). On obtient alors une droite (équation de la forme : y = ax + b) dont la valeur absolue de la pente (coefficient « a » de l'équation) correspond à la quantité de gaz dégagé (« a » positif dans le cas du CO₂) ou consommé (« a » négatif dans le cas de l'O₂) par fruit et par intervalle de temps.

L'intensité respiratoire, exprimée en µl de gaz par gramme de fruit et par heure (ou en ml de gaz par kg de fruit par heure), est calculée suivant la formule :

$$IR_{(ml/kg.h)} = \frac{|a| \times V_u}{m}$$

avec : |a|, la valeur absolue de la pente de la droite obtenue (en ppm/h, soit en µl/l.h)
 V_u, le volume mort utile calculé (en l)
 m, la masse du fruit (en g)

Convertissons cette valeur en mmol/kg.h

On sait que : « 1 mole de gaz » = « 22,4 litres », à 0°C (soit 273 °K)

et que, pour une température donnée t, « 1 mole de gaz » = « (T × 22,4) / K » litres, à t°C (soit 273+t °K)

avec T_(en °K) = (273 + t) et K = 273

soit :

$$IR_{(mmol/kg.h)} = \frac{|a| \times V_u \times 273}{m \times (T \times 22,4)}$$

A 20°C (soit T = 293°K), on a donc :

$$IR_{(20°C)} = \frac{|a| \times V_u \times 0,0416}{m}$$

5 MESURES MORPHOLOGIQUES ET ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES

5.1 Mesures morphologiques

Les mangues sont pesées avant leur pelage et découpage.

5.2 Préparation des échantillons

Les échantillons de pulpe fraîche sont finement broyés à l'aide d'un broyeur à hélice *Grindomix GM200* de RETSCH et d'un broyeur-homogénéisateur à haute vitesse *Polytron PT1600E*. Le broyat est alors mis dans des godets et congelé immédiatement à -20°C dans l'attente des diverses analyses.

Des difficultés concernant la conservation des échantillons de pulpe de mangue ont été rencontrées lors de leur maintien au froid (coupure de courant d'une part et décongélation partielle de l'échantillon avant chaque analyse d'autre part). Les échantillons ont donc pu évoluer quelque peu pour certaines analyses.

5.3 Mesure de la matière sèche

La teneur en matière sèche est obtenue après pesage (5g de pulpe dans une coupelle) et étuvage (103°C, 24H) de la pulpe de mangue broyée.

Elle se calcule en appliquant la formule suivante :

$$MS (\%) = \frac{M_f - M_c}{M_e} \times 100$$

avec : M_f , la masse finale obtenue, c'est-à-dire la masse de la coupelle et la masse de l'échantillon mis 24H à l'étuve (en g)

M_c , la masse de la coupelle vide (en g)

M_e , la masse de l'échantillon placé dans la coupelle avant étuvage (en g)

5.4 Mesure de l'extrait sec soluble

La teneur en extrait sec soluble (ESS), qui est corrélée à la teneur en sucres dans les fruits, est mesurée par réfractométrie sur le jus de mangue.

A partir du broyat de pulpe, quelques gouttes de jus sont prélevées avec une pipette et déposées sur la vitre du réfractomètre à main *ATC-1C* de ATAGO (réfractomètre ayant une gamme de lecture de 0 à 32°Brix et compensé en température).

5.5 Mesure du pH et de l'acidité titrable

Dans un bécher, 3 grammes de pulpe décongelée sont pesés et complétés avec 30 millilitres d'eau distillée. Le pH et l'acidité titrable sont mesurés à l'aide d'un titromètre automatique *Titroline easy de* SCHOTT. Le bécher est placé sous agitation et une sonde potentiométrique mesure le pH. Une solution de soude 0,1 N est versée automatiquement jusqu'à atteindre un pH de 8,1 (+/-0,2).

Le volume de soude versé permet de calculer l'acidité titrable, exprimée en milliéquivalents pour 100g de matière fraîche selon la formule :

$$\text{acidité}_{(\text{meqv./100g MF})} = (C_{\text{NaOH}} \times V_{\text{NaOH}} \times 100) / P_e$$

avec : C_{NaOH} , la concentration de la solution de soude (= 0,1 mol/l)

V_{NaOH} , le volume de soude versée (en ml)

P_e , le poids de l'échantillon pesé (en g)

5.6 Protocoles d'extraction et de dosage des sucres

5.6.1 Extraction des sucres

5 grammes de pulpe décongelée sont pesés et introduits avec 80 ml d'une solution aqueuse d'alcool éthylique à 80% dans un erlen. L'extraction se réalise à froid (à température ambiante) par agitation douce et continue pendant 1 heure. La solution est ensuite centrifugée à 5000 rpm pendant 5 minutes puis filtrée sous vide sur une membrane de porosité 0,22 μm . La solution est alors transvasée dans un ballon pour évaporateur rotatif (la fiole est bien rincée à l'éthanol 80%). L'éthanol est évaporé sous vide à 50°C jusqu'à obtenir 15 à 20 ml de solution reprise dans une fiole jaugée de 100 ml. La fiole est complétée avec de l'eau ultra pure en prenant soin de rincer le ballon d'évaporation. Après agitation manuelle, une partie aliquote de la solution obtenue (10 ml) est versée dans un godet identifié qui est stocké au congélateur en attendant l'analyse chromatographique.

5.6.2 Dosage des sucres

Le dosage des sucres libres majeurs (glucose, fructose et saccharose) a été effectué au laboratoire régional de la DGCCRF.

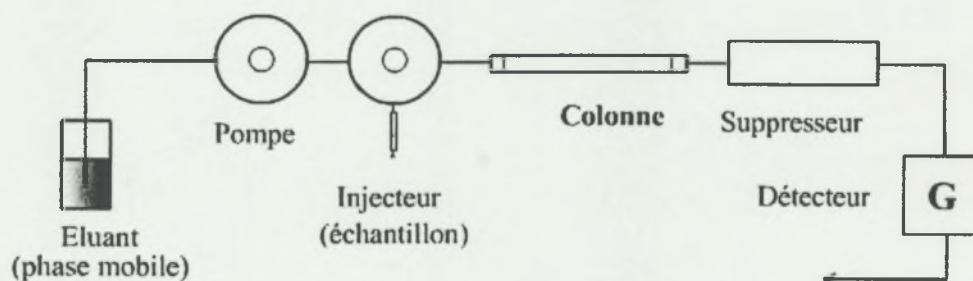
Les sucres sont analysés par chromatographie liquide haute performance (HPLC) d'échange d'anions (chromatographie ionique).

5.6.2.1 Principe de la chromatographie en phase liquide

La chromatographie en phase liquide est une méthode physico-chimique basée sur des différences d'interactions entre des solutés, une phase mobile et une phase stationnaire.

La phase mobile liquide (ou éluant), poussée par un gaz vecteur pompé sous haute pression, parcourt en permanence le système chromatographique. Le mélange à séparer et à analyser est mis en solution dans un solvant, est injecté par l'intermédiaire d'une vanne puis transporté au travers du système (cf. Figure 14). Au niveau de la colonne, les composés en solution se répartissent suivant leur affinité entre la phase mobile et la phase stationnaire contenue dans la colonne.

Figure 14 : Schéma d'un appareil HPLC



5.6.2.2 Principe de la chromatographie ionique

Le principe de la chromatographie ionique est basé sur l'ionisation partielle ou totale des espèces à séparer sous un potentiel donné. Les molécules ionisées peuvent alors être séparées par échange d'ions avec la phase stationnaire et la phase mobile.

Les sucres sont des molécules électrochimiquement actives et se comportent à pH fortement basique (pH>12) comme des acides faibles. Les sucres ionisés sont retenus par la phase stationnaire porteuse de groupements ammonium puis séparés sélectivement par l'éluant en fonction de leur charge.

La détection se fait par ampérométrie pulsée, technique basée sur la mesure du courant d'oxydation des sucres à un potentiel déterminé, la concentration des sucres étant proportionnelle au courant d'oxydation mesuré à la surface de l'électrode de travail.

L'électrode est soumise à un cycle de trois potentiels répété deux fois par seconde : le potentiel d'oxydation des sucres, le potentiel de nettoyage de l'électrode et le potentiel de reconditionnement de l'électrode. L'ampérométrie pulsée permet une mesure :

- stable : le cycle de potentiels permet un nettoyage continu de l'électrode,
- spécifique : seules les molécules possédant un groupement alcool secondaire répondent au potentiel d'oxydation,
- sensible : le seuil de détection est de quelques dizaines de picomoles.

Le logiciel couplé au chromatogramme permet le pilotage de l'appareillage, l'acquisition des données, ainsi que le traitement des résultats.

Les pics obtenus sont identifiés, intégrés et quantifiés à partir d'un étalon externe.

5.6.2.3 Conditions expérimentales

Appareil de chromatographie ionique de type DIONEX

Colonne : Carbopac PA1, 4 x 250 mm

Phase stationnaire : résine de billes de polystyrène-divinyl-benzène recouvertes de micro-particules de latex, porteuses de groupements ammonium quaternaire

Pré-colonne : Carbopac PA1 guard

Boucle d'injection : 25 µl

Eluant : solution composée de 85% de soude à 200 mM et de 15% d'eau ultra pure

Mode d'élution : isocratique (toujours le même éluant tout au long de la migration)

Débit d'élution : 1 ml/min

Détecteur : ampérométrique de type ED40

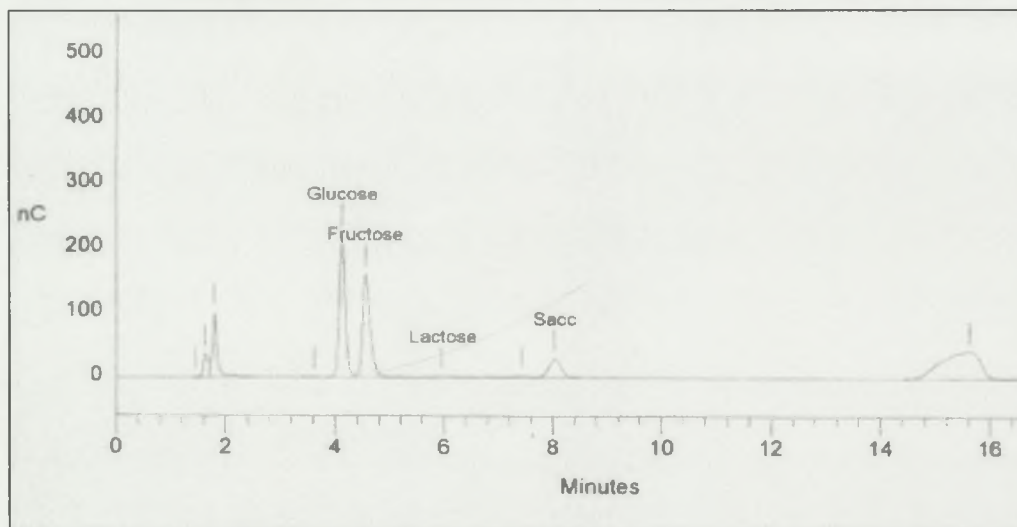
Logiciel de pilotage : Peaknet de DIONEX

Etalon : glucose, fructose et saccharose en poudre, pesés pour obtenir une solution à 10 mg/l pour chaque sucre

Avant leur injection, les solutions échantillons sont diluées à l'eau ultra pure au 50^{ème} (1 ml dans une fiole de 50 ml).

Il faut compter environ 17 minutes d'analyse par échantillon (cf. Figure 15).

Figure 15 : Exemple de chromatogramme obtenu pour un échantillon de pulpe



5.6.3 Expression des résultats

Avec le logiciel, les résultats sont obtenus en mg/l de la solution injectée. Ils sont exprimés en mg/g de matière fraîche selon la formule :

$$[\text{sucres}]_{(\text{mg/g MF})} = ([\text{sucres}]_{(\text{mg/l})} \times \text{dil} \times V) / P_e$$

avec : $[\text{sucres}]_{(\text{mg/l})}$, la concentration du sucre considéré en milligrammes par litre de la solution injectée (équivalent aux ppm données par le logiciel d'intégration)

dil, le facteur de dilution avant injection (= 50)

V, le volume de la fiole jaugée utilisée pour l'extraction (= 0,1 l)

P_e , le poids de l'échantillon pesé (en g)

5.7 Protocoles d'extraction et de dosage de l'amidon

La méthode utilisée a été développée par le laboratoire des sols du CIRAD La Bretagne pour la pulpe de mangue fraîche, d'après la méthode EDWARDS modifiée (Cahiers techniques de l'INRA, 1994, 35, 5-22).

Le principe de la méthode est un lavage à l'alcool et une dispersion de l'amidon en milieu alcalin. Puis une hydrolyse de l'amidon par une amyloglucosidase thermorésistante permet de doser le glucose formé par spectrophotométrie.

5.7.1 Extraction de l'amidon

5.7.1.1 Lavage des sucres

1,5 grammes de pulpe fraîche sont pesés et introduits dans un tube à centrifuger de 50 ml bouché à vis et résistant à l'eau bouillante. Deux lavages à l'alcool sont effectués pour éliminer les sucres solubles et les produits de dégradation de l'amidon. Pour cela, 20 ml d'éthanol aqueux à 40% sont ajoutés dans le tube. Le mélange est mis à agiter au culbuteur pendant 20 minutes.

L'éthanol est ensuite séparé par centrifugation (5 min à 1000 rpm) et éliminé. Le culot est repris dans 20 ml d'éthanol et lavé comme précédemment.

5.7.1.2 *Extraction de l'amidon*

Le culot obtenu est placé dans un tube fermé, 10 ml d'eau y sont ajoutés et le tube est placé 30 minutes dans un bain-marie bouillant. Le tube est après refroidi rapidement dans un bain de glace. 10 ml de potasse 4 M sont également ajoutés dans le tube qui est ensuite agité 30 minutes au culbuteur. Le mélange est versé dans une fiole jaugée de 50 ml complétée à l'eau distillée.

Dans un autre tube à centrifuger, 1 ml de la solution précédente est ajouté à 10 ml de tampon acétique (acide acétique 0,5 M et chlorure de calcium 0,004 M) et à 0,2 ml d'amyloglucosidase (activité : 14 unités/ml, de NOVO NORDISK BIOINDUSTRIES). Le mélange est mis à incuber pendant une heure à 65°C, puis porté 10 minutes au bain-marie bouillant et refroidi à l'eau. 0,6 ml de potasse 4 M est alors ajouté pour désactiver l'enzyme, et le tout est centrifugé à 1000 rpm pendant 10 minutes.

5.7.2 *Dosage du glucose par kit enzymatique*

5.7.2.1 *Principe*

Le D-glucose est phosphorylé en glucose-6-phosphate (G-6-P) en présence d'hexokinase et d'ATP (adénosine-5'-triphosphate). En présence de G6P-DH (glucose-6-phosphate déshydrogénase), le G-6-P est oxydé par le NADP (nicotinamide-adénine-dinucléotide phosphate) en gluconate-6-phosphate (6-PG). Il se forme du NADP réduit (NADPH). La quantité de NADPH formée au cours de la réaction est proportionnelle à la quantité de D-glucose. On la mesure par l'augmentation de l'absorption à 340 nm.

5.7.2.2 *Manipulation*

Dans une cuve de spectrophotomètre, 0,95 ml d'eau, 0,5 ml de la solution n°1 (tampon + NADP + ATP) du kit BOEHRINGER MANNHEIM et 0,05 ml de l'échantillon préparé précédemment sont mélangés. Après 3 minutes, la densité optique A1 est lue à 340 nm. 20 µl de la solution n°2 (hexokinase, G6P-DH) du kit sont ensuite ajoutés et, après 15 minutes, la densité optique A2 est lue.

Le dosage du glucose est étalonné avec une gamme étalon : 0, 50, 100, 200 mg/l, réalisée à partir d'une solution mère de glucose à 1g/l.

5.7.3 *Expression des résultats*

La différence A1-A2 est calculée pour toutes les lectures optiques (la DO de l'échantillon blanc est aussi soustraite de la DO obtenue). Le dosage du glucose est étalonné en établissant une régression linéaire passant par zéro à partir de tous les points de la gamme étalon. Les concentrations en glucose en mg/l de chaque échantillon en sont déduites.

La concentration en amidon est calculée en mg/g de matière fraîche à l'aide de la formule :

$$[\text{amidon}]_{(\text{mg/g MF})} = ([\text{glucose}]_{(\text{mg/l})} \times V_t \times V \times 0,9) / P_e$$



avec : $[glucose]_{(mg/l)}$, la concentration de glucose en milligrammes par litre obtenue par dosage enzymatique

V_t , le volume du test (= $1+10+0,2+0,6 = 11,8$ ml)

V , le volume de la fiole jaugée utilisée pour l'extraction (= 0,05 l)

0,9, le coefficient de conversion glucose / amidon

P_e , le poids de l'échantillon pesé (en g)

5.8 Protocoles d'extraction et de dosage des acides organiques

5.8.1 Extraction des acides organiques

Les anions organiques et minéraux sont extraits de leur matrice végétale par une solution d'éthanol à 20% dont le pH est inférieur à 3. 1,5 grammes de pulpe décongelée sont pesés dans un ballon de 250 ml dans lequel 50 ml d'acide chlorhydrique éthanolique 0,005 N à 20% sont ajoutés. Le ballon, surmonté d'un réfrigérant simple, est placé sur une rampe d'extraction pendant 1 heure sous ébullition douce avec agitation et réfrigération. La solution obtenue est ensuite centrifugée à 5000 rpm pendant 5 minutes et filtrée sous vide sur une membrane de porosité 0,45 μ m. Le filtrat est repris dans une fiole jaugée de 50 ml complétée avec de l'éthanol aqueux à 20%. 5 ml de cette solution est ajouté à 5 ml d'eau ultra pure (dilution au $\frac{1}{2}$) dans un godet contenant environ 1g de résine échangeuse de cations sous forme H^+ (Amberlite IR120). Le godet est mis sous agitation douce pendant 5 minutes. La solution est filtrée à nouveau sur une membrane de 0,22 μ m et le filtrat est récupéré dans un godet qui est ensuite stocké au congélateur jusqu'à l'analyse chromatographique.

5.8.2 Dosage des acides organiques

Comme pour les sucres, les acides organiques sont dosés par chromatographie ionique à la DGCCRF. Le même appareillage est utilisé mais la méthode est quelque peu différente car on utilise une autre colonne pour séparer en gradient les anions minéraux, les acides organiques et les polyphosphates.

5.8.2.1 Principe de la chromatographie ionique pour les acides organiques

Comme les ions de différentes valences ont des temps de rétention relativement éloignés en chromatographie ionique, le gradient d'éluant (concentration variable au cours de l'analyse) permet de diminuer le temps d'analyse.

Pour abaisser la conductivité de l'éluant avant la détection, un supprimeur automatique est utilisé. Il permet l'utilisation d'un gradient rapide pour séparer les anions inorganiques monovalents et trivalents, et les acides organiques en une seule injection. Le potentiel appliqué au supprimeur automatique est fixé par l'éluant le plus concentré (pour cette application 35 mM de soude). Le gradient varie de 0,5 mM à 35 mM en 25 minutes avec un débit de 2 ml/min.

La détection se fait par conductimétrie, celle-ci est basée sur l'aptitude d'une solution ionique à transporter le courant lorsqu'elle est placée entre deux électrodes de charges différentes. Plus la solution sera riche en ions, plus elle conduira le courant à travers les électrodes "fermant" ainsi le circuit électrique.

5.8.2.2 Conditions expérimentales

Appareil de chromatographie ionique de type DIONEX

Colonne : Ion Pac AS11

Phase stationnaire : résine de billes de polystyrène-divinyl-benzène recouvertes de micro-particules de latex (très hydrophiles) porteuses de groupements amine quaternaire

Pré-colonne : Carbopac PA1 guard

Boucle d'injection : 25 µl

Éluants : eau ultra pure (A), soude 5 mM (B), soude 100 mM (C), soude 200 mM (D)

Mode d'éluion : gradient linéaire qui varie de 0,5 mM à 35 mM de soude en 25 minutes (éluants A, B et C)

Régénération de la colonne : en fin d'analyse avec de la soude 200 mM (D) pendant 5 minutes

Débit d'éluion : 2 ml/min

Détecteur : conductimétrique de type ED40

Suppresseur : cartouche ASRS, mode de suppression unique utilisant l'eau comme régénérant (l'éluant est supprimé grâce à une réaction d'électrolyse de l'eau)

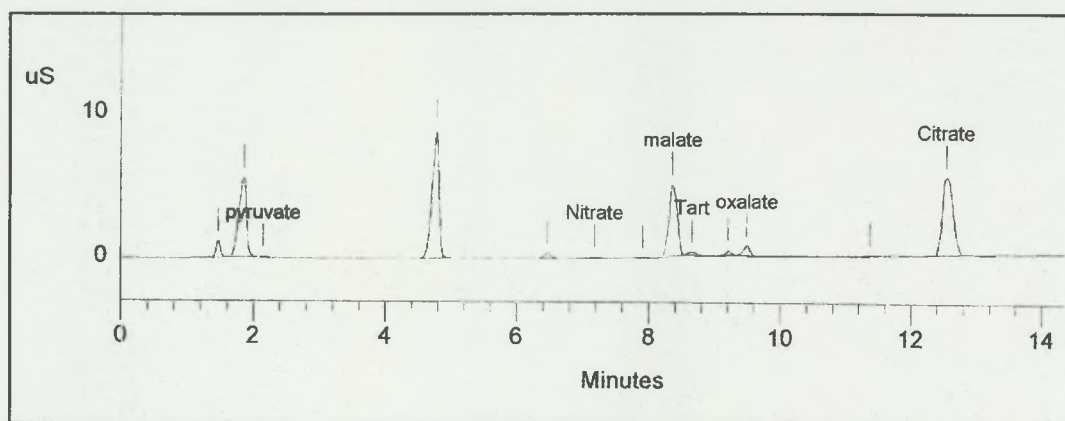
Logiciel de pilotage : Peaknet de DIONEX

Étalon : pyruvate, citrate, oxalate et malate en poudre, pesés pour obtenir une solution à 10 mg/l pour chaque acide

Avant leur injection, les solutions échantillons sont de nouveau diluées avec de l'eau ultra pure au 1/5 (5 ml dans une fiole de 25 ml), au 1/4 (5 ml dans une fiole de 20 ml) ou au 1/2 (10 ml dans une fiole de 20 ml) selon le degré de maturité de la mangue.

Il faut environ 14 minutes d'analyse par échantillon (cf. Figure 16).

Figure 16 : Exemple de chromatogramme obtenu pour un échantillon de pulpe



5.8.3 Expression des résultats

Avec le logiciel, les résultats sont obtenus en mg/l de la solution injectée. Ils sont exprimés en mg/100g de matière fraîche selon la formule :

$$[\text{acide}]_{(\text{mg}/100\text{g MF})} = ([\text{acide}]_{(\text{mg}/\text{l})} \times \text{dil} \times V \times 100) / P_e$$

avec : $[\text{acide}]_{(\text{mg}/\text{l})}$, la concentration de l'acide organique considéré en milligrammes par litre de la solution injectée (équivalent aux ppm données par le logiciel d'intégration)

dil, le facteur de dilution avant injection (de 4 à 10 selon la maturité des mangues)
V, le volume de la fiole jaugée utilisée pour l'extraction (= 0,05 l)
P_e, le poids de l'échantillon pesé (en g)

5.9 Protocoles d'extraction et de dosage des cations

5.9.1 Extraction des cations

5 grammes de pulpe décongelée sont pesés dans un godet dans lequel 10 ml d'une solution aqueuse d'acide trichloroacétique à 12% sont ajoutés. Ce traitement chimique dissocie les cations contenus dans les parois cellulaires de leurs supports, permettant de les isoler sous leur forme libre. La solution est agitée sur un plateau agitant (agitateur va-et-vient) pendant 15 minutes. La solution est ensuite centrifugée à 5000 rpm pendant 10 minutes et filtrée sous vide sur une membrane de porosité 0,45 µm. Le godet et la membrane sont bien rincés avec de l'eau ultra pure. Le résidu insoluble est repris avec 10 ml d'eau ultra pure et les opérations de centrifugation et filtration sont répétées. Les filtrats sont récupérés dans une fiole jaugée de 100 ml complétée avec de l'eau ultra pure. Une partie aliquote de la solution ainsi obtenue est stockée au congélateur jusqu'au dosage des cations par électrophorèse capillaire.

5.9.2 Dosage des cations

Le pôle agroalimentaire ne disposant pas de l'appareillage nécessaire à ce dosage, les cations sont dosés au laboratoire d'analyse des sols du CIRAD La Bretagne qui dose habituellement par CIA (Capillary Ion Analyser) les cations et anions inorganiques de différents milieux (sols, végétaux, résidus organiques).

5.9.2.1 Principe de la CIA (électrophorèse capillaire)

L'échantillon à analyser est introduit dans un tube capillaire rempli d'un électrolyte. Une différence de potentiel est appliquée entre les deux extrémités du capillaire. Sous l'effet du champ électrique, les espèces d'ions vont migrer vers la charge opposée. La séparation des différentes espèces s'appuie sur leur mobilité, caractéristique physico-chimique basée sur la conductivité et la masse molaire d'un ion. En effet, plus un ion est petit et chargé, plus il est mobile et plus sa vitesse de migration est importante.

5.9.2.2 Conditions expérimentales

Les conditions utilisées sont celles décrites dans le cookbook WATERS version 2.0 pour l'analyse des cations alcalins et alcalino-terreux.

Appareil de CIA de type WATERS

Electrolyte : UV CAT2

Capillaire : composé de silice fondue et plongé dans l'électrolyte aux deux extrémités

Potentiel d'analyse : un générateur permet de créer un potentiel de 20 kV aux bornes du capillaire

Courant : 10 µA

Mode d'injection : hydrostatique qui utilise comme source d'énergie la gravité en surélevant le tube dans lequel le capillaire est plongé pendant 20 secondes (les volumes injectés sont de l'ordre de 10 nl)

Migration : en plus de l'effet du champ électrique, la migration est soumise au phénomène de FEO (Flux Electro-Osmotique) du à la fois au faible diamètre du capillaire, à sa composition (présence de sites silanols), au pH de l'électrolyte et à la différence de potentiel entre les bornes du capillaire (le FEO accélère l'analyse des cations)

Détection : UV inverse (185 nm, lampe mercure)

Température : 20°C

Alimentation : positive

Constante de temps : 0,6 s

Acquisition : 20 points/s

Durée d'injection : 20 s

Précision : de l'ordre de 5%

Logiciel de pilotage : Millenium de WATERS

Temps d'analyse : environ 2H30 pour un passeur automatique de 20 échantillons

Etalons : potassium, ammoniac, sodium, calcium et magnésium en poudre pesés pour obtenir 3 solutions de concentrations différentes (cf. ci-dessous)

| concentration en mg/l | NH ₄ ⁺ | K ⁺ | Ca ²⁺ | Na ⁺ | Mg ²⁺ |
|-----------------------|------------------------------|----------------|------------------|-----------------|------------------|
| Etalon 1 | 1 | 70 | 5 | 1 | 1 |
| Etalon 2 | 3 | 50 | 10 | 3 | 5 |
| Etalon 3 | 5 | 30 | 20 | 5 | 10 |

5.9.3 Expression des résultats

Avec le logiciel Millenium, les concentrations en cations sont obtenues directement en mg/l de la solution injectée (suivant la méthode d'intégration dite de l'étalon externe). Elles sont ensuite converties en mg/100g de matière fraîche selon la formule suivante :

$$[\text{cation}]_{(\text{mg}/100\text{g MF})} = ([\text{cation}]_{(\text{mg}/\text{l})} \times \text{dil} \times V \times 100) / P_e$$

avec : $[\text{cation}]_{(\text{mg}/\text{l})}$, la concentration du cation considéré en milligrammes par litre de la solution injectée (équivalent aux ppm données par le logiciel d'intégration)

dil, le facteur de dilution avant injection (= 1)

V, le volume de la fiole jaugée utilisée pour l'extraction (= 0,1 l)

P_e, le poids de l'échantillon pesé (en g)

Les valeurs sont ensuite converties en mg/100g de matière sèche en faisant le calcul :

$$[\text{cation}]_{(\text{mg}/100\text{g MS})} = ([\text{cation}]_{(\text{mg}/100\text{g MF})} / \text{MS}(\%)) \times 100$$

5.10 Protocoles d'extraction et de dosage de l'ACC libre et de l'ACC total

L'ACC (acide 1-aminocyclopropane-1-carboxylique, C₄H₇NO₂) existe sous une forme libre facilement analysable et sous une forme de stockage, le MACC (malonyl-ACC), analysable après dégradation en ACC en milieu fortement acide. L'ACC total extrait de la pulpe de mangue comprend donc l'ACC libre et le MACC.

5.10.1 Extraction de l'ACC libre

Dans un ballon de 250 ml, 5 grammes de pulpe fraîche décongelée sont pesés. 15 ml d'éthanol aqueux à 70% sont ajoutés. La solution est chauffée sous agitation continue sous reflux pendant 45 minutes à l'aide d'une colonne de réfrigération montée sur le ballon. Après centrifugation du mélange à 5000 rpm pendant 2 minutes, le filtrat est récupéré et filtré sous vide sur verre fritté. L'éthanol est évaporé sous vide à l'aide d'un évaporateur rotatif (*Rotavapor*) à 55°C. L'extrait est récupéré et transvasé dans un tube Falcon de 50 ml. 1 ml d'eau distillée, 1 ml de solution de polyéthylène glycol à 10% et 50 µl d'acide chlorhydrique 2 N sont ensuite ajoutés à l'extrait. Le mélange ainsi obtenu est centrifugé à 5000 rpm pendant 10 minutes puis neutralisé avec 50 µl de soude 2 N. Après agitation, l'extrait est récupéré dans un godet fermé de 15 ml. Le volume de l'extrait brut récupéré est mesuré et consigné.

5.10.2 Extraction de l'ACC total

Dans un tube Falcon de 15 ml, 2 ml de l'extrait brut précédent sont ajoutés à 400 µl d'acide chlorhydrique 36 N. Après fermeture du tube et agitation au vortex pendant quelques secondes, l'ensemble est mis à incuber à 100°C dans un bain-marie pendant 3 heures. Après refroidissement à température ambiante, 400 µl de soude à 10 N sont ajoutés pour la neutralisation. Ensuite, à l'aide d'une seringue, le mélange est filtré sur une membrane de 0,45 µm et récupéré dans un godet de 15 ml.

5.10.3 Dosage de l'ACC

5.10.3.1 *Principe*

L'analyse de l'ACC est basée sur la méthode de Lizada et Yang⁽¹⁵⁾. Le principe repose sur le dosage chromatographique de l'éthylène formé par conversion chimique de l'ACC, après addition d'hypochlorite de sodium (NaOCl) en milieu fortement basique et en présence de chlorure de mercure (HgCl₂) comme catalyseur.

5.10.3.2 *Manipulation*

Dans chaque pilulier, 500 µl d'extrait, 100 µl de chlorure de mercure 80 mM et 300 µl d'eau distillée sont mélangés. Les ions mercuriques (Hg²⁺) sont à la concentration finale de 8 mM. Après avoir introduit ces trois constituants, le pilulier est fermé par un bouchon en caoutchouc et maintenu dans la glace. A travers le bouchon, 100 µl du réactif (NaOCl 6% - NaOH 5,6 M) refroidi dans la glace sont injectés. Le réactif est préparé au dernier moment pour avoir un degré de chlore suffisant dans la solution. Le pilulier est alors agité 5 secondes au vortex, laissé 150 secondes dans la glace et agité de nouveau 5 secondes. Un prélèvement d'une aliquote de 1 ml du milieu gazeux est effectué à l'aide d'une seringue étanche-gaz et l'éthylène formé est dosé par chromatographie en phase gazeuse.

5.10.3.3 *Conditions expérimentales*

Appareil CPG (HP 5890 séries II)

Injecteur : boucle d'injection Valco (6 voies) de 250 µl gaz à 80°C

Détecteur : détecteur à ionisation de flamme (DIF) à 210°C

Four : programmation de température : 100°C p^d 1'10, de 100 à 165°C avec 15°C/min et 2' à 165°C

Gaz vecteur : azote (47 psi) à 8,3 ml/min

Colonne : GS-Q (30 m × 0,53 mm) spéciale gaz ; phase stationnaire : divinylbenzène

5.10.3.4 Calibration de l'appareil

Une pré-calibration de l'appareil avec une solution étalon d'ACC pur commerciale à 2,5 µM est nécessaire. Ainsi, une solution d'ACC (2,5 µM), préparée dans de l'acide chlorhydrique 0,1 N afin de prolonger la conservation à 4°C, est utilisée avant chaque série de dosage pour vérifier le rendement de la réaction et calibrer l'analyse (étalon externe).

La manipulation est la même que celle décrite précédemment sauf que, dans le pilulier, 100 µl d'ACC 2,5 µM sont ajoutés à 100 µl de chlorure de mercure 80 mM et à 700 µl d'eau distillée, ce qui donne 0,25 nmol d'ACC dans ce pilulier. Sachant que le volume libre du pilulier est de 11,1 ml et que, en théorie, 1 nmole d'ACC donne 1 nmole d'éthylène (soit 22,4 nl), la conversion de l'ACC en éthylène doit donner : $(0,25 \times 22,4) / 11,1 = 0,5045$ ppm de C₂H₄

5.10.4 Expression des résultats

Les valeurs d'éthylène sont données en ppm par le logiciel d'intégration (ChemStation) de la CPG suivant la méthode d'intégration dite de l'étalon externe. La concentration en ACC de l'échantillon (en nmol/g de matière fraîche) est ensuite obtenue par le calcul suivant :

$$[\text{ACC libre}]_{(\text{nmol/g MF})} = ([\text{C}_2\text{H}_4]_{(\text{ppm})} \times V_1 \times V_e) / (22,4 \times P_e \times V_d)$$

avec : [C₂H₄], la concentration de l'éthylène en nanolitres par millilitres de la solution injectée (équivalent aux ppm données par le logiciel d'intégration)

V₁, le volume libre du pilulier (= 11,1 ml)

V_e, le volume de l'extrait brut récupéré (en ml)

P_e, le poids de l'échantillon pesé (en g)

V_d, le volume d'extrait par pilulier (= 0,5 ml)

$$[\text{ACC total}]_{(\text{nmol/g MF})} = ([\text{C}_2\text{H}_4]_{(\text{ppm})} \times V_1 \times V_e \times V_r) / (22,4 \times P_e \times V_d \times V_a)$$

avec : [C₂H₄], la concentration de l'éthylène en nanolitres par millilitres de la solution injectée (équivalent aux ppm données par le logiciel d'intégration)

V₁, le volume libre du pilulier (= 11,1 ml)

V_e, le volume de l'extrait brut récupéré (en ml)

V_r, le volume total de la réaction (= 2,8 ml)

P_e, le poids de l'échantillon pesé (en g)

V_d, le volume d'extrait par pilulier (= 0,5 ml)

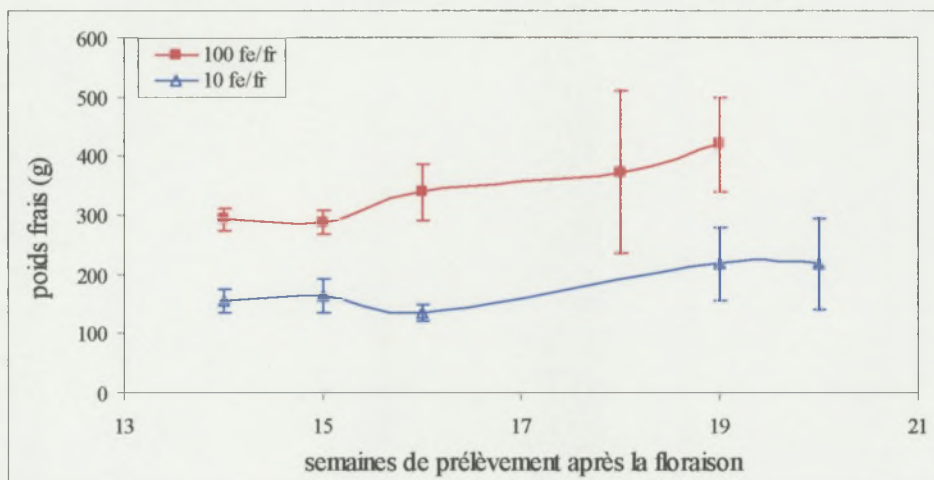
V_a, le volume de l'aliquote (= 2 ml)

RESULTATS ET DISCUSSION : EVOLUTION BIOCHIMIQUE DE LA MANGUE A LA RECOLTE

1 CROISSANCE MORPHOLOGIQUE DES FRUITS

Le poids des mangues tend à augmenter entre la 14^{ème} et la 20^{ème} semaine après la floraison (cf. Graphique 1). Les poids frais des fruits soumis au traitement « 100 feuilles par fruit » sont toujours supérieurs à ceux des fruits du traitement « 10 feuilles par fruit ».

Graphique 1 : Croissance en poids frais des mangues



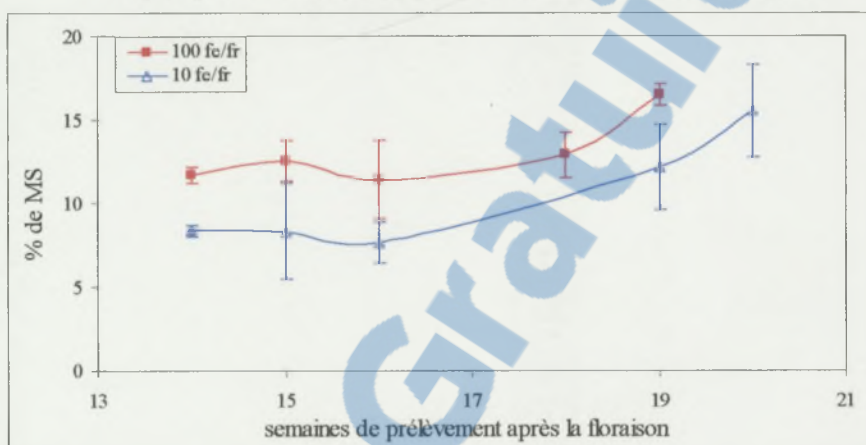
Les allures des deux courbes sont identiques à celles observées les saisons précédentes et correspondent à la troisième phase de croissance : fin du développement du fruit et phase de maturation.

Pour les charges en fruit faibles (100 fe/fr), les mangues sont plus volumineuses et présentent une masse plus importante. Ce résultat est logique, puisque ces fruits puisent leurs réserves dans des rameaux chargés en feuilles dont la sève phloémienne est supposée plus riche en assimilats carbonés issus de la photosynthèse (Souty *et al.*⁽²⁷⁾).

2 EVOLUTION DU TAUX DE MATIERE SECHE

Quel que soit le traitement, le taux de matière sèche augmente au cours de la maturation de la mangue (de la 16^{ème} à la 20^{ème} semaine après la floraison), conformément aux observations de Mendoza et Wills⁽¹⁸⁾. Il est compris entre 5% et 18% (cf. Graphique 2). Les fruits issus du traitement 100 fe/fr ont logiquement un taux de matière sèche plus important que les 10 fe/fr puisque, comme indiqué précédemment, ils accumulent plus de nutriments.

Graphique 2 : Evolution de la matière sèche des mangues

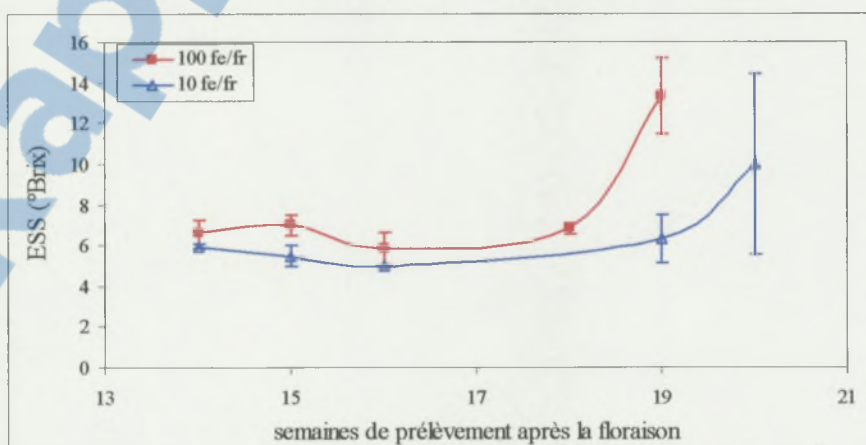


3 EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN GLUCIDES

3.1 Extrait sec soluble

Pour les charges en fruit faibles, l'ESS augmente fortement à partir de la 18^{ème} semaine après la floraison alors que pour les charges en fruit fortes, l'ESS augmente fortement à partir de la 19^{ème} semaine après la floraison (cf. Graphique 3). De plus, l'ESS est toujours plus élevé dans les 100 fe/fr.

Graphique 3 : Evolution de l'ESS de la pulpe de mangue



3.2 Sucres majeurs

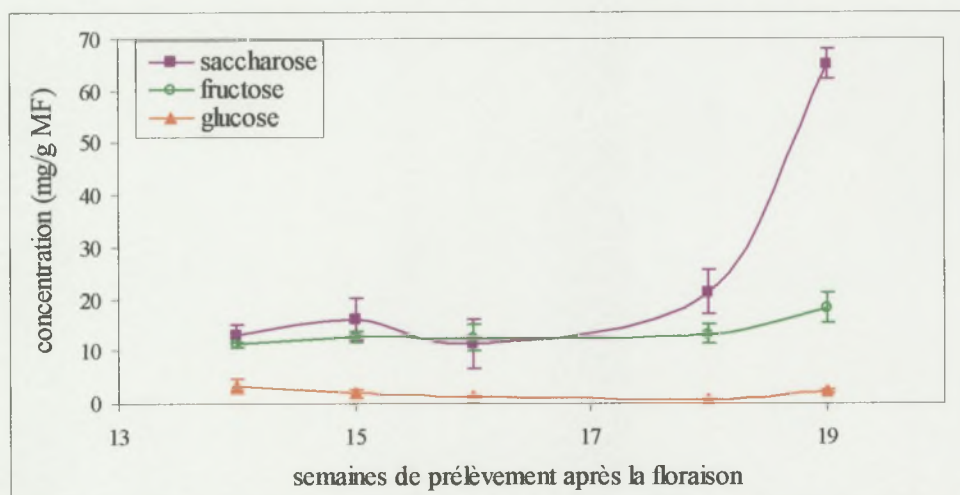
Les sucres majeurs de la mangue, c'est-à-dire le glucose, le fructose et le saccharose, ont des comportements différents au cours du développement du fruit (*cf. Graphique 4*).

Le fructose et le saccharose sont majoritaires dans la pulpe de mangue : ils sont 2 à 20 fois plus présents en quantité que le glucose. De plus, la concentration en saccharose est dominante tout au long du développement et de la maturation du fruit.

La concentration en glucose a tendance à diminuer pendant la phase de grossissement, puis à augmenter quand la phase de maturation se rapproche.

L'enrichissement en fructose et saccharose est régulier au cours de la maturation du fruit, avec une augmentation plus prononcée ou brutale à partir de la 18^{ème} semaine après la floraison.

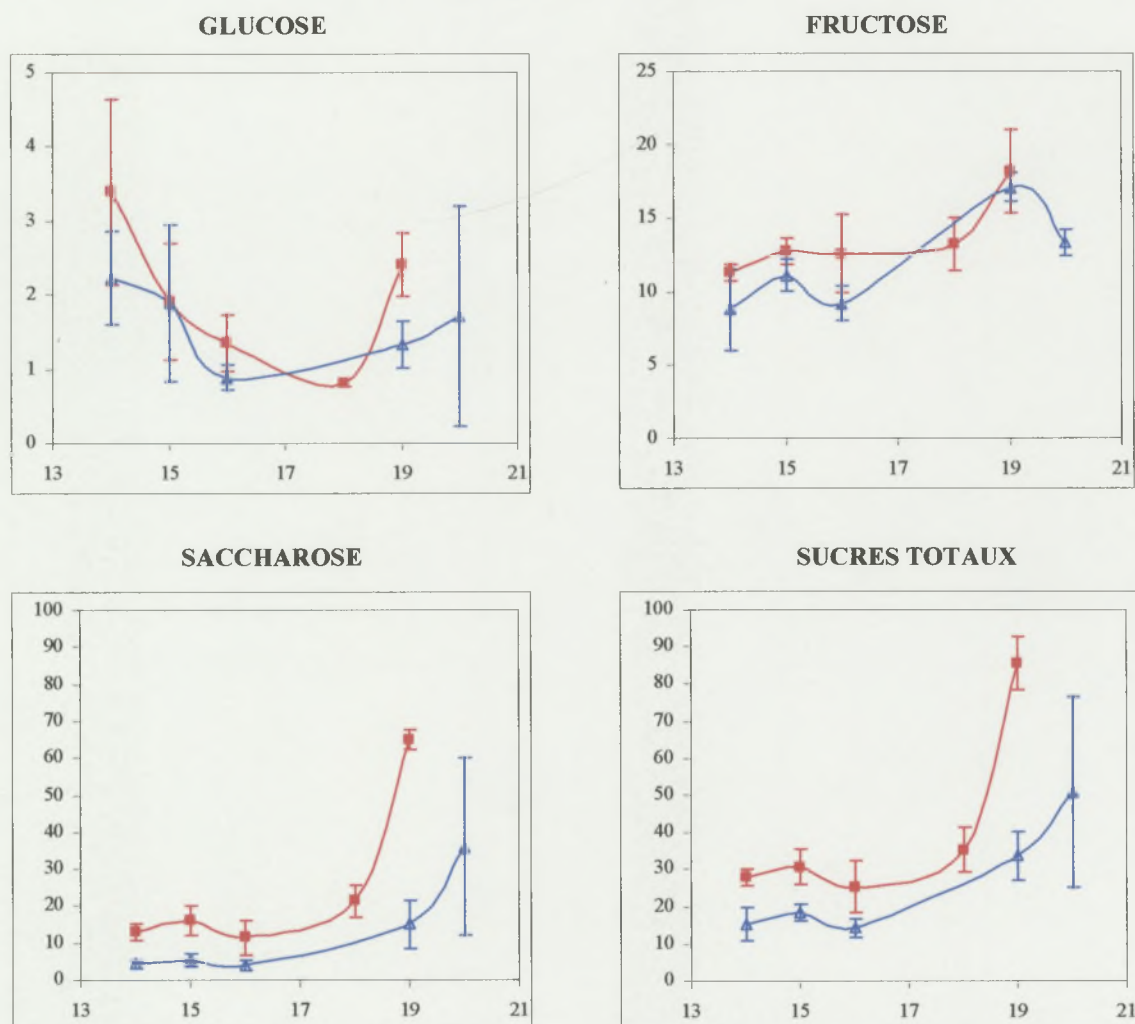
Graphique 4 : Evolution des concentrations en sucres majeurs dans la pulpe de mangue
– 100 feuilles/fruit –



Concernant les différences entre les conditions de culture des mangues, celles disposant de 100 feuilles sur le rameau ont en général une quantité de sucres totaux plus importante que les mangues n'ayant que 10 feuilles (*cf. Graphique 5*). Cela est particulièrement net pour le saccharose, sucre prédominant, où les écarts sont importants à partir de la 18^{ème} semaine après la floraison. Pour les deux autres sucres, ces écarts ne sont pas aussi visibles.

De façon logique, cette différence entre les deux traitements est corrélée avec celle observée pour l'extrait sec soluble puisque ce dernier reflète le taux de sucres solubles présents dans la pulpe de mangue.

Graphique 5 : Evolution des concentrations de glucose, fructose, saccharose et sucres totaux dans la pulpe de mangue (mg/g de MF en fonction des semaines de prélèvement après la floraison) (■:100 fe/fr ; △:10 fe/fr)



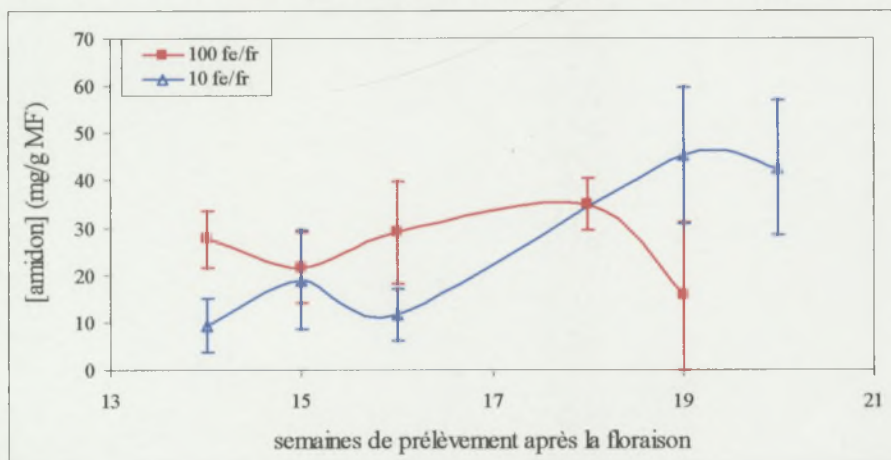
A partir de la 19^{ème} semaine pour les 10 feuilles et à partir de la 18^{ème} semaine pour les 100 feuilles, les concentrations en glucose, fructose et saccharose augmentent avec l'entrée en maturation des manges, ce qui est confirmé par Medlicott et Thompson⁽¹⁷⁾.



3.3 Amidon

La concentration en amidon a tendance à augmenter au cours du développement de la mangue avant de diminuer (*cf. Graphique 6*). Pour les 100 fe/fr, la concentration d'amidon chute à la 18^{ème} semaine après la floraison. Dans le cas des 10 fe/fr, l'augmentation de la concentration d'amidon est beaucoup plus importante avec une diminution plus tardive à partir de la 19^{ème} semaine.

Graphique 6 : Evolution de la concentration d'amidon dans la pulpe de mangue



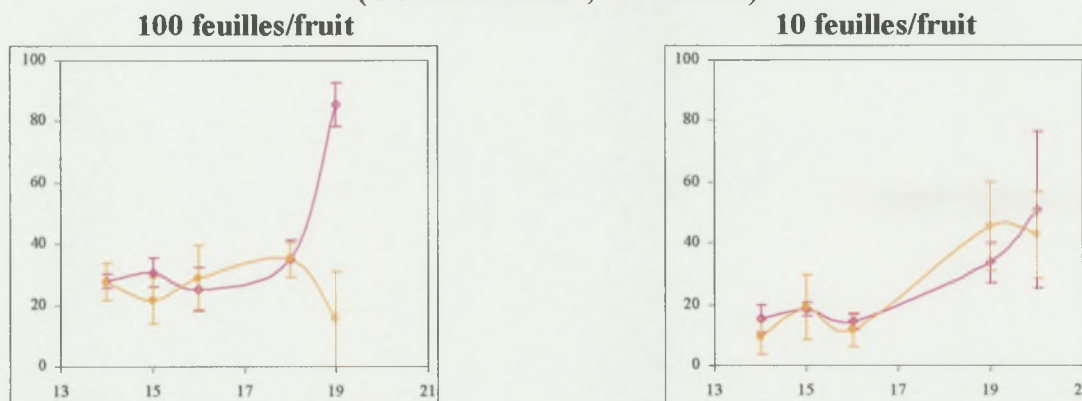
L'amidon s'accumule pendant la croissance des mangues, avant d'être hydrolysé lors de leur mûrissement ; les sucres réducteurs sont alors synthétisés en saccharose (Leley *et al.*⁽¹³⁾).

La bonne corrélation entre la période d'augmentation des sucres totaux et de diminution de l'amidon montre que l'entrée en maturation (crise respiratoire et changements métaboliques) a lieu environ à la 18^{ème} semaine après la floraison pour les 100 fe/fr (*cf. Graphique 7*).

Il est beaucoup plus difficile de déterminer la période de maturation des 10 fe/fr. Ceci est probablement dû au stress appliqué à ces fruits, stress qui perturbe visiblement la maturation, dont l'entrée est moins franche et se situe en moyenne à partir de la 19^{ème} semaine après la floraison.

Graphique 7 : Evolution des concentrations de sucres et d'amidon dans la pulpe de mangue (mg/g de MF en fonction des semaines de prélèvement après la floraison)

(◇ : sucres totaux ; ● : amidon)



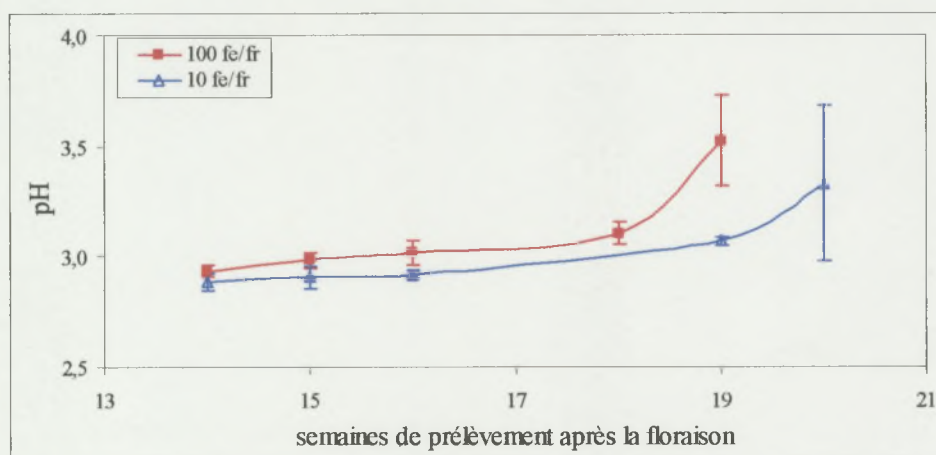
4 EVOLUTION DU pH, DE L'ACIDITE TITRABLE ET DE LA TENEUR EN ACIDES ORGANIQUES

4.1 pH et acidité titrable

Le pH des mangues augmente, en accord avec les résultats de Medlicott et Thompson⁽¹⁷⁾, progressivement d'abord puis fortement lors de l'entrée en maturation des mangues. Il y a une bonne corrélation avec les observations antérieures, c'est-à-dire une augmentation plus prononcée du pH à partir de la 18^{ème} semaine après la floraison pour les 100 fe/fr et à partir de la 19^{ème} semaine pour les 10 fe/fr (cf. Graphique 8).

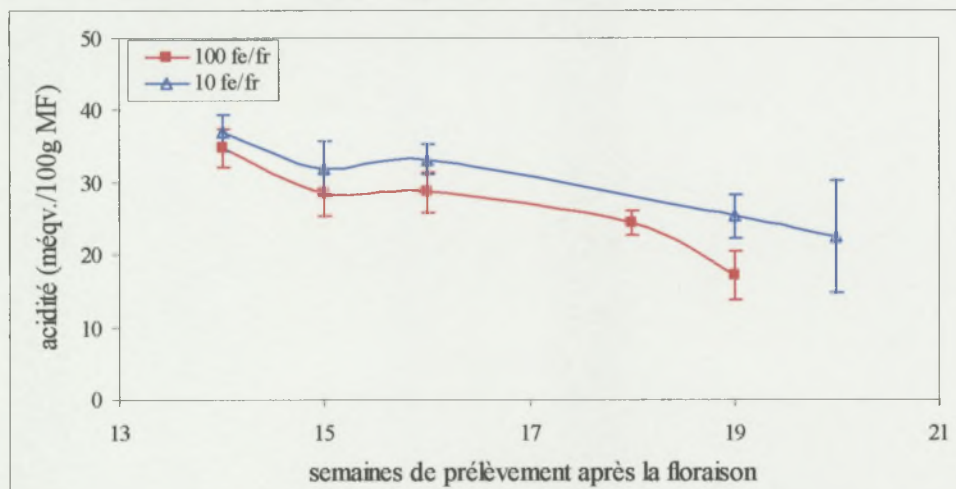
Le pH des mangues à forts apports carbonés est toujours plus élevé que celui des mangues à faibles apports carbonés : il y a donc un réel impact du traitement sur le pH des fruits.

Graphique 8 : Evolution du pH de la pulpe de mangue



L'acidité diminue de la 14^{ème} à la 20^{ème} semaine après la floraison pour les deux traitements et elle est plus élevée dans les 10 fe/fr (cf. Graphique 9).

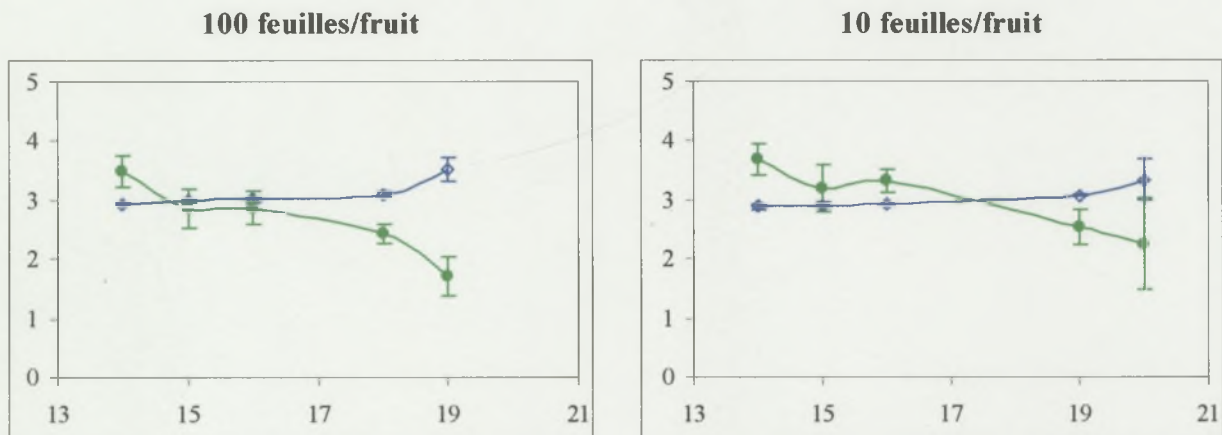
Graphique 9 : Evolution de l'acidité titrable dans la pulpe de mangue



Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus pour le pH : l'acidité titrable diminue alors que le pH augmente pendant le mûrissement des mangues.

La courbe de pH est exactement l'inverse de la courbe d'acidité (cf. Graphique 10).

Graphique 10 : Evolution de l'acidité et du pH de la pulpe de mangue (valeur de pH et acidité en méqV./10g de MF en fonction des semaines après la floraison) (◇ : pH ; ● : acidité titrable)



4.2 Acides organiques

Nous avons dosé 4 acides organiques : l'acide pyruvique, l'acide oxalique, l'acide malique et l'acide citrique. Parmi eux, les acides citriques et maliques sont ceux dont les concentrations sont les plus fortes et varient le plus (cf. Graphique 11).

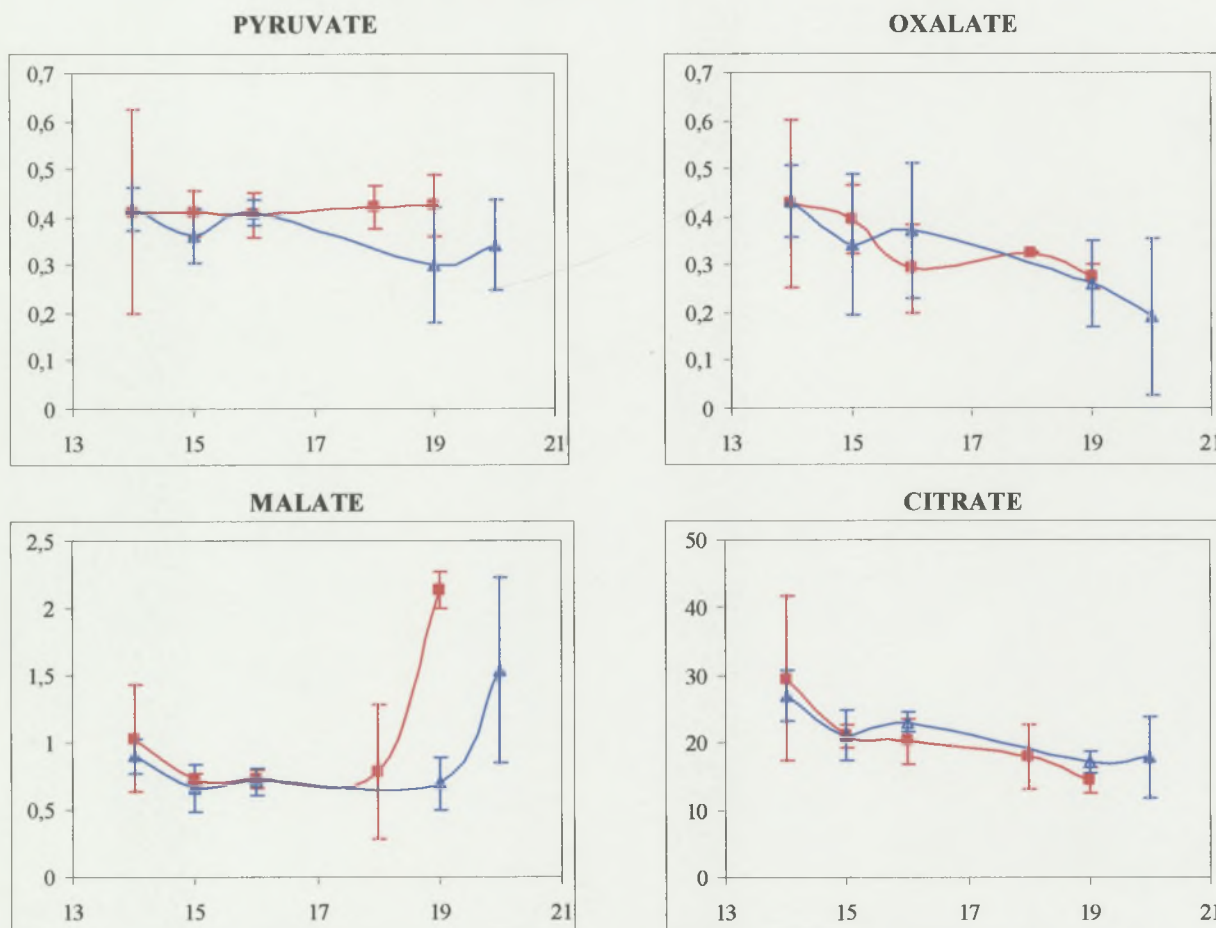
L'acide pyruvique est un indicateur du bon déroulement du cycle de Krebs et sa concentration reste relativement constante au cours de la maturation.

L'acide oxalique présente des profils assez irréguliers avec une tendance à diminuer au cours du temps. Sa concentration oscille entre 0,2 et 0,5 mg/g MF.

La concentration en acide malique reste relativement constante, puis elle augmente respectivement à partir de la 18^{ème} et 19^{ème} semaine après la floraison pour les 100 et 10 fe/fr.

La teneur en acide citrique a tendance à diminuer avec des teneurs comprises entre 15 et 30 mg/g de MF.

Graphique 11 : Evolution des concentrations en acides organiques dans la pulpe de mangue (mg/g de MF en fonction des semaines de prélèvement après la floraison) (■:100 fe/fr ; △:10 fe/fr)



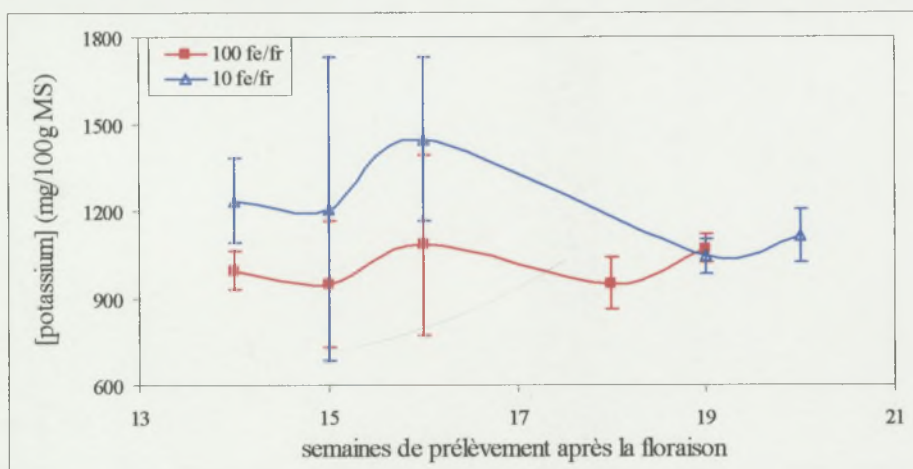
En général, la concentration de citrate diminue progressivement durant la maturation de la mangue, tandis que le malate présente des variations différentes selon les cultivars. La teneur en malate augmente dans la variété Lirifa, comme dans la mangue Alphonso, où le taux de malique-deshydrogénase augmente alors que le taux de citrate-synthase diminue significativement lors de la maturation (Mitra et Baldwin⁽¹⁹⁾).

5 EVOLUTION DE LA TENEUR EN MINERAUX

5.1 Le potassium

La concentration de potassium a tendance à rester constante au cours du développement et de la maturation des mangues (cf. Graphique 12). Elle est comprise entre 900 et 1100 mg/100g de MS pour les 100 fe/fr et entre 1000 et 1500 mg/100g de MS pour les 10 fe/fr. Les mangues disposant de 10 feuilles par rameau contiennent donc en moyenne plus de potassium que celles disposant de 100 feuilles par rameau.

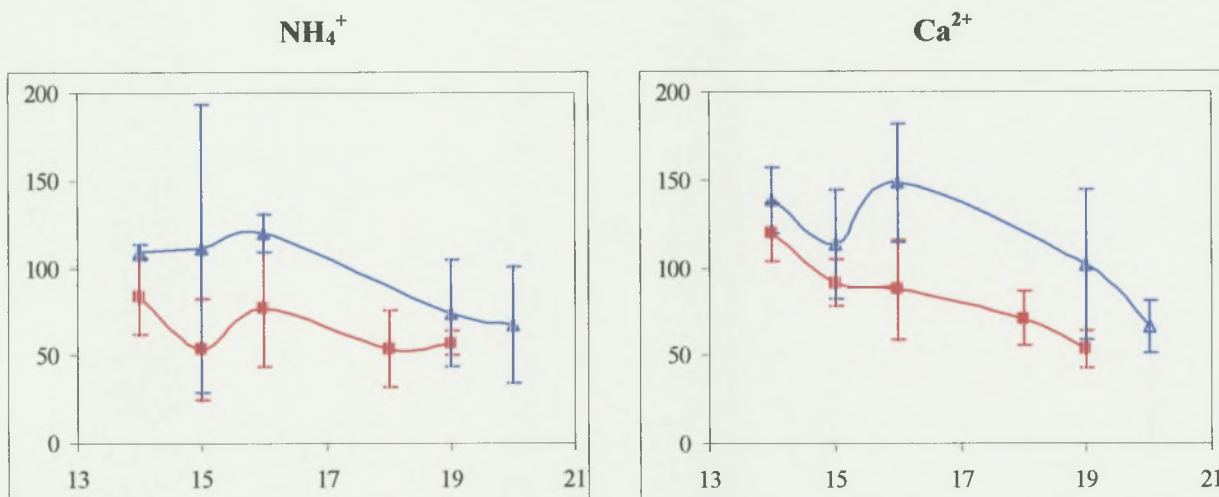
Graphique 12 : Evolution de la concentration de potassium dans la pulpe de mangue

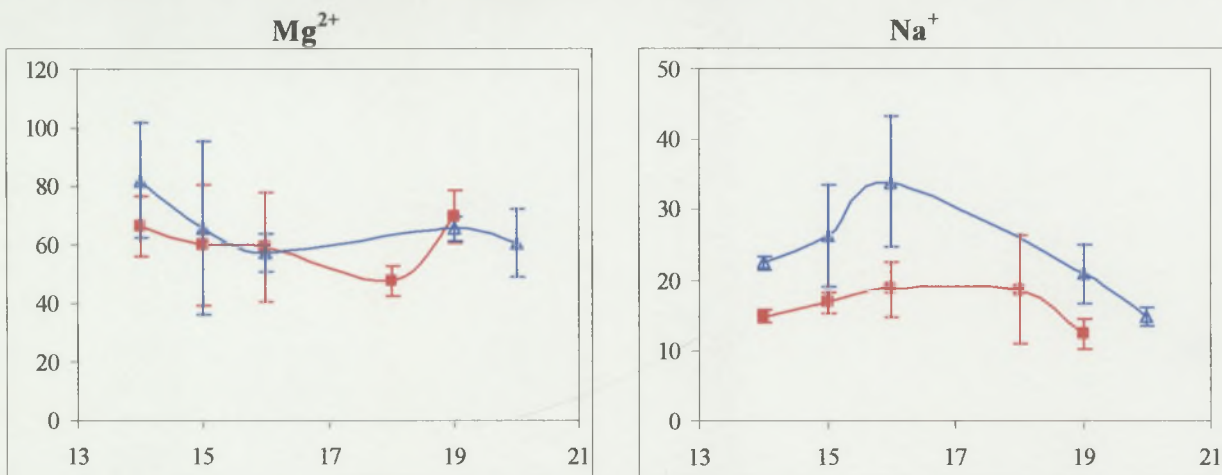


5.2 L'ammoniac, le calcium, le sodium et le magnésium

Ces quatre cations sont en quantités moins importantes que le potassium. Leur évolution au cours du développement de la mangue montre des profils assez proches (cf. Graphique 13). En général, les 10 fe/fr sont plus riches en cations que les 100 fe/fr. De plus, la concentration de ces cations a tendance à diminuer à partir de la 16^{ème} semaine après la floraison (sauf pour le magnésium).

Graphique 13 : Evolution des concentrations d'ammoniac, de calcium, de sodium et de magnésium dans la pulpe de mangue (mg/100g de MS en fonction des semaines de prélèvement après la floraison) (■:100 fe/fr ; △:10 fe/fr)



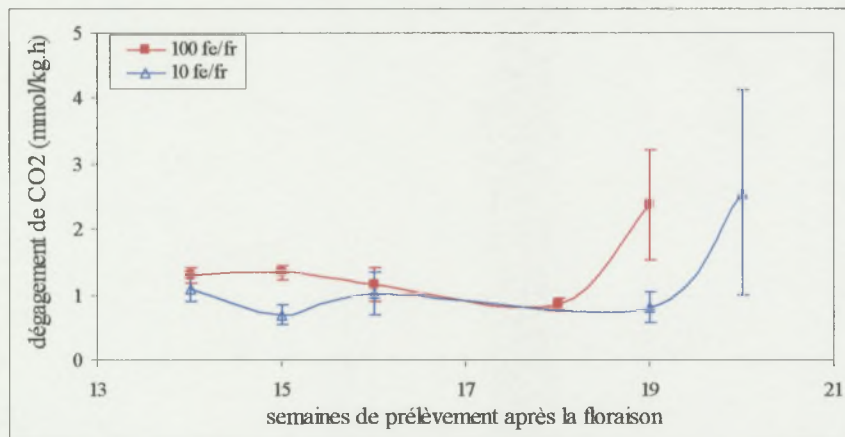


La transpiration étant plus importante au niveau des rameaux 10 fe/fr (résultats de Léchaudel non publiés), il est probable que la circulation de la sève brute soit plus élevée pour compenser ces pertes en eau, ce qui expliquerait un enrichissement en cations des fruits 10 fe/fr par rapport aux 100 fe/fr.

6 EVOLUTION DE L'INTENSITE RESPIRATOIRE

Le dégagement de CO₂ est relativement stable de la 14^{ème} semaine à la 16^{ème} après la floraison puis, après une légère diminution, il augmente fortement à la 18^{ème} semaine pour les 100 fe/fr et à la 19^{ème} semaine pour les 10 fe/fr (cf. Graphique 14).

Graphique 14 : Evolution du dégagement de CO₂ par la mangue



Ces résultats confirment toutes nos précédentes observations : la crise climactérique, caractérisée par une forte augmentation de la respiration, se produit à la 18^{ème} semaine après la floraison pour les mangues ayant subi le traitement 100 fe/fr et à la 19^{ème} semaine pour les mangues ayant subi le traitement 10 fe/fr.

L'entrée en maturation des mangues disposant d'une alimentation carbonée suffisante se produirait donc avant celle des mangues disposant d'une faible alimentation carbonée. Cette conclusion va dans le même sens que celle de Souty *et al.*⁽²⁷⁾ : le déclenchement de l'émission éthylénique est d'autant plus tardif que le rapport fe/fr est élevé.

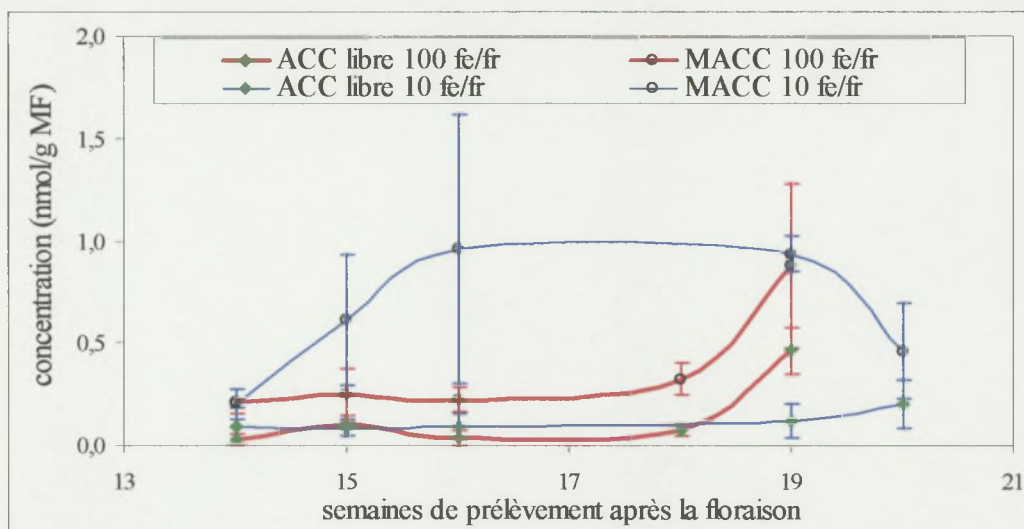
7 EVOLUTION DE LA TENEUR EN ACC

Les concentrations en acide 1-aminocyclopropane-1-carboxylique (ACC) et en malonyl-ACC (MACC) fluctuent différemment selon les traitements (cf. Graphique 15).

Pour le traitement 100 fe/fr, les concentrations respectives en ACC et MACC dans les fruits peuvent être considérées stables et très faibles pour les premiers stades de récolte, puis elles augmentent brutalement pour le dernier stade de récolte (récolte à la 19^{ème} semaine après la floraison). L'ACCS (ACC synthétase) et en parallèle l'ACCMT (ACC malonyltransférase) sont donc activées à ce stade. Comme la récolte à la 19^{ème} semaine correspond à des fruits entrant en maturation, cette augmentation soudaine montre qu'il y a un enrichissement en ACC sur le plant qui précède la crise éthylénique.

Pour le traitement 10 fe/fr, la teneur en ACC reste également faible pour les premiers stades de récolte. Par contre, la teneur en MACC augmente très rapidement, se stabilise plus ou moins en plateau puis diminue ensuite à la 19^{ème} semaine après la floraison, semaine pour laquelle une légère augmentation de la teneur en ACC est enregistrée.

Graphique 15 : Evolution des concentrations en ACC libre et en MACC dans la pulpe de mangue



Les fruits subissant une contrainte ont donc un métabolisme perturbé. Dès la 14^{ème} semaine après la floraison, l'ACCS et la ACCMT sont sollicitées précocement et fortement, conformément aux observations réalisées la saison précédente (ces deux enzymes étant nécessaires pour l'accumulation du MACC). Comme l'ACC peut être produit en cas de stress (Latché *et al.*⁽¹¹⁾), l'augmentation de la teneur en MACC peut donc être expliquée (l'ACC étant alors directement complexé en MACC). Pour le dernier stade de récolte (stade de récolte à la 19^{ème} semaine), la baisse de la teneur en MACC et la faible augmentation de l'ACC laissent supposer que l'ACCS ne peut pas jouer correctement son rôle. Deux explications à cette baisse de la teneur en MACC sont alors possibles : soit le MACC est catabolisé quand le fruit approche de la maturation, soit, sous l'action d'enzymes, il y a une conversion du MACC en ACC qui viendrait en complément ou supplanterait la déficience en ACCS. Normalement, le MACC est un composé métaboliquement inactif qui n'est plus disponible pour la production d'éthylène, mais il peut être converti en ACC sous des conditions non physiologiques (Lelièvre *et al.*⁽¹⁴⁾). Il est peut-être possible, *in vivo*, qu'en situation de stress la synthèse d'enzymes permette cette conversion.

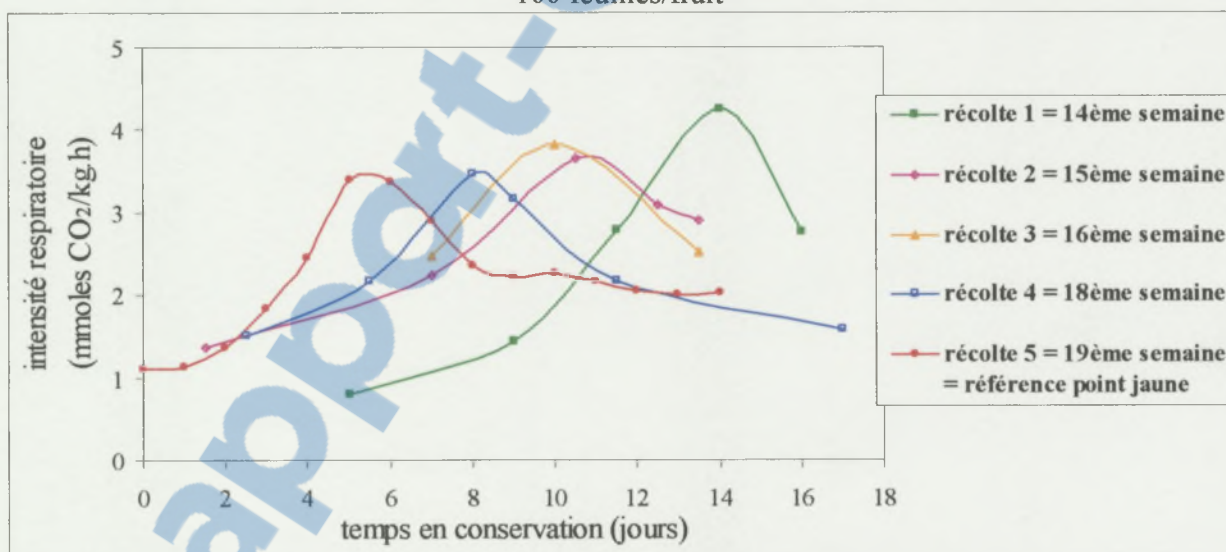
RESULTATS ET DISCUSSION : EVOLUTION BIOCHIMIQUE DE LA MANGUE EN CONSERVATION EN FONCTION DE SON STADE DE MATURITE

Les résultats précédents permettent de caractériser la qualité initiale des fruits en fonction de leur stade de récolte. Il s'agit maintenant de suivre l'évolution de ces différents lots de mangues afin d'apprécier leur aptitude à mûrir et leur potentiel de conservation en conditions non contraignantes (stockage à 20°C) et de pouvoir caractériser la qualité finale des fruits mûrs.

1 VITESSE D'EVOLUTION DES MANGUES EN POST-RECOLTE

Les mangues montrent une respiration typique de fruit climactérique après la récolte (cf. Graphique 16). Elles n'évoluent pas à la même vitesse selon la récolte : plus la récolte est tardive, plus le temps pour atteindre le pic respiratoire est court. Ainsi, le pic climactérique a lieu 14 jours après la récolte pour les fruits cueillis à la 14^{ème} semaine après la floraison et 5 jours après la récolte pour les fruits cueillis à la 19^{ème} semaine après la floraison. Les fruits plus matures entrent donc en maturation plus tôt et ont de ce fait une durée de conservation plus courte. Ces données sont semblables à celles obtenues par Lam *et al.* en 1982 (cité par Mendoza et Wills⁽¹⁸⁾).

Graphique 16 : Allures de l'intensité respiratoire à partir de mangues observées en post-récolte
– 100 feuilles/fruit –



2 RELATIONS ENTRE L'INTENSITE RESPIRATOIRE, LE STADE CLIMACTERIQUE ET L'INDICE DE MATURITE CORRIGE

Lors de la conservation, les fruits n'évoluent pas à la même vitesse selon le stade de récolte (cf. paragraphe précédent), voire pour une même récolte. Il est donc difficile de comparer les résultats d'analyse entre eux.

Aussi, pour avoir une idée objective du stade de maturation vraie des fruits, un indice de maturité corrigé (IMC) a été élaboré. Il tient compte du stade climactérique et de la durée de conservation des mangues et se calcule de la façon suivante :

$$\text{IMC} = (\text{nombre de jours en conservation} + 1) / \text{stade climactérique estimé}$$

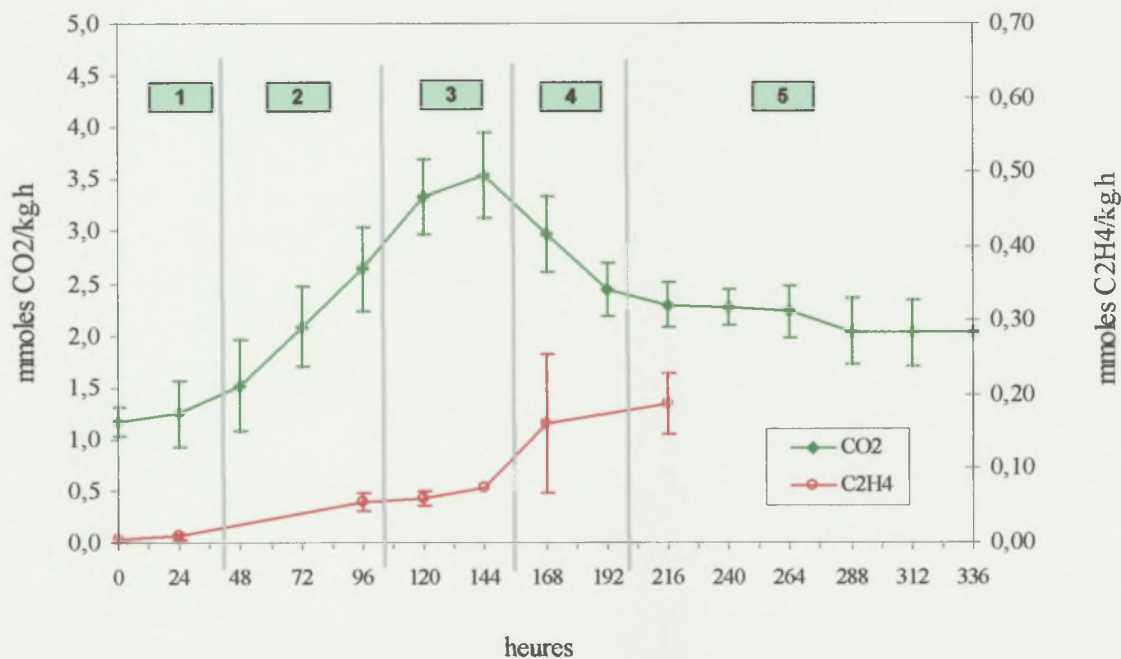
Le stade climactérique est défini par rapport à une courbe de référence réalisée sur un lot témoin de 6 fruits suivis individuellement en respiration (fruits homogènes, non stressés, récoltés au stade pratiqué par les producteurs réunionnais, c'est-à-dire au stade « point jaune » correspondant à la récolte 5 de notre étude). (cf. Graphique 17)

Cinq stades climactériques sont définis :

- 1 = stade pré-climactérique,
- 2 = début de crise climactérique,
- 3 = pic climactérique,
- 4 = fin de crise climactérique,
- 5 = stade post-climactérique.

Ces stades tiennent compte de l'intensité respiratoire en fonction du temps de conservation. La synthèse d'éthylène se produit après le pic respiratoire, entre les stades climactériques 3 et 4 (conformément aux observations de Mendoza et Wills⁽¹⁸⁾) et annonce la sénescence du fruit.

Graphique 17 : Evolution de l'intensité respiratoire et de la production d'éthylène des mangues en post-récolte



Les résultats des différentes analyses sont par conséquent exprimés en fonction de cet indice de maturité corrigé pour chaque fruit.

Le classement initial de 3 fruits pour les 5 durées de conservation sont sujet à des modifications. Quand plusieurs fruits ont le même IMC, l'écart-type de la variable observée est mesuré et présenté sur les graphiques.

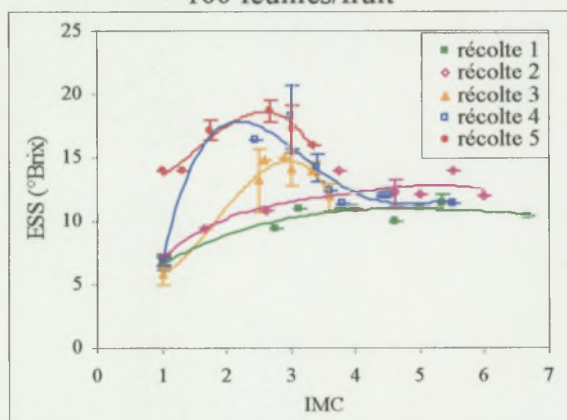
Sur l'ensemble des suivis respiratoires réalisés pour chaque récolte, seuls quelques fruits ont eu un comportement respiratoire atypique et n'ont pas été intégrés dans les résultats.

3 EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN GLUCIDES

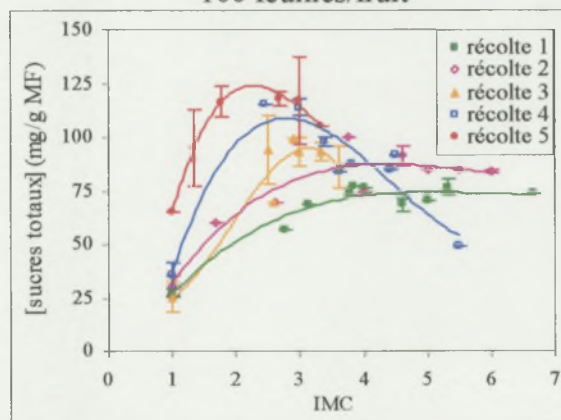
3.1 Extrait sec soluble et sucres totaux

L'extrait sec soluble et la concentration en sucres totaux évoluent logiquement de la même manière au cours de la conservation des mangues : ils augmentent puis diminuent (cf. Graphiques 18 et 19). Ces résultats confirment ceux de Selvaraj *et al.*⁽²⁴⁾ : les sucres solubles augmentent après la récolte et sont rapidement consommés pendant la sénescence des fruits. Notons que les courbes présentées dans le présent paragraphe sont des courbes de tendance, ce qui permet de lisser les courbes de résultats obtenues initialement.

Graphique 18 : Evolution de l'extrait sec soluble de la pulpe de mangue en fonction de son stade de maturité
– 100 feuilles/fruit –



Graphique 19 : Evolution de la concentration de sucres dans la pulpe de mangue en fonction de son stade de maturité
– 100 feuilles/fruit –



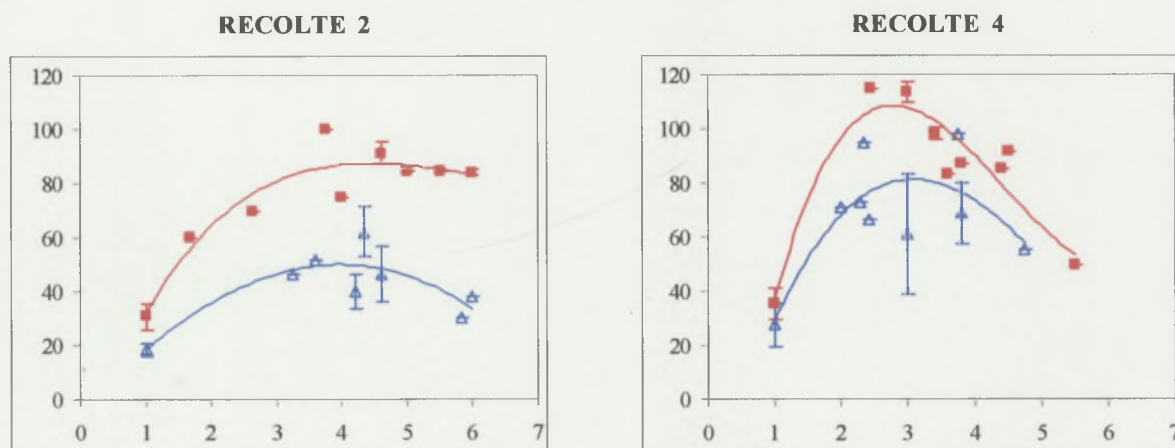
Plus la récolte est précoce, plus l'IMC est élevé et plus le temps de conservation des mangues est long. Mais, plus la récolte est précoce, plus la concentration en sucres des mangues est faible et plus la qualité organoleptique des mangues est mauvaise. Un compromis entre une qualité convenable des mangues et une durée de conservation correcte doit donc être établi.

Les récoltes 3 et 4 semblent être un bon compromis. Par contre, la récolte 5 (19^{ème} semaine après la floraison), habituellement pratiquée à La Réunion, évolue rapidement en post-récolte (les mangues sont déjà entrées en maturation à la récolte). Elle n'est donc pas préconisée pour l'exportation.

L'évolution de la concentration en sucres des mangues ayant subi le traitement 10 fe/fr est semblable à celle observée pour les 100 fe/fr. Cependant, les 100 fe/fr ont une concentration en sucres plus élevée que les 10 fe/fr quels que soient la récolte et le stade de maturité des mangues (cf. Graphique 20). La qualité organoleptique des fruits stressés est donc altérée.



Graphique 20 : Evolution de la concentration en sucres dans la pulpe de mangue en fonction de son stade de maturité (mg/g de MF en fonction de l'indice de maturité corrigé)
 (■:100 fe/fr ; △:10 fe/fr)

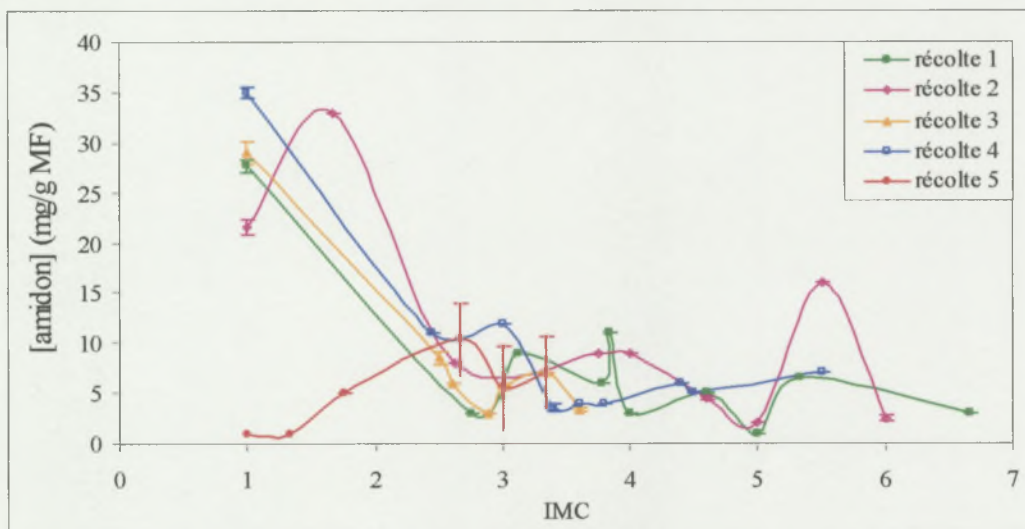


3.2 Amidon

La concentration en amidon diminue dans les mangues après la récolte, sauf pour la récolte 5 (cf. Graphique 21).

Les fruits mûrs ont une concentration en amidon excessivement faible puisque l'activité de l'amylase, et donc la synthèse des sucres, augmente en post-récolte (Kalra et Tandon⁽⁷⁾).

Graphique 21 : Evolution de la concentration d'amidon dans la pulpe de mangue en fonction de son stade de maturité – 100 feuilles/fruit –

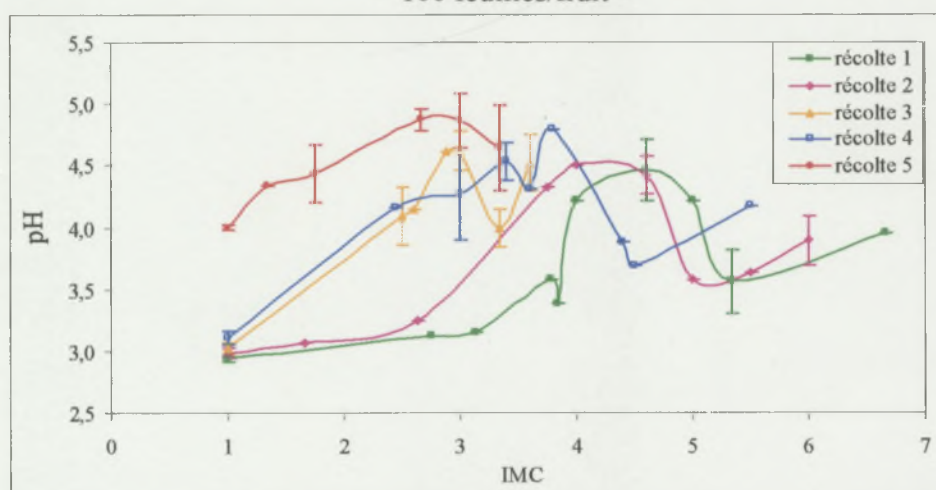


4 EVOLUTION DU pH, DE L'ACIDITE TITRABLE ET DE LA TENEUR EN ACIDES ORGANIQUES

4.1 pH

Pour toutes les récoltes, le pH des mangues augmente fortement puis diminue (cf. Graphique 22). En outre, le pH est d'autant plus élevé que la récolte est tardive.

Graphique 22 : Evolution du pH de la pulpe de mangue en fonction de son stade de maturité
– 100 feuilles/fruit –



Les allures des courbes de pH pour les 10 fe/fr présentent les mêmes caractéristiques que celles décrites pour les 100 fe/fr. Mais la valeur du pH des 10 fe/fr est inférieure en moyenne à celle des 100 fe/fr (cf. Figure 17).

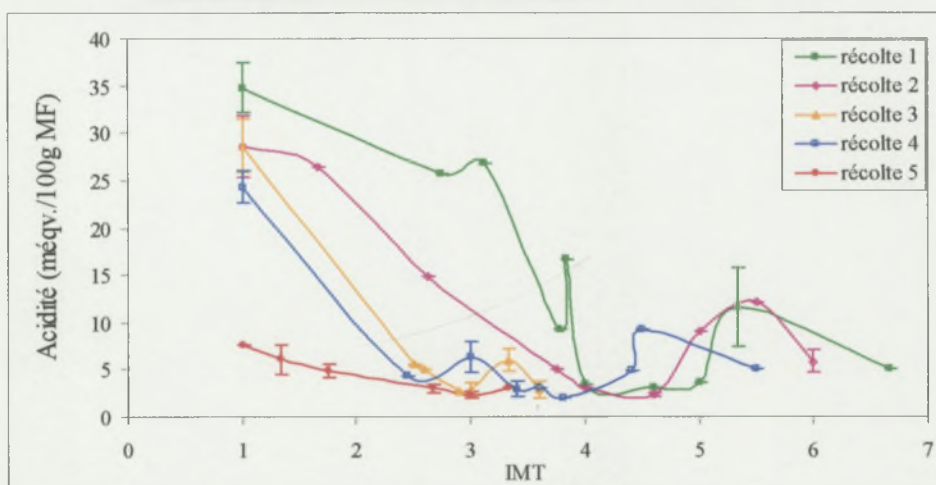
Figure 17 : Evolution du pH de la pulpe de mangue en fonction de son stade de maturité

| IMC | Récolte | | | |
|-------|-----------|----------|-----------|----------|
| | 2 | | 4 | |
| | 100 fe/fr | 10 fe/fr | 100 fe/fr | 10 fe/fr |
| 1 à 3 | 3,10 | 2,91 | 3,85 | 3,52 |
| 3 à 4 | 4,42 | 3,97 | 4,54 | 4,49 |
| 4 à 5 | 4,00 | 3,78 | 3,79 | 4,30 |
| 5 à 6 | 3,77 | 3,98 | | |

4.2 Acidité titrable

L'acidité des mangues décroît fortement en post-récolte et plus la récolte est avancée, moins les mangues cueillies sont acides (cf. Graphique 23).

Graphique 23 : Evolution de l'acidité titrable dans la pulpe de mangue en fonction de son stade de maturité – 100 feuilles/fruit –

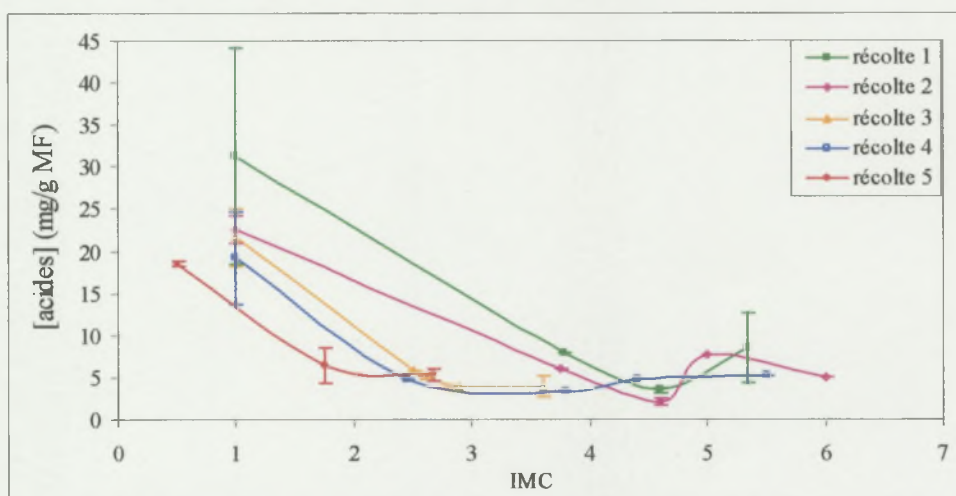


Les courbes d'acidité titrable des 10 fe/fr présentent des allures analogues.

4.3 Acides organiques

La concentration en acides organiques des mangues suit une évolution comparable à celle exposée pour l'acidité titrable (cf. Graphique 24) : elle diminue fortement en post-récolte et atteint des valeurs très faibles quelle que soit la récolte. L'évolution de la teneur en acides est alors assez homogène, contrairement à l'évolution de la teneur en sucres qui varie en fonction du stade de récolte.

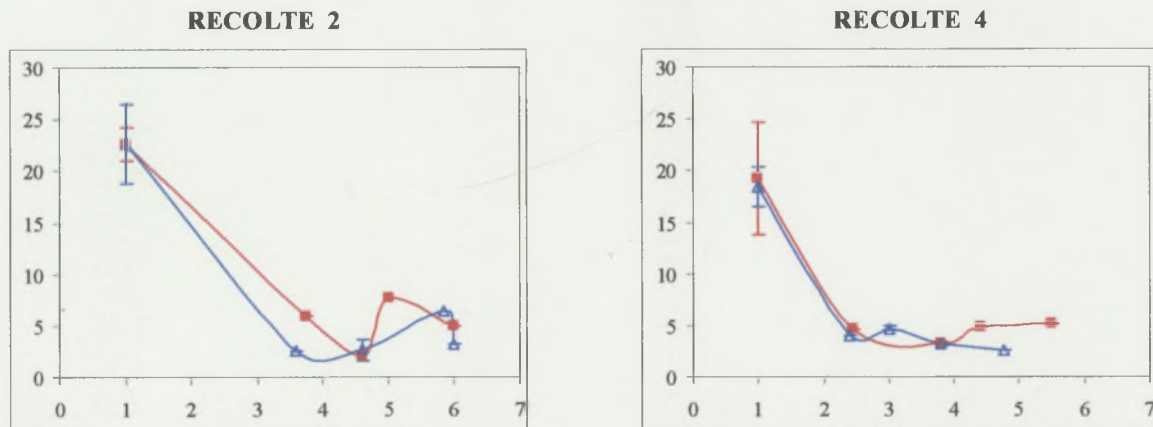
Graphique 24 : Evolution de la concentration en acides organiques dans la pulpe de mangue en fonction de son stade de maturité – 100 feuilles/fruit –



Les différences observées entre les 100 fe/fr et les 10 fe/fr sont minimales (cf. Graphique 25). Les contraintes des conditions de culture (nombre de feuilles par fruit) n'ont donc pas un impact

important sur la synthèse des acides organiques (essentiellement représentés par le citrate), ce qui suppose qu'il n'y a pas de perturbations majeures sur le cycle de Krebs.

Graphique 25 : Evolution de la concentration en acides organiques dans la pulpe de mangue en fonction de son stade de maturité (mg/g de MF en fonction de l'IMC)
(■:100 fe/fr ; Δ:10 fe/fr)

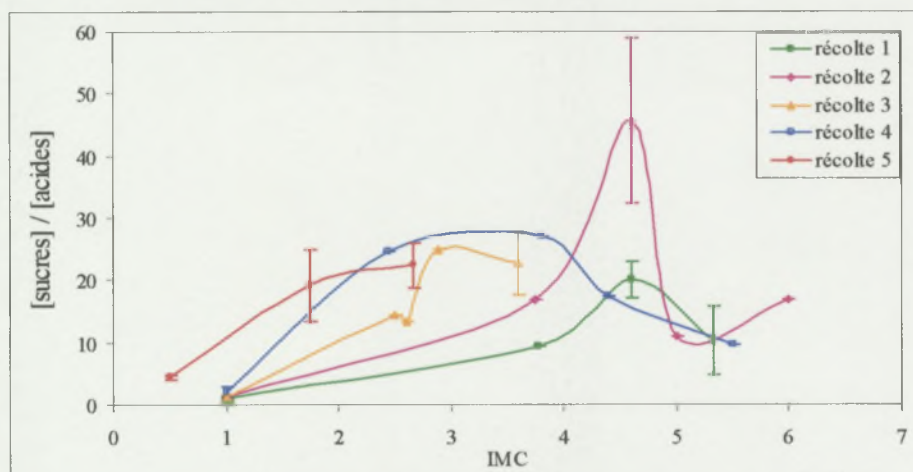


Les différents résultats (pH, acidité titrable, concentration en acides organiques) sont en accord avec les divers travaux réalisés par d'autres chercheurs : le pH augmente pendant le stockage des mangues tandis que l'acidité titrable et la concentration en acides organiques diminuent après la récolte.

5 EVOLUTION DU RAPPORT SUCRES/ACIDES

La saveur du fruit est basée principalement sur le rapport sucres/acides organiques et sur la présence de nombreux composés aromatiques (Medlicott et Thompson⁽¹⁷⁾). D'après les études de Selvaraj *et al.*⁽²⁴⁾, le ratio sucres/acides augmente après la récolte ce que nos travaux confirment (*cf. Graphique 26*). Toutefois, ce ratio diminue lors de la sénescence du fruit.

Graphique 26 : Evolution du rapport sucres/acides dans la pulpe de mangue en fonction de son stade de maturité – 100 feuilles/fruit –



Les mangues des récoltes 1 et 2 ont un rapport sucres/acides qui augmente lentement puis présente un pic (bien visible pour la récolte 2) quand l'IMC se situe entre 4 et 5. Ces mangues n'évoluent pas harmonieusement : elles sont cueillies trop tôt. En revanche, les mangues des récoltes 3 et 4 ont un rapport sucres/acides qui évolue de façon harmonieuse (présence d'un plateau). Quant aux mangues de la récolte 5, elles évoluent également convenablement, mais montrent rapidement des signes de sénescence (cf. paragraphe 2.2 sur l'évolution de la concentration en glucides). En conclusion, une récolte entre la 16^{ème} et la 18^{ème} semaine après la floraison (récoltes 3 et 4) serait le meilleur compromis entre une bonne aptitude à la conservation et une qualité de maturation des mangues convenable.

6 EVOLUTION DES TENEURS EN ACC ET MACC

La teneur en ACC dépend de l'activité enzymatique, et les conditions de conservation sont importantes pour la stabilisation des enzymes. Lors du stockage des échantillons, une panne de courant s'est produite et a pu avoir un impact sur cette activité enzymatique, certains échantillons ont donc pu légèrement évoluer avant leur analyse.

Par conséquent, si les résultats qui suivent semblent globalement cohérents, il faudra néanmoins les confirmer sur d'autres essais.

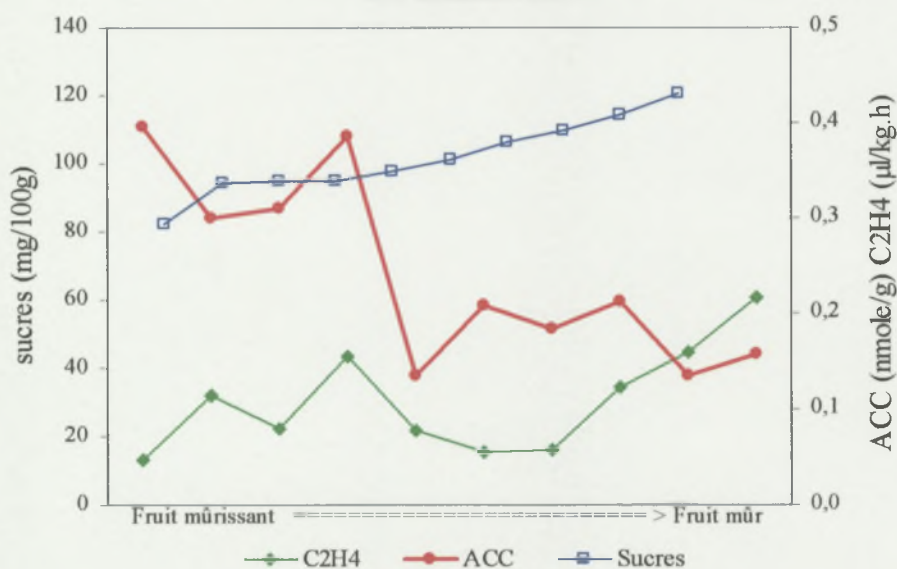
6.1 Relation ACC/éthylène/intensité respiratoire

Comme précisé précédemment, l'ACC est le précurseur direct de l'éthylène, hormone végétale qui intervient dans l'entrée en maturation des fruits climactériques.

La synthèse d'éthylène a lieu après le pic respiratoire aux alentours des stades climactériques 3 et 4 (cf. Graphique 17). Le graphique 27 (cf. ci-dessous), élaboré à partir d'un autre lot de fruits récoltés au stade 5, montre que, pour cette récolte, la concentration en ACC libre diminue lors de la synthèse en éthylène.

Graphique 27 : Evolution des concentrations en sucres, ACC libre et éthylène dans des mangues de stade avancé (récolte 5) en fonction du niveau de maturation

– 100 feuilles/fruit –



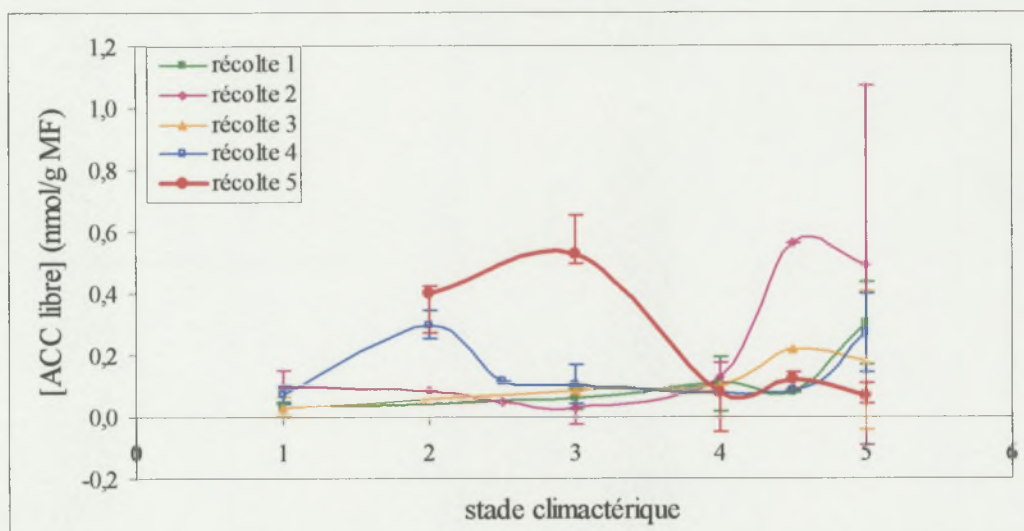
6.2 Evolution de la teneur en ACC libre

Pour les récoltes 1, 2, 3 et 4, la concentration en ACC libre ne diminue pas lors de la synthèse d'éthylène, c'est-à-dire entre les stades climactériques 3 et 4 (cf. Graphique 28). L'effet rétroactif de l'éthylène sur l'ACC synthétase (ACCS) permettrait de compenser la consommation d'ACC (Lelièvre *et al.*⁽¹⁴⁾). Par la suite, après la synthèse éthylénique (stades climactériques 4 et 5), l'ACC n'est plus consommé et s'accumule tant que l'ACCS est active (confirmé par Hoffman et Yang⁽⁶⁾).

Par contre, pour la récolte 5, la teneur initiale élevée en ACC libre montre que l'ACCS est déjà activée sur le plant. La concentration en ACC chute ensuite lors de la crise éthylénique et semble suffisante : l'effet rétroactif de l'éthylène, s'il existe dans ce cas, est négligeable et ne compense pas la consommation de l'éthylène. La concentration se stabilise ensuite après la crise.

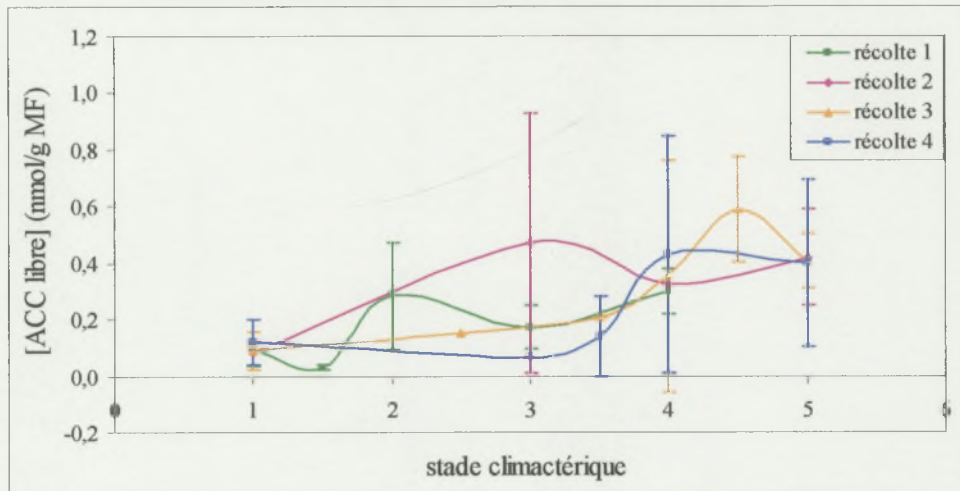
Cette hypothèse semble confirmée par le suivi sur d'autres fruits de la concentration en ACC et de la synthèse d'éthylène (cf. Graphique 27).

Graphique 28 : Evolution de la concentration en ACC libre dans la pulpe de mangue en fonction de son stade climactérique – 100 feuilles/fruit –



Pour les mangues 10 fe/fr, la concentration en ACC libre a un comportement bien plus aléatoire : les écarts-type calculés sont très importants (cf. Graphique 29) et indiqueraient une perturbation de l'activité de l'ACCS et de la synthèse d'éthylène.

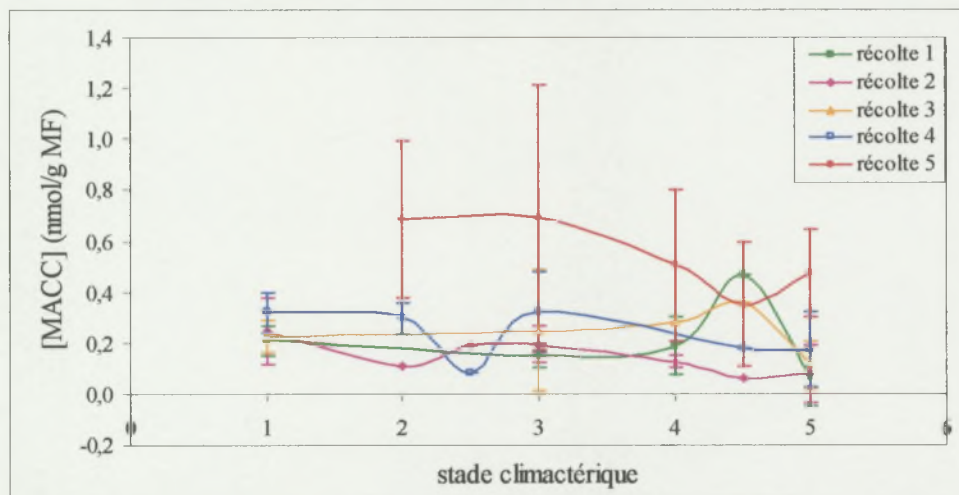
Graphique 29 : Evolution de la concentration en ACC libre dans la pulpe de mangue en fonction de son stade climactérique – 10 feuilles/fruit –



6.3 Evolution de la teneur en MACC

L'évolution de la concentration en MACC est moins marquée (cf. Graphique 30). Elle semble diminuer légèrement dans les mangues des récoltes 2 et 4, elle présente un pic entre les stades climactériques 4-5 pour les récoltes 1 et 3, et elle est très variable pour la récolte 5.

Graphique 30 : Evolution de la concentration en MACC dans la pulpe de mangue en fonction de son stade climactérique – 100 feuilles/fruit –



L'observation d'une diminution de la concentration en MACC pourrait remettre en question l'irréversibilité de la réaction de synthèse du MACC, à moins que cette molécule ne soit catabolisée lors de la sénescence.

Pour les 10 fe/fr, la concentration en MACC varie énormément comme pour l'ACC. Aucune conclusion ne peut alors être tirée des résultats, hormis le fait que les fruits sont stressés et que la voie de biosynthèse de l'éthylène semble perturbée.

Afin de confirmer toutes les hypothèses émises dans ce chapitre sur l'ACC et le MACC, des études complémentaires sur la quantité d'éthylène dégagé et sur l'activité des enzymes entrant dans la synthèse d'éthylène sont nécessaires et sont envisagées.

Rapport-Gratuit.com

DISCUSSION GENERALE SUR L'ETUDE

L'étude menée cette année a porté, en complément des années précédentes, sur la biochimie de la mangue en conditions « naturelles » d'évolution. La physiologie après récolte est en effet directement impliquée dans les problèmes de la conservation des organes végétaux et, avant d'étudier l'impact réel d'une technique de stockage, il est important de définir les relations entre les potentiels de maturation et la qualité finale sans y intégrer des contraintes sur le métabolisme cellulaire.

1 L'INFLUENCE DE LA DISPONIBILITE EN APPORTS CARBONES

La disponibilité en assimilats carbonés est un facteur important agissant sur la variation de croissance de la mangue. L'alimentation carbonée influe sur la croissance morphologique et l'accumulation des composés biochimiques dans la mangue (Robbe⁽²¹⁾). Les résultats obtenus à la récolte confirment ceux de l'an dernier : la teneur des mangues en matière sèche, amidon et sucres est plus grande lorsque les fruits sont issus des traitements à haut ratio feuilles/fruit, et l'acidité de ces fruits est plus faible.

Après la récolte, la différence de concentration en sucres entre les 100 fe/fr et les 10 fe/fr se confirme et même s'intensifie. En outre, le rapport sucres/acides est plus bas dans les mangues issues du traitement 10 fe/fr ce qui témoigne d'une moins bonne qualité organoleptique.

Les résultats relatifs aux concentrations en ACC libre et en MACC indiquent que la voie de biosynthèse de l'éthylène est perturbée dans les mangues à faibles apports carbonés. Leur potentiel de maturation serait alors modifié.

2 LA CRISE CLIMACTERIQUE

Grâce aux changements visibles de l'intensité respiratoire, des teneurs en saccharose, amidon et ACC dans les mangues à fort ratio feuilles/fruit, la crise climactérique peut être datée environ à la 18^{ème} semaine après la floraison. Pour les mangues à faible ratio feuilles/fruit, les changements sont moins nets mais la crise climactérique peut être datée à partir de la 19^{ème} semaine après la floraison. L'entrée en maturation des mangues disposant d'une alimentation carbonée suffisante se produit donc avant celle des mangues disposant d'une faible alimentation carbonée.

Pour le traitement 100 fe/fr, les évolutions en post-récolte des caractéristiques biochimiques des mangues des récoltes 3 et 4 (16^{ème} et 18^{ème} semaine après la floraison) indiquent qu'une récolte à la 17^{ème} semaine après la floraison serait le meilleur compromis entre une bonne aptitude à la conservation des mangues (environ 6 jours de phase préclimactérique en conservation à 20°C) et une qualité de maturation convenable (teneur en sucres et rapport sucres/acides corrects) (cf. Figure 18).

Les mangues de la récolte 5 (19^{ème} semaine après la floraison) sont au stade dit « point jaune ». C'est ce stade qui sert traditionnellement de repère aux producteurs. Dans nos essais, ces fruits ont un comportement atypique qui s'explique par le fait que la crise climactérique est déjà

amorcée sur le plant. Pour ces fruits, une conservation contrôlée est difficilement envisageable, avec un risque élevé de dépréciation de la qualité.

Figure 18 : Evolutions en post-récolte des 100 fe/fr

| | récolte tardive | stade de récolte optimal | | récoltes trop précoces | |
|--------------------------------|-----------------|--------------------------|------------|------------------------|------------|
| Récolte | 5 (19° s.) | 4 (18° s.) | 3 (16° s.) | 2 (15° s.) | 1 (14° s.) |
| Délai moyen avant crise (20°C) | 2 j | 5 j | 7 j | 9 j | 10 j |
| max.[sucres] (mg/g) | 125 | 110 | 90 | 80 | 70 |
| min.[acides] (mg/g) | 5 | 3 | 3 | 2 | 2 |

Pour le traitement 10 fe/fr, l'évolution très aléatoire de la concentration en ACC libre indique une perturbation dans la chaîne de synthèse de l'éthylène, composé primordial pour de nombreuses réactions métaboliques (accélération et auto-régulation des mécanismes de maturation, action ciblée sur la synthèse des arômes et d'autres constituants biochimiques du fruit). Le potentiel de maturation de ces mangues étant perturbé, il est alors difficile de prévoir leur évolution en post-récolte. De même, la notion de stade optimal de récolte n'offre guère d'intérêt.

3 L'EVOLUTION DE L'ACC ET DU MACC

Si les tendances observées pour le MACC et l'ACC à la récolte confirment les résultats obtenus la saison précédente, l'incertitude sur le niveau de stabilisation des échantillons indiquée précédemment oblige à considérer avec précaution l'évolution de ces teneurs en post-récolte. De plus, les teneurs en ACC sont très faibles dans la mangue contrairement à d'autres fruits climactériques (moins de 1 nmol/g contre 1 à 15 nmol/g dans la tomate et 1 à 45 nmol/g dans l'avocat), avec des échantillons hétérogènes, les fruits n'évoluant pas tous à la même vitesse. Des répétitions sur le dosage des teneurs en ACC libre et total sont donc nécessaires, en les combinant aux suivis respectifs des quantités d'éthylène émises par les fruits et des activités des enzymes ACC synthase et ACC oxydase.

4 LES PERSPECTIVES DE RECHERCHE

La qualité d'un produit dépend aussi de son histoire. Outre les facteurs génétiques résultant de la sélection variétale, les conditions climatiques, les caractéristiques du terrain et les pratiques culturales interviennent dans les modalités de la cueillette et dans les conditions de conservation. La position du fruit dans l'arbre conditionne les apports hydrique et carboné et la variabilité intra-arbre peut être plus forte que la variabilité entre arbres. L'incidence de la position du fruit sur la canopée sera donc étudiée et des protocoles sont en cours d'élaboration avec l'équipe d'écophysiologie.

A présent que l'évolution biochimique des mangues en post-récolte dans des conditions ambiantes est connue, l'étude de l'incidence réelle de la conservation sur les fruits peut être engagée. D'autres caractéristiques des mangues évoluent lors de la maturation et seront prises en



compte : c'est le cas par exemple de la fermeté. En effet, le phénomène de maturation des fruits s'accompagne d'une diminution de la cohésion des cellules entre elles (la chair devient fondante) car les composés pectiques de la paroi cellulaire sont dégradés. La maturation est également marquée par des changements de coloration du fruit. Généralement la chlorophylle disparaît et d'autres pigments apparaissent. L'étude qualitative et quantitative de ces pigments (chlorophylles a et b, caroténoïdes, etc.) permettrait de caractériser davantage la qualité organoleptique de la mangue. La mesure de la teneur en vitamines de la pulpe (notamment la vitamine C) qui se rapporte à la valeur nutritionnelle du fruit et son évolution en cours de stockage pourrait aussi venir compléter la caractérisation de la qualité.

Les techniques de conservation peuvent par ailleurs avoir une incidence sur les précurseurs aromatiques. La richesse en arômes des fruits étant un élément important de la qualité organoleptique, il faut donc s'intéresser à la synthèse aromatique dans le couplage « potentiel de maturation-technique de conservation ».

Ces travaux permettront alors d'identifier les meilleures conditions de mise en marché pour garantir une qualité organoleptique finale correcte des mangues.

CONCLUSION

Les résultats concernant l'évolution des mangues au cours de leur développement confirment ceux obtenus l'an passé. La pulpe des mangues s'enrichit en sucres (principalement en saccharose) et son acidité diminue. Les fruits bénéficiant d'une disponibilité supérieure en assimilats carbonés sont plus lourds, moins acides et accumulent plus de saccharose.

L'entrée en maturation des mangues non soumises à un stress (ratio feuilles/fruit équilibré) est caractérisée par de multiples variations métaboliques : une augmentation de l'intensité respiratoire, des concentrations en ACC libre et MACC, une forte augmentation de la concentration en sucres accompagnée d'une diminution de la concentration en amidon ainsi qu'une nette augmentation du pH et une chute brutale de la concentration en acides organiques. Elle se situe à la 18^{ème} semaine après la floraison des manguiers.

En post-récolte, l'acidité des mangues continue de diminuer et la concentration en sucres continue d'augmenter (avant de diminuer lors de la sénescence des mangues). L'évolution biochimique des mangues en conservation diffère selon le stade de maturité à la récolte. D'après notre étude, le stade de récolte présentant le meilleur compromis entre une durée de conservation des mangues acceptable et une qualité de maturation convenable serait aux alentours de la 17^{ème} semaine après la floraison.

Le stade point jaune correspond à des fruits dont la crise climactérique est initiée ou imminente. Si ce stade de récolte peut être acceptable pour une mise en marché immédiate, il ne convient pas pour envisager une technique de stockage sans dégradation de la qualité.

L'évolution des fruits en maturation et en conservation met en évidence l'influence de la fourniture en assimilats sur la qualité des fruits :

- la concentration en sucres est plus basse dans les mangues à faibles apports carbonés,
- le rapport sucres/acides évolue de la même manière selon les traitements mais sa valeur est nettement plus basse dans les 10 fe/fr,
- la synthèse d'ACC est perturbée dans ces fruits.

Nos résultats mettent en évidence l'importance du stade de récolte et des conditions pré-récolte qui, selon le niveau de contrainte exercé, vont définir la qualité et l'évolution du fruit.

L'impact des conditions de stockage et des techniques de conservation et la relation entre cette qualité initiale et la qualité finale peuvent maintenant être étudiés et constitueront le prochain volet de ce programme.

BIBLIOGRAPHIE

1. **Fréhaut G.** *Caractérisation biochimique de la mangue en fonction de son stade de maturité.* Rapport de stage, Génie Biologique, Université de Technologie de Compiègne, 2001, 49 p.
2. **Gardner W.H.** *Food acidulants.* New York : Allied Chem. Corp., 1966.
3. **Hartmann C.** *La sénescence des végétaux.* Paris : Hermann - éditeurs des sciences et des arts, 1992, 159 p.
4. **Heller R.** *Physiologie végétale tome 1 : nutrition.* 5^e éd. Paris : Masson, 1993, 294 p.
5. **Heller R.** *Physiologie végétale tome 2: développement.* 4^e éd. Paris: Masson, 1993, 266 p.
6. **Hoffman N.E. et Yang S.F.** Changes of 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid content in ripening fruits in relation to their ethylene production rates. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 1980, 105, p. 492-495.
7. **Kalra S.K. et Tandon D.K.** Ripening behaviour of « Dashehari » mango in relation to harvest period. *Scientia Horticulturae*, 1983, p. 263-269.
8. **Krishnamurthy S. et Subramanyam H.** Respiratory climacteric and chemical changes in the mango fruit *Mangifera indica* L. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 1970, 95, p. 333-337.
9. **Lakshminarayana S.** Mango. *In* Nagy S. et Shaw P.E. *Tropical and subtropical fruits.* The avi publishing company inc., 1980, p. 184-257.
10. **Lakshminarayana S., Subbiah Shetty M. et Subramanyam H.** Some aspects of developmental physiology of mango fruit. *Journal of Horticultural Science*, 1970, 45, p.133-142.
11. **Latché A., Ayub R., Martinez G., Guis M., Ben Amor M., Rombaldi C., Pech J.C. et Bouzayen M.** Biosynthèse et mode d'action de l'hormone végétale éthylène. *Fruits.* Paris : Elsevier, 1995, 50, p. 379-396.
12. **Lechaudel M.** *Croissance et qualité organoleptique du fruit chez le manguier : analyse expérimentale et modélisation de la disponibilité carbonée et hydrique.* Projet de thèse CIRAD-INRA, 2001.
13. **Leley V.K., Narayana N. et Daji J.A.** Biochemical studies in the growth and ripening of the « Alphonse » mango. *The indian journal of agricultural science*, 1942, p. 291-299.

14. **Lelièvre J.M., Latché A., Jones B., Bouzayen M. et Pech J.C.** Ethylene and fruit ripening. *Physiologia Plantarum*, 1997, 101, p. 727-739.
15. **Lizada M.C.C. et Yang S.F.** A simple and sensitive assay for 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid. *Analytical biochemistry*, 1979, 100, p. 140-145.
16. **Loeillet D., Imbert E. et Braz J.** Le marché international de la mangue. *In Réunion annuelle 2001 CIRAD-FHLOR*, document interne, 2001.
17. **Medlicott Andrew P. et Thompson Anthony K.** Analysis of sugars and organic acids in ripening mango fruits (*Mangifera indica* L. var Keitt) by high performance liquid chromatography. *J. Sci. Food. Food Agric.*, 1985, 36, p. 561-566.
18. **Mendoza Jr D.B. et Wills R.B.H.** Mango : Fruit development, Postharvest Physiology and Marketing in ASEAN. *Asean Food Handling Bureau*, 1984, 73 p.
19. **Mitra S.K. et Baldwin E.A.** Mango. *In Mitra S.K. Postharvest physiology and storage of tropical and subtropical fruits*. Oxon : CAB International, 1997, p. 85-122.
20. **Mukerjee P.K.** Biochemical and physiological studies during development of mango fruit. *Horticultural Research Institute*, 1959, p. 95-101.
21. **Robbe, D.** Incidence des contraintes culturales sur le développement et le potentiel de maturation de la mangue (*Mangifera indica* L. Lirfa). Rapport de stage, Génie Biologique, Université de Technologie de Compiègne, 2002, 64 p.
22. **Rothan C. et Nicolas J.** Changes of 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid and of its conjugate during tomato fruit ripening. *Plant Physiol. Biochem.*, 1988, 26, p. 661-664.
23. **Sarker S.C. et Muhsi A.A.A.** A study on the content and interconversion of organic acids of mango (*Mangifera indica*) at various stages of fruit development. *Bangladesh J. Agril. Sci.*, 1981, 8, p. 69-75.
24. **Selvaraj Y., Rajiv Kumar et Pal D.K.** Changes in sugars, organic acids, amino acids, lipid constituents and aroma characteristics of ripening mango (*Mangifera indica* L) fruit. *J. Fd. Sci. Technol.*, 1989, 26, p. 308-313.
25. **Shang F.Y.** Biosynthesis and action of ethylene. *HortScience*, 1985, 20, p. 41-45.
26. **Simmons S.L., Hofman P.J., Whiley A.W. et Hetherington S.** Effect of leaf:fruit ratios on fruit growth, mineral concentration and quality of mango (*Mangifera indica* L). *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 1998, 3, p. 367-374.
27. **Souty M., Génard M., Reich M. et Albagnac G.** Influence de la fourniture en assimilats sur la maturation et la qualité de la pêche. *Canadian Journal of Plant Science*, 1999, 79, p. 259-268.

28. **SUAD Fruits.** *Dossier technico-économique : La mangue.* Chambre d'Agriculture de la Réunion, 2002, 32 p.
29. **Subramanyam H., Krishnamurthy S. et Parpia H.A.B.** Physiology and biochemistry of mango fruit. *Advances in Food Research*, 1975, p. 223-305.
30. **Trisonthi C.** Description et clé d'identification de quelques fruits tropicaux comestibles. *Fruits*, 1992, vol. 47, p. 331-347.
31. http://www.servicevie.com/01Alimentation/AlimentVedette/AVf_HTML/HTML_500D/585H.html
32. <http://www-peda.ac-martinique.fr/svt/bana13.shtml>

RECAPITULATIF DES FIGURES ET GRAPHIQUES

| | |
|--|-------|
| <u>Figure 1</u> : Implantation du CIRAD à La Réunion..... | 3 |
| <u>Figure 2</u> : Elaboration et préservation de la qualité..... | 5 |
| <u>Figure 3</u> : Manguier, fleurs et fruits du manguier..... | 8 |
| <u>Figure 4</u> : Morphologie structurale de la mangue..... | 9 |
| <u>Figure 5</u> : Lirfa « point jaune »..... | 9 |
| <u>Figure 6</u> : Valeurs nutritionnelles de la pulpe de mangue indienne mûre..... | 10 |
| <u>Figure 7</u> : Cycle phénologique théorique de la mangue..... | 11 |
| <u>Figure 8</u> : Biosynthèse des glucides dans les végétaux..... | 12 |
| <u>Figure 9</u> : Schéma de la respiration des végétaux..... | 15 |
| <u>Figure 10</u> : Biosynthèse de l'éthylène..... | 16 |
| <u>Figure 11</u> : Actions et rétro-contrôles de l'éthylène..... | 17 |
| <u>Figure 12</u> : Schéma explicatif de la décortication annulaire..... | 18 |
| <u>Figure 13</u> : Schéma d'un appareil de CPG avec un détecteur à ionisation de flamme..... | 20 |
| <u>Figure 14</u> : Schéma d'un appareil HPLC..... | 23 |
| <u>Figure 15</u> : Exemple de chromatogramme obtenu pour un échantillon de pulpe (sucres)..... | 25 |
| <u>Figure 16</u> : Exemple de chromatogramme obtenu pour un échantillon de pulpe (acides organiques)..... | 28 |
| <u>Figure 17</u> : Evolution du pH de la pulpe de mangue en fonction de son stade de maturité..... | 48 |
| <u>Figure 18</u> : Evolutions en post-récolte des 100 fe/fr..... | 56 |
| | |
| <u>Graphique 1</u> : Croissance en poids frais des mangues..... | 33 |
| <u>Graphique 2</u> : Evolution de la matière sèche des mangues..... | 34 |
| <u>Graphique 3</u> : Evolution de l'ESS de la pulpe de mangue..... | 34 |
| <u>Graphique 4</u> : Evolution des concentrations en sucres majeurs dans la pulpe de mangue (100 fe/fr)..... | 35 |
| <u>Graphique 5</u> : Evolution des concentrations de glucose, fructose, saccharose et sucres totaux dans la pulpe de mangue..... | 36 |
| <u>Graphique 6</u> : Evolution de la concentration d'amidon dans la pulpe de mangue..... | 37 |
| <u>Graphique 7</u> : Evolution des concentrations de sucres et d'amidon dans la pulpe de mangue..... | 37 |
| <u>Graphique 8</u> : Evolution du pH de la pulpe de mangue..... | 38 |
| <u>Graphique 9</u> : Evolution de l'acidité titrable dans la pulpe de mangue..... | 38 |
| <u>Graphique 10</u> : Evolution de l'acidité et du pH de la pulpe de mangue..... | 39 |
| <u>Graphique 11</u> : Evolution des concentrations en acides organiques dans la pulpe de mangue..... | 40 |
| <u>Graphique 12</u> : Evolution de la concentration de potassium dans la pulpe de mangue..... | 41 |
| <u>Graphique 13</u> : Evolution des concentrations d'ammoniac, de calcium, de sodium et de magnésium dans la pulpe de mangue..... | 41-42 |
| <u>Graphique 14</u> : Evolution du dégagement de CO ₂ par la mangue..... | 42 |
| <u>Graphique 15</u> : Evolution des concentrations en ACC libre et en MACC dans la pulpe de mangue..... | 43 |
| <u>Graphique 16</u> : Allures de l'intensité respiratoire à partir de mangues observées en post-récolte (100 fe/fr – récolte 5)..... | 44 |

| | |
|---|----|
| <u>Graphique 17</u> : Evolution de l'intensité respiratoire et de la production d'éthylène en post-récolte (100 fe/fr – récolte 5)..... | 45 |
| <u>Graphique 18</u> : Evolution de l'extrait sec soluble de la pulpe de mangue en fonction de son stade de maturité (100 fe/fr)..... | 46 |
| <u>Graphique 19</u> : Evolution de la concentration de sucres dans la pulpe de mangue en fonction de son stade de maturité (100 fe/fr)..... | 46 |
| <u>Graphique 20</u> : Evolution de la concentration en sucres dans la pulpe de mangue en fonction de son stade de maturité..... | 47 |
| <u>Graphique 21</u> : Evolution de la concentration d'amidon dans la pulpe de mangue en fonction de son stade de maturité (100 fe/fr)..... | 47 |
| <u>Graphique 22</u> : Evolution du pH de la pulpe de mangue en fonction de son stade de maturité (100 fe/fr)..... | 48 |
| <u>Graphique 23</u> : Evolution de l'acidité titrable dans la pulpe de mangue en fonction de son stade de maturité (100 fe/fr)..... | 49 |
| <u>Graphique 24</u> : Evolution de la concentration en acides organiques dans la pulpe de mangue en fonction de son stade de maturité (100 fe/fr)..... | 49 |
| <u>Graphique 25</u> : Evolution de la concentration en acides organiques dans la pulpe de mangue en fonction de son stade de maturité..... | 50 |
| <u>Graphique 26</u> : Evolution du rapport sucres/acides dans la pulpe de mangue en fonction de son stade de maturité (100 fe/fr)..... | 50 |
| <u>Graphique 27</u> : Evolution des concentrations en sucres, ACC libre et éthylène dans des mangues de stade avancé en fonction du niveau de maturation (100 fe/fr)..... | 51 |
| <u>Graphique 28</u> : Evolution de la concentration en ACC libre dans la pulpe de mangue en fonction de son stade climactérique (100 fe/fr)..... | 52 |
| <u>Graphique 29</u> : Evolution de la concentration en ACC libre dans la pulpe de mangue en fonction de son stade climactérique (10 fe/fr)..... | 53 |
| <u>Graphique 30</u> : Evolution de la concentration en MACC dans la pulpe de mangue en fonction de son stade climactérique (100 fe/fr)..... | 53 |

ANNEXES

Annexe 1 : Les 10 premiers producteurs mondiaux de mangue

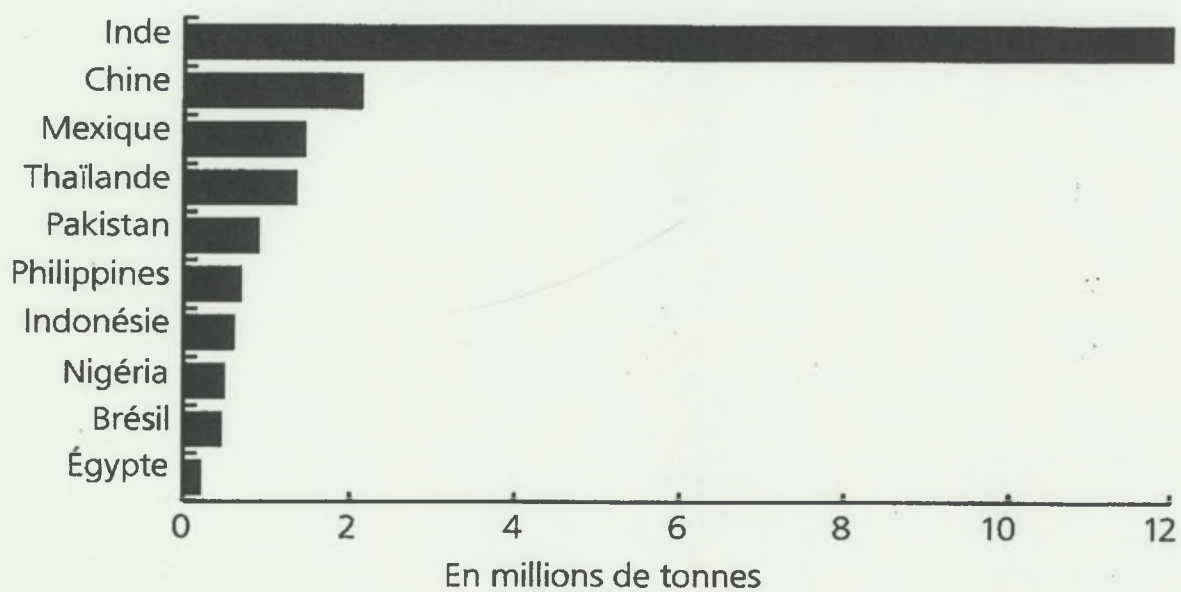
Annexe 2 : Répartition des surfaces cultivées en manguiers à La Réunion

Annexe 3 : Fixation du CO₂ dans la photosynthèse et Cycle de Calvin

Annexe 4 : Cycle de Krebs

Annexe 5 : Cycle de la méthionine en relation avec la biosynthèse de l'éthylène

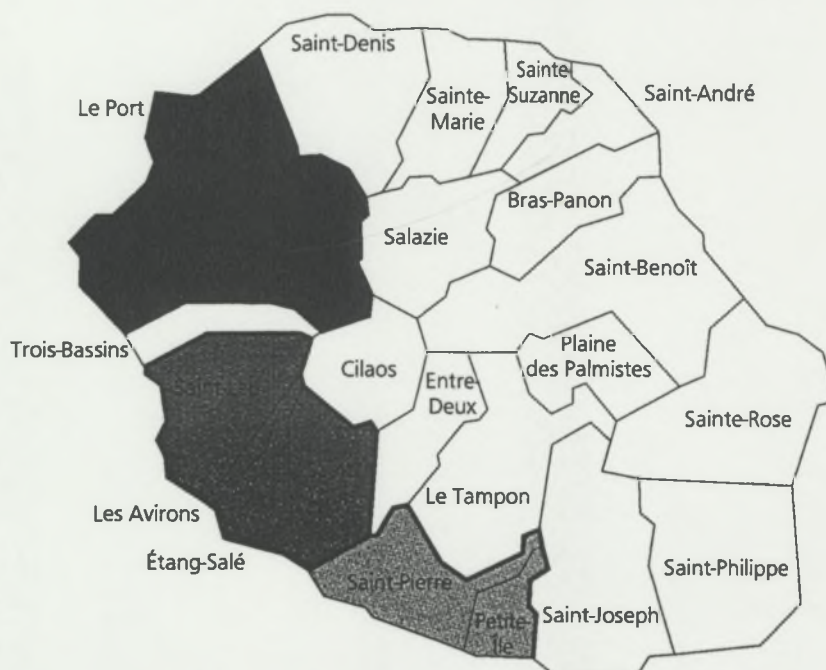
Annexe 1 : Les 10 premiers producteurs mondiaux de mangue (source FAO, 1998)



Annexe 2 : Répartition des surfaces cultivées en manguiers à La Réunion

Répartition des surfaces cultivées en manguiers à la Réunion

(Surfaces selon Agreste 2000 ; répartition géographique d'après la Chambre d'Agriculture de la Réunion, 1999)

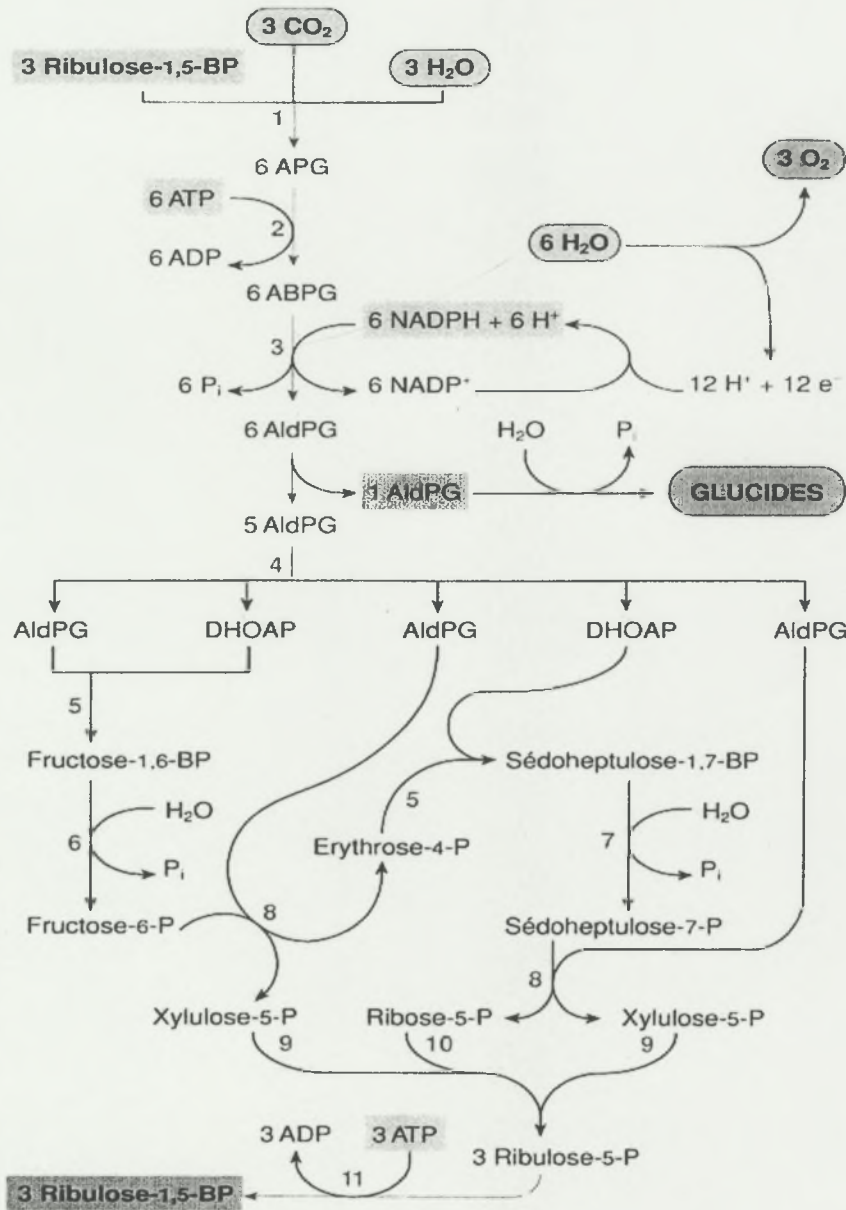


Ouest : 180 ha (Possession - St-Gilles) ■
Altitude favorable : 0 à 400 m

Ouest : 108 ha (St-Leu - St-Louis) ■
Altitude favorable : 0 à 400 m

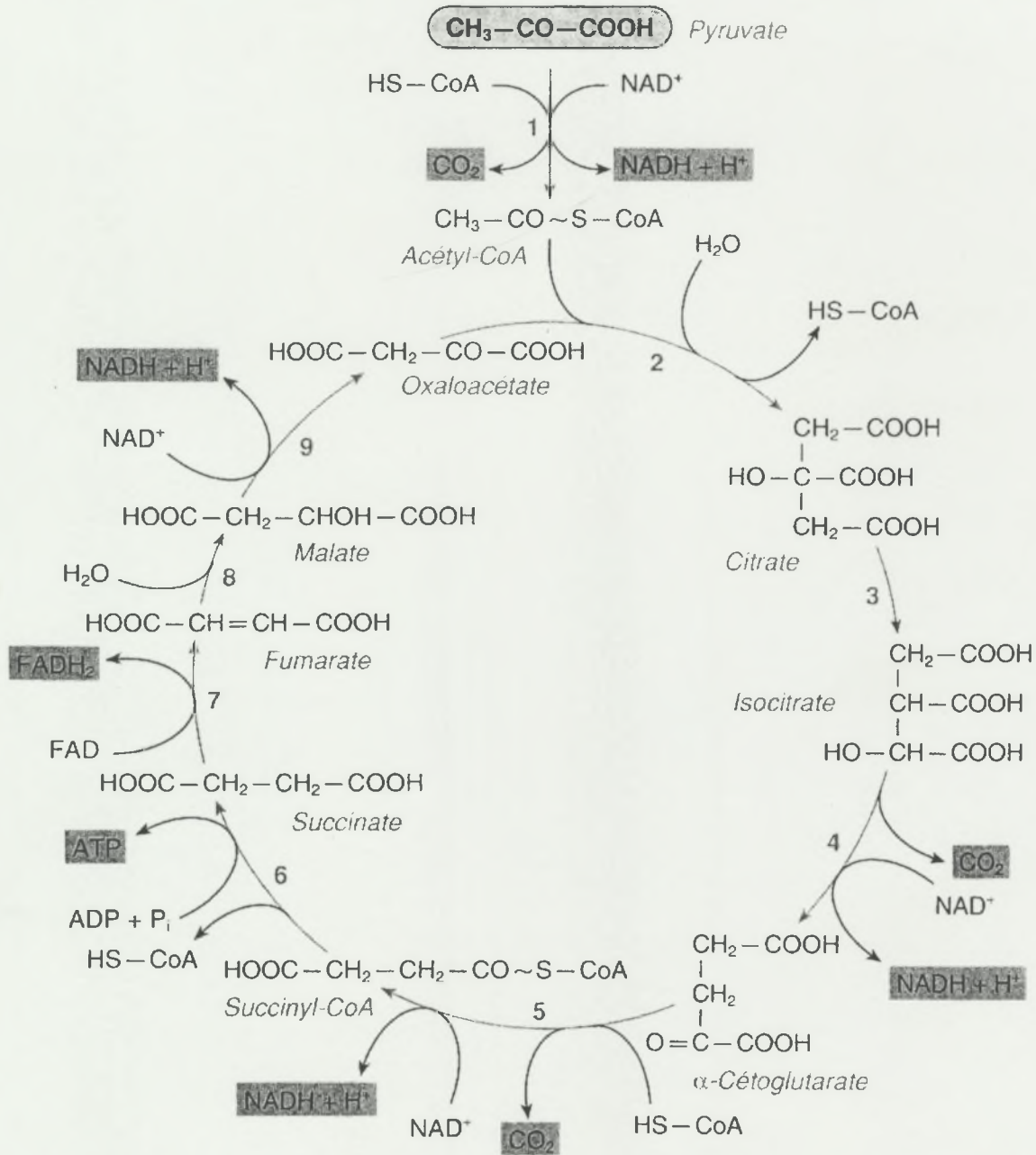
Sud : 73 ha (St-Pierre - Petite-Île) ■
Altitude favorable : 0 à 200 m

Annexe 3 : Fixation du CO₂ dans la photosynthèse et cycle de Calvin



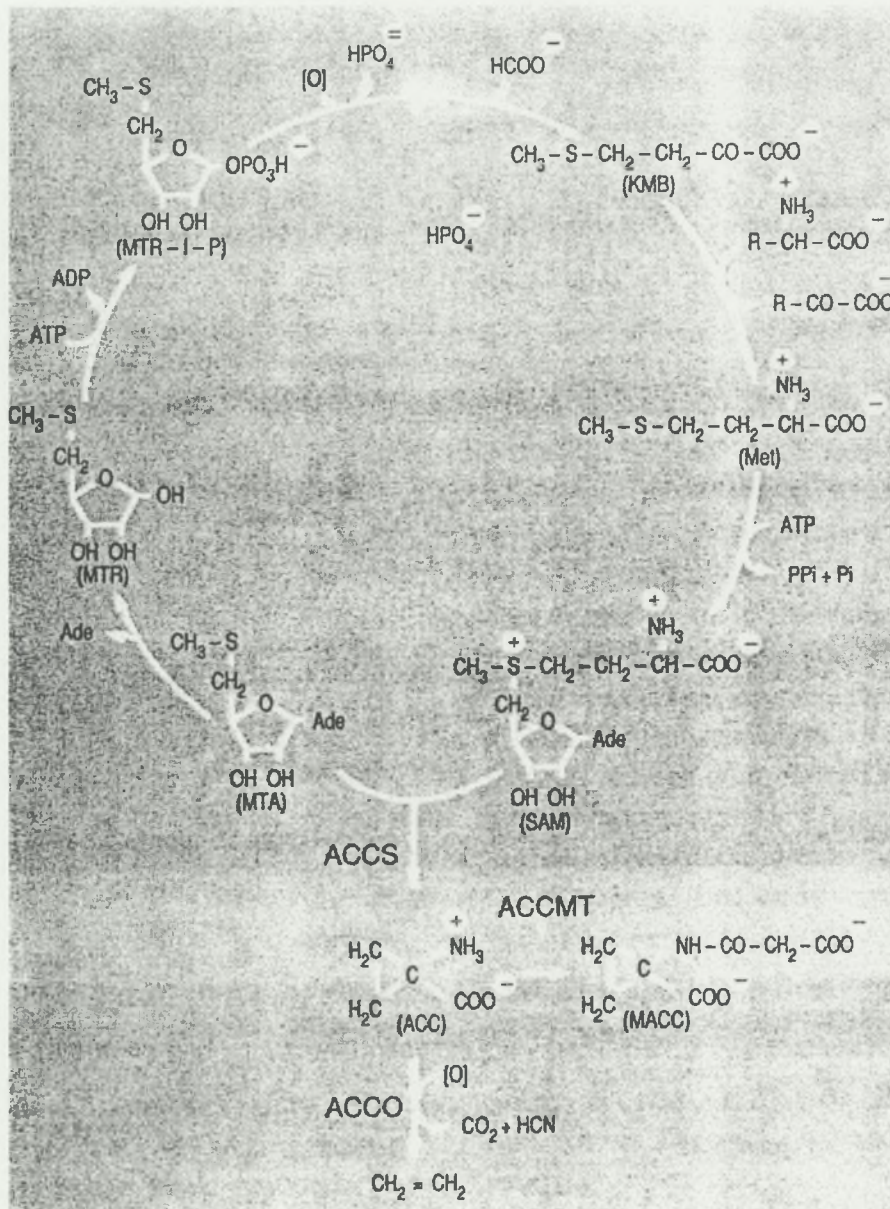
Enzymes responsables : 1 = ribulose bisphosphate carboxylase/oxygénase (Rubisco), 2 = phosphoglycérate kinase, 3 = glycéraldéhyde phosphate déshydrogénase, 4 = triose-phosphate isomérase, 5 = transaldolase, 6 = fructose-1,6-bisphosphatase, 7 = sédoheptulose-1,7-bisphosphatase, 8 = transcétolase, 9 = épimérase, 10 = isomérase, 11 = ribulose-5-phosphate kinase.

Annexe 4 : Cycle de Krebs



- Le cycle de Krebs. Enzymes responsables : 1, pyruvate déshydrogénase (complexe enzymatique) ; 2, citrate synthase ; 3, aconitase ; 4, isocitrate déshydrogénase ; 5, α -cétoglutarate déshydrogénase (complexe enzymatique) ; 6, succinyl-CoA synthétase ; 7, succinate déshydrogénase ; 8, fumarase ; 9, malate déshydrogénase. Deux intermédiaires réactionnels (*cis*-aconitate, oxalosuccinate) n'ont pas été représentés.

Annexe 5 : Cycle de la méthionine en relation avec la biosynthèse de l'éthylène
(d'après Miyazaki et Yang, 1987, modifié)



ACC : acide 1-aminocyclopropane-1-carboxylique, Ade : adénine, KMB : acide 2-keto-4-méthylthiobutyrique, Met : méthionine, MTA : 5'-méthylthioadénosine, MTR : 5-méthylthioribose, MTR-1-P : 5-méthylthioribose-1-phosphate, SAM : S-adénosylméthionine, ACCS : ACC synthétase, ACCO : ACC oxydase, ACCMT : ACC malonyltransférase.



REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier **Jacques Joas** de m'avoir permis de réaliser mon projet de fin d'étude au sein de son département et de m'avoir apporté de précieux conseils scientifiques.

Je souhaite remercier tout particulièrement **Yanis Caro** pour sa collaboration scientifique, technique et méthodologique, mais aussi pour sa bonne humeur et sa disponibilité.

Je remercie aussi **Antoine Collignan**, responsable du Pôle Agroalimentaire, pour son accueil et sa gentillesse.

J'adresse également mes remerciements à l'ensemble du personnel du CIRAD, que ce soit le personnel installé à la Maison Régionale des Sciences et de la Technologie ou celui de la station La Bretagne, pour ses conseils et son aide tout au long de mon stage, et plus particulièrement **Isabelle Torinière** pour sa contribution efficace et sa patience, **Elodie Arnaud** pour son enthousiasme ainsi que **Patrick Légier**, **Jocelyn Idmond** et **Jean-Dolin Mouny-Latchimy** pour leur accueil et leur appui scientifique au laboratoire des sols.

Merci aussi à **M. Briantais**, directeur de la DGCCRF, ainsi qu'à tout son personnel, notamment **Alexin Pajanaye** qui m'a beaucoup appris sur l'HPLC mais aussi sur la culture créole.

Un grand merci aux stagiaires **Sylvain Deswarte**, **Romain Ioos** et **Carole Leverrier** pour leur soutien et leur amitié au travail comme à la case.

Merci également à tous ceux que j'ai rencontrés et qui ont rendu mon séjour à La Réunion fort agréable.

Enfin, merci à **Rougaille** et **Mafate** pour leur miaulements quotidiens.

Auteur : Amélie DELROISE

Titre : Caractérisation de la qualité et étude du potentiel de maturation de la mangue (*Mangifera indica* L. Lirfa) en fonction de son stade de récolte

Institution : CIRAD FLHOR – Pôle Agroalimentaire

Lieu : Ile de La Réunion – Maison Régionale des Sciences et de la Technologie

Période : mars à août 2003

Encadrant : Jacques JOAS

RESUME TECHNIQUE

La culture de la mangue est en plein essor à La Réunion et la maîtrise de la qualité du fruit et de sa maturation représente un enjeu majeur pour les marchés locaux et l'exportation. Différentes mesures biochimiques ainsi que des mesures spécifiques du métabolisme de maturation sont réalisées afin de déterminer la qualité initiale de la mangue à la récolte ainsi que son évolution en cours de conservation. Les mesures effectuées sont : pH, acidité, dosage des sucres, de l'amidon, des acides organiques, de l'acide aminocyclopropane-carboxylique (ACC), mesure de l'intensité respiratoire, etc. Le schéma expérimental est le suivant : échantillons à charge en fruit forte (10 feuilles/fruit) et à charge en fruit faible (100 feuilles/fruit) pour 5 stades de récolte et 5 stades de maturité.

La caractérisation biochimique initiale de la mangue aux différents stades de récolte confirme les résultats obtenus les saisons précédentes.

L'évolution de la teneur en ACC est modifiée dans les 10 feuilles/fruit, leur potentiel de maturation est altéré.

L'évolution des fruits en conservation dépend du stade de récolte. Pour le stade 5 de récolte, habituellement pratiqué par les producteurs, la crise climactérique est déjà amorcée ce qui ne permet pas d'envisager une conservation contrôlée aisée. Une récolte aux alentours de la 17^{ème} semaine après la floraison des manguiers serait le meilleur compromis entre une durée de conservation convenable et une qualité de maturation correcte des mangues.

Mots clés : mangue, *Mangifera indica* L., fruit climactérique, qualité, charge en fruit, stade de récolte, composition biochimique, respiration, ACC (acide aminocyclopropane carboxylique), éthylène, potentiel de maturation, conservation.