



HAL
open science

Effet de l'ensoleillement en pré récolte sur l'acquisition d'une thermotolérance des mangues (*Mangifera indica* L.): impact sur leur réponse physiologique aux traitements à la chaleur en après récolte

Valérie Kagy

► To cite this version:

Valérie Kagy. Effet de l'ensoleillement en pré récolte sur l'acquisition d'une thermotolérance des mangues (*Mangifera indica* L.): impact sur leur réponse physiologique aux traitements à la chaleur en après récolte. Agronomie. Université de la Nouvelle-Calédonie, 2010. Français. NNT : 2010NCAL0028 . tel-02975888

HAL Id: tel-02975888

<https://unc.hal.science/tel-02975888>

Submitted on 23 Oct 2020

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

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



Université de la Nouvelle-Calédonie
Ecole Doctorale du Pacifique ED 469

THÈSE

présentée par

Valérie KAGY

Pour obtenir le grade de

Docteur en Sciences de l'Université de la Nouvelle-Calédonie

Spécialité : Agronomie et Biologie

**Effet de l'ensoleillement en pré récolte sur l'acquisition d'une
thermotolérance des mangues (*Mangifera indica* L.). Impact sur
leur réponse physiologique aux traitements à la chaleur
en après récolte**

Soutenue le 19 février 2010 devant le jury composé de :

C. CHERVIN,	Professeur , ENSAT Toulouse	Rapporteur
C. DELEU,	Maître de Conférence, HDR, INRA/Université de Rennes 1	Rapporteur
F. MADEMBA-SY	Directeur du Développement Rural de la Province Sud	Examineur
L. LHUILLIER	Directeur Adjoint de l'IAC	Examineur
H. AMIR	Professeur, Université de la Nouvelle-Calédonie	Co-directeur de thèse
A. WOOLF	Science Leader, Plant and Food Research Institute Nouvelle-Zélande	Co-directeur de thèse

REMERCIEMENTS

Je remercie MM. Paul Néaoutyne, Président, et Thierry Mennesson, Directeur Général, de l'Institut Agronomique néo Calédonien, pour les moyens mis à ma disposition pour la réalisation de cette étude.

Je remercie Mme. Carole Deleu, maître de conférence HDR et M. le professeur Christian Chervin de m'avoir fait l'honneur d'accepter la lourde tâche de rapporteur et d'avoir évalué mon travail. Je tiens également à remercier MM. François Mademba-Sy, Laurent Lhuillier de leur participation au jury.

Je voudrais exprimer ma sincère gratitude à M. Allan Woolf et MM. les professeurs René Pineau et Hamid Amir pour l'encadrement de ces travaux de recherche, pour leurs conseils avisés au cours de ces années d'étude, malgré parfois les difficultés de l'éloignement et de la langue. Une attention toute particulière à Allan qui, n'a jamais cessé de m'encourager par sa bonne humeur et son énergie durant toutes ces années.

Un grand merci à Richard Gallois, responsable de l'axe 1 : Connaissance et Amélioration des Agrosystèmes à l'Institut Agronomique néo Calédonien, pour son soutien scientifique et sa disponibilité tout au long de mon long travail de rédaction.

Je remercie les enseignants-chercheurs et techniciens de l'Université de Nouvelle-Calédonie : Valérie Sarramegna, Yvon Cavaloc, Morgan Mangeas et Saliou Bouraïma pour leurs conseils judicieux qui m'ont toujours été d'une grande utilité ainsi que Valérie Medevielle et Alain Videault pour le prêt de matériel de laboratoire et leurs compétences techniques. Je n'oublierais pas non plus mes amies et collègues Atika Amir pour la relecture de mon document et Sylvia Cornu-Mercky de l'Association Interprovinciale de gestion des Centres Agricoles pour ses précieuses recommandations lors de la préparation de la soutenance orale. Merci pour le temps accordé et la disponibilité.

Ma profonde gratitude s'adresse à mes fidèles collègues : François Mademba-Sy pour m'avoir enseigné la rigueur, le courage et la persévérance dans mon parcours professionnel ainsi que Zacharie Lemerre Desprez, Stéphane Lebégin et Christian Mille pour leur indéfectible soutien pendant les moments difficiles. Je dois aussi beaucoup à la compétence, à la bonne volonté, à la disponibilité et à la gentillesse du personnel de la Station de Recherche Agronomique de

Pocquereux pour leur collaboration et leur sympathie. Sans eux et leur travail quotidien sur la station de recherche, ces travaux n'auraient pas pu exister. Ils se rappelleront longtemps notamment de cette interminable nuit de récoltes, de traitements et de prélèvements d'échantillons de mangues. Je remercie tout particulièrement mon équipe : Danyèla Salmon, Marcelle Bouteiller, Irma Murcia et Solange Némébreux pour le travail d'expérimentation, de laboratoire et la mise en forme du document. Merci aussi à Juliana Munanoa pour les batailles menées avec la photocopieuse et à Marie Bernadette Herlin pour l'organisation administrative et financière. Je dois également mentionner tous les stagiaires de passage, Fabien Van Beneden, Solen Rocher, Cecilia Chevalier pour leur aide précieuse et Frédéric de Almeida et Hélène Duret pour la tâche difficile de la mise en route des analyses protéomiques au laboratoire de physiologie de la Station de Recherche Agronomique de Pocquereux.

Dans le cadre des collaborations développées, je remercie les techniciens et les chercheurs du New Zealand Institute for Plant and Food Research Limited : Barbara Waddell, Ian Ferguson, Di Barraglough, Judith Bowen, Richard Jackman, Cecilia Requejo-Jackman, Shane Olsson, Anne White, Grand Thorp, Chris Clark, Bruce Freeth, pour leur précieuse collaboration à ce travail ainsi que Mme. le professeur Elisabeth Vierling de University of Arizona pour le don d'anticorps et de l'ADNc de la protéine recombinante sans lesquels nous n'aurions pas pu réaliser les analyses sur les protéines. Je voudrais aussi exprimer ma profonde gratitude à MM. les professeurs François Robert Larher et Alain Bouchereau et aux enseignants-chercheurs de leur équipe à l'Institut National de Recherche Agronomique/ Université de Rennes 1 pour leur accueil chaleureux dans leurs laboratoires et les conseils dispensés tout au long de ces années de recherche.

Mes remerciements s'adressent également à mes amis pour m'avoir entourée affectivement et avoir su me pardonner de mon indisponibilité de ces dernières années avec une pensée particulière à Timango qui m'a donné la force de continuer dans les moments difficiles.

Enfin je voudrais dédier ce présent travail à mes enfants Kim-Lou, Arthur et Sam, à mes parents et à Sandro, et leur exprimer tout mon amour et toute ma reconnaissance pour avoir enduré avec patience cette longue période durant laquelle j'ai été « absente », et de m'avoir soutenue si affectueusement.

SIGLES ET ABREVIATIONS

A	Absorbance
ABTS	Acide 2,2'-azinobis-3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonique
ACC	Acide carboxylique 1-aminocyclopropane
ADNc	Acide désoxyribonucléique complémentaire
AOAC	Association of Official Agricultural Chemists
APS	Persulfate d'ammonium
ARBOFRUITS	Association des Producteurs de Fruits de la Nouvelle Calédonie
ARNm	Acide ribonucléique messenger
ATP	Adénosine triphosphate
BSA	Sérum d'albumine bovine
cv.	Cultivar
DAVAR	Direction des Affaires Vétérinaires Alimentaire et Rurales
DF	Facteur de dilution
DTT	Dithiothreitol
EDTA	Sel disodique de l'acide éthylènediaminetétraacétique
ESS	Extraits Secs Solubles
FAA	Alcool formolé acétique
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
GABA	Acide 4-amino-butérique
GAE	Equivalent acide gallique
GAS	Système général d'adaptation
GC	Chromatographie en phase gazeuse
GLM	Modèle général linéaire
HA	Traitement à l'air chaud
HPLC	Chromatographie à phase liquide à haute performance
HRP	Horseradish peroxydase
HSE	Elément de choc thermique

HSF	Facteur de choc thermique
HSP(s)	Protéine (s) de choc thermique
HTFA	Traitement à la chaleur humide et pulsée
HWT	Traitement en immersion dans de l'eau chaude
I	Indice général de dégâts externes
IAC	Institut Agronomique néo Calédonien
IBPGR	International Board for Plant Genetic Resources
If	Intensité des dégâts sur le fond
IR	Radiations infrarouges
It	Intensité des dégâts sur la tache
smHSP(s)	Protéine(s) de choc thermique de faible poids moléculaire
MA	Absorptivité molaire
MF	Matière fraîche
MS	Matière sèche
-MS	Spectrométrie de masse
Mt	Millions de tonnes
MW	Poids moléculaire
PAGE	Electrophorèse de protéines sur gel d'acrylamide
PBST	Perborate de sodium tetrahydrate
PMSF	Phenyl méthane sulfonyle fluoride
PVC	Polychlorure de vinyl
PVDF	Polyfluorure de vinylidène
PVP10	Polyvinylpyrrolidone
PVPP	Polyvinylpolypyrrolidone
Q-PCR	Reaction de polymérase en chaine quantitative
RGA	Recensement Général Agricole
ROS	Radicaux libres ou 'reactive oxygen species'
SA	Acide salicylique
SRA de Pocquereux	Station de Recherche Agronomique de Pocquereux

SAM	S-adenosylméthionine
SDS	Sodium docecyl sulfate
TAT	Anthocyanes totaux
TEAC	Activité antioxydante totale
TGS	Tris glycine sodium docecyl sulfate
TPP	Polyphénols totaux
TRIS	2-amino-2-hydroxyméthyl-1,3-propanediol
UE	Union Européenne
UPLC	Chromatographie en phase liquide ultra performante
USA	United States
USD	United States Dollar
UV	Radiations ultraviolets
v	Volume
VHT	Traitement à la vapeur d'eau chaude
w	Masse

SOMMAIRE GENERAL

INTRODUCTION.....	1
CONTEXTE BIBLIOGRAPHIQUE.....	4
1. La mangue dans le Monde et en Nouvelle Calédonie.....	4
1.1. Présentation générale du manguiier (<i>Mangifera indica</i> L.)	4
1.1.1. Description botanique	4
1.1.2. Origine botanique, dispersion du manguiier et cultivars.....	5
1.1.3. Conditions écologiques et zones de culture du manguiier	6
1.2. Données économiques.....	7
1.2.1. Le marché mondial de la mangue	7
1.2.2. La mangue en Nouvelle Calédonie.....	9
2. La physiologie de la mangue	11
2.1. La maturation et le mûrissement de la mangue.....	12
2.1.1. Activité enzymatique.....	12
2.1.2. Les teneurs en acides organiques.....	15
2.1.3. Les teneurs en éléments minéraux.....	16
2.1.4. Les teneurs en pigments, antioxydants et protéines	16
2.2. Détermination du stade de maturité et du point de coupe de la mangue.....	18
3. Les traitements thermiques après récolte et la réponse physiologique des mangues	20
3.1. La conservation à basse température.....	20
3.2. La désinsectisation des mangues.....	22
3.2.1. Le traitement à la vapeur d'eau chaude (VHT)	22
3.2.2. Le traitement à l'air chaud pulsé (HTFA)	23
3.2.3. Le traitement en immersion dans de l'eau chaude (HWT).....	23
3.2.4. Réponse physiologique des mangues aux traitements à la chaleur	25
3.3. Les conditionnements thermiques.....	33
3.4. Influence des facteurs pré récolte sur le comportement des fruits en après récolte....	34

1.3. Analyses histologiques	66
1.3.1. <i>Découpe et fixation des tissus</i>	67
1.3.2. <i>Déshydratation et inclusion dans la paraffine</i>	67
1.3.3. <i>Préparation des lames d'observation</i>	67
1.3.4. <i>Observation et analyses</i>	68
1.4. Caractérisation des protéines de choc thermique	69
1.4.1. <i>Extraction et dosage des protéines totales</i>	70
1.4.2. <i>Séparation des protéines sur gel de polyacrylamide SDS-PAGE</i>	71
1.4.3. <i>Western Blots et immunodétection</i>	72
1.4.4. <i>Révélation par chimioluminescence</i>	72
1.5. Mesure de l'activité antioxydante, des polyphénols, des caroténoïdes et des anthocyanes totaux.....	73
1.5.1. <i>Extractions d'échantillons.....</i>	73
1.5.2. <i>Mesure de l'activité antioxydante totale par la méthode TEAC</i>	74
1.5.3. <i>Mesure des polyphénols totaux</i>	75
1.5.4. <i>Mesure des anthocyanes totaux.....</i>	75
1.5.5. <i>Mesures des caroténoïdes totaux</i>	76
1.6. Analyse statistique.....	76

CHAPITRE 2 : L'ENSOLEILLEMENT ET LES TEMPERATURES INTERNES

DES MANGUES.....	77
2.1. Effet de l'ensoleillement sur la température interne des mangues.....	78
2.1.1. <i>Effet de l'exposition.....</i>	78
2.1.2. <i>Gradient de température interne en fonction de l'exposition</i>	79
2.1.3. <i>Effet d'un filtre anti UV</i>	80
2.2. Effet des caractéristiques de la mangue sur la température interne.....	81
2.2.1. <i>Effet de la taille du fruit</i>	81
2.2.2. <i>Effet de la couleur de la mangue.....</i>	82
2.3. Discussion.....	84

CHAPITRE 3 : CARACTERISATION DES MANGUES A LA RECOLTE..... 89

3.1. Chromaticité des mangues	89
3.1.1. <i>Surface et couleur de la tache colorée.....</i>	89
3.1.2. <i>Couleur du fond en fonction de l'exposition au soleil</i>	90
3.1.3. <i>Couleur de la pulpe en fonction de l'exposition au soleil.....</i>	92
3.2. Caractéristiques de maturité.....	93
3.2.1. <i>Teneur en Extraits Secs Solubles (ESS)</i>	93
3.2.2. <i>Teneur en Acidité Titrable (TA)</i>	94
3.3. Relations entre chromaticité des fruits et les paramètres de maturité	95
3.4. Caractéristiques histologiques des tissus des mangues par rapport à l'ensoleillement	96
3.4.1. <i>La structure des tissus</i>	96
3.4.2. <i>La teneur en amidon.....</i>	96

CHAPITRE 4 : LA REPONSE PHYSIOLOGIQUE DES MANGUES AU TRAITEMENT THERMIQUE HWT 55 °C PENDANT 50 MIN 98

4.1. Comparaison, des dégâts physiologiques occasionnés par le traitement HWT 55 °C pendant 50 min à ceux engendrés par les traitements HA (47 °C pendant 20 min et 49 °C pendant 90 min.....	99
4.2. Influence du cultivar sur la réponse physiologique au traitement HWT 55 °C pendant 50 min et classement de sensibilité variétale.....	101
4.2.1. <i>Dégâts sur la tache de couleur des fruits au soleil</i>	101
4.2.2. <i>Dégâts sur le fond des fruits.....</i>	101
4.2.3. <i>Surface et intensité de dégâts externes.....</i>	103
4.2.4. <i>Dégâts dans la pulpe</i>	104
4.3. Analyse globale de l'effet de l'exposition sur la réponse physiologique des mangues au traitement HWT 55 °C pendant 50 min	105
4.3.1. <i>Dégâts externes</i>	105
4.3.2. <i>Dégâts internes.....</i>	106
4.3.3. <i>Recherche de facteurs explicatifs</i>	106

4.4. Etudes de cas : effet de l'exposition sur la réponse physiologique des mangues au traitement HWT 55 °C pendant 50 min.....	108
4.4.1. <i>Le cultivar Reynal</i>	108
4.4.2. <i>Le cultivar Keitt</i>	111
4.4.3. <i>Le cultivar Palmer</i>	114
4.4.4. <i>Le cultivar Smith</i>	117
4.4.5. <i>Le cultivar Nam Doc Mai</i>	119
4.4.6. <i>Synthèse des résultats</i>	122
4.5. Influence du filtre anti UV	123
4.6. Effet de l'heure de récolte et de l'ensoleillement sur la réponse physiologique des mangues du cv. Reynal au traitement HWT 55 °C pendant 50 min	124
4.6.1. <i>Effet de l'heure de récolte indépendamment de l'exposition</i>	124
4.6.2. <i>Effet de l'ensoleillement</i>	126
4.7. Influence du délai et de la conservation entre la récolte et le traitement HWT sur la réponse physiologique des mangues du cv. Keitt	127
4.7.1. <i>Influence des délais de 42 à 167h à 5, 12 et 20 °C entre la récolte et le traitement HWT sur la réponse physiologique des mangues du cv. Keitt</i>	128
4.7.2. <i>Influence des délais de 42, 114 et 167h à 12 °C entre la récolte et le traitement HWT sur la réponse physiologique des mangues du cv. Keitt</i>	129
4.8. Discussion.....	131

CHAPITRE 5 : LES MECANISMES BIOCHIMIQUES DE THERMOTOLERANCE147

5.1. Les protéines de choc thermique HSPs et smHSPs.....	148
5.1.1. <i>Effet du type de tissu</i>	148
5.1.2. <i>Effet de la profondeur du tissu</i>	149
5.1.3. <i>Effet de l'exposition, d'un filtre anti UV-A et UV-B et du traitement HWT</i> .	149
5.1.4. <i>Effet de l'heure de récolte et du traitement HWT</i>	150
5.1.5. <i>Effet de la température de conservation à 5, 20 et 12 °C et du traitement HWT</i>	151
5.1.6. <i>Effet du type de traitement à la chaleur</i>	152
5.1.7. <i>Discussion</i>	153

5.2. Antioxydants	162
5.2.1. <i>Effet du type de tissu et du cultivar</i>	162
5.2.2. <i>Effet de l'ensoleillement et du filtre anti UV-A et UV-B</i>	163
5.2.3. <i>Effet des traitements à la chaleur</i>	164
5.2.4. <i>Effet de l'heure de récolte</i>	165
5.2.5. <i>Effet de durée de conservation à 12 °C</i>	166
5.2.6. <i>Discussion</i>	167
CHAPITRE 6 : DISCUSSION GENERALE ET PERSPECTIVES	176
CONCLUSIONS GENERALES ET IMPLICATIONS PRATIQUES	190
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	194
ANNEXES	218

TABLE DES ILLUSTRATIONS

FIGURES

Figure 1. Inflorescence, fleurs et fruit de <i>Mangifera indica</i> L.	page 4
Figure 2. Descripteurs de la mangue	page 5
Figure 3. Distribution du manguier à partir de leur zone d'origine	page 5
Figure 4. Zones de culture du manguier	page 7
Figure 5. Production et commerce international de la mangue	page 8
Figure 6. Croissance, respiration et production d'éthylène pour les fruits climactériques et non climactériques.....	page 11
Figure 7. Chronologie de la respiration, de la production d'éthylène et de la composition carbonée de la chair de mangue du cv. Keitt pendant son développement et son mûrissement	page 12
Figure 8. Métabolisme de dégradation de l'amidon et de synthèse du sucrose dans les chloroplastes des tissus des plantes par l'activité enzymatique	page 13
Figure 9. Biosynthèse de l'éthylène chez les végétaux supérieurs.....	page 15
Figure 10. Régulation du mûrissement des fruits climactériques	page 15
Figure 11. Evolution des acides organiques pendant la maturation des mangues du cv. Kensington.....	page 16
Figure 12. Les mécanismes de tolérance au stress thermique chez les plantes	page 42
Figure 13. Les interactions suggérées entre les HSPs/chaperones moléculaires et autres mécanismes de réponse au stress dans la plante	page 43
Figure 14. Le réseau de HSPs/chaperones moléculaires en réponse à un stress abiotique	page 45
Figure 15. Origine des différents radicaux libres oxygénés et espèces réactives de l'oxygène impliqués en biologie	page 49
Figure 16. Stratégie de conception de systèmes oxydants susceptibles de prévenir la formation de radicaux libres oxygénés ou de permettre leur destruction	page 50
Figure 17. Températures moyennes, minimales et maximales, pluviométrie mensuelles de 2007 en comparaison avec les statistiques de la période 1986-2006 enregistrées sur le site de la SRA de Pocquereux (La Foa).....	page 57

Figure 18. Rayonnement global et durée d'insolation de décembre 2006 à avril 2007 sur la côte ouest de la Nouvelle-Calédonie	page 57
Figure 19. Sphère colorimétrique Cie L*a*b*	page 61
Figure 20. Vue de dessus du prototype expérimental du bain en immersion dans l'eau chaude.....	page 63
Figure 21. Scores d'intensité de dégâts physiologiques dus aux traitements à la chaleur sur la tache colorée des mangues (It) du cv. Palmer	page 65
Figure 22. Scores d'intensité de dégâts physiologiques dus aux traitements à la chaleur sur le fond (If) des mangues du cv. Keitt	page 66
Figure 23. Scores de dégâts physiologiques dus aux traitements à la chaleur dans la pulpe de différents cultivars de mangues	page 67
Figure 24. Représentation schématique des étapes d'une immunodétection	page 72
Figure 25. Températures internes des mangues du cv. Keitt en fonction de différentes expositions au soleil	page 78
Figure 26. Mesure des températures internes des mangues du cv. Cogs Hall en fonction de la profondeur des tissus	page 79
Figure 27. Gradient de température interne d'une mangue ensoleillée du cv. Cogs Halls	page 80
Figure 28. Températures internes des mangues du cv. Reynal avec et sans filtre anti UV	page 81
Figure 29. Températures internes des mangues du cv. Kensington en fonction de leur taille ...	page 82
Figure 30. Températures internes des mangues des cv. Smith et Sensation qui diffèrent par leur couleur	page 84
Figure 31. Surface et chromaticité a* (CIE Lab) de la tache colorée des mangues de différents cultivars à la récolte	page 89
Figure 32. Teneur en Acidité Titrable (TA) et Extraits Secs Solubles des mangues vertes matures de différents cultivars à la récolte de 2006 et 2007	page 93
Figure 33. Surface et intensité des dégâts physiologiques sur la tache colorée des mangues de différents cultivars après HWT 55.0 °C/ 50 min	page 101
Figure 34. Surface et intensité des dégâts physiologiques sur le fond des mangues de différents cultivars après HWT 55.0 °C/ 50 min	page 102
Figure 35. Indice général de dégâts externes sur les mangues traitées HWT 55.0 °C/ 50 min de différents cultivars	page 103
Figure 36. Indice de dégâts dans la pulpe des mangues traitées HWT 55.0 °C/ 50 min de différents cultivars	page 104

Figure 37. Dégâts physiologiques externes et internes sur mangues du cv. Reynal traitées HWT 55.0 °C/ 50 min, en fonction de l'exposition	page 109
Figure 38. Dégâts physiologiques externes et internes sur mangues du cv. Keitt traitées HWT 55.0 °C/ 50 min, en fonction de l'exposition	page 112
Figure 39. Surface et indice d'intensité des dégâts physiologiques sur la tache colorée des mangues du cv. Palmer traitées HWT 55.0 °C/ 50 min en 2006 et 2007	page 114
Figure 40. Dégâts physiologiques externes et internes sur mangues du cv. Palmer traitées HWT 55.0 °C/ 50 min, en fonction de l'exposition	page 115
Figure 41. Dégâts physiologiques externes et internes sur mangues du cv. Smith traitées HWT 55.0 °C/ 50 min en fonction de l'exposition	page 117
Figure 42. Dégâts physiologiques externes et internes sur mangues traitées du cv. Nam Doc Mai traitées HWT 55.0 °C/ 50 min en fonction de l'exposition en 2007	page 120
Figure 43. Surface et intensité de dégâts sur mangues du cv. Palmer traitées HWT 55.0 °C/ 50 min et effet de la présence d'un filtre anti UV au champ	page 123
Figure 44. Indices de dégâts externes et internes des mangues du cv. Palmer traitées HWT 55.0 °C/ 50 min, en fonction de leur exposition et de la présence d'un filtre anti UV au champ	page 123
Figure 45. Surface et intensité de dégâts sur la tache colorée sur mangues du cv. Reynal récoltées à différentes heures sur 24 h et traitées HWT 55.0 °C/ 50 min, en 2006 et 2007.....	page 124
Figure 46. Surface et intensité de dégâts sur le fond sur mangues du cv. Reynal, récoltées à différentes heures sur 24 h et traitées HWT 55.0 °C/ 50 min, en 2006 et 2007.....	page 124
Figure 47. Indice général de dégâts externes sur mangues du cv. Reynal, récoltées à différentes heures sur 24 h et traitées HWT 55.0 °C/ 50 min, en 2006 et 2007.....	page 126
Figure 48. Influence de l'exposition sur l'indice général de dégâts externes sur mangues du cv. Reynal récoltées à différentes heures sur 24 h et traitées HWT 55.0 °C/ 50 min en 2006 et 2007	page 127
Figure 49. Influence de l'exposition sur l'indice de dégâts internes sur mangues du cv. Reynal récoltées à différentes heures sur 24 h et traitées HWT 55.0 °C/ 50 min en 2006 et 2007	page 127
Figure 50. Influence d'un délai de 42 à 167 h en conservation à 5, 12 et 20 °C entre la récolte et le traitement HWT 55.0 °C/ 50 min sur les dégâts sur la tache colorée des mangues du cv. Keitt 2006	page 128
Figure 51. Influence d'un délai de 42 à 167 h en conservation à 5, 12 et 20 °C entre la récolte et le traitement HWT 55.0 °C/ 50 min sur les dégâts sur le fond des mangues du cv. Keitt 2006	page 128

Figure 52. Influence d'un délai de 42 à 167 h en conservation à 5, 12 et 20 °C entre la récolte et le traitement HWT 55.0 °C/ 50 min sur les indices généraux de dégâts externes et internes des mangues du cv. Keitt en 2006	page 129
Figure 53. Influence d'un délai de 42, 114 et 167 h en conservation à 12 °C entre la récolte et le traitement HWT 55.0°C/ 50 min sur la dégâts sur la tache et le fond des mangues du cv. Keitt en 2007	page 129
Figure 54. Influence d'un délai de 42, 114 et 167 h en conservation à 12 °C entre la récolte et le traitement HWT 55.0 °C/ 50 min sur les indices généraux de dégâts externes et internes des mangues du cv. Keitt 2007	page 130
Figure 55. Western blots des HSP70 et HSP17 de la peau et de la chair des mangues exposées au soleil ou à l'ombre du cv. Keitt. Récolte de 15 h.	page 148
Figure 56. Western blots et quantifications des HSP17.4 dans les tissus des mangues du cv. Cogs Hall selon la profondeur des tissus	page 149
Figure 57. Western blots, et quantifications des HSP17.4 dans la chair des mangues du cv. Palmer. Effet de l'exposition (ombre, soleil ou soleil avec filtre anti UV) et du traitement HWT 55.0 °C/ 50 min	page 149
Figure 58. Western blots et quantifications des HSP17.4 dans la chair des mangues du cv. Reynal. Effet de l'exposition (ombre, soleil ou soleil avec filtre anti UV) et du traitement HWT 55.0°C/ 50 min	page 150
Figure 59. Western blots des HSP17 de la peau des mangues du cv. Keitt selon leur face, leur exposition, la date et l'heure de récolte.....	page 150
Figure 60. Western blots et quantifications des HSP17.4 dans les tissus des mangues du cv. Reynal récoltées à différentes heures de la journée pour les mangues au soleil (à gauche) et les mangues à l'ombre (à droite)	page 151
Figure 61. Western blots des HSP17.4 dans la chair de la face exposée des mangues au soleil du cv. Keitt en fonction de la durée de leur conservation à 5 et 20 °C	page 152
Figure 62. Western blots et quantifications des HSP17.4 de la pulpe des mangues du cv. Keitt récoltées et conservées à 0, 42, 114 et 167 h à 12 °C	page 153
Figure 63. Western blots, profils and quantifications des HSP17.4 dans la pulpe des mangues exposées au soleil et à l'ombre (b) du cv. Keitt non traitées et traitées HA 49.0 °C/ 90 min, HA 47.0 °C/ 20 min et HWT 55.0 °C/ 50 min.....	page 154
Figure 64. Capacité antioxydante, polyphénols, anthocyanes, caroténoïdes totaux de la peau du cv. Reynal selon l'exposition (ombre, soleil, soleil avec filtre anti UV-A et UV-B) et selon le traitement HWT 55.0 °C/ 50 min.....	page 163
Figure 65. Teneur en caroténoïdes totaux de la chair du cv. Reynal selon l'exposition (ombre, soleil, soleil avec filtre anti UV-A et UV-B) et le traitement HWT 55.0 °C/ 50 min	page 164
Figure 66. Capacité antioxydante, polyphénols, anthocyanes, caroténoïdes totaux de la peau du cv. Reynal selon l'exposition (ombre, soleil) et sur 24 h	page 165

Figure 67. Capacité antioxydante, polyphénols, anthocyanes, caroténoïdes totaux de la peau du cv. Keitt selon la durée de conservation à 12 °C	page 167
Figure 68. Capacité antioxydante, polyphénols, anthocyanes, caroténoïdes totaux de la chair du cv. Keitt selon la durée de conservation à 12 °C	page 168
Figure 69. Schéma général de l'acquisition d'une thermotolérance au champ des mangues .	page 177

PHOTOGRAPHIES

Photo 1. Manguier du cv. Reynal en production à la SRA-Pocquereux de l'IAC	page 4
Photo 2. Sondes d'enregistrement de température interne dans le cv. Kensington.....	page 59
Photo 3. Filtres de sisalation et anti UV-A et UV-B sur le cv. Palmer	page 59
Photo 4. Différence de coloration entre une mangue exposée au soleil et une mangue à l'ombre sous la canopée du cv. Keitt.....	page 60
Photo 5. Mangues du cv. Haden disposées sur des grilles, zone pédonculaire vers le bas pour permettre l'écoulement de sève	page 60
Photo 6. Détail d'un cabinet de traitement HA de la machine expérimentale développée par le Plant and Food Research Institute de Nouvelle-Zélande	page 64
Photo 7. Délimitation des trois zones d'observation au microscope : épicarpe et cellules sous jacentes, parenchyme intermédiaire et parenchyme profond.....	page 68
Photo 8. Fruits exposés au soleil des cv Sensation (à gauche) et Smith (à droite) à un stade vert mature	page 83
Photo 9. Cuticule et structure cellulaire de l'épicarpe et parenchyme moyen de la face exposée d'une mangue au soleil du cv. Keitt	page 96
Photo 10. Cuticule et structure cellulaire de l'épicarpe et parenchyme moyen de la face non exposée d'une mangue au soleil du cv. Keitt.....	page 96
Photo 11. Grains d'amidon dans le parenchyme profond d'une mangue à l'ombre du cv. Keitt	page 97
Photo 12. Dégâts de la cuticule et des premières couches de cellules de l'épicarpe (lenticelles) dus au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min sur une mangue à l'ombre du cv. Keitt	page 100
Photo 13. Influence de la tache colorée sur la réponse physiologique des mangues exposées au soleil du cv. Reynal et traitées HWT 55.0 °C/ 50 min.....	page 109
Photo 14. Illustration des dégâts des différentes réponses physiologiques des mangues exposées au soleil du cv. Palmer et traitées HWT 55.0 °C/ 50 min.....	page 114

TABLEAUX

Tableau 1. Description de quelques cultivars présents dans la collection de la SRA Pocquereux (IAC)	page 6
Tableau 2. Productions 2006, exportations et importations 2005 mondiales de mangues. Calendrier d’approvisionnement de l’Union Européenne	page 8
Tableau 3. Dégâts physiologiques sur cultivars de mangues causés par les traitements de désinsectisation	page 24
Tableau 4. Classement de tolérance de différents cultivars aux traitements à la chaleur	page 26
Tableau 5. Description des perturbations sur le mûrissement des mangues consécutives aux traitements de désinsectisation	page 27
Tableau 6. Les cinq classes majeures des HSPs/chaperonnes moléculaires, et leurs sous familles, des plantes	page 44
Tableau 7. Paramètres de couleur de deux cultivars cv. Smith et cv. Sensation de leur tache colorée, leur face externe exposée et leur face interne non exposée.....	page 83
Tableau 8. Pourcentage de la surface de la tache colorée sur la mangue et mesure de la chromaticité et luminosité (CIE, Lab) des mangues de différents cultivars de 2006.....	page 89
Tableau 9. Pourcentage de la surface de la tache colorée sur la mangue et mesure de la chromaticité et luminosité (CIE, Lab) des mangues de différents cultivars de 2007.....	page 90
Tableau 10. Coefficients de corrélations bilatérales de Spearman pour les paramètres de couleur de la peau des mangues	page 90
Tableau 11. Chromaticité et luminosité (CIE, Lab) pour le fond des mangues de différents Cultivars de 2006	page 91
Tableau 12. Chromaticité et luminosité (CIE, Lab) pour le fond des mangues de différents Cultivars de 2007	page 91
Tableau 13. Mesure de la chromaticité (CIE, Lab) de la pulpe des mangues des cultivars 2006 pour lesquels il existe une différence significative entre les expositions.....	page 92
Tableau 14. Mesure de la chromaticité (CIE, Lab) de la pulpe des mangues des cultivars 2007 pour lesquels il existe une différence significative entre les expositions	page 92
Tableau 15. Nombre de grains d’amidon dans les cellules du parenchyme profond.....	page 97
des mangues exposées au soleil et à l’ombre du cv. Keitt	
Tableau 16. Indice de dégâts internes dus aux traitements à la chaleur dans les tissus des mangues des différents cultivars en 2006	page 100
Tableau 17. Dégâts physiologiques externes et internes dus aux traitements à la chaleur dans les tissus des mangues des différents cultivars en 2007	page 100

Tableau 18. Indice général de dégâts externes des mangues traitées HWT 55.0 °C/ 50 min de différents cultivars en 2006 et 2007	page 105
Tableau 19. Indice général de dégâts internes dans les mangues traitées HWT 55.0 °C/ 50 min des cultivars 2006 pour lesquels une différence significative de réponse existe entre les fruits exposés au soleil ou à l'ombre	page 106
Tableau 20. Tableau récapitulatif des différences significatives dans l'expression des dégâts physiologiques liés au traitement HWT 55 °C/ 50 min des mangues des cultivars 2006 et 2007 selon l'exposition	page 106
Tableau 21. Tableau synthétique des coefficients de corrélations bilatérales de Spearman entre les paramètres de dégâts dus au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min et les paramètres biochimiques à la récolte pour tous les cultivars en 2006 et 2007	page 107
Tableau 22. Tableau synthétique des corrélations bilatérales de Spearman pour le cv. Reynal entre les paramètres de dégâts dus au traitement HWT 55.0°C/ 50 min et les paramètres biochimiques à la récolte, l'exposition et l'année de récolte	page 110
Tableau 23. Tableau synthétique pour le cv. Keitt des corrélations bilatérales de Spearman entre les paramètres de dégâts dus au traitement HWT 55.0°C/ 50 min, les paramètres biochimiques à la récolte, l'exposition et l'année de récolte	page 112
Tableau 24. Tableau synthétique pour le cv. Palmer des corrélations bilatérales de Spearman entre les paramètres de dégâts dus au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min, les paramètres biochimiques à la récolte, l'exposition et l'année de récolte	page 115
Tableau 25. Tableau synthétique pour le cv. Smith, des corrélations bilatérales de Spearman entre les paramètres de dégâts dus au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min, les paramètres biochimiques à la récolte, l'exposition et l'année de récolte	page 117
Tableau 26. Tableau synthétique pour le cv. Nam Doc Mai des corrélations bilatérales de Spearman entre les paramètres de dégâts dus au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min, les paramètres biochimiques à la récolte, l'exposition et l'année de récolte	page 120
Tableau 27. Tableau récapitulatif et synthétique des résultats 2006 et 2007 de la réponse physiologique des mangues de cinq cultivars au traitement à la chaleur HWT 55.0 °C/ 50 min en relation avec les paramètres et de couleur, ainsi que l'exposition avant traitement	page 122
Tableau 28. Protéines totales, HSP17.4 dans les tissus des mangues du cv. Reynal récoltées à différentes heures sur 24 h, à l'ombre ou exposées au soleil, traitées ou non traitées HWT 55.0 °C/ 50 min	page 152
Tableau 29. Protéines totales, HSP17.4 dans la pulpe des mangues du cv. Keitt conservées à 12 °C pendant 0, 42, 114 et 167 h en fonction de leur exposition et de l'application d'un traitement HWT 55 °C/ 50 min ou non	page 152
Tableau 30. Protéines totales, HSP17.4 des mangues exposées au soleil et à l'ombre du cv. Keitt non traité et traités HA 49.0 °C/ 90 min, HA 47.0 °C/ 20 min et HWT 55.0 °C/ 50 min	page 154

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Le manguier (*Mangifera indica* L.) est cultivé par l'homme depuis plus de 4000 ans (Nakasone et Paull, 1998). Le nom latin botanique *Mangifera indica* L. vient du nom tamoul ancien 'mangos'. La mangue est la sixième production fruitière mondiale mais seulement une faible part, de 2.6 %, est exportée. Mais de par sa saveur, son apparence attractive ainsi que ses qualités nutritionnelles, elle est de plus en plus demandée sur les marchés d'exportation (Gerbaud, 2008). En Nouvelle-Calédonie, ce fruit représente un intérêt économique non négligeable sur un marché local limité (246 000 habitants au dernier recensement de 2009) mais son potentiel commercial est surtout important sur les marchés d'exportation vers la Nouvelle Zélande et les pays asiatiques en contre saison.

Cependant, hôte des mouches des fruits (Tephritidae, *Bactrocera* sp., *Ceratitis* sp., *Anastrepha* sp.), la mangue nécessite d'être désinsectisée pour lever le risque quarantenaire qu'elle représente pour de nombreux pays importeurs. La désinsectisation chimique au bromure de méthyle a été bannie et des traitements alternatifs, plus respectueux de la santé humaine et de l'environnement, sont désormais préconisés. Ainsi, le traitement à la chaleur est utilisé en après récolte des mangues pour la désinsectisation contre les mouches des fruits. Cependant les technologies et les protocoles appliqués occasionnent des dégâts externes et internes sur un grand nombre de cultivars de mangues (Ducamp Collin et al., 2007). L'incidence, la sévérité de ces dégâts dépendent du cultivar, de la méthode de traitement appliquée et du niveau de stress subi par les tissus. La tolérance des fruits à des températures supérieures à celles auxquelles les fruits sont habituellement exposés varie selon les facteurs suivants : espèce, génotype, variabilité entre les espèces, stade de maturité, taille du fruit, exposition aux différents facteurs environnementaux et de pré récolte, type de traitement et application d'un conditionnement thermique ou non (Jacobi et al., 2001a).

L'endurcissement *via* des conditionnements thermiques en après récolte entre 38 et 42 °C est une pratique qui peut modifier le comportement des fruits et légumes. Ces traitements après récolte peuvent être bénéfiques pour les traitements de quarantaine, eux même effectués à la chaleur. Ils peuvent en effet conduire à une inhibition ou une diminution des dégâts et des perturbations physiologiques causés par les stress thermiques (Lurie, 1998 ; Jacobi et al., 2001a). C'est dans ce contexte que se positionne ce travail de thèse qui vise à déterminer si **une exposition au soleil des fruits en pré récolte permettrait d'acquérir une**

thermotolérance pouvant améliorer les réponses physiologiques des fruits lors des traitements en après récolte. L'exposition au soleil des fruits au champ pourrait alors être considérée comme un conditionnement thermique pouvant assurer une protection des fruits en après récolte.

En effet, un stress est défini comme une condition qui perturbe le fonctionnement normal du système biologique. En conditions de pré récolte, les fruits sont soumis à différents stress abiotiques journaliers ou saisonniers, dont l'ensoleillement fait partie. Ce dernier provoque à la fois un stress thermique et un stress oxydatif du fait de l'intensité de ses radiations. La température interne du fruit est la résultante d'un ensemble de facteurs : lumière, intensité de radiation, humidité relative, vitesse du vent, densité et conductivité des tissus qui peuvent affecter le comportement en après récolte des fruits (Ferguson et *al.*, 1998). Ainsi au champ, les plantes activent des stratégies de gestion des stress, dont ceux induits par l'ensoleillement, à travers des mécanismes physiologiques et moléculaires de protection des cellules. C'est ce que Leshem et *al.* (1998) décrivent comme le '**General Adaptation Syndrom**' (GAS). Parmi ces mécanismes, ils citent la mise en place d'un **système de défense antioxydant** associé à une **synthèse de protéines de choc thermique** (HSPs) comme deux éléments majeurs.

Une thermotolérance acquise au champ est ainsi suggérée. Elle serait liée à l'expression de protéines de choc thermique (Woolf et *al.*, 1999a ; Woolf et Ferguson, 2000). Cependant, à la différence des conditions d'endurcissement où seule la température est impliquée, les radiations du soleil provoquent un stress oxydatif qui induit la mise en place d'un système de défense antioxydant (Flint et *al.*, 1985 ; Solovchenko et Schmitz-Eiberger, 2003). **Comment ces deux mécanismes de protection interagissent ? Est-ce qu'ils persistent entre la récolte et un traitement à la chaleur en après récolte ?**

Les conditions optimales de production et de persistance de protéines de choc thermique dans les tissus de la mangue, de même que les réponses physiologiques et biochimiques à des stress de températures des mangues en après récolte ne sont pas encore élucidées (Jacobi et *al.*, 2001a). Par ailleurs, si un effet direct des températures de pré récolte sur un phénomène de thermotolérance (Woolf et Ferguson, 2000) et la mise en place de systèmes de défense anti oxydant (Chen et *al.*, 2009 ; Solovchenko et Schmitz-Eiberger, 2003) ont été étudiés sur d'autres fruits, aucun travail de recherche n'a jusqu'ici été mené sur les mangues. Ainsi, l'acquisition de connaissances scientifiques génériques paraît nécessaire pour l'élaboration de

stratégies efficaces visant à préserver, voire améliorer la qualité des mangues après désinsectisation à la chaleur et promouvoir ainsi leur commercialisation dans le monde.

En Nouvelle-Calédonie, les priorités de recherche-développement sont, entre autres, de soutenir techniquement et scientifiquement les agriculteurs dans les domaines de pré et après récolte afin de produire des fruits et légumes de qualité, désinsectisés qui répondent aux exigences de l'exportation.

Cette thèse, qui s'inscrit dans cette optique, a pour objectifs globaux :

- une contribution à une connaissance scientifique générique sur la physiologie de la mangue et plus particulièrement à la compréhension de certains mécanismes biochimiques et moléculaires de thermotolérance (expression, maintien et protection).
- une application pratique potentielle avec l'élaboration de stratégies ou de protocoles pour l'optimisation de la qualité des mangues lors des traitements en après récolte (désinsectisation).

Pour atteindre ces objectifs, plusieurs aspects ont été étudiés:

- 1) le niveau des températures internes en pré récolte de mangues de plusieurs cultivars aux morphologies et couleurs différentes afin de vérifier les conditions d'une éventuelle acquisition de thermotolérance en pré récolte,
- 2) la réponse physiologique de différents cultivars à des traitements à la chaleur en fonction de leur exposition (comparaisons inter cultivars et vérification de l'expression d'une éventuelle thermotolérance acquise au champ),
- 3) deux mécanismes de défense habituellement mis en place par la plante : d'une part l'expression, le maintien des protéines de choc thermique et d'autre part la mise en place d'un système de défense antioxydant non enzymatique ainsi que leurs possibles interactions.

L'objectif final de ce travail de thèse est donc d'une part, d'avoir une meilleure compréhension des systèmes de défense mis en place dans la mangue pour se prémunir ou limiter les effets du stress causé par l'ensoleillement, et d'autre part, de déterminer si ces mécanismes pourraient contribuer à expliquer le phénomène d'acquisition d'une éventuelle thermotolérance des mangues en conditions de pré récolte.

CONTEXTE BIBLIOGRAPHIQUE

1. La mangue dans le Monde et en Nouvelle Calédonie	4
1.1. Présentation générale du manguier (<i>Mangifera indica</i> L.)	4
1.1.1. Description botanique	4
1.1.2. Origine botanique, dispersion du manguier et cultivars.....	5
1.1.3. Conditions écologiques et zones de culture du manguier	6
1.2. Données économiques.....	7
1.2.1. Le marché mondial de la mangue	7
1.2.2. La mangue en Nouvelle Calédonie.....	9
2. La physiologie de la mangue	11
2.1. La maturation et le mûrissement de la mangue.....	12
2.1.1. Activité enzymatique.....	12
2.1.2. Les teneurs en acides organiques.....	15
2.1.3. Les teneurs en éléments minéraux.....	16
2.1.4. Les teneurs en pigments, antioxydants et protéines	16
2.2. Détermination du stade de maturité et du point de coupe de la mangue.....	18
3. Les traitements thermiques après récolte et la réponse physiologique des mangues	20
3.1. La conservation à basse température.....	20
3.2. La désinsectisation des mangues.....	22
3.2.1. Le traitement à la vapeur d'eau chaude (VHT)	22
3.2.2. Le traitement à l'air chaud pulsé (HTFA).....	23
3.2.3. Le traitement en immersion dans de l'eau chaude (HWT).....	23
3.2.4. Réponse physiologique des mangues aux traitements à la chaleur	25
3.3. Les conditionnements thermiques.....	33
3.4. Influence des facteurs pré récolte sur le comportement en après récolte des fruits	34

4. Influence de l'ensoleillement en pré récolte sur les températures internes et la physiologie des fruits.....	36
4.1. La chaleur dans les fruits.....	36
4.2. Mesures des températures internes des fruits en pré récolte	37
4.3. Réponses physiologiques des fruits à l'ensoleillement.....	38
4.3.1. <i>Influence sur la physiologie et la composition chimique des fruits</i>	38
4.3.2. <i>Désordres physiologiques causés par des stress abiotiques</i>	39
5. Deux exemples de réponses physiologiques aux stress thermiques : synthèse d'HSPs et production d'antioxydants	41
5.1. Les protéines de choc thermique (HSPs)	42
5.1.1. <i>Les différentes familles d'HSPs – les Small Heat Shock Proteins (smHSPs)</i>	44
5.1.2. <i>Les protéines de choc thermique dans les fruits</i>	46
5.2. Les antioxydants.....	49
5.2.1. <i>Le rôle et le métabolisme des composés phytochimiques et antioxydants</i>	50
5.2.2. <i>Les antioxydants dans les mangues</i>	53



Photo 1. Manguier du cv. Reynal en production à la Station de Recherche Agronomique de Pocquereux (SRA de Pocquereux – IAC)

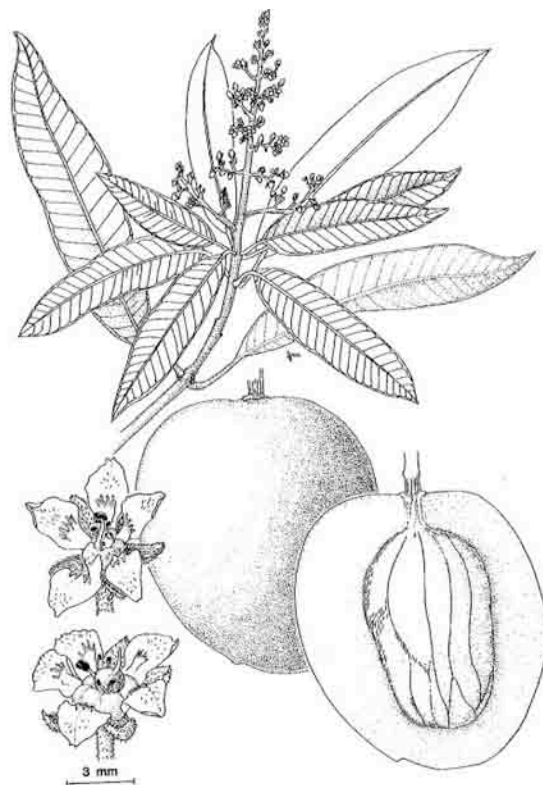


Figure 1. Inflorescence, fleurs et fruit de *Mangifera indica* L. (Mujerkhee, 1997)

CONTEXTE BIBLIOGRAPHIQUE

1 La mangue dans le Monde et en Nouvelle Calédonie

1.1 Présentation générale du manguiers (*Mangifera indica* L.)

1.1.1 Description botanique

Au plan systématique (**photo 1**), le manguiers (*Mangifera indica* L.) appartient au genre *Mangifera*, ordre des Sapindales, famille des Anacardiaceae. C'est un arbre à feuilles persistantes, érigé ou à port plus ou moins étalé pouvant atteindre jusqu'à 30 m de haut et pouvant vivre plus de cent ans. Ses feuilles sont produites par une succession de pousses végétatives entre des périodes de dormance. En général, trois à quatre pousses végétatives par an sont observées sur un arbre adulte. Le nombre de pousses est sous la dépendance du climat (Mukherjee, 1997 ; De Laroussilhe, 1980). La floraison apicale marque la fin de la croissance des rameaux, ce qui aboutit à une ramification sympodiale. La panicule florale est composée d'un axe principal subdivisé en ramifications secondaires et éventuellement tertiaires sur lesquelles apparaissent les boutons floraux. La panicule florale peut porter une centaine de petites fleurs de 5 à 10 mm de diamètre qui peuvent être des fleurs hermaphrodites ou des fleurs mâles (De Laroussilhe, 1980).

La mangue qui est le fruit du manguiers est une drupe (**figure 1**), plus ou moins aplatie, de forme, de taille, de couleur et de saveur différentes, pouvant présenter en son apex un bec selon les cultivars (cv.). La **figure 2** montre ses descripteurs morpho-taxonomiques tels qu'ils ont été définis par l'International Board for Plant Genetic Resources (IBPGR) en 1989. De l'extérieur vers l'intérieur, le fruit est constitué successivement de trois parties : une fine couche qui est la peau ou épicarpe, une partie de chair consommable ou mésocarpe puis une partie dure l'endocarpe, qui entoure la graine (De Laroussilhe, 1980). L'épicarpe est vert puis jaune à jaune-verdâtre pour certaines variétés, ou rouge violacé. La totalité du fruit peut être

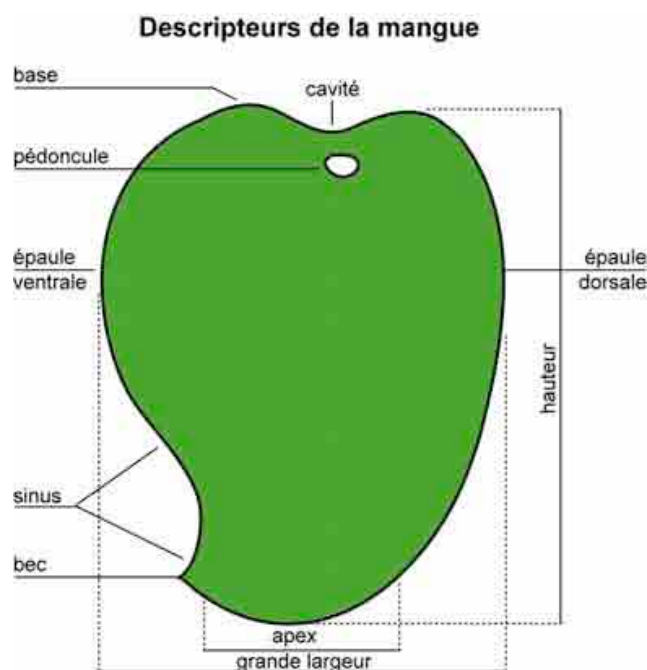


Figure 2. Descripteurs de la mangue (IPBGR, 1989)

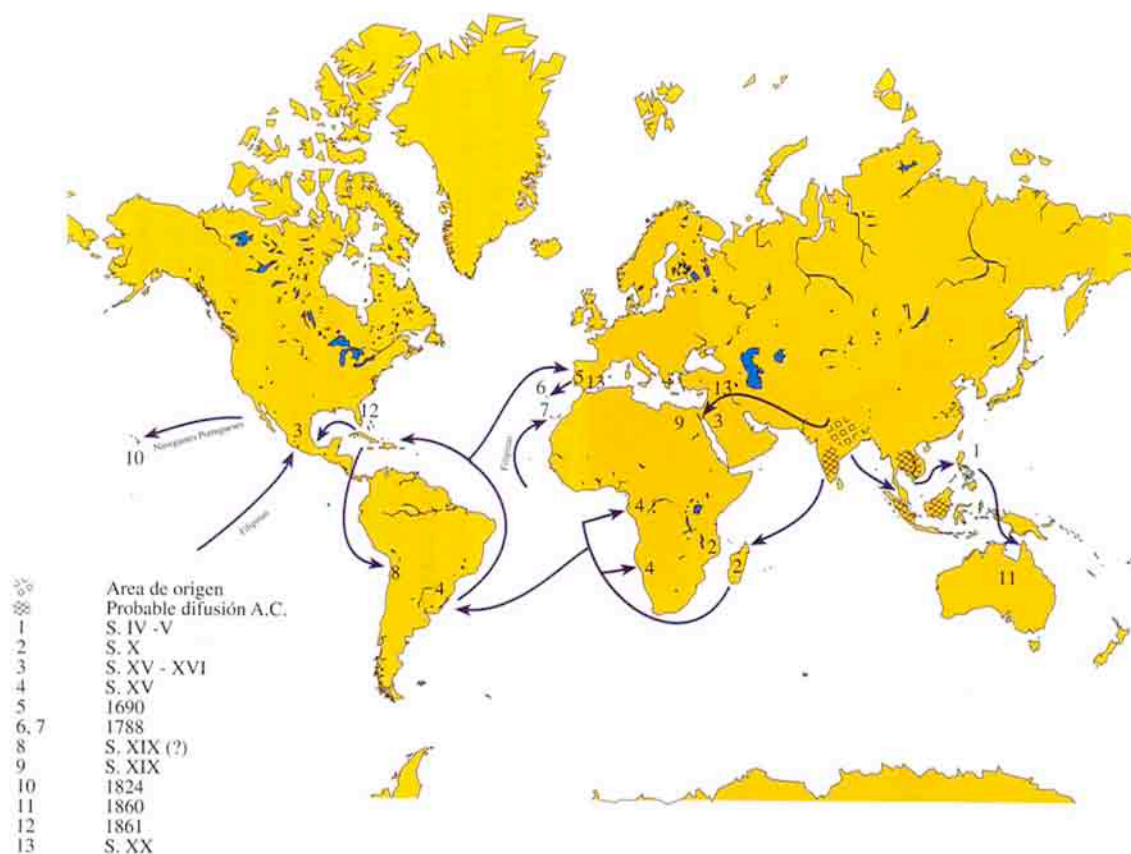


Figure 3. Distribution du manguier à partir de leur zone d'origine (Galan Sauco, 1999)

colorée ou alors uniquement des plages limitées sur le fond souvent jaune ou orange pour d'autres. L'épicarpe présente également des lenticelles plus ou moins apparentes. Pour certaines variétés, il est couvert d'une couche de pruine plus ou moins abondante. La pulpe est de couleur jaune-orangé. Le noyau du fruit est un endocarpe ligneux. Il contient la semence qui est entourée de deux téguments, un externe appelé le testa et un interne, le tégument qui enveloppe l'amande. Cette dernière comprend deux cotylédons ou plusieurs dans le cas des amandes polyembryonnées (De Laroussilhe, 1980).

1.1.2 Origine botanique, dispersion du manguier et cultivars

Le manguier est originaire de la partie Nord-Est de la région indo-birmane (Mukherjee, 1997 ; Nakasone et Paull, 1998). D'après Mukherjee (1997) ce sont à la fois les commerçants indiens, les navigateurs et les prêtres bouddhistes qui auraient assuré la diffusion du manguier. Cette diffusion géographique aurait concerné successivement la Malaisie puis le reste du sud est asiatique au IV^{ème} ou V^{ème} siècle avant J.C. pour finir par les Philippines, la Thaïlande vers 1400-1450 et enfin l'Afrique de l'Ouest au X^{ème} siècle (**figure 3**). Cette première diffusion a été suivie d'une seconde concernant les différents cultivars obtenus dans les différents centres de domestication. Les trois phases de dispersion qui peuvent être distinguées sont :

1) le déplacement des variétés indiennes (monoembryonnées) à partir du XVI^{ème} siècle par les portugais, premiers européens à établir des routes commerciales avec l'Inde, dans l'est de l'Afrique et jusqu'au Brésil. Elles auraient été introduites au Moyen Orient vers la fin du XVIII^{ème} siècle au Yemen.

2) la dispersion des variétés du sud est asiatique (polyembryonnées) à travers l'océan pacifique jusqu'en Amérique centrale et en Amérique du sud par les commerçants espagnols. Ces derniers ont introduit le manguier depuis les Philippines, sur la côte orientale du Mexique au XVIII^{ème} siècle où les anglais le découvrent et l'introduisent aux Iles Hawaï dans les années 1800. Ce n'est que vers les années 1870 que l'Australie l'importe dans le Queensland.

3) La création d'un centre secondaire contemporain de diversité en Floride où de nombreux cultivars monoembryonnés ont été sélectionnés et distribués à travers le monde à partir

Tableau 1. Description de quelques cultivars présents dans la collection de la SRA de Pocquereux (De Laroussilhe, 1980 ; Mukherjee, 1997 ; Galan Saucó, 1999)

variété	embryon	forme	couleur peau	couleur chair	apex	bec	fibres	poids en g	peau	tenue	saison
Tommy Atkins	mono	ovale	jaune orangé, tache rouge	jaune orangé	rond	léger	léger	450 à 710	épaisse	bonne	précoce
Kent	mono	arrondie	vert jaune, tache rouge	jaune orangé	rond	sans	sans	600 à 750	épaisse	bonne	fin de saison
Keitt	mono	ovale	jaune orangé, tache rouge	jaune orangé	rond	sans	moyen	510 à 2000	épaisse	bonne	tardive
Haden	mono	ovale	jaune vif, large tache rouge vif	jaune orangé	rond	sans	sans	510 à 680	fine	fragile	début de saison
Florigon	poly	ovale	jaune vif	jaune foncé	rond	léger	léger	270 à 450	fine	bonne	saison
Irwin	mono	ovale	jaune vif, large tache rouge vif	jaune	pointu	sans	sans	340-450	moyenne	fragile	debut de saison
Kensington	poly	arrondie	jaune vif, large tache rouge vif	jaune	rond	léger	léger	350-750	moyen	bonne	saison
Nam Doc Mai	poly	oblongue	vert jaune	jaune	rond	fort	sans	340-580	moyen	bonne	saison
Palmer	mono	oblongue	rouge, tache plus vive	jaune orangé	rond	léger	léger	510 à 850	épais	bonne	fin de saison
Sensation	mono	arrondie	rouge, tache plus vive	jaune foncé	rond	sans	sans	280-340	épais	bonne	tardive
Van Dyke	mono	arrondie	jaune vif, large tache rouge vif	jaune orangé	rond	léger	léger	250-520	épais	bonne	fin de saison
Davis Haden	mono	ovale	jaune orangé, tache rouge	jaune orangé	pointu	sans	léger	680-900			saison
Early Gold		oblongue	jaune orangé, tache rouge	jaune orangé				340			précoce
Fascell	mono	ovale	jaune vif, large tache rouge vif	jaune	rond	sans	léger	300-400	fin	fragile	fin de saison
Ruby	mono	ovale	jaune orange, tache rouge	jaune	rond	sans	léger	225	épais	bonne	saison
Smith	mono	oblongue	jaune orangé, tache rouge	jaune foncé	rond	sans	moyen	580-950	fin	bonne	saison
Cogs Hall	mono	oblongue	vert jaune avec tache rouge	jaune	pointu	sans	léger	240-450	fin	fragile	saison

d'introductions de variétés indiennes et du sud-est asiatique à partir de la fin du XIX^{ème} et du début du XX^{ème}. Selon Mukherjee (1997) la majorité des mangues floridiennes sont en général issues du cv. Haden, sélection de Mulgoba. Ce sont les cv. Eldon, Lippens, Smith, Tommy Atkins et Zill.

L'existence de ces trois grands groupes de dispersion des variétés à partir de leur zone d'origine a été confirmée par des études de diversité génétique utilisant la technique des marqueurs moléculaires par microsatellites (Duval et *al.*, 2005 ; 2006).

Les variétés d'origine américaine, appelées également 'mangues rouges', ont été introduites depuis les îles Hawaï, en Guinée en 1950 puis étendues à l'Afrique occidentale et centrale (De Laroussilhe, 1980 ; Nakasone et Paull, 1998). Concernant la Nouvelle-Calédonie, une sélection d'origine martiniquaise, a été importée en provenance de Tahiti par le Gouverneur Saisset en 1859 (Mackee, 1985), ce qui correspond à la première introduction répertoriée du manguier dans l'archipel. D'autres introductions ont suivi en 1862 à partir de manguiers de la Réunion (Brou, 1982). Les différents programmes de recherche-développement qui se sont succédés ont également permis l'introduction de nombreux cultivars de Tahiti dans les années 1980, puis principalement des mangues floridiennes entre 1990 et 1994 et plus récemment, en 1998 des mangues d'Afrique de l'ouest (*cf.* Cahier d'introductions de la Station de Recherche Agronomique– SRA de Pocquereux-, Institut Agronomique néo Calédonien –IAC- de 1979 à 2008). Les variétés les plus exportées dans le monde sont les variétés floridiennes car elles sont très colorées et très attractives. Cependant des cultivars jaunes tels que le cv. Nam Doc Mai sont très prisés sur les marchés asiatiques. Le **tableau 1** présente un descriptif des cultivars en collection à la SRA de Pocquereux-IAC qui représentent un potentiel commercial à l'export.

1.1.3 Conditions écologiques et zones de culture du manguier

Considéré comme le fruit le plus populaire d'orient (Hulme, 1971), la mangue est aujourd'hui de plus en plus prisée dans le monde. C'est pourquoi le manguier est maintenant largement cultivé en dehors de sa zone de production d'origine (**figure 4**). Il est présent dans toutes les zones intertropicales mais également subtropicales, dans des zones écologiquement très différentes de sa région d'origine, ce qui témoigne de sa large capacité d'adaptation (Nakasone et Paull, 1998).

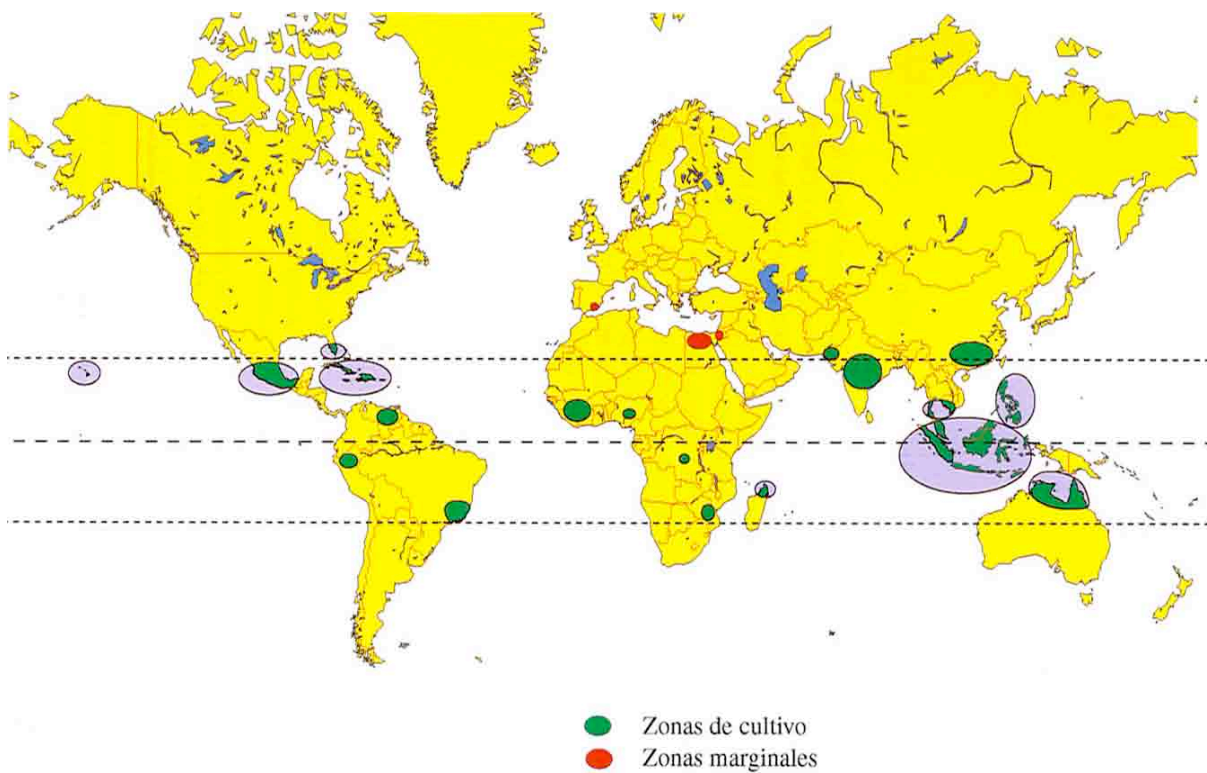


Figure 4. Zonas de culture du manguier (Galan Sauco, 1999)

Le manguiier est un arbre pour lequel la croissance optimale se produit à une température moyenne comprise entre 24 et 30 °C. Il peut supporter des températures de l'air jusqu'à 48 °C pendant le développement du fruit si l'irrigation est adéquate pour limiter les risques de brûlures sur la peau dues au soleil (De Laroussilhe, 1980). Il tolère également de basses températures jusqu'à 4 °C pendant de courtes périodes mais le zéro végétatif est atteint pour une température médiane journalière de 15 °C. En général, les cultivars monoembryonnés sont plus tolérants au froid (températures inférieures à 12 °C) en climat subtropical pendant la floraison (Whiley et Schaffer, 1997). Par ailleurs, l'induction florale pourrait être régulée par des températures de nuit inférieures à 18 °C. Une période sèche et fraîche la favorise et est donc déterminante pour l'obtention de bons rendements. Par contre, un climat trop humide est néfaste pour la production, les fleurs et les fruits étant très sensibles à l'antracnose due à *Colletotrichum gloeosporioides* (Davenport et Nunez-Elisea, 1997 ; Nakasone et Paull, 1998). C'est en fait la répartition de la pluviométrie, qui est un facteur important pour la floraison et la mise à fruit. Elle est ainsi prépondérante pour la production.

Les travaux de recherche menés par la SRA de Pocquereux -IAC- depuis plus de quinze ans ont permis d'introduire et de sélectionner d'une part, des cultivars de mangues bien adaptés au climat calédonien, et répondant d'autre part, aux exigences des différents marchés locaux ou d'exportation. Les itinéraires techniques ainsi que des zonages de prédilection (côte ouest de la Nouvelle-Calédonie) ont été établis tenant compte des contraintes biotiques et abiotiques de la culture afin d'améliorer les rendements mais également la qualité des fruits.

1.2 Données économiques

1.2.1 Le marché mondial de la mangue

La mangue est un fruit apprécié pour sa saveur et son apparence attractive : elle procure également une source de revenu intéressant pour les producteurs. Ses qualités nutritionnelles et plus particulièrement sa teneur en vitamines A et C constituent des compléments alimentaires non négligeables pour les pays producteurs en voie de développement comme l'Inde, le Pakistan et les Philippines (Roe et Bruemmer, 1981 ; Jacobi, 2001a) mais elles

représentent aussi des arguments commerciaux pour la promotion de ce fruit sur les marchés d'exportation.

La mangue (*Mangifera indica* L.) représente la 6^{ème} production fruitière mondiale et la 2^{ème} production fruitière tropicale après la banane. En recoupant les informations de l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) et celles des douanes de l'Union Européenne (UE), des Etats Unis (USA) et du Japon, Gerbaud (2008) estime la production mondiale à 30.5 Mt en 2006 avec une augmentation de 50 % ces dix dernières années. Il existe environ soixante dix pays producteurs (**figure 5**). C'est en Asie que se concentre 65 % de la production mondiale et dix pays se partagent près de 85 % du total mondial. La production a un gros potentiel d'accroissement dans les pays producteurs émergents comme la Chine, l'Indonésie et le Mexique (Jedele, 2003).

La majorité de la production est consommée en frais. Seule une faible part des mangues produites est exportée. Ainsi en 2005, la quantité de mangues exportées n'était que de 820 000 t (2.6 % de la production mondiale), soit une valeur sur le marché international d'environ 600 millions USD. C'est principalement vers l'Amérique du nord (37 % pour les Etats-Unis), vers l'Europe (26 %) et vers l'Asie (14 %, dont le Japon 1.5 %) que s'orientent ces transactions. L'émergence de nouveaux importateurs est observée des pays du golfe persique et de Hong Kong (**tableau 2**). Les principaux exportateurs sont l'Inde, le Mexique et le Brésil à hauteur respectivement de 27 %, de 24 % et de 14 % des exportations (Gerbaud, 2008).

La demande mondiale n'a cessé de s'accroître. L'augmentation a été spectaculaire entre les années 1990 et 2006 durant lesquelles le marché mondial est passé de 154 000 à 820 000 t. La coloration attractive des nouveaux cultivars hybrides a favorisé la pénétration de la mangue sur les marchés de consommation européen et nord américain. Cette demande se justifie par le développement de la consommation de ce fruit, essentiellement en frais, aussi bien dans les pays producteurs que dans les pays importateurs. Pour certains marchés, ces produits innovants connaissent une croissance de leur consommation car évocateur de fête et de soleil. Cependant, à l'échelle mondiale, la forte consommation de la mangue est encore cantonnée aux périodes festives. Elle représente pourtant un potentiel commercial important qui nécessite une promotion à travers le développement de stratégies marketing et commerciale dans les pays déjà importateurs mais également dans les pays non importateurs (Loeillet, 1998).

Avec la baisse des cours, la consommation de la mangue s'est démocratisée et les consommateurs, mieux avertis, sont de plus en plus exigeants sur des caractères objectifs tels que l'état sanitaire, le conditionnement, la durée de conservation des mangues ou bien des critères subjectifs tels que la forme des fruits, leur couleur et leur poids. Afin de satisfaire ces exigences, l'UE a donc mis en place des normes de qualité sur la marchandise pénétrant sur le territoire européen (Bissardon, 1999). Les marges des exportateurs et importateurs s'étant réduites, ceux-ci ont été amenés à accorder un intérêt croissant à la qualité et aux préjudices occasionnés par les pertes après la récolte ou les ventes au rabais des lots défectueux (Loeillet, 1998).

Toutes ces informations relatives au marché mondial de la mangue expliquent l'intérêt de l'approfondissement des recherches menées sur les conditions de traitements des mangues en après récolte.

1.2.2 La mangue en Nouvelle Calédonie

La culture du manguier en Nouvelle-Calédonie est passée en quelques années du stade d'arbres isolés en jardin à celui de la plantation de verger monovariétal. Les derniers chiffres communiqués, en 2002, lors du dernier Recensement Général Agricole (RGA) et réactualisés avec ceux des enquêtes mensuelles menées jusqu'en 2007 par la Direction des Affaires Vétérinaires Alimentaires et Rurales (DAVAR), amènent à une estimation de 53 000 arbres sur verger ou isolés sur l'ensemble du territoire. La majorité de ces manguiers n'est pas productive mais les manguiers font partie du paysage calédonien puisqu'ils sont présents partout autour des maisons et sur le bord des routes. Avec 13.2 % des surfaces plantées pour la production, le manguier est la deuxième culture fruitière pérenne après les agrumes qui représentent 42 % des surfaces plantées (Source : RGA, 2002).

En 2007, 218 t de mangues ont été produites en Nouvelle-Calédonie (DAVAR). La majorité de cette production est issue d'arbres de semis qui ne répond pas aux exigences des marchés d'exportation (calibre, sensibilité aux pathogènes, présence de fibres, qualité générale). Une plus faible proportion provient d'arbres greffés, de cultivars floridiens et/ou thaïlandais introduits et étudiés sur le site de la SRA de Pocquereux. C'est pourquoi en 2002, seulement 37 % (soit 80 t) de la production calédonienne

se retrouve dans les circuits commerciaux officiels. En 2005, le volume de mangues commercialisées a doublé (160 t) soit 73 % de la production officielle. Cette augmentation est due à l'entrée en pleine production du verger de manguier calédonien. En effet, en 1997, 50 % des arbres avaient moins de 5 ans. Cependant bien que difficiles à estimer, des circuits de commercialisation (bords des routes, marchés de proximité ou marchés locaux) existent et représentent une part importante de la production néo calédonienne non recensée.

Si les mangues de qualité représentent un potentiel économique pour le marché local, il l'est d'autant plus pour les marchés d'exportation néo-zélandais (pays non producteur et consommateur d'environ 1500 t /an, en constante progression) et asiatiques en contre saison. Le marché japonais a été estimé à 9 300 t, celui de Hong Kong à 28 000 t. Des tentatives d'exportation avaient été réalisées en 1993 et 1994 vers la Nouvelle-Zélande où la qualité des mangues calédoniennes avait été très appréciée comparativement à celles d'autres provenances. Cependant, l'interdiction d'utilisation du bromure de méthyle pour la désinsectisation obligatoire des produits candidats à l'export a mis en veille ces filières d'exportation le temps de développer des traitements alternatifs contre les mouches des fruits de quarantaine (*Bactrocera tryoni*, *Bactrocera psidii*, *Bactrocera curvipennis*).

Les travaux de recherche en entomologie initiés en 1993 à la SRA de Pocquereux ont abouti à la mise en place d'un protocole de désinsectisation par la chaleur humide et pulsée qui a été agréé par les services phytosanitaires néo-zélandais en août 1999. Cependant ces traitements de désinsectisation par la chaleur occasionnent des problèmes de qualité externe et interne des mangues. Ces dégâts peuvent intervenir de façon irrégulière et variable, ce qui aboutit à la limitation de leur compétitivité sur les marchés à l'export. En 2003 et 2004, 16 t de mangues calédoniennes ont été exportées vers la Nouvelle-Zélande. Mais ces mangues étaient en compétition avec celles du Mexique et du Brésil. Compte tenu de leur prix élevé de production, les mangues calédoniennes candidates à l'exportation se doivent d'être d'une qualité irréprochable pour espérer se positionner sur le marché international.

La levée des barrières sanitaires (unité de traitement par la chaleur humide pulsée contre les insectes de quarantaine dont les mouches des fruits) ainsi que l'amélioration et le maintien du niveau de qualité des fruits sont des conditions *sine qua non* au développement des marchés d'exportation.

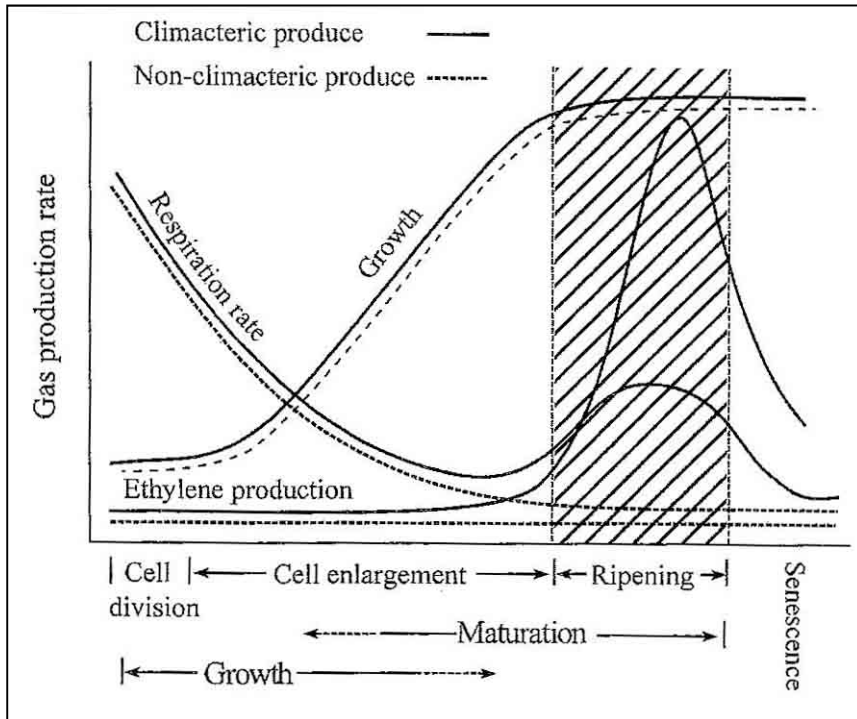


Figure 6. Croissance, respiration et production d'éthylène pour les fruits climactériques et non climactériques (Wills et *al.*, 2007).

2 La physiologie de la mangue

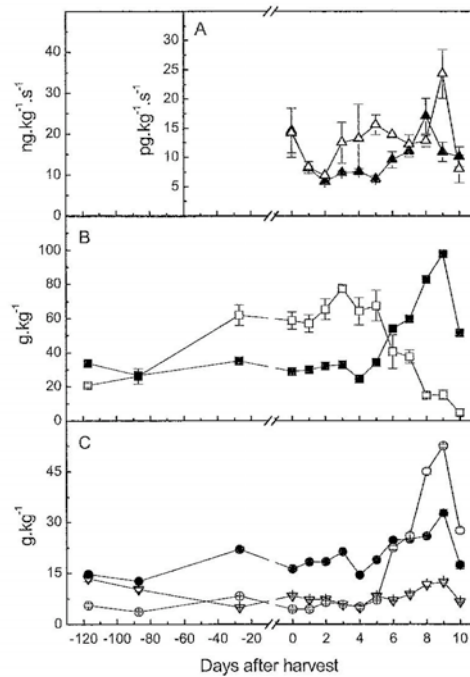
De nombreux auteurs ont tenté de caractériser les changements qui accompagnent le développement d'une mangue sur l'arbre jusqu'à son stade consommable mais à l'unanimité ils s'inscrivent dans un processus continu non délimité (De Laroussilhe, 1980 ; Wills et *al.* 2007). Cependant trois phases physiologiques majeures sont observées (**figure 6**) :

a) La phase de croissance juvénile de la mangue : Observée deux à trois semaines après la fécondation. La multiplication rapide des cellules pour la formation du jeune fruit engendre une respiration intense qui va décroître durant la phase d'allongement des cellules jusqu'à sa taille *quasi* définitive. C'est durant cette phase de croissance que la mangue va accumuler ses réserves en amidon.

b) La phase de maturation de la mangue : Initiée sur l'arbre pendant la phase de croissance du fruit elle se poursuit pendant le mûrissement. Cette phase de maturation permet à la mangue d'accumuler tous les constituants qui lui seront nécessaires lors de l'élaboration de sa composition physico-chimique finale. La croissance de la mangue ralentit et le passage de l'état mature à l'état mûr de la mangue se manifeste par une reprise de l'activité respiratoire aussi brève qu'intense et un fort dégagement d'éthylène. Ces phénomènes caractérisent la crise climactérique.

c) La phase de sénescence de la mangue qui comme pour tous les fruits est un phénomène irréversible : Elle est définie par le ralentissement des processus anaboliques qui font place aux processus cataboliques. Ainsi la sénescence entraîne la dégradation puis la mort des tissus.

Dans l'itinéraire commercial dans lequel nous nous plaçons, le développement de la mangue (phase de croissance et de maturation) a lieu sur l'arbre alors que le mûrissement et la sénescence interviennent après la récolte. La compréhension des changements physiologiques qui affectent la mangue au cours de sa maturation et de son mûrissement, l'élaboration de sa composition physico-chimique ainsi que de sa texture est importante. En effet toutes ces modifications sont déterminantes pour les qualités physique et organoleptique du fruit en pré et après récolte et vont conditionner sa réponse physiologique aux différents stress auxquels il va être soumis.



(A) Endogenous ethylene (Δ) (on the right) and CO_2 (\blacktriangle) (on the left) produced by respiration of mangoes after fruit harvest. (B) Content of starch (\square) and soluble sugars (\blacksquare) given by some of glucose, fructose and sucrose amounts. (C) Changes in glucose (∇), fructose (\bullet) and sucrose (\circ) levels during development and ripening. Negative numbers on the horizontal scale represent the development phase, and the positive numbers represent the ripening phase after fruit detachment (day 0). Standard errors of the analysis are indicated by the vertical bars ($n = 3$).

Figure 7. Chronologie de la respiration, de la production d'éthylène et de la composition carbonée de la chair de mangue du cv. Keitt pendant son développement et son mûrissement (Bernades Silva, 2007).

2.1 La maturation et le mûrissement de la mangue

D'une façon plus détaillée, jusqu'à sa pleine maturité une mangue sur l'arbre constitue un système complexe de tissus interagissant entre eux et avec l'arbre. Selon Léchaudel (2004), cette phase est déterminante puisque les flux d'assimilats vont influencer fortement la composition et donc la qualité des mangues. Il démontre par ailleurs que ces flux sont variables selon le rapport feuille:fruit et les conditions hydriques de culture. Ils peuvent aussi modifier le métabolisme des composés secondaires dont dépend la qualité gustative et nutritionnelle. La croissance jusqu'à environ cent jours après la floraison et le mûrissement de la mangue utilisent les réserves carbonés et la photosynthèse en cours (Chacko *et al.*, 1982 ; Léchaudel, 2004). Selon la **figure 7**, différents changements physiologiques interviennent de façon complexe, progressive ou concomitante (Bernades Silva, 2007). Ces changements sont les suivants :

2.1.1 Activité enzymatique

a) Métabolisme carboné.

La pulpe du fruit joue le rôle d'un organe de stockage avec la mobilisation de nutriments carbonés solubles, des feuilles, organes 'source' vers le fruit, organe 'puits' contre un gradient de concentration, qui deviennent insolubles sous forme d'amidon. L'activité photosynthétique de la peau des fruits est négligeable en comparaison de celle des feuilles (Chauhan et Pandey, 1984). Dès 1943, Leley *et al.* repris en 1975 par Lodh et Pantastico notent une augmentation de l'amidon de 1 à 13 % du poids de matière fraîche (MF) du fruit dans les différents cultivars de mangues pendant la phase de maturation. Ces données sont confirmées par Bernades Silva (2007) qui note une progression de 2 à 7 % du poids de MF sur le cv. Keitt. Il suggère que l'amidon constituerait la source principale de carbone pour la libération de sucres solubles (**figure 7**). Cependant en 2003, il avait observé que la teneur en amidon des fruits immatures n'est pas corrélée avec la teneur en sucres solubles des fruits mûrs et qu'il existe un approvisionnement continu de la plante en éléments carbonés en fonction des différents cultivars. Ces travaux mentionnent entre 2.5 % à 9 % d'amidon du poids MF pour, respectivement, le cv. Van Dyke et le cv. Palmer à maturité mais il montre aussi qu'à ce stade, plus de la moitié de la teneur en amidon s'est déjà dégradée.

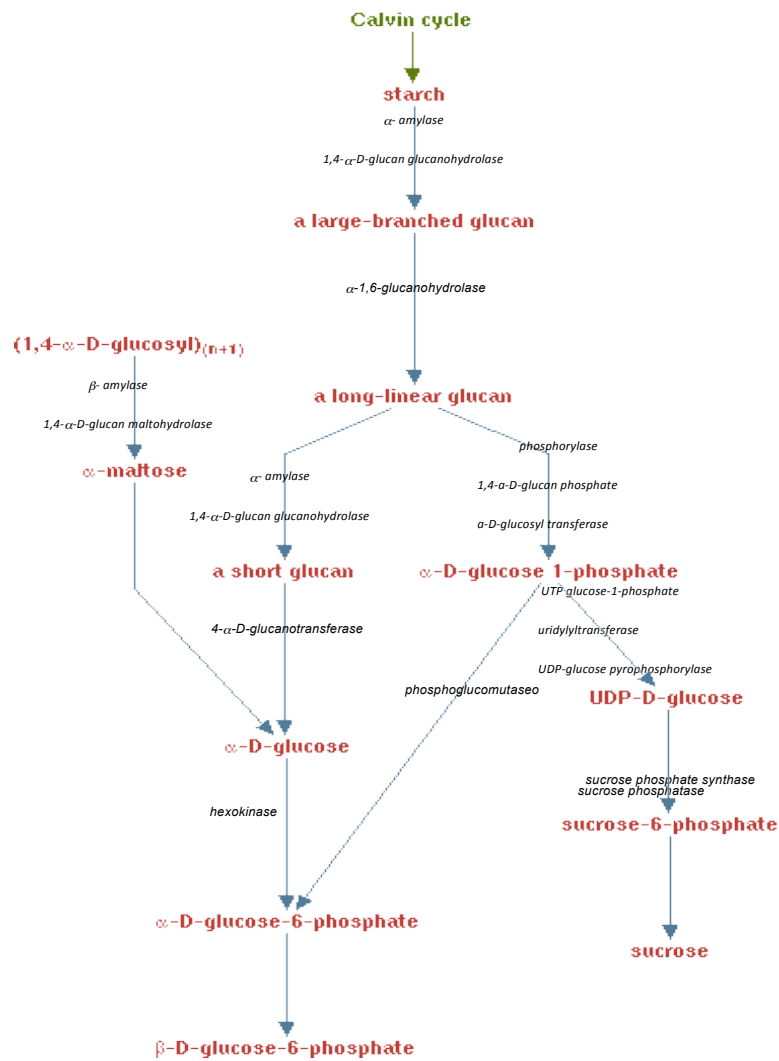


Figure 8. Métabolisme de dégradation de l'amidon et de synthèse du sucrose dans les chloroplastes des tissus des plantes par l'activité enzymatique (Plant Metabolic Network)

La **figure 8** illustre le métabolisme des sucres et de la dégradation de l'amidon qui sont régulés par différentes enzymes particulièrement l' α -amylase (Mattoo et *al.*, 1975) mais également la β -amylase et, l'amidon phosphorylase et d'autres isoamylases ou hydrolases pour le cv. Keitt (Bernades Silva, 2007). En effet si l' α -amylase est capable d'initier la dégradation des grains d'amidon et de promouvoir l'endo-hydrolyse des polysaccharides, d'autres enzymes peuvent contribuer à la dépolymérisation complète de ces derniers. Mattoo et Modi (1970) précisent cependant que le mésocarpe des mangues immatures des cv. Haden et cv. Alphonso contient également un inhibiteur de l' α -amylase qui permet l'accumulation d'amidon malgré l'activité croissante de l'amylase. Ce dernier n'est pas détectable dans les mangues mûres (Mattoo et Modi, 1969 ; Kamath et *al.*, 1987).

Pratiquement absents en début de croissance dans la pulpe des mangues, les sucres solubles, qui sont principalement le saccharose, le glucose et le fructose augmentent progressivement jusqu'à fin de la prématuration (Hulme, 1971). Bernades Silva (2007) mentionne que les quantités de sucres solubles varient aussi selon les cultivars à la fin de la maturation : 12 % de MF pour le cv. Haden et le cv. Tommy Atkins, 9.8 % pour le cv. Palmer et 7.5 % pour le cv. Van Dyke. Il observe que pour le cv. Keitt (**figure 7**), les sucres solubles augmentent jusqu'à atteindre 10 % du poids frais mais cette élévation affecte uniquement le fructose et le saccharose alors que le glucose décroît. Ces résultats sont confirmés par ceux de Léchaudel (2004) qui note pour le fructose et le saccharose des pics maxima, respectivement, de 0.4 g et 1.25 g /g de (MS) structurale au cours du mûrissement. Le saccharose est donc le sucre principal contenu dans les mangues mûres. C'est l'enzyme saccharose-phosphate synthase (EC : 2.4.1.14) qui est responsable de sa synthèse à partir des hexoses phosphates (Hubbard et *al.*, 1991 ; Castrillo et *al.*, 1992) comme le montre la **figure 8**. La saccharose-synthase (EC : 2.4.1.13) dans le cytosol catalyse, quant à lui, une réaction réversible qui va dégrader le saccharose et l'UDP en de l'UDP-glucose et du fructose. Les invertases (EC : 3.2.1.26) vont catalyser, dans le cytosol et les vacuoles, l'hydrolyse du diholoside en fructose et en glucose. Il semble que l'accumulation du saccharose pendant le mûrissement de la mangue résulte d'une balance entre dégradation et synthèse en fonction des stimuli reçus pendant cette phase (Castrillo et *al.*, 1992). Mukherjee (1997) suggère que la quantité de saccharose est trois à quatre fois supérieure du fait de l'hydrolyse de l'amidon et représente 15 à 20 % des Extraits Secs Solubles (ESS) dans une mangue mûre. Par ailleurs Chaplin et *al.* (1990) observent que le centre du mésocarpe a un ESS supérieur aux zones périphériques.

b) Dégradation des parois cellulaires

Des changements chimiques et structuraux des polysaccharides des parois cellulaires (polysaccharides pectiques, celluloses, hémicelluloses et protéines) vont également accompagner la phase de mûrissement et entraîner le ramollissement de la chair des mangues (Lazan et *al.*, 1986 ; Sozzi et *al.*, 1996). La dégradation des parois cellulaires du mésocarpe se fait sous l'effet conjoint de différentes hydrolases, enzymes de polymérisation des parois cellulaires et plus particulièrement la polygalacturonase (Chaimanee, 1992). Cette dernière est composée de deux isoenzymes : l'endopolygalacturonase pour la solubilisation des fractions de pectines et l'exopolygalacturonase pour catalyser la dégradation de cette fraction de pectine solubilisée pour une hydrolyse complète. Une variabilité d'activité de la polygalacturonase et de ses deux isoenzymes est observée chez différents cultivars. L'activité de la polygalacturonase du cv. Nam Doc Mai est soixante dix fois plus importante que celle du cv. Keitt (Lazan *al.*, 1986). De plus, Chaimanee (1992) démontre que pour ce même cultivar l'activité de l'exopolygalacturonase dépasse largement l'activité de l'endopolygalacturonase et ne peut pas expliquer à elle seule le ramollissement des mangues. Les cellulases ou endo- β -(1-3) glucanases, glycosidases et pectinesterases, autres enzymes des parois cellulaires ont également été impliquées dans le ramollissement des mangues respectivement pour la dégradation des fractions de pectines, des résidus des sucres neutres (galactosyl, arabinosyl et rhamanosyl) et des pectines méthylées (Roe et Bruemmer, 1981 ; Lazan et *al.*, 1986 ; Ali et *al.*, 1995).

Le ramollissement des tissus du mésocarpe se fait de l'intérieur vers l'extérieur (Chaplin et *al.*, 1990) et non en suivant longitudinalement l'axe du fruit comme cela avait été démontré sur dattes et avocats (Hasegawa et *al.*, 1969 ; Pesis et *al.*, 1978). Chaplin et *al.* (1990) observent cependant que la différence de fermeté entre le centre et les régions périphériques varie selon les cultivars, que le mésocarpe à l'apex du fruit est plus mou que le centre du fruit pour le cv. Keitt et que la région pédonculaire pour le cv. Kensington.

c) Synthèse de l'éthylène

La production d'éthylène est faible pendant la maturation du fruit. Le mûrissement du fruit de la mangue est initié par un pic climactérique. Ce dernier se traduit par une intensité respiratoire et un dégagement d'éthylène qui augmentent brutalement (Cua et Lizada, 1990) atteignant 0.02 à 0.08 ppm selon les différents cultivars (Burg et Burg, 1961). Ces phénomènes interviennent pour le cv. Keitt, comme le démontre la **figure 7**, respectivement

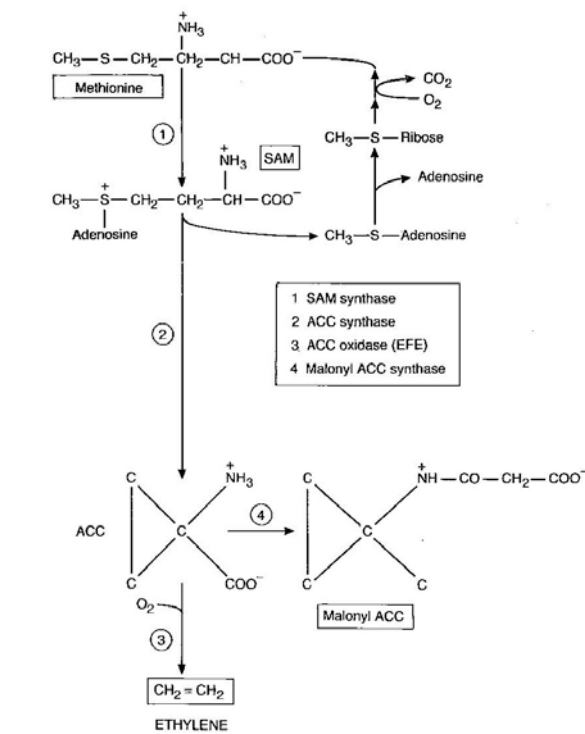


Figure 9. Biosynthèse de l'éthylène chez les végétaux supérieurs. Les numéros indiquent les différents enzymes impliqués. SAM, S-adenosyl méthionine ; ACC, acide carboxylique 1-amino cyclopropane (Gomez-Lim *et al.*, 1997).

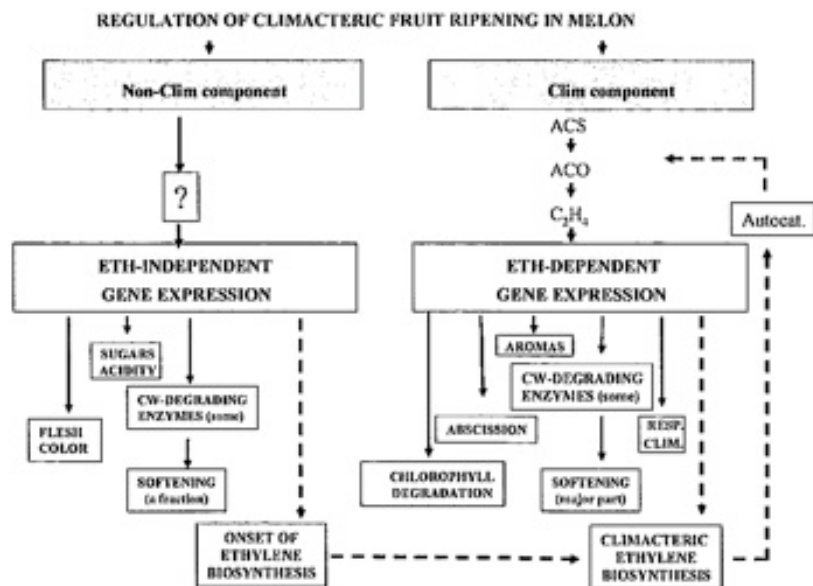


Figure 10. Régulation du mûrissement des fruits climactériques. Exemple du melon. Pech *et al.* (2008)

huit jours et trois jours après la récolte (Bernades Silva, 2007). La **figure 9** décrit l'activité de deux enzymes qui vont catalyser l'une, la conversion de la S-adenosylmethionine (SAM) en acide 1-aminocyclopropane-1-carboxylique (ACC) et l'autre, l'ACC en éthylène. Il s'agit de l'ACC synthase et de l'ACC oxydase.

Pech et *al.* (2008) mentionnent dans leur synthèse bibliographique que la désactivation de l'expression de l'ACC synthase et l'ACC oxydase permet une forte inhibition du mûrissement. Ainsi les gènes codant pour le mûrissement des fruits sont régulés par l'éthylène mais ces auteurs observent également une régulation indépendante de l'éthylène sur tomate et sur melon (**figure 10**). Ainsi dans ces recherches menées par Pech et *al.* (2008), la coloration de la pulpe, l'accumulation des sucres et la perte d'acidité de la pulpe seraient des paramètres de mûrissement indépendants de la production d'éthylène. Par contre le jaunissement de la peau, le ramollissement de la chair, le développement d'une zone d'abscission sur le pédoncule, la formation de l'arôme et l'accroissement de la respiration seraient partiellement ou totalement régulés par l'éthylène.

2.1.2 Les teneurs en acides organiques

Les acides contenus dans les vacuoles, principalement l'acide citrique et l'acide malique, augmentent pendant la première phase de la croissance des fruits puis diminuent ensuite durant la période de maturation principalement du fait de leur utilisation par la respiration ou de leur conversion en sucres (Medlicott et Thompson, 1985 ; Jacobi et *al.*, 2000 ; Kader, 2002).

Ainsi l'acide citrique chez le cv. Kensington augmente pendant les quatre vingt dix jours après la floraison pour atteindre un maximum de 0.35 à 0.50 g /g de MS structurale. La **figure 11** montre qu'elle va ensuite décroître en deçà de 0.10 g /g de MS structurale (Léchaudel, 2004). L'acide malique va diminuer de 0.5 à 0.1 g /g de MS structurale jusqu'à un minimum de 3.7 mg cent jours après la floraison mais les données sont variables en fonction des cultivars (Léchaudel, 2004). Chaplin et *al.* (1990) observent que le centre du mésocarpe du cv. Haden et du cv. Kensington est moins acide que les zones périphériques.

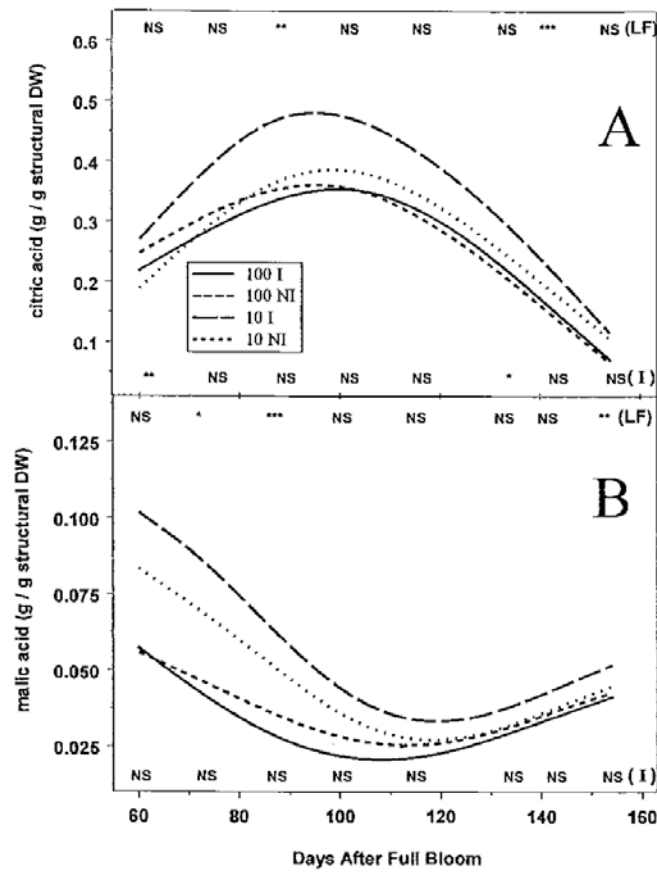


Figure 11. Evolution des acides organiques pendant la maturation des mangues du cv. Kensington selon un ratio de 100 feuilles pour un fruit ou de 10 feuilles pour un fruit en condition d'irrigation ou non (Léchaudel, 2004)

La pulpe de la mangue est également une excellente source de vitamine C. Les quantités d'acide ascorbique sont en général quatre à cinq fois plus importantes dans un fruit immature vert que dans un fruit coloré et mûr. Elles sont aussi une fois et demi supérieures dans la peau que dans la pulpe. Le noyau n'en contient pas (Hulme, 1971 ; Mukherjee, 1997). Les quantités varient de 25 mg à 79 mg /100 g de MF pour le cv. Haden, respectivement, mûre et immature et peut atteindre 165 mg à 250 mg /100 g de MF pour le cv. Alphonso.

D'une façon synthétique, Kim et *al.* (2007) considèrent qu'une mangue peut être qualifiée de verte mature, mi mûre et mûre à des taux d'acidité de leur poids de MF respectifs de 1.35 %, 0.86 % et 0.47 %.

2.1.3 Les teneurs en éléments minéraux

Simmons et *al.*, (1998) ont estimé les teneurs des mangues en minéraux principaux. Le potassium (K) représente 80 % de la totalité des minéraux suivi du magnésium (Mg) et du calcium (Ca). Ces composés qui sont stockés dans les vacuoles des cellules peuvent modifier l'équilibre ionique, ainsi que le pH engendrant une diminution de la concentration en acide malique (Léchaudel, 2004).

2.1.4 Les teneurs en pigments, antioxydants et protéines

Au niveau de la couleur, la peau et la chair évoluent du vert au jaune orange. Kader (2002) mentionne que ce changement de coloration intervient quand le fruit approche de la maturité et pendant le mûrissement à la suite des éléments suivants :

- dégradation des chlorophylles et plus particulièrement de la chlorophylle a (Medlicott et *al.*, 1986) qui est induite par la modification du pH, des conditions oxydatives et l'action de l'enzyme chlorophyllase,
- biosynthèse et/ou révélation des caroténoïdes (jaune et orange) dans les chloroplastes des cellules de la peau et de la chair des mangues, certaines caroténoïdes telles que la cryptoxanthin ou le lycopène peuvent également donner une coloration rouge,
- développement des anthocyanes rouge, bleu et violet spécifiques du fruit (essentiellement dans la peau).

Les premières traces de jaune dans la chair, en majorité dues aux caroténoïdes, apparaissent lorsque les épaules (**figure 2**) sont au même niveau que le point d'insertion du pédoncule. La chair devient ensuite orange, quand le point d'insertion du pédoncule se gonfle légèrement (Hulme, 1971). La coloration ainsi que le ramollissement de la chair se font selon un gradient centrifuge du centre vers l'extérieur. De nombreux cultivars et plus particulièrement les monoembryonnés développent sur la peau une tache de coloration attractive rose à rouge. Cette coloration est principalement due aux anthocyanes qui se développent quand les tissus sont exposés à la lumière (Whiley et Schaffer, 1997). La coloration des fruits à la maturité est dépendante du génotype (Mukherjee, 1997). Il faut cependant noter que la peau de certains cultivars reste verte avec un léger changement à vert clair ou jaune pendant le mûrissement (Hulme, 1971).

Le mûrissement des fruits est décrit comme un phénomène oxydatif qui nécessite l'élimination de radicaux libres tels que le H_2O_2 ou SO_2^- (Jimenez et al., 2002). Les antioxydants présents dans la chair des mangues (caroténoïdes, polyphénols dont anthocyanes et vitamines) vont permettre une protection des cellules du fruit par piégeage et l'élimination des radicaux libres (ROS) responsables des dégâts oxydatifs des lipides, protéines et acides nucléiques (Bravo, 1998). Malgré les variations des caroténoïdes et des polyphénols observées pendant le mûrissement des fruits, Talcott et al. (2005) constatent que la capacité antioxydante de la mangue demeure constante. A l'inverse, Kim et al. (2007) démontrent que pour le cv. Tommy Atkins, le mûrissement des fruits implique une décroissance de la capacité antioxydante totale jusqu'à 45 % entre un fruit vert mature et un fruit mûr. Les polyphénols sont observés dans les tissus pendant toutes les phases de développement du fruit. Ils accroissent pendant le grossissement du fruit et diminuent pendant le mûrissement (Selvaraj et Kumar, 1998). Kim et al. (2007) confirment une décroissance de 26 % des polyphénols totaux pendant le mûrissement. Parmi les polyphénols, des anthocyanes peuvent être présents. Berardini et al. (2005) mesurent des valeurs d'anthocyanes totales variant de 0.17 mg pour le cv. Haden à 0.50 mg /100 g de MS pour le cv. Kent. Il précise que la peau de la mangue ne contient pas beaucoup d'anthocyanes comparativement à d'autres fruits.

Le taux de protéines est de 0.5 à plus de 5 % du poids de MF chez les mangues avec des différences variétales et des différences entre la peau et la chair (Hulme, 1971). La peau contient en général plus de protéines que la chair. Les principaux acides aminés libres sont les suivants : l'acide aspartique, l'acide glutamique, l'alanine, la glycine, la serine et l' α

amino butyrique mais la liste n'est pas exhaustive (Hulme, 1971). Lopez-Gomes et Gomez-Lim (1992) précisent qu'il y a une modification de la synthèse de protéines pendant le mûrissement des mangues avec des accroissements et des décroissances dues aux activités enzymatiques inhérentes aux changements physiologiques et biochimiques.

La mangue est un fruit complexe dont le développement et le mûrissement sont régis par tout un ensemble de transformations physiologiques et biochimiques qu'il est nécessaire d'appréhender dans cette étude. En effet, ces modifications sont fortement influencées par de nombreux paramètres tels que le cultivar, les conditions environnementales et de culture, l'âge phénologique ainsi que le stade de maturité, ce qui risque d'engendrer une grande variabilité dans les résultats.

2.2 Détermination du stade de maturité et du point de coupe de la mangue

Dans l'optique de la commercialisation, la mangue doit être récoltée à un stade vert mature mais correspondant à un stade de maturité optimal. En effet, cueillie trop tôt, elle mûrit mal et se fripe, cueillie trop tardivement, le processus de sénescence est plus rapide réduisant ainsi sa durée de vie verte (entre la récolte et la crise climactérique) et pendant le transport et la conservation (De Laroussilhe, 1980).

Les travaux de recherche menés sur la physiologie pré et après récolte de la mangue permettent d'identifier et de préciser les changements physiques, chimiques et physiologiques pendant le développement du fruit mais, en général, les caractéristiques organoleptiques ne sont pas mentionnées. Des indices de maturité tentent de relier certains paramètres physiques ou chimiques mesurés à différents stades de développement à la qualité gustative des mangues mûres (Peacock et *al.*, 1986).

Différentes approches ont été réalisées pour la détermination du stade optimal de récolte des mangues :

- des méthodes d'évaluation visuelle (gonflement des épaules, couleur de la peau ou de la chair, observation de la chute des fruits) ou tactile (fermeté du mésocarpe) ont été

étudiées par Brown *et al.* (1981) et Chaplin *et al.* (1982). Elles restent cependant aléatoires car difficilement mesurables et quantifiables.

- des recherches de corrélation des critères précédemment cités avec des paramètres physico-chimiques ont été réalisées (Jha *et al.*, 2006). La coloration de la pulpe pourrait être un critère pour déterminer la maturité de la mangue car elle a pu être corrélée négativement avec la fermeté. Par contre, elle n'a pu être reliée au remplissage de l'épaule du fruit ou à l'ESS (Crisoto, 1994). La valeur optimale de ce dernier à la récolte varie selon les cultivars : 7.3° brix à 15.0° brix selon les cultivars (De Laroussilhe, 1980 ; Bezuidenhout, 1988). D'autres critères tels que la densité du fruit, le taux d'amidon, l'acidité titrable (TA) sont évoqués mais leurs modifications sont souvent trop graduelles pendant le développement du fruit pour être de bons indicateurs du stade optimal de récolte.
- Plus récemment, des méthodes non destructives ont été testées pour la détermination du stade de maturité optimal. Ainsi la spectroscopie visible sur le cv. Dashehari utilisent les relations entre le brix, la fermeté, la couleur et la réflectance de la pulpe (Jha *et al.*, 2007). De leur côté, Mizrach *et al.* (1999) et Mizrach (2000) montrent que les spectres d'ultrasons à travers le cv. Tommy Atkins diffèrent selon la fermeté, la teneur en sucres et en acides. Des études similaires mais utilisant les spectres à infrarouges sont menées par Schmilovitch *et al.* (2000) et Subedi *et al.* (2007) : Mais le coût de cette technologie et la variabilité des cultivars ne permettent pas de la généraliser et peu d'applications commerciales sont connues. Jha *et al.*, (2007) utilisent alors la couleur de la peau, mesurée avec un chromamètre portable et démontrent en effet que le ratio de Hunter a^*/b^* a une corrélation satisfaisante avec les teneurs en ESS de la chair du cv. Dashehari.

Cependant tous ces indices de maturité, peu précis au sens physiologique du terme rendent l'appréciation du stade de récolte optimal difficile (Peacock *et al.*, 1986).

Ainsi la définition d'un point de coupe optimal est encore très aléatoire en fonction des cultivars et des conditions de cultures. Si beaucoup d'études ont été menées, les applications restent encore très empiriques et récolter des mangues, de la même variété, ou de variétés différentes à un même stade phénologique reste très difficile. Une variabilité intrinsèque due au stade de maturité existe et il faudra la considérer dans ce présent travail.

3 Les traitements thermiques après récolte et la réponse physiologique des mangues

L'exposition aux basses et fortes températures peut être utilisée comme une méthode efficace pour l'allongement de la durée de vie des produits horticoles, pour une désinsectisation non chimique des fruits et un contrôle des maladies en après récolte.

Cependant de nombreux fruits sont sensibles aussi bien aux fortes qu'aux basses températures (Woolf et Laing, 1996 ; Woolf et *al.*, 1997 ; Woolf, 1997). D'une façon générale, l'incidence d'un stress de température sur un fruit est dépendante du rapport entre la température et la durée de l'exposition auquel le fruit est soumis (Inaba et Crandall, 1988). L'utilisation en après récolte de températures extrêmes peut engendrer des altérations biochimiques et physiologiques entraînant la destruction de tissus et des désordres physiologiques de divers fruits et légumes (Inaba et Crandall, 1988 ; An et Paull, 1990 ; Yahia et *al.*, 2007) dont la mangue (Thomas et Joshi, 1988 ; Chaplin, 1991 ; Acosta et *al.*, 2000 ; Ketsa et *al.*, 2000).

3.1 La conservation à basse température

La conservation à basse température est couramment utilisée pour allonger la durée de vie des fruits et légumes. En effet, la réfrigération va retarder les processus métaboliques qui contrôlent les changements physiologiques et physico-chimiques après récolte qui interviennent pendant la respiration et le mûrissement : réduction de la perte de poids, inhibition du pic de la respiration, retardement du mûrissement (Saucedo Veloz et *al.*, 1977).

Cependant le froid peut être également néfaste (Mitra et Baldwin 1997). Des dégâts physiologiques dus au froid ont été observés sur la peau des mangues à des températures inférieures à 10 °C (Saucedo Veloz et *al.*, 1977 ; Lizada et *al.*, 1984 ; Chaplin, 1991 ; Lederman et *al.*, 1997 ; Gonzales-Aguilar et *al.*, 2001). Certains cultivars sont mêmes sensibles au froid à des températures de 15 °C comme le cv. Alphonso (Thomas et Joshi, 1988) ou de 13 °C comme le cv. Kensington (Hubbert et Ledger, 1988).

Les principaux dégâts observés sont :

- des zones décolorées sur la peau,
- des ponctuations grises en dépression qui coalescent en plages noires,
- une accentuation de halos rouges autour des lenticelles.

Mais également des dysfonctionnements physiologiques tels que :

- une hétérogénéité de mûrissement,
- une sensibilité accrue aux attaques microbiennes,
- peu de saveur du fait d'une réduction de la teneur en sucres et d'une forte teneur en acides,
- peu de coloration de la chair du fait d'une faible teneur en caroténoïdes et donc une coloration terne de la peau,
- une réduction de l'activité de l'amylase ce qui se traduit par une mauvaise dégradation de l'amidon (Chattpar et *al.*, 1971),
- une décarboxylation fermentée avec la production d'aldéhydes et d'alcool surtout si le taux de CO₂ est élevé (Saucedo Veloz et *al.*, 1977).

Kane et Marcellin (1978) remarquent que sur les mangues du cv. Amélie, l'apparition de dégâts physiologiques dus au froid est corrélée avec une modification de la composition lipidique de la membrane de la mitochondrie des cellules et notamment une baisse de l'acide palmitoléique. Le changement de composition d'acides gras par peroxydation pourrait entraîner une modification de la fluidité et une réduction de la capacité oxydative des membranes mitochondriales (Shewfelt et Del Rosario, 2000). Différents travaux de recherche mettent en évidence que l'atmosphère contrôlée (Pesis et *al.*, 2000), les traitements à la chaleur (Chaplin et *al.* 1986 ; McCollum et *al.*, 1993), le jasmonate méthyle (Gonzalez-Aguilar et *al.*, 2001) et plus récemment l'acide 2,4-dichlorophenoxyacétique (Wang et *al.*, 2008) pourraient réduire l'incidence de dégâts physiologiques pendant la conservation à basse température.

L'incidence de dégâts physiologiques dus au froid est variable selon le stade de maturité et l'origine du fruit. Les conditions de culture ou de pré récolte pourraient avoir une influence sur le phénomène (Lizada, 1991).

3.2 La désinsectisation des mangues

La mangue est hôte de mouche des fruits (Tephritidae, *Bactrocera* sp., *Ceratitis* sp., *Anastrepha* sp.). Elle représente donc un risque quarantenaire pour beaucoup de pays importateurs (Heather et al., 1997 ; Ducamp Collin et al., 2007). Ainsi les mangues candidates à l'export doivent être traitées de façon à être indemnes de larves ou de mouches des fruits. La désinsectisation était réalisée par fumigation chimique au bromure de méthyle (Paull, 1994 ; Paull et McDonald, 1994 ; Ducamp Collin et al., 2007). Cependant, en 1984, ce produit a été banni à un niveau mondial sur les produits frais à l'export. Des traitements alternatifs de désinsectisation plus respectueux de la santé humaine et de l'environnement ont été recherchés.

La chaleur est utilisée en traitement après récolte des mangues pour la désinsectisation contre les mouches des fruits. La désinsectisation par la chaleur nécessite que le fruit soit maintenu à une certaine température interne pendant une période définie. Les fruits sont réchauffés par transfert à partir d'une source de chaleur qui peut être soit de l'air, soit de l'eau. Trois méthodes sont utilisées : 1) vapeur chaude ou Vapor Heat Treatment -VHT-, 2) air chaud et humide pulsé ou High Temperature Forced Air -HTFA-) et 3) bain d'eau chaude (Hot Water Treatment – HWT-. Les températures appliquées vont de 43 °C à 52 °C pendant des durées variables (Jacobi et al., 2001a ; Ducamp Collin et al., 2007).

Le froid est également utilisé pour la désinsectisation (0 à 1 °C) et la conservation des produits en après récolte. Mais la désinsectisation par le froid n'est pas toujours possible du fait de la faible tolérance des produits aux basses températures et des durées d'exposition de plusieurs jours (Heather et al. 1997).

3.2.1 Le traitement à la vapeur d'eau chaude (VHT)

Le traitement à la vapeur d'eau chaude (VHT) est réalisé avec de l'air pratiquement saturé en humidité qui passe à travers les fruits. Quand la température de la mangue atteint le seuil de condensation, la température du fruit s'élève par une énergie de transfert conductive. La chaleur du fruit en surface est transférée vers son centre (Jordan, 1993). Des applications

commerciales sont connues pour les mangues. Les synthèses bibliographiques de Jacobi et *al.* (2001a) et Ducamp Collin et *al.* (2007) recensent les protocoles utilisés pour accéder aux différents marchés. Pour le marché japonais, ces protocoles varient entre de 46.0 °C et 47.0 °C/ 10 à 15 min pour les mangues en provenance d'Asie et d'Australie. Pour le marché américain, les mangues d'origine mexicaines du cv. Manila subissent un traitement de désinsectisation de 43.3 °C/ 6 h.

3.2.2 Traitement à l'air chaud pulsé (HTFA)

Le traitement à air chaud humide et pulsé, implique un transfert de la chaleur de l'air, pulsé à travers les fruits, par conduction à travers la peau vers le centre du fruit. En fait le transfert de la chaleur de l'air vers la peau se fait beaucoup plus lentement que de la peau vers le centre du fruit (Jordan, 1993). La différence entre le traitement VHT et HTFA est la présence ou l'absence d'eau de condensation à la surface du fruit (Armstrong, 1996). Dans le cas de l'HTFA, l'humidité relative de l'air fluctue mais peut atteindre des minima de 30 % et le transfert de l'air se fait alors essentiellement par convection (Hallman et Armstrong, 1994). Une faible humidité relative peut accentuer la perte de poids pendant le traitement et induire un flétrissement (Williamson et Wilkenman, 1994 ; Ducamp Collin et *al.*, 2007). Des applications commerciales utilisant ce procédé technologique existent à travers le monde : pour les mangues mexicaines importées aux Etats-Unis, dans le Pacifique à Hawaii, aux Iles Cook (Armstrong, 1996) et en Nouvelle-Calédonie pour la désinsectisation des fruits et légumes candidats à l'export vers la Nouvelle-Zélande pour des traitements de 43.0 °C / 3 h 30 min ou 47.0 °C / 20 min.

3.2.3 Traitement en immersion dans de l'eau chaude (HWT)

Le traitement en immersion dans de l'eau chaude utilise le transfert de la chaleur de l'eau vers la peau du fruit, puis de la surface du fruit vers son centre. La vitesse de réchauffement du fruit est ainsi plus rapide et plus uniforme que par les méthodes utilisant l'air (Couey, 1989 ;

Tableau 3. Dégâts physiologiques sur cultivars de mangues causés par les traitements de désinsectisation (Jacobi, 2001a)

Cultivar	Dégâts physiologiques	Désinsectisation	Référence
cv. Tommy Atkins	Lenticelles noires	HWT 46 °C 120 min ou HWT 49 °C 60 min	Spalding et al. (1988)
cv. Kent	Lenticelles noires	HWT 46 °C 90 min ou HWT 46 °C 60 min	Spalding et al. (1988)
cv. Kensington	Brûlures sur peau Coloration de la peau non uniforme Couches et grains d'amidon dans le mésocarpe Cavités internes	HWT 47 °C 7.5-30 min	Jacobi et Wong (1992)
cv. Kensington cv. Irwin cv. Haden cv. Tommy Atkins	Brûlures sur peau	HWT 42-48 °C 30-90 min	Smith et Chin (1989)
cv. Kensington	Cavités internes Couches et grains d'amidon dans le mésocarpe	HWT 47 °C 25 min	Joyce et al. (1993)
cv. Keitt	Cavités internes près du noyau avec des tissus immatures autour	VHT 46 °C 3-4 h ou VHT 48 °C 5 h	Mitcham et McDonald (1993)
cv. Tommy Atkins	Ponctuations sur la peau	HTFA 51.5 °C 125 min	Miller et McDonald (1991a)
cv. Carabao	Couches et grains d'amidon dans le mésocarpe	VHT 46 °C 10 min	Esguerra et al. (1990)

Stewart et *al.*, 1990 ; Jordan, 1993 ; Ducamp Collin et *al.*, 2007). D'autres avantages sont notables tels que :

- technologie simple avec un coût réduit qui représente seulement 10 % du coût d'une VHT (Jordan, 1993),
- temps de traitement court,
- contrôle de la température interne du fruit facilité,
- élimination de pathogènes ou d'exsudats pouvant être présents sur la peau des fruits.

Ce traitement de désinsectisation a été très largement utilisé en application commerciale aux Etats Unis ou en Amérique Centrale à des températures comprises entre 43.0 et 46.7 °C avec des durées variant entre 35 et 90 min. Les protocoles varient en durées et en températures selon la forme et le poids des mangues (Ducamp Collin et *al.*, 2007). Ainsi il faut retenir qu'un calibrage sévère doit être réalisé avant traitement afin de minimiser les risques de dégâts. Cependant d'une façon générale, au delà de 46 °C, Sharp (1994) observe des dégâts sévères sur la peau des mangues. Kim et *al.* (2009) précisent que sur le cv. Tommy Atkins des traitements HWT 46.1 °C /70, 90 et 110 min n'engendrent aucun dégât externe sur la peau des mangues. Des résultats similaires avaient été observés par (Sharp, 1986 ; Sharp et *al.*, 1989). A l'inverse Ponce de Léon et *al.* (1997) précisent que le traitement HWT 46.1 °C/ 90 min provoque l'expansion de la cuticule de la peau des mangues du cv. Haden et donc l'apparition de microfissures et l'élargissement des pores. Des résultats similaires sur cuticule du cv. Kensington traité HWT 45.0 °C/ 30 min à cœur ont été observés avec une désorganisation et une discontinuité des cellules de l'épiderme et des cellules sous jacentes (Jacobi et Gowanlock, 1995). En Australie, il n'y a pas d'application commerciale de cette méthode pour la désinsectisation des mangues contre la mouche du Queensland car les fortes températures nécessaires pour la mortalité de tous les stades larvaires engendrent des dégâts sévères sur les mangues comme l'illustrent Jacobi et Wong (1992) dans le **tableau 3**.

Quel que soit le type de traitement utilisé, le protocole (température et durée) doit être adapté en fonction des cultivars, des provenances et des ravageurs à éliminer afin de maintenir la qualité commerciale des fruits.

3.2.4 Réponse physiologique des mangues aux traitements à la chaleur

La tolérance des fruits à des températures extrêmes varie selon les facteurs suivants : espèce, génotype, variabilité entre les espèces, cultivar, stade de maturité, taille du fruit, exposition aux différents facteurs environnementaux, facteurs en pré récolte, type de traitement (Lurie, 1998) mais également en fonction du niveau de stress subi par les tissus et les températures de conservation avant et après le traitement (Jacobi et *al.*, 2001b).

Dégâts externes et internes

Comme le décrit le **tableau 3**, les traitements de désinsectisation utilisant la chaleur à des températures variant entre 42 °C et 49 °C sont connus pour provoquer un certain nombre de dégâts externes sur la peau et internes dans la chair de certains cultivars de mangues (Jacobi et *al.*, 2001a). Sont observés principalement :

- des brûlures sur la peau,
- des lésions au niveau des lenticelles,
- des cavités internes dans la chair,
- des couches d'amidon ou grains d'amidon dans le mésocarpe de fruits mûrs.

a) Influence des écoulements de sève sur la peau des mangues à la récolte

Smith et Chin (1989) remarquent que les brûlures sur la peau sont plus sévères là où il y aurait eu des écoulements de sève et plus particulièrement sur les parties immatures des mangues traitées HWT 48.0 °C/ 30 min. De même sur le cv. Kensington traité HTFA à 56.0 °C/ 20 min, les dégâts du latex sur la peau des mangues sont exacerbés par le traitement à la chaleur (Jacobi et *al.*, 1995). Cependant, les travaux de Lizada et *al.* (1986) sur les mangues du cv. Carabao traitées HWT 51.0-55.0 °C/ 10 min, montrent que les incidences des brûlures sont sévères si la sève écoulée est sèche. A l'inverse Ducamp Collin et *al.* (2007) mentionnent que les mangues traitées en bain d'eau chaude le jour même de la récolte présentent sur leur peau plus de dégâts que si un délai de 24 à 48 h a été respecté entre la récolte et le traitement. Par ailleurs, Kosiyachinda et Mendoza (1984) comme Brown et *al.* (1986) attribuent l'exsudation du latex à la turgescence du fruit qui est variable pendant la journée. La pression de la sève est plus importante tôt le matin que dans l'après midi car une dilution des substances toxiques (laccase, terpènes et substances mucilagineuses) a alors eu lieu (Joël, 1980). Ainsi les écoulements de sève et donc les dégâts sur la peau des mangues traitées à la chaleur seraient variables selon l'heure de récolte et le délai entre la récolte et le traitement.

Tableau 4. Travaux ayant établi des classements de tolérance aux traitements à la chaleur en fonction des différents cultivars. Les cultivars sont classés du plus tolérant au moins tolérant (Jacobi, 2001a)

Cultivar	Désinsectisation	Référence
cv. Tommy Atkins, cv Keitt	HTFA 51.5 °C 125 min	McDonald et Miller (1994)
cv. Haden, cv. Davis Haden, cv. Pahiri, cv. Alphonso	HWT 51.7-52.2 °C 15-20 min	Pennock et Maldonaldo (1962)
cv. Zill, cv. Haden, cv. Sensation, cv. Kent, cv. Keitt	HWT 49-63 °C 0.5-15 min	Smoot et Segall (1963)
cv. Irwin, cv. Kensington, cv. Haden, cv. Strawberry	HWT 48 °C jusqu'à 90 min	Smith et Chin (1989)

b) Influence du cultivar

Jacobi *et al.*, (2001a), synthétisent dans leur revue bibliographique, les travaux de recherche mettant en évidence des classements de tolérance des mangues de cultivars aux différents traitements à la chaleur (**tableau 4**). Smith et Chin (1989) constatent que le cv. Irwin traité HWT 49.0 °C/ 90 min est plus tolérant à l'incidence de brûlures sur peau que le cv. Kensington Pride et que le cv. Haden. Campos et Yahia (1991) n'ont observé aucun dégât sur le cv. Keitt traité HWT 46.0 °C/ 60 à 90 min et même à des températures bien supérieures de 52.0 °C/ 20 min (traitement HTFA). Jacobi *et al.* (1995) n'observent aucun dégât sur le cv. Kensington. Par contre, Mitcham et McDonald (1993) notent des dégâts de brûlures sur le cv. Keitt traité VHT entre 46.0 et 48.0 °C/ 3 à 5 h.

Ainsi, de nombreux travaux et résultats de recherche sont disponibles mais la complexité réside dans la comparaison par rapport aux conditions des traitements. Par ailleurs, même si des différences de réponse des cultivars existent, de nombreux autres facteurs interviennent tels que, ici, la technologie, la température et la durée du traitement et ceux qui ont pu être cités précédemment (Lurie, 1998 ; Jacobi *et al.*, 2001a).

c) Influence du stade de maturité

Jacobi *et al.*, (2001c) observent que plus la mangue du cv. Kensington est à un stade de maturité avancé à la récolte, moins elle est sensible à ces brûlures et moins elle présente au sein de son mésocarpe de couches ou grains d'amidon non hydrolysés à la suite d'un traitement HWT à 47.0 °C/ 15 min. Des résultats similaires ont été observés par Esguerra et Lizada (1990), et Esguerra *et al.*, (1990) sur le cv. Carabao suite à un traitement VHT 46.0 °C/ 10 min. Sur le cv. Keitt immature, Sharp *et al.*, (1989), Segarra-Carmona *et al.* (1990) observent un flétrissement et de légères ponctuations en dépression sur la peau après un traitement HWT 46.1 °C/ 65 à 90 min. Kosiyachinda *et al.* (1984) attribuent ce flétrissement de peau à une perte en eau plus importante sur mangue immature du fait d'une structure de peau moins développée et une utilisation plus accrue à travers la respiration des sucres et acides organiques (Jacobi *et al.*, 2000). De plus, Joshi et Shiralkar (1977) démontrent, chez les mangues matures, une activité plus faible des polyphénoloxydases responsables du brunissement des tissus. Par ailleurs Jacobi *et al.* (1996) soulignent que pour le cv. Kensington traité VHT 46.5 °C/ 10 min, les mangues immatures manifestent une altération dans le processus de mûrissement. Ces résultats vont dans le sens de ceux de Lakshminarayana (1973) et Medlicott *et al.* (1988) qui constatent que les

Tableau 5. Description des perturbations sur le mûrissement des mangues suite aux traitements de désinsectisation (Jacobi, 2001a)

Cultivar	Réponse de mûrissement	Désinsectisation	Référence
cv. Carabao	Augmentation du taux de respiration Jaunissement de la peau	VHT 46 °C 10 min	Esguerra et <i>al.</i> (1990)
cv. Keitt	Jaunissement de la peau Coloration uniforme	HWT 46.1 °-46.7 °C 20-60 min	Segarra Carmona et <i>al.</i> (1990)
	Idem	HWT 46 °C 60-120 min HWT 49 °C 60 min	Spalding et <i>al.</i> , (1988)
	Idem + perte de fermeté	HTFA 46 °C 3h.25 ou HTFA 48 °C 2.5 h ou HWT 44 °C 25 min	Couey (1989)
	Augmentation du taux de respiration	HTFA 46 °C 3-4 h HTFA 48 °C 5 h	Mitcham et McDonald (1993)
cv. Palmer	Jaunissement de la peau	Pré traitement 38 °C 48 h	Pesis et <i>al.</i> (1997)
	Jaunissement de la peau Coloration uniforme Perte de fermeté	HTFA 46 °C 3 h 25 min ou HTFA 48 °C 2.5 h ou HWT 44 °C 25 min	Couey (1989)
cv. Tommy Atkins	Jaunissement de la peau	HWT 46 °C 60-120 min HWT 49 °C 60 min	Spalding et <i>al.</i> (1988)
	Idem + coloration uniforme + perte de fermeté	HTFA 46 °C 3 h 25 min ou HTFA 48 °C 2.5 h ou HWT 44 °C 25 min	Couey (1989)
	Augmentation du taux de respiration	HTFA 46 °C 3-4 h HTFA 48 °C 5 h	Mitcham et McDonald (1993)
	Perte de fermeté	HTFA 51.5 °C 125 min	Miller et McDonald (1991a)
cv. Kensington	Jaunissement de la peau	Pré traitement 38 °C 48 h	Pesis et <i>al.</i> (1997)
	Augmentation du taux de respiration Jaunissement de la peau	VHT/HWT 47 °C 7.5-30 min ou	Jacobi et Giles (1997) Jacobi et <i>al.</i> (1996)
	Perte de fermeté	VHT 46.5 °C 10 min VHT 47 °C 15 min	

traitements à la chaleur entraînent un jaunissement de la peau des mangues et plus particulièrement si le fruit est à un stade de maturation physiologique plus avancé car sa capacité de dégradation de la chlorophylle et/ou de synthèse des caroténoïdes est plus grande (Lizada *et al.*, 1986 ; Medlicott *et al.*, 1986a ; Sankat *et al.*, 1994).

A l'inverse Jacobi *et al.* (2001c) suggèrent que les lenticelles des mangues les plus matures ont des cellules en périphérie moins prédisposées, parce que moins fonctionnelles, à subir des augmentations de pression osmotique pendant le traitement en bain d'eau chaude comparativement à des mangues moins matures.

Il semble donc qu'il ait effectivement une relation avec l'âge physiologique du fruit et sa tolérance aux traitements à la chaleur mais les différents résultats de recherche mettent en évidence des réponses variant selon les cultivars.

d) Influence des facteurs environnementaux

Certains travaux de recherche suggèrent que la sensibilité aux brûlures des mangues peut être reliée aux précipitations au moment de la récolte. En effet, si les mangues du cv. Kensington sont récoltées sous la pluie, les dégâts de brûlures sur peau après trempage 52.0 °C/ 5 min sont plus importants (Johnson *et al.*, 1992 ; Cooke et Johnson, 1994). De même, si ces mêmes mangues sont récoltées après plusieurs jours de pluie, les brûlures mais également l'incidence de couches et grains d'amidon dans le mésocarpe sont plus sévères après un traitement VHT 46.5 °C/ 10 min (Jacobi et Wong, 1993 ; Jacobi et Giles, 1997).

Perturbation de la physiologie du mûrissement

D'après différents auteurs, les traitements à la chaleur perturbent le mûrissement des mangues de façon variable : inhibition, accélération ou ralentissement (**tableau 5**).

Les fruits traités à la chaleur entre 30 et 50 °C pendant des durées variables mûrissent moins vite (Woolf *et al.*, 1995 ; Woolf et Lay-Yee, 1997 ; Yahia *et al.*, 2007). Ce ralentissement a aussi été observé par Mitcham et McDonald (1997) sur le cv. Tommy Atkins et le cv. Keitt traités VHT 46.0 à 50.0 °C /2 à 5 h. Constaté également sur d'autres fruits, il pourrait être dû à l'inhibition de la respiration et de la production d'éthylène ainsi qu'à la réduction de la synthèse des protéines lors des traitements à la chaleur (Eaks, 1978 ; Lurie et Klein, 1990 ; Lurie et Klein, 1991 ; Ferguson *et al.*, 1994).

a) La coloration de la mangue

Les traitements à la chaleur accélèrent le jaunissement de la peau des mangues et améliorent l'uniformité de la coloration (**tableau 5**). Ces phénomènes pourraient être associés à une accélération de la synthèse des caroténoïdes et de la dégradation de la chlorophylle par la chlorophyllase (Jacobi et *al.*, 2001a). Ils ont été également observés sur d'autres fruits à la suite de traitements à la chaleur compris entre 35 et 40 °C mais seule la disparition de la chlorophylle a été suggérée sans qu'on évoque la synthèse *de novo* de caroténoïdes (Seymour et *al.*, 1987 ; Lurie et Klein, 1990 ; 1991). A l'inverse, une inhibition de la synthèse des lycopènes et de la dégradation de la chlorophylle ont été suggérées sur tomate traitée HA entre 36 et 40 °C (Sozzi et *al.*, 1996 ; Yahia et *al.*, 2007). Lurie et *al.* (1996) démontrent que ce phénomène est dû à l'inhibition de la transcription de l'ARNm pour la lycopène synthase mais que cette inhibition est levée dès que le stress disparaît.

En ce qui concerne le mésocarpe des mangues, Mitcham et McDonald (1997) notent une réduction de la vitesse de coloration sur le cv. Keitt et le cv. Tommy Atkins traités VHT 46.0 et 50.0 °C /2 à 5 h. Cependant, Talcott et *al.* (2005) ne remarquent aucune différence significative dans la coloration de la pulpe entre des mangues du cv. Tommy Atkins traitées HWT 50.0 °C/ 60 min et des mangues non traitées.

Toutefois, d'autres travaux de recherche décrivent des phénomènes inverses. Sur le cv. Keitt traité HWT 46.0 °C/ 60 et 90 min, une augmentation du taux de carotène est observée dans la chair mais le traitement a été suivi d'une conservation de vingt et un jours à 10 °C et une semaine à 20 °C (Campos et Yahia, 1991).

Ainsi, les effets du traitement sur la coloration des fruits sont très disparates. Sozzi et *al.* (1996) soulignent que ces réponses sont dépendantes de la température mais également de la durée du traitement et que la vitesse d'augmentation de la température a également une forte influence.

b) La fermeté des mangues

Les traitements à la chaleur pourraient considérablement modifier l'activité des enzymes de dégradation des parois cellulaires et affecter ainsi leur composition (Lurie, 1998). Lazan et *al.* (1986) mentionnent, dans leur synthèse bibliographique, des travaux de recherche mettant en avant une réduction de l'activité des polygalacturonases, qui solubilisent les pectines, sur la mangue du cv. Harumanis traitée HWT 55.0 °C/ 5 min. Sozzi et *al.* (1996) sur tomate

et Vicente et *al.* (2005) sur fraise mentionnent plus précisément une réduction de l'activité des α et β galactosidases, des endo-1,4- β -glucanases et des β -xylosidases après des stress de température respectivement de 36 °C à 40 °C et de 45 °C. La réduction de ces activités enzymatiques pourrait ainsi contribuer à différer la dégradation des polymères des parois cellulaires (Vicente et *al.*, 2005). Ils suggèrent que l'effet des traitements à la chaleur sur ces enzymes pourrait être le ralentissement de la solubilisation des pectines par la réduction des ruptures des chaînes de pectines et l'accroissement d'un nombre de sites pour la formation de pont calciques dans les parois cellulaires. Woolf et *al.* (1997a) démontrent sur kaki, une réduction de la solubilisation des polyuronides suite à des traitements à la chaleur HA 47.0 °C/ 30 min. Il faut cependant signaler que les activités de la polygalacturonase et des polyphénols oxydases solubles sont sensibles à la chaleur mais ne le sont cependant pas à un niveau tel que le ramollissement puisse en être affecté (Lazan et *al.*, 1986). Cependant, Lurie et Klein (1990) démontrent sur tomate que les ARNm pour la synthèse des polygalacturonases sont absentes pendant le traitement de un à trois jours à 38 °C. Ce phénomène n'est cependant pas irréversible mais dépend de la durée du stress pour des températures variant entre 38 et 40 °C (Lurie et Klein, 1992 ; Mitcham et McDonald, 1992). Ainsi l'inhibition temporaire du ramollissement de la chair par certains traitements à la chaleur est utilisé comme un effet bénéfique (Lurie, 1998 ; Paull et Chen, 2000) et notamment pour la fraise (Vicente et *al.*, 2005).

A l'inverse, d'autres travaux de recherche mettent en évidence une perte rapide de fermeté suite à un stress de température de 36 °C et de 40 °C. Ainsi Campos et Yahia (1991) montrent que les mangues du cv. Keitt traitées HWT 46.0 °C/ 60 et 90 min puis conservées vingt et un jours à 10 °C et une semaine à 20 °C réagissent par un accroissement de l'activité de la polygalacturonase. De même, Shellie et Mangan (1994) rapportent que des mangues et papayes traitées HTFA 50.0 °C/ 4 h perdent très rapidement leur fermeté.

c) Le métabolisme carboné

La présence de couches ou grains d'amidon non hydrolysés dans le mésocarpe des mangues après un stress à la chaleur est un dégât observé sur un grand nombre de cultivars :

- cv. Carabao (Neuvo et *al.*, 1984 ; Esguerra et *al.*, 1990 ; Esguerra et Lizada, 1990),
- cv. Alphonso (Katrodia, 1988 ; Katrodia et Kane 1988 ; Katrodia et Sheth, 1988),
- cv. Keitt (Mitcham et McDonald, 1993),
- cv. Kensington (Joyce et *al.*, 1993 ; Jacobi et *al.*, 1995 ; Jacobi et Giles, 1997).

Ainsi, les traitements à la chaleur pourraient perturber le métabolisme carboné (inhibition de la dégradation de l'amidon) des mangues (Joyce *et al.*, 1993). Les mangues du cv. Kensington traitées HWT 45.0 °C/ 30 min, et présentant des dégâts physiologiques internes, ont une teneur en amidon plus élevée (jusqu'à 15 mg/ g de MF) que les mangues non endommagées (Jacobi *et al.*, 1995). L'hypothèse avancée, pour expliquer cette perturbation du métabolisme carboné, serait une modification de l'activité enzymatique (Jacobi *et al.*, 2001b). Pour Katrodia (1988) si les fortes températures au champ ne sont pas assez élevées pour engendrer un stress modifiant la synthèse protéique elles peuvent cependant suffire pour réduire l'activité enzymatique et donc l'ESS.

d) La respiration et la production d'éthylène

Les traitements à la chaleur peuvent réduire ou augmenter les pics climactériques de respiration ou de production d'éthylène pendant et après le traitement en fonction de leur température et de leur durée (Eaks, 1978 ; Klein et Lurie, 1990). Sur mangues, une augmentation du métabolisme de la respiration est observée sur le cv. Keitt, et sur le cv. Haden traité HWT 46.0 °C/ 60 et 90 min (Campos et Yahia, 1991 ; Ponce de Léon *et al.*, 1997). De même, Ketsa *et al.* (1999) démontrent sur le cv. Nam Doc Mai soumis à 38.0 °C/ 3 jours, que l'intensité respiratoire est deux fois plus élevée que celles de mangues maintenues à 25°C. Cette augmentation de l'intensité respiratoire s'accompagne en général d'une perte de poids plus importante.

A l'inverse, une réduction de la biosynthèse d'éthylène intervient pendant et après les traitements à la chaleur. Mitcham et McDonald (1997) observent que les traitements VHT 46.0 à 50.0 °C/ 2 à 5 h sur le cv. Keitt diminuent l'ACC oxydase immédiatement après traitement mais que cette inhibition n'est pas irréversible et que l'enzyme peut être réactivée trois jours après. L'ACC oxydase serait plus sensible au stress thermique que l'ACC synthase (Yu *et al.*, 1980 ; Field, 1984). Mais ce résultat est remis en cause par Biggs *et al.* (1988) car à l'inverse, ils démontrent que l'ACC synthase est plus sensible à la chaleur mais par contre récupère plus vite si le niveau du stress diminue. Par ailleurs, Seymour *et al.* (1987) ainsi que Yang *et al.*, (1990) sur banane et tomate respectivement, remarquent que pendant la durée du stress à la chaleur, les produits ne réagissent pas non plus à de l'éthylène exogène suggérant ainsi l'inactivation des récepteurs par la chaleur.

Une accumulation en atmosphère interne de CO₂ (13 %) et de O₂ (2 %) est observée dans le cv. Keitt traité VHT 46.0 à 50.0 °C/ 2 à 5 h (Mitcham et McDonald, 1997). Cette forte concentration interne de CO₂ suite aux traitements à la chaleur est citée par d'autres auteurs (Ketsa et *al.*, 1999) sur mangue et sur d'autres fruits (Klein et Lurie, 1990 ; Miller et McDonald, 1991b ; Woolf et *al.*, 1995). Les cavités internes observées dans les tissus du mésocarpe du cv. Kensington traité HWT pourraient être dues à une accumulation de gaz entraînant une rupture des cellules (Jacobi et Gowanlock, 1995). Mitcham et McDonald (1997) remarquent également une concentration plus forte en éthanol, méthanol et acétaldéhyde (confirmant ainsi des conditions anaérobiques) ainsi qu'une augmentation de la perméabilité membranaire sur le cv. Tommy Atkins traité VHT 46.0-50.0 °C/ 2 à 4 h. Cette perméabilité diminue jusqu'à revenir au niveau des témoins trois jours après le traitement. Esguerra et Lizada (1990) suggèrent que le traitement VHT pourrait créer une déplétion d'oxygène qui, combinée avec de fortes températures, engendrerait des désordres physiologiques.

e) Caractéristiques biochimiques

Des travaux de recherche ont démontré que la teneur en sucres ne variait pas et que l'acidité diminuait dans les conditions suivantes :

- sur pomme à 38.0 °C/ 3-4 jours (Klein et Lurie, 1990),
 - sur nectarine traitée HTFA à 41.0-46.0 °C/ 1 ou 2 jours (Lay Yee et Rose, 1994),
- ou restait inchangée suite aux traitements à la chaleur :
- sur tomate traitée HA 38.0 °C/ 2-3 jours (Lurie et Sabehat, 1997),
 - sur pomelo traité HWT 43.5 °C/ 4.5 h (Miller et McDonald, 1992).

Cependant les résultats sont très variables et très controversés en fonction des produits et des traitements. Les traitements à la chaleur pourraient améliorer les teneurs en sucres mais Klein et *al.* (1997) attribuent davantage cette perception à la réduction de TA. Kim et *al.* (2009) mettent en évidence que le traitement HWT 46.1 °C/ 70, 90 ou 100 min sur le cv. Tommy Atkins n'a aucun effet sur la teneur en ESS. Ce résultat confirme les travaux de Jacobi et *al.* (2000) sur le cv. Kensington traité HWT 45.0 °C/ 30 min et 47.0 °C/ 15 min.

Le traitement HWT 46.0 °C/ 75 min n'a pas d'influence majeure sur la concentration en acide gallique (principal polyphénol présent dans la chair des mangues) et la capacité antioxydante totale des fruits du cv. Tommy Atkins (Kim et *al.*, 2007). Cependant Talcott et *al.* (2005)

remarquent une augmentation des tannins hydrolysables sur le cv. Tommy Atkins traité HWT 50.0 °C/ 60 min mais notent avoir rencontré des différences notables entre les cultivars et leur provenance. Plus récemment, Kim et *al.* (2009) observent que la concentration en acide gallique diminue à mesure que les durées de traitement HWT 46.1 °C augmentent de 70 à 100 min. Il note également que les gallotannins hydrolysables augmentent sensiblement mais seulement pour le traitement HWT 46.1 °C/ 70 min. Cet accroissement pourrait être lié à une hydrolyse enzymatique des grosses molécules de tannins non identifiées mais présentes dans la chair des mangues (Berardini et *al.*, 2004) ou encore à une synthèse *via* des gallotransférases présentes également dans les mangues (El Ansari et *al.*, 1971). Les composés phénoliques solubles totaux (l'acide ascorbique, les sucres réducteurs et certaines protéines solubles) diminuent en réponse à un traitement HWT 46.1 °C et à l'augmentation des durées d'exposition à ce traitement. A l'inverse, les composés phénoliques des contrôles non traités augmentent du fait de la transformation de l'amidon en sucres par l'activité enzymatique de l'amylase (Kim et *al.*, 2009). Ainsi, les hypothèses que les traitements à la chaleur pourraient réduire l'activité enzymatique de l'amylase (Katrodia, 1989) et les teneurs en vitamines C par oxydation sont confortées (Lee et Kader, 2000).

Les mangues ont une faible capacité antioxydante hydrophile (Wu et *al.*, 2004). En fait la majeure partie de leur capacité antioxydante est corrélée à leur contenu polyphénolique. Cependant les changements de ce contenu du fait du traitement à la chaleur HWT 46.1 °C/ 70 à 110 min ne sont pas suffisants pour affecter la capacité antioxydante totale juste après le traitement. Toutefois une conservation de quatre jours à 25 °C après le traitement engendre une perte plus rapide de la capacité antioxydante des mangues traitées (Kim et *al.*, 2009).

Pourtant certains travaux sur tomate démontrent que les traitements à la chaleur ont permis d'accroître l'activité antioxydante totale mais sans changement des contenus phénoliques et flavonoïdes totaux bien qu'une baisse de la vitamine C ait été observée à partir de 38.0 °C/ 24 h (Dewanto et *al.*, 2002). Trois jours à 37 °C permettent d'augmenter l'activité enzymatique de la catalase, de l'ascorbate peroxydase et de la superoxyde dismutase sur mandarine (Sala et Lafuente, 2000). Ces enzymes vont être utiles dans l'élimination des ROS et ainsi augmenter la capacité antioxydante des mangues

Ainsi d'une façon générale, les traitements à la chaleur occasionnent des dégâts physiques et physiologiques sur les mangues. Ils ont été largement décrits. Ceci étant, les réponses physiologiques sont observées dans des conditions qui ne sont pas toujours identiques :

nombreux cultivars, stades de maturité non homogènes, périodes de récolte variées et également des conditions environnementales difficiles à contrôler. C'est pourquoi, surtout pour les perturbations physiologiques liées aux traitements, beaucoup de résultats semblent diverger et se contredire confirmant les interactions entre les facteurs de variation.

3.3 Les conditionnements thermiques

L'induction d'un stress peut quelquefois induire une résistance ou une tolérance à un autre stress (Lurie, 1998). Ainsi, certains traitements thermiques maîtrisés, appelés conditionnements ou prétraitements, peuvent avoir des effets bénéfiques, par l'induction de réactions naturelles de défense des fruits au préalable d'un autre stress. Ces effets bénéfiques sont le contrôle des insectes (Yahia et Ortega-Zaleta 2000) et des pourritures, la réduction des dégâts physiologiques (faible développement de la couleur, de lésions sur peau, diminution du stress oxydatif causés par de basses températures (Yahia et *al.*, 2007) et le retardement du mûrissement et de la sénescence des fruits (Fallik, 2004) et (Klein et Lurie, 1992) sur pomme.

Les références bibliographiques semblent indiquer que la gamme de température de ces conditionnements se situerait entre 38 et 42 °C (Lurie, 1998 ; Klein et Lurie, 1992) pour toute une gamme de fruits (Paull et Chen, 1990 ; Lurie et Klein, 1990, 1991 ; Salveit, 1991 ; Sabehat et *al.*, 1996 ; Florissen et *al.*, 1996 ; Lurie et *al.*, 1997 ; Woolf et Lay-Yee, 1997 ; Hofman et *al.*, 2002) dont la mangue (McCollum et *al.*, 1993 ; Joyce et Shorter, 1994 ; Jacobi et *al.*, 1995 ; 2000 ; 2001a ; 2001b ; 2001c).

Des conditionnements de 38 jusqu'à 40 °C avant des désinsectisations HWT de 45.0 °C/ 30 min et 47.0 °C/ 15 min à cœur de fruit ont permis d'éliminer complètement les dégâts dus au traitement sur le cv. Kensington (Jacobi et *al.*, 1995 ; 2000). Cette dernière suggère qu'un conditionnement à 40.0 °C/ 4 h pourrait modifier l'âge physiologique des mangues du cv. Kensington en favorisant l'utilisation des acides organiques et l'hydrolyse de l'amidon. Ce changement d'âge physiologique permettrait aux mangues immatures de bénéficier de la même thermotolérance que celle observée chez les mangues matures. Elle mentionne également la grande probabilité d'une synthèse de protéines de choc thermique à 40 °C qui

protégerait les cellules membranaires et la dénaturation des protéines ainsi que stabiliserait leur fonction et structure avant et après le traitement de désinsectisation.

D'une façon générale, une fois ces prétraitements d'endurcissement réalisés, un transfert immédiat des fruits aux hautes ou basses températures des traitements après récolte (désinsectisation ou conservation longue durée) doit être effectué. En effet Jacobi et *al.* (2001b) ont démontré que la thermotolérance induite à 40 °C sur mangue du cv. Kensington était perdue avec des durées croissantes à 22 °C avant une désinsectisation HWT 47.0 °C/ 15 min. De même, Sabehat et *al.* (1998) observent que l'effet bénéfique d'un conditionnement thermique de deux jours à 38 °C sur une conservation à basse température à 2 °C peut être perdu si plus de quatre jours sont écoulés entre le pré traitement et la température de conservation. De même Woolf et *al.* (2004) sur avocat, mentionnent qu'après 5 jours de conservation à 20 °C, l'effet bénéfique du traitement d'endurcissement de 38 °C de 0 à 60 min, sur la réponse physiologique des avocats au traitement à la chaleur HWT 50 °C/ 10 min, est perdu.

Si ces conditionnements thermiques assurent une protection des fruits en après récolte, une exposition suffisante au soleil des fruits sur l'arbre avant la récolte ne pourrait-elle induire une réaction bénéfique sur le comportement des fruits en après récolte ? (Woolf et Ferguson, 2000).

3.4 Influence des facteurs pré récolte sur le comportement des fruits en après récolte

En horticulture, les pratiques culturales et l'étude des productions agricoles sont traditionnellement séparées en deux disciplines distinctes. La première relève du domaine des physiologistes en pré récolte et l'autre des physiologistes en après récolte. Cependant, il est maintenant reconnu que les facteurs de pré récolte, environnementaux et culturaux conditionnent la qualité des produits en après récolte (Monselise et Goren, 1987) et leur comportement pendant la maturation et la sénescence (Ferguson et *al.*, 1999). En effet, de nombreux facteurs de production, tels que la situation géographique, le type de sol, le climat, le cultivar, la fertilisation et l'irrigation ont un impact important sur la qualité des fruits tempérés (Beverly et *al.*, 1993 ; Ferguson et *al.*, 1998) mais également tropicaux et subtropicaux (Monselise et Goren, 1987) et sur leurs performances en conservation, les processus de maturation et de sénescence, l'incidence de désordres physiologiques (Ferguson et *al.*, 1999).

Les conditions climatiques telles que la température, l'humidité, la longueur du jour l'ensoleillement, le vent et les pluies sont cependant difficilement contrôlables. Elles influent individuellement mais également en relation les unes avec les autres (Emongor et *al.*, 1994). De plus chaque facteur a toujours un rôle bénéfique dans une certaine mesure mais également néfaste dans une autre mesure (Monselise et Goren, 1987). A travers l'ensoleillement, la température interne du fruit, à un moment donné, est la résultante d'un ensemble de facteurs : lumière, intensité de radiation, humidité relative, vitesse du vent, durée d'exposition continue ou discontinue au soleil, et/ou à l'ombre, densité et conductivité des tissus. Tous ces éléments peuvent donner des réponses différentes sur le comportement des fruits et légumes en après récolte (Ferguson et *al.*, 1998).

Les travaux de Lurie (1998) suggèrent que l'exposition pré récolte des fruits à de fortes températures pourrait avoir un effet sur une tolérance en après récolte. Woolf et *al.* (1999a, 1999b, 2000) et Woolf et Ferguson (2000) démontrent qu'une tolérance effective en après récolte est observée envers les températures élevées et basses pour les avocats qui avaient été directement exposés au soleil avec des températures de chair allant jusqu'à 40 °C. Une réduction des dégâts physiologiques dus au froid à 0 °C est observée sur les faces exposées de l'avocat du cv. Hass et d'une façon générale sur les fruits exposés comparativement à des fruits à l'ombre. Un même comportement est décrit après des traitements en après récolte à l'eau chaude à 50 °C : Paull (1995) démontre que la moyenne des températures internes des papayes, trois jours avant la récolte, est corrélée avec l'accroissement de leur résistance aux dégâts dus à des températures de 49 °C. D'autres observations allant dans ce sens ont été faites (Lipton et Aharoni, 1979) sur melon, (Brooks et Fisher, 1926 ; Ferguson et *al.*, 1998) sur pomme.

Cependant aucune donnée bibliographique ne concerne directement les mesures de températures internes des mangues en pré récolte. Les observations sur un effet de ces dernières sur le comportement après récolte des mangues ne sont pas mentionnées dans la littérature. Les références relatives à d'autres fruits seront donc citées dans la suite du document. Par ailleurs, aucun travail de recherche concernant les délais entre la récolte et les traitements à la chaleur et leur impact sur la réponse physiologique des fruits n'a pu être trouvé. Ainsi nous nous référons aux délais entre les traitements de conditionnement thermiques et les traitements à la chaleur pour l'étude de la persistance des mécanismes de protection mis en place par les tissus des fruits dans le cadre de l'acquisition d'une éventuelle thermotolérance.

4 Influence de l'ensoleillement en pré récolte sur les températures internes et la physiologie des fruits

4.1 La chaleur dans les fruits

Pendant longtemps, la température des plantes et des organes de plantes a été considérée comme étant à peu près la même que celle de son environnement (air, sol). En effet les plantes, à l'inverse des animaux, n'ont pas la faculté de pouvoir réguler leur température interne (Hopp, 1947). L'étude de la température interne des plantes et de leurs organes n'a été possible que grâce à la mise au point par Eggert (1946) d'équipements thermoélectriques et de thermocouples pour la recherche biologique.

La chaleur d'un fruit provient soit de la convection de l'air environnant soit des radiations solaires ainsi que de la chaleur métabolique des réactions chimiques à l'intérieur du produit. Si un fruit est récolté tôt le matin, il sera plus froid et aura certainement un plus faible niveau de chaleur puisqu'en général, plus la température du fruit est élevée, plus les activités métaboliques sont importantes (Bergh *et al.*, 1980 ; Thompson, 1996). Les rayons infrarouges (IR) pourraient être responsables de l'augmentation de la température interne des fruits plus que les rayons ultraviolets (UV) car 50 % de la radiation directe du soleil est dans la portion IR du spectre (Hopp, 1947 ; Lipton et O'Grady, 1980). L'absorbance des IR est fonction de la forme, de la taille des cellules et de l'espace cellulaire. Elle est importante par les tissus aqueux et dépendante de la couleur du fruit (Barber et Sharpe, 1970). La plus grande absorbance de la tomate rouge par rapport à la verte semble provenir d'une meilleure absorbance des IR par la couleur rouge (Retig et Kedar, 1967). Mais la contribution des longueurs d'ondes visibles et des ultraviolets (UV) ne doit pas non plus être ignorée (Lipton et O'Grady, 1980). Ainsi, la pigmentation des fruits pourrait influencer également la température de la surface des fruits sur pomme (Thorpe, 1974).

La mesure de la température du fruit est dépendante de la position du soleil. Plus l'angle du soleil est grand avec la surface du fruit, plus le rayonnement sera direct et la radiation intense (Bergh *et al.*, 1980). La position du fruit est aussi un facteur important à prendre en compte : plus les fruits sont près du sol, plus leur température interne sera élevée du fait de la chaleur

du sol et de la moindre circulation d'air. Les fruits ont une conductivité thermique variable : certains tissus vont retenir la chaleur plus longtemps et se refroidir plus lentement que l'air ou inversement. Certains produits (cosses de haricot, de petit pois) répondent plus vite à l'ensoleillement, d'autres plus lentement (concombre, squash). Ainsi le cycle journalier de ces températures internes va différer selon les plantes (Bergh et *al.*, 1980). Enfin, la position des sondes dans le fruit est également très importante surtout si justement cette conductivité thermique dans le fruit est faible comme dans le cas de la pomme (Bergh et *al.*, 1980). Il apparaît ainsi que les cellules ou tissus ont leur propre température qui peut être différente de celle de l'air quand ils sont exposés au soleil (Hopp, 1947).

Même en conditions ombragées ou de brouillard, la conduction de la chaleur par radiation réfléchie par les nuages ou/et la surface du sol semble suffisante pour maintenir les fruits à des températures bien plus élevées que la température de l'air (Merrit et *al.*, 1961 ; Thorpe, 1974 ; Ferguson et *al.*, 1998) sur pomme.

4.2 Mesures des températures internes des fruits en pré récolte

En 1946, Hopp (non publié) effectuée en serre, les premiers enregistrements de températures internes de haricot, tomate ainsi que fraise et met en évidence des différences entre la température de l'air et la température interne des fruits selon le degré d'ensoleillement.

Contrairement aux fruits, les feuilles ont une structure laminaire et peuvent par évapotranspiration réguler leur température. Quand les plants sont bien irrigués, elles atteignent rarement des températures supérieures à celles de l'air ambiant (Hernandez et Vierling, 1993). Cependant, les organes plus charnus tels que les fruits réagissent comme un réservoir de chaleur. La chair et la peau peuvent atteindre des températures très supérieures à celle de l'air ambiant. Schroeder (1965) met en évidence des écarts de 10 à 20 °C entre la température de l'air ambiant et celle de la chair des fruits directement exposés au soleil. Smart et Sinclair (1976) sur le raisin, Kliwer et Lider (1968) ; Thorpe (1974) ; Kotzé et *al.* (1988) ; Parchomchuk et Meheriuk (1996) sur pomme relatent des différences de l'ordre de 12 °C. Ferguson et *al.* (1998) démontrent que, même les conditions de cultures de climat tempéré, avec des températures de l'air n'excédant pas 30 °C, la température de la chair des pommes peut atteindre 40 °C soit une différence de température de 15 °C quand les fruits sont

directement exposés au soleil. Les plus faibles températures sont enregistrées entre 24 h et 3 h du matin. Woolf et *al.*, (1999a ; 1999b) observent que la chair des avocats, cultivés en Nouvelle-Zélande et qui sont exposés de façon directe au soleil sur l'arbre, est fréquemment supérieure à 35 °C.

Quand les organes charnus (fruits ou légumes) sont directement exposés au soleil ou à une forte lumière artificielle, ils se réchauffent sur les faces les plus exposées de plusieurs degrés au dessus de ceux des faces non exposées. Un fort gradient de température d'une face à une autre apparaît quand la face exposée a une température au delà de la température ambiante de l'air (Curtis, 1937 ; Hopp, 1947 ; Ferguson et *al.*, 1998). Sur pomme, la vitesse de montée en température dans la pulpe du côté exposé peut aller jusqu'à 10 °C par heure quand les températures de l'air sont de 30 à 35 °C. Par contre la décroissance est plus lente et 10 °C de chute prend environ 2 h (Ferguson et *al.*, 1998). Le côté exposé des pommes subit de fortes températures même si les conditions climatiques sont modérées. Il est en général 10 °C plus chaud que le côté à l'ombre bien que ce dernier soit également plus chaud de quelques degrés par rapport à la température de l'air (Brooks et Fisher, 1926 ; Harvey, 1993).

En résumé, les travaux de Schroeder (1965) ; Kliewer et Linder (1968) ; Smart et Sinclair (1976) ont démontré les résultats suivants : 1. l'exposition directe au soleil peut engendrer des températures internes jusqu'à 15 °C au dessus de la température de l'air. 2. Un gradient thermique important (15 °C) peut exister entre les côtés exposés ou ombrés sur un même fruit. 3. La partie de la peau la plus pigmentée est en général celle qui a subi les plus fortes températures.

4.3 Réponses physiologiques des fruits à l'ensoleillement

4.3.1 Influence sur la physiologie et la composition chimique des fruits

Les températures de pré récolte influent sur le développement du fruit en déterminant le rythme de croissance et les activités du métabolisme des tissus. Cette influence est d'autant plus importante que le stade du fruit est avancé. Les températures en pré récolte peuvent ainsi

déterminer la qualité du fruit à travers les saisons (Monselise et Goren, 1987) : des critères tels que taille, fermeté, coloration et sucres solubles ainsi que des changements biochimiques peuvent constituer ainsi de précieux indicateurs comme le suggèrent Ferguson et *al.*, (1998) sur pomme et Kliewer (1973) sur raisins. Ferguson et *al.* (1998) précisent que la vitesse d'accroissement de la chaleur ainsi que la durée d'exposition aux fortes températures seraient suffisantes pour que des changements métaboliques interviennent dans les tissus.

Sur raisins, les températures de 15 à 20 °C, permettent l'augmentation des anthocyanes, du TA, l'acide malique mais également une décroissance du pH, arginine, proline et de l'azote totale en comparaison aux fruits qui ont mûri à des températures entre 30 et 35 °C (Kliewer et Lider 1968 ; 1970). En effet, la production des pigments (anthocyanes) et le contenu phénolique des raisins est dépendante des températures (Kliewer, 1977). Mais la couleur des fruits et la teneur en ESS seront favorisées également de façon significative en présence d'une forte luminosité (Kliewer et Lider, 1970). De même pour la pomme l'ensoleillement combiné avec des températures fraîches de la nuit induit la synthèse *de novo* d'anthocyanes (Saure, 1990 ; Honda et *al.*, 2002) et plus particulièrement la cyanidin-3-galactoside (Sun et Francis, 1967).

Un grand nombre de cultivars de pommes rouges ne manifestent une tache de couleur que sur le côté du fruit exposé au soleil ou au sommet, ou à l'extérieur de la canopée, les autres fruits restant verts (Jackson et *al.*, 1971 ; Dever et *al.*, 1995). Une différence également au niveau de la texture, du goût et de la saveur entre des fruits au soleil et des fruits à l'ombre a été notée (Palmer, 1989) sur pomme.

4.3.2 Désordres physiologiques causés par des stress abiotiques

Des conditions climatiques anormales pendant le développement des fruits telles que des fortes ou de très basses températures, la durée d'exposition à ces températures, de longues périodes nuageuses, l'irradiance, des conditions de sécheresse ou d'humidité peuvent aussi avoir des effets négatifs sur le fruit et son comportement en après récolte (Adegroye et Jolliffe, 1983 ; Emongor et *al.*, 1994). Toute une gamme de désordres physiologiques exprimés en après récolte peut être reliée aux conditions du fruit à la récolte (facteurs

agronomiques, échanges gazeux entre la peau du fruit et l'atmosphère) et au stade de maturité (Ferguson et *al.*, 1999).

En effet, de nombreuses cultures horticoles des pays chauds manifestent des brûlures dues à l'action combinée des températures et du niveau de rayonnement (principalement les UV-B) engendrés par le soleil (Curtis, 1937 ; Rabinowitch et *al.*, 1974 ; Glenn et *al.* 2002). Les UV-B sont les radiations à plus faible longueur d'onde et à plus haute énergie qui traversent la couche d'ozone de la stratosphère. Elles représentent 5 % des rayonnements UV totaux et 0.5 % de l'énergie totale de l'ensoleillement (Caldwell et Flint, 1997). Ces rayonnements provoquent des dégâts majeurs. En fait, les mécanismes physiologiques sont insuffisants pour utiliser ou dissiper les radiations absorbées par la peau des fruits (Blanke et Lenz, 1989). Cela a pour conséquence une température du fruit nettement plus élevée que celle de l'air ce qui provoque des colorations brunes voire des nécroses, en fonction de la durée d'exposition et du niveau de température auxquels les fruits sont soumis. En général, l'incidence de brûlure est observée quand la température de la peau des pommes est supérieure à 45 °C (Schrader et *al.*, 2003) bien que ce niveau critique de température soit dépendant de la radiation, de l'humidité relative et de la vitesse du vent mais également de la position des fruits sur l'arbre et de l'exposition qu'il reçoit par rapport à une canopée ombragée. Les fruits les plus exposés sont les plus susceptibles aux brûlures (Gindaba et Wand, 2005). Sur les tomates vertes matures, les parties endommagées ne mûrissent pas normalement et restent dures et jaune vert (Adegoroye et Jolliffe, 1983).

D'autres désordres physiologiques ont été également mentionnés tels que le 'watercore', translucence aqueuse dans la chair des fruits au soleil de certains cultivars de pomme (Ferguson et *al.*, 1998 ; 1999). Ce 'watercore' a été relié avec les fortes températures, une forte intensité lumineuse et une forte concentration de sève dans les pommes (Fisher, 1941). Mais d'autres travaux de recherche, au contraire, observent que ce sont les faibles températures pendant la maturation des fruits qui peuvent exacerber ces symptômes indépendamment du stade de maturité (Yamada, 1999). Faust et *al.* (1969) suggèrent que les symptômes sont différents de ceux causés par l'exposition du fruit au soleil par de fortes températures avant la maturation et que les basses températures influent sur le plutôt long terme alors que les fortes températures localisées dans la chair des fruits (liées à l'exposition) ont des incidences de 'watercore' à court terme.

Les travaux de Paull et Reyes (1996) sur ananas démontrent que la translucence du fruit est un désordre qui présente de fortes similarités avec le ‘watercore ‘ des pommes. Elle apparaît avant la récolte et se développe pendant la conservation. La translucence est reliée à un fort taux d’azote, un fort ensoleillement mais également à la température et les précipitations pendant la croissance du fruit. Mais en 2001, Chen et Paull constatent que la température du fruit a un effet significatif sur la translucence de l’ananas seulement quand un seuil de tolérance thermique de la chair est atteint, ceci est observé indépendamment de la différence de température qu’il existe entre la chair du fruit et l’air. Elle interviendrait également plus fréquemment dans les gros fruits suggérant que le rythme de croissance et la fourniture en eau et éléments carbonés pourraient avoir une influence.

Les fortes températures peuvent altérer les fonctions cellulaires (Hale et Orcutt, 1987) en modifiant la composition et la structure de la membrane et ainsi provoquer une perméabilité membranaire (Björkman et al, 1980 ; Quinn, 1988). Ce phénomène est considéré comme un indicateur de dégâts cellulaires (Inaba et Crandall, 1988). Les pommes qui sont soumises à des gradients de températures internes de 5 à 17 °C subissent un mouvement d’eau de l’endroit le plus chaud vers l’endroit le plus froid engendrant ainsi un flétrissement sur la face exposée et à l’inverse plus de turgescence sur la face soumise à des températures inférieures (Curtis, 1937).

5 Deux exemples de réponses physiologiques aux stress thermiques : synthèse d’HSPs et production d’antioxydants.

Un stress est défini comme une condition qui perturbe le fonctionnement normal du système biologique (dans la synthèse bibliographique de Sorensen et al. 2003). Le stress est généralement considéré comme extrinsèque (facteur environnemental) mais peut aussi intrinsèque (facteurs génétiques et de sénescence). Les stress abiotiques impliquent en général des réponses multiples : des événements physiologiques, biochimiques et moléculaires (Wang et al., 2004).

Face à un large éventail d’altérations saisonnières ou journalières ainsi que des conditions environnementales, un ‘General Adaptation Syndrome’ (GAS) a été décrit chez les plantes. Ce syndrome fait référence à une réponse de la plante à la durée d’exposition et à l’intensité

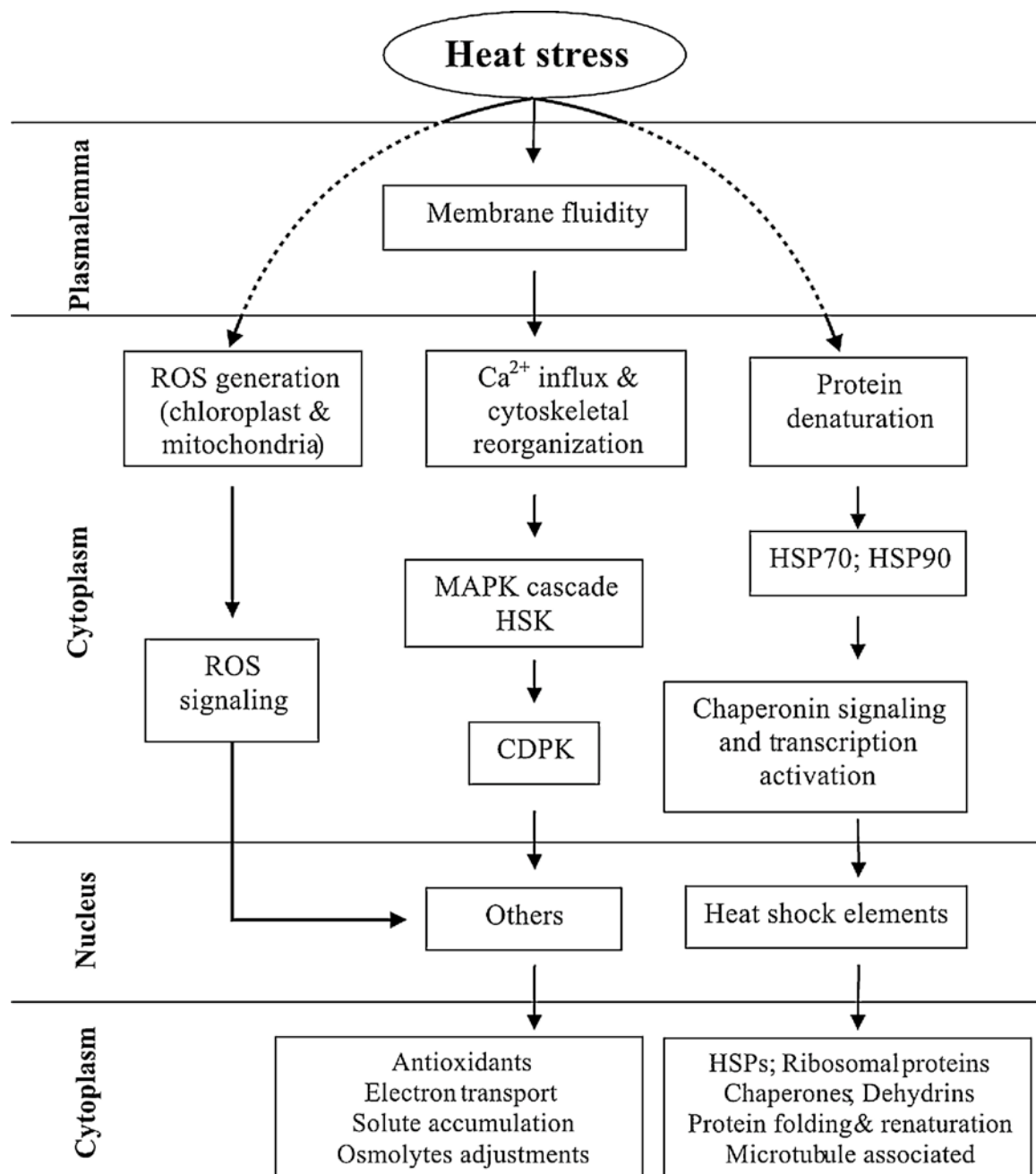


Figure 12. Les mécanismes de tolérance au stress thermique chez les plantes. MAPK (protéine kinase mitogène activée) ; ROS (espèces réactives de l’oxygène) ; HAPK (HSPs activées) ; HSK (histidine kinase) ; CDPK (protéine kinase calcium-dépendante) (Wahid *et al.*, 2007).

d'un stress (Jenkins et *al.*, 1997 ; Leshem et *al.*, 1998). Dès qu'une source de stress est détectée chez la plante, sa résistance intrinsèque diminue et si le stress est intense, elle meurt. Si il y a survie, la plante peut initier une phase d'acclimatation par laquelle des stratégies de gestion du stress sont activées et un niveau de tolérance est obtenu. Cependant si la plante est exposée à ce stress pendant une assez longue période, elle épuise sa capacité d'adaptation et meurt (Verdaguer et *al.*, 2003).

Un grand nombre d'agents de stress environnementaux provoquent également un stress oxydatif (Smirnoff, 1998 ; Shigeoka et *al.*, 2002). L'ensoleillement en fait partie. Il provoque en plus d'un stress de température, un stress oxydatif à travers ses rayonnements (Green, 1983) et par conséquent une production de 'Reactive Oxygen Species' (ROS). Ces derniers vont attaquer en premier les lipides et plus particulièrement les acides gras insaturés et les protéines qui sont les principaux blocs constructeurs des membranes biologiques (Foyer et *al.*, 1997). La réponse des plantes aux UV est similaire à celle du stress de température suggérant que les mécanismes de défense des plantes sont similaires ou partagées (Jenkins et *al.*, 1997). Pour Leshem et *al.* (1998) la synthèse de protéines de choc thermique ainsi que l'induction d'éliminateurs de radicaux libres et/ou de substances antioxydantes sont des facteurs importants dans les mécanismes GAS (**figure 12**).

5.1 Les protéines de choc thermique (HSPs)

Dans les faits, l'acquisition d'une thermotolérance dans les plantes est souvent le résultat de mécanismes de réponse variés à un stress de température qui agissent en coordination ou en synergie à un niveau cellulaire afin d'améliorer ou de réduire les dégâts des processus métaboliques, de rétablir l'homéostasie cellulaire et ainsi de permettre la survie de l'organisme (Wang et *al.*, 2004). Elle intervient quand les températures environnementales s'accroissent de façon significative au dessus de la température médiane observée pour la croissance d'un organisme (Jenkins et *al.*, 1997 ; Bowen, 2000) mais peut également être induite par des conditions artificielles en traitements en après récolte (Lurie, 1998).

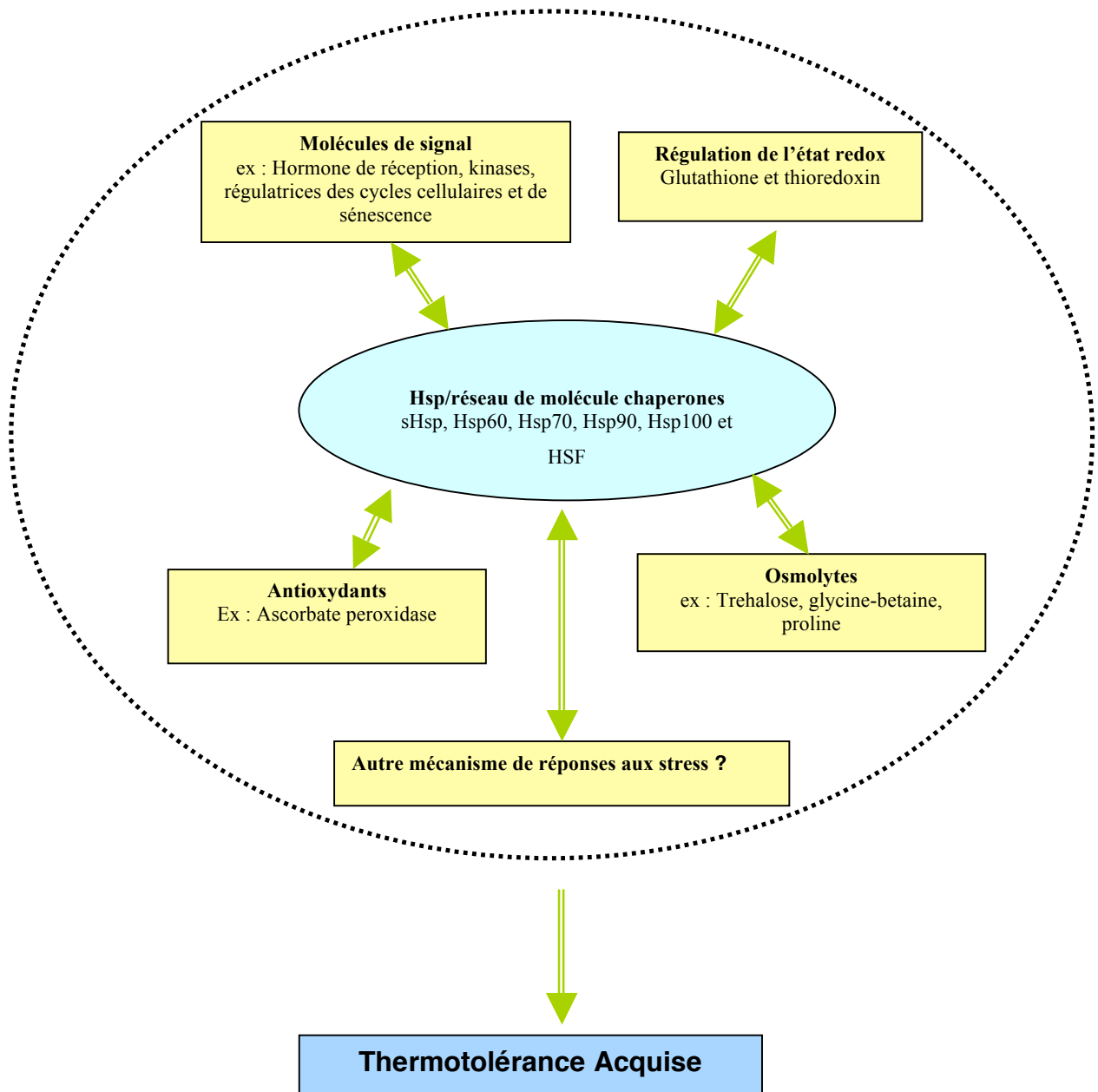


Figure 13. Les interactions suggérées entre les HSPs/chaperones moléculaires et autres mécanismes de réponse au stress chez la plante (Wang *et al.*, 2004).

Selon Vierling (1991), tous les organismes répondent à une augmentation de température de quelques degrés au dessus du niveau physiologique par la transcription de gènes de choc thermique de façon parallèle à un déclin de la transcription des autres gènes, et donc par l'expression de la synthèse d'un groupe de protéines appelées, de ce fait, les protéines de choc thermique (HSPs). L'expression des gènes HSPs requiert l'activation et la translocation dans le noyau d'un facteur de transcription 'Heat Shock Factor' (HSF). Celui ci reconnaît alors des séquences spécifiques présentes en copies multiples dans les promoteurs des gènes HSPs, les 'Heat Shock Elements' (HSE), et déclenche la transcription de ces gènes (Santoro, 2000). Cette réponse est universelle et représente le système génétique le plus hautement conservé dans les organismes aussi divers que les bactéries, les animaux et les plantes (Lindquist, 1986 ; Lindquist et Craig, 1988 ; Vierling, 1991 ; Young et *al.*, 1999). La grande conservation des gènes codant pour les HSPs à travers l'évolution suggère que ces protéines possèdent une fonction essentielle pour la survie de l'organisme (Sorensen et *al.*, 2003). L'expression de HSPs et leur persistance dans les tissus végétaux ont été étroitement corrélées avec ce phénomène de thermotolérance (Lindquist, 1986 ; Vierling, 1991 ; Parsell et Lindquist, 1994 ; Bowen, 2000). Ainsi les cellules soumises à un choc thermique, sublétal induisent une synthèse et une accumulation de HSPs afin de résister à un deuxième choc thermique qui, lui aurait pu être létal (Wirth et *al.*, 2002).

Les HSPs sont synthétisées en masse en réponse à la chaleur mais également à d'autres stress environnementaux ou oxydatifs (Waters et *al.*, 1996). Les radiations UV ont été aussi impliquées dans la production de protéines proches de HSPs (Nedunchezian et *al.*, 1992).

Par ailleurs, un nombre croissant de travaux suggère que les HSPs/chaperonnes interagissent avec d'autres mécanismes de réponse aux stress tels que (**figure 13**) :

- les osmolytes - trehalose, glycine, bétaïne, glycérol proline, chaperonnes chimiques qui peuvent également accroître la stabilité des protéines natives et contribuer à leur repliement (Singer et Lindquist, 1998 ; Diamant, 2001 ; Viner et Clegg, 2001),
- des molécules signalétiques comme des récepteurs d'hormones nucléaires - tyrosine et sérine/threonine kinase – et des régulateurs du cycle et de la sénescence cellulaire (Ellen, 2002),
- l'activité antioxydante des tissus en agissant comme des régulateurs du potentiel redox de la cellule (Verdaguer et *al.*, 2003).

Tableau 6. Les cinq classes majeures des HSPs/chaperonnes moléculaires, et leurs sous familles, des plantes. Exemples spécifiques de l'implication des HSPs/chaperonnes moléculaires dans la tolérance au stress des plantes (Wang et al., 2004)

Classes	Representative members	Intracellular localization	Major functions	Refs
Hsp70			Preventing aggregation, assisting refolding, protein import and translocation, signal transduction, and transcriptional activation	[4–6,13,14,16,18]
Subfamily: DnaK	Hsp/Hsc70 Hsp70 Bip ¹	Cytosol Chloroplast, mitochondria Endoplasmic reticulum		
Hsp110/SSE	Hsp91	Cytosol		
Chaperonin/Hsp60			Folding and assisting refolding	[4–6,13,14,17]
Subfamily: Group I Group II	Cpn60 ² CCT ³	Chloroplast, mitochondria Cytosol		
Hsp90	Hsp90		Facilitating maturation of signaling molecules, genetic buffering	[4,15,49,50,52,56]
	AtHsp90-1 AtHsp90-5 AtHsp90-6 AtHsp90-7	Cytosol Chloroplast Mitochondria Endoplasmic reticulum		
Hsp100/Clp	Hsp100 ⁴		Disaggregation, unfolding	[4,58,63,64]
Subfamily: Class I	ClpB, ClpA/C ClpD	Cytosol, mitochondria		
Class II	ClpM, ClpN ClpX, ClpY	Chloroplast Chloroplast		
sHsp			Preventing aggregation, stabilizing non-native proteins	[3–5,75–78]
Subfamily: I II III IV V VI	Hsp17.6 Hsp17.9 Hsp21 Hsp26.2 ⁵ Hsp22 Hsp23 ⁵ Hsp22.3	Cytosol Cytosol Chloroplast Endoplasmic reticulum Mitochondria Membrane		

¹Additional groups of proteins or enzymes are also considered as molecular chaperones, including: peptidyl-prolyl *cis/trans* isomerase, which catalyzes the isomerization of peptide bonds of proline residues; protein disulfide isomerase (PDI), which catalyzes disulfide bond formation in the endoplasmic reticulum; calnexin/calreticulin, which assists the folding of glycosylated proteins in the endoplasmic reticulum. Owing to the limitations of space, these groups of chaperones are not discussed in this article and are not listed in the table.

²Examples for direct involvement of Hsps/molecular chaperones in plant tolerance to stress:

¹Enhanced accumulation of Bip in *Nicotiana tabacum* protoplast and transgenic plants conferred tolerance to water stress [29].

²Deletion of LEN1 (Cpn60 β) triggered cell death in *Arabidopsis* [47].

³CCT α from the mangrove plant *Bruguiera sexangula* enhanced the salt and osmotic stress tolerance of *Escherichia coli* transformants [48].

⁴Hsp100 functional complementation of the temperature sensitive yeast *hsp104* mutant cells was shown using *athsp101* and *gmhps101* cDNAs [71,72].

⁵*Zea mays* mitochondrial sHsp improved mitochondrial electron transport during salt stress, mainly by protection of the NADH:ubiquinone oxidoreductase activity (Complex I), but it failed to protect enzymes associated with Complex II [82]. A mutant of the chloroplast sHsp of *Agrostis stolonifera* grass, sHsp26.2, with a point mutation that generated a premature stop-codon (sHsp26.2m) was isolated from a heat-sensitive variant; protein product of the mutant was not accumulated upon heat stress [83].

5.1.1 Les différentes familles d'HSPs – les Small Heat Shock Proteins (smHSPs)

En 1991, Vierling classe les HSPs en cinq familles conservées (**tableau 6**) : les HSP70 (Dnak) ; les HSP60 et GroEL (chaperonines), les HSP90, les HSP100 (Clp) et les 'small' HSPs (smHSPs). Bien que les HSPs de ces différentes familles partagent des propriétés communes, chacune présente des particularités concernant leur mécanisme d'action, la spécificité du substrat, la dépendance ou non vis à vis de l'ATP, la localisation intracellulaire (Wirth et *al.*, 2002). Les HSPs/chaperones HSP60, HSP70 et HSP90 sont en général exprimées de façon constitutive dans les plantes. Leur expression est cependant régulée en fonction des stades de développement et est induite par des stress environnementaux tels que la chaleur, le froid, la déshydratation, la salinité, la lumière ou l'obscurité (synthèse bibliographique de Wang et *al.*, 2004). Elles interagissent bien souvent avec toute une gamme de protéines co-chaperones mais elles jouent également un rôle croisé avec d'autres mécanismes et agissent en synergie avec d'autres composants afin de réduire les dégâts cellulaires. Les HSPs ont un haut degré d'homologie entre elles : elles sont ubiquitaires et abondantes dans tous les compartiments subcellulaires (Vierling, 1991 ; Wang et *al.*, 2004).

De nombreux travaux décrivent les rôles moléculaires et physiologiques des différentes familles de HSPs/chaperones moléculaires qui, bien souvent, coopèrent entre elles afin de protéger la cellule (Parsell et Lindquist 1993 ; Feder et Hofmann, 1999 ; Morimoto et *al.*, 1999). Pendant le stress (**figure 14**), beaucoup d'enzymes et de protéines ont des changements structurels et fonctionnels détériorés (dénaturation et perte momentanée de l'activité enzymatique). Le dépliement des protéines est certainement le type de dégât majeur du stress à la chaleur (Boston, 1996). Dans les cellules mammaliennes, la présence de protéines endommagées semble être, par elle-même, un signal important pour l'expression des HSPs (Santoro, 2000). Ces dernières synthétisées permettent la renaturation des protéines et la récupération de l'activité enzymatique (synthèse bibliographique de Wirth et *al.*, 2002) Ainsi le maintien des protéines dans leur conformation fonctionnelle mais également l'élimination de protéines non fonctionnelles et des polypeptides potentiellement dangereux (issus d'un mauvais repliement, dénaturés ou agrégés) sont particulièrement importants pour la survie des cellules en condition de stress (Gething et Sambrook, 1992 ; Parsell et Lindquist, 1994 ; Wang et *al.*, 2004).

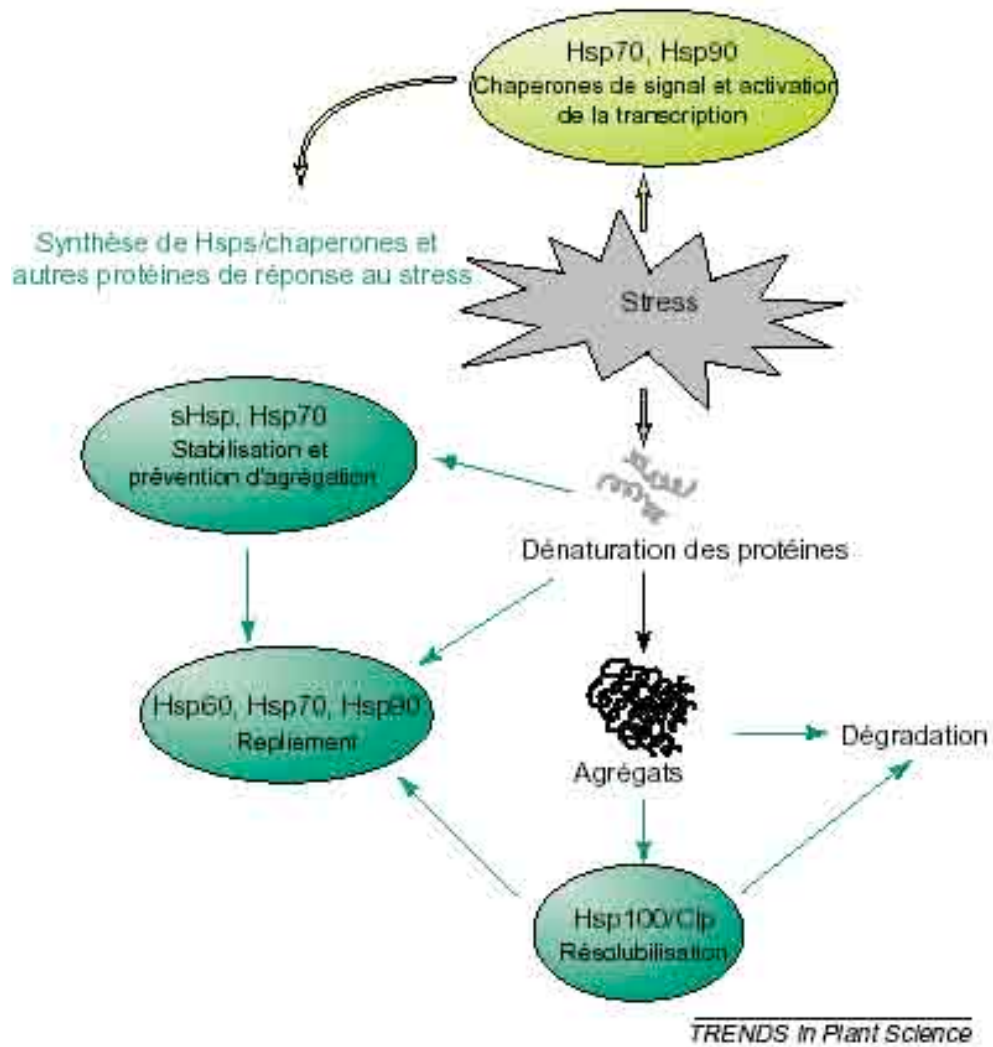


Figure 14. Le réseau de HSPs/chaperonnes moléculaires en réponse à un stress abiotique (Wang *et al.*, 2004)

Dans le cadre de cette thèse, les smHSPs ont été plus particulièrement étudiées, car elles sont les plus abondantes dans les tissus végétaux et de nombreux travaux ont permis de corréler leur présence avec une thermotolérance des fruits (Paull et Chen, 1990 ; Lurie et *al.*, 1996 ; Ferguson et *al.*, 1998 ; Woolf et *al.* 1995, 1999a, 1999b, 2000).

Les smHSPs sont des protéines de faible poids moléculaire compris entre 12 et 40 kDa. Elles partagent un domaine de 90 acides aminés conservés avec un domaine C terminal appelé le domaine α -cristallin qui est apparenté à la protéine α -cristalline dans l'œil des vertébrés. Ce domaine est organisé en trimères de dimères, formant ainsi un dodécamère à deux anneaux. Elles sont codées par 5 familles nucléaires multigènes. Chaque famille de gène code pour des protéines qui sont dans des compartiments cellulaires distincts (le cytosol-classe I et II, les chloroplastes- classe III, le réticulum endoplasmique-classe IV et les mitochondries-classe IV). Les smHSPs sont ubiquitaires et les plus fréquentes dans les plantes (Vierling, 1991 ; Waters et *al.*, 1996). Ce sont les protéines de la classe I du cytoplasme qui sont les plus fortement induites. Elles représentent près de 1.5 % des protéines totales solubles dans le cytoplasme (De Rocher et Vierling, 1994). Les smHSPs forment une famille plus diversifiée que les autres HSPs/chaperonnes comparativement aux similarités des séquences, à leur localisation dans la cellule et à leurs fonctions (Vierling, 1991 ; Waters et *al.*, 1996). Cette haute diversification reflète probablement une adaptation moléculaire aux conditions de stress qui est unique aux plantes. En effet, les smHSPs des plantes répondent à une large gamme de stress environnementaux qui inclut le chaud, le froid, la sécheresse, la salinité et les stress oxydatifs (Waters et *al.*, 1996 ; Sun et *al.*, 2002 ; Wang et Luthe, 2003). De nombreux résultats suggèrent une corrélation forte entre l'accumulation de smHSPs et la tolérance des plantes aux stress (Lindquist, 1986 ; Vierling, 1991 ; Parsell et Lindquist, 1994 ; Bowen, 2000). La synthèse de ces protéines est en général très rapide en cas de stress (Lindquist et Craig, 1988). Mais certaines smHSPs sont seulement exprimées à certains stades de développement sans forcément avoir été induites par un stress (Waters et *al.*, 1996 ; Boston, 1996).

Si les smHSPs ont une forte capacité à se lier aux protéines non natives, à les stabiliser et à empêcher leur agrégation, elles ne sont pas capables, à elles seules, de les replier. Elles fournissent alors un réservoir de substrat pour un repliement, ATP dépendant, qui se fera ultérieurement par les membres des familles chaperonnes HSP100 – pour la solubilisation des agrégations – et HSP70 pour le repliement en lui même (Ehrnsperger et *al.*, 1997 ; Veinger et

al., 1998 ; Lee et Vierling, 2000 ; Mogk et *al.*, 2003). Elles ont souvent des rôles complémentaires mais qui peuvent aussi se superposer. Studer et Narberhaus (2000) précisent également, chez les bactéries, que les smHSPs protègent les enzymes de la dénaturation due à un stress thermique. Par ailleurs, il a été démontré que les smHSPs mitochondriales – classe III – du maïs amélioreraient le transport d'électron pendant le stress à la salinité (Hamilton et Heckathorn, 2001). De même, Heckathorn et *al.* (1998) mettent en évidence que des smHSPs chloroplastiques contribuent à la protection du système photosynthétique en cas d'un fort stress de température.

La compréhension du rôle des HSPs/chaperonnes comme molécules de régulation, de participation à l'appréciation du stress, de transduction de signal et d'activation de la transcription des gènes de stress est fort incomplète. La plupart des études tentent cependant de détecter des changements d'expression des protéines pendant ou après un stress (revue bibliographique de Wang et *al.*, 2004).

5.1.2 Les protéines de choc thermique dans les fruits

Si de nombreux travaux sur plantules, plantes entières (Kimpel et Key 1985 ; Vierling, 1991), semences (Hernandez et Vierling, 1993), développement d'embryons, germination (DeRocher et Vierling, 1994) et cultures cellulaires (Bowen, 2000 ; Bowen et *al.*, 2002) ont permis de mettre en évidence la présence des smHSPs en relation avec la présence ou non d'un stress à la chaleur, peu de travaux existent sur fruits entiers.

La présence de HSPs dans les tissus des fruits, tels que la tomate, la papaye, l'avocat et la pomme, a été observée consécutivement à des prétraitements après la récolte utilisant des températures entre 38 et 42 °C. L'expression de ces HSPs et plus particulièrement des smHSPs, est étroitement corrélée avec une thermotolérance permettant de réduire les dégâts physiologiques occasionnés par les températures extrêmes des traitements à la chaleur ou d'une conservation à basse température de longue durée (Paull et Chen, 1990 ; Lurie et Klein, 1990 ; 1991 ; Lurie et *al.*, 1993 ; Woolf et *al.*, 1995 ; Sabehat et *al.*, 1996 ; Woolf et Lay-Yee, 1997).

Cependant, d'autres travaux ont démontré que les températures en pré récolte des fruits jouent un rôle important dans leur aptitude à supporter la chaleur ou le froid en simulant un durcissement progressif à des températures extrêmes (Brooks et Fisher, 1926 ; Ferguson et *al.*, 1998) sur pomme, (Woolf et *al.*, 1999a , 1999b) sur avocat. En effet la réponse au choc thermique est un événement naturel associé avec le cycle des températures internes diurnes auquel le fruit sur l'arbre est exposé indépendamment de la température de l'air. Quand il est directement exposé au soleil, le fruit peut atteindre des températures de chair bien supérieures à 40 °C et induire l'expression de gènes de choc thermique afin de réguler les fluctuations journalières de température (Lurie et *al.*, 1993 ; Ferguson et *al.*, 1998 ; Woolf et *al.*, 1999a ; Woolf et Ferguson 2000).

Ferguson et *al.*, (1998) observent que les niveaux de transcription des ARNm codant pour les HSP17 et dans une moindre mesure des ARNm codant pour les HSP70 sont nettement plus élevés dans les tissus des fruits exposés au soleil suggérant alors la relation directe avec les niveaux de températures internes de la chair. En effet, les HSP70 sont constitutives dans les tissus des végétaux mais peuvent être amplifiés par les fortes températures ou un autre stress (synthèse bibliographique de Wang et *al.*, 2004). Cependant, dans les pommes exposées au soleil, les niveaux de transcriptions des ARNm HSP70 et de HSP17 vont s'accumuler pendant les premières heures chaudes de la journée mais vont atteindre leur maximum seulement 3 heures après les maxima de température de la chair (> 40 °C). Par contre ces niveaux de transcription se maintiennent pendant la nuit jusqu'au lendemain matin alors que les températures déclinent et que le lendemain matin, alors que le fruit se réchauffe à nouveau, ils diminuent rapidement, signalant ainsi une perte du message de transcription. Un même cycle journalier d'expression de gènes de HSP70 et HSP17 est observé par Woolf et *al.* (1999a) sur avocats en pré récolte. Ferguson et *al.* (1998) suggèrent alors que les températures plus fraîches de la nuit (< à 25 °C) contribueraient à stabiliser cette transcription alimentant alors les hypothèses de DeRocher et *al.* (1991) sur pois, de Sabehat et *al.* (1996) sur tomate, de Lurie (1998) et de Woolf et *al.* (1995) sur avocats placés à 2 °C après un prétraitement de 38 °C.

Ces résultats introduisent ainsi la notion de persistance de la thermotolérance et des conditions dans lesquelles elle opère. Lurie et *al.* (1996) et Sabehat et *al.* (1996) démontrent sur tomate, qu'un délai de quatre jours voire moins, à température ambiante entre un

prétraitement à 38 °C et une conservation au froid à 2 °C induit une perte des HSP70, HSP17 et HSP23 thermo-induites par le prétraitement. Ils observent consécutivement une perte de tolérance aux dégâts physiologiques induits par le froid. Par contre la thermotolérance est effective pendant quatorze à vingt et un jours à 2 °C si il n'y a pas de délai. Par ailleurs, sur mangue, Jacobi et *al.* (2001b) démontrent que la perte de thermotolérance acquise par un prétraitement à 40 °C est proportionnelle à l'accroissement de la durée d'un délai à 22 °C avant un traitement HWT. Sabehat et *al.* (1996) suggèrent que ce maintien à basse température pourrait être simplement dû à une décroissance du métabolisme ou à une rétention sélective de HSPs. Un même cycle de synthèse et de maintien a été observé avec la persistance de polypeptides 21, 23 et 31 kDa sur chérimole mais Montero et *al.* (1995) observent également une synthèse *de novo* de ces protéines quand les fruits sont placés à 6 °C. Woolf et Ferguson (2000) suggèrent, eux aussi, que les basses températures pourraient induire une thermotolérance par une synthèse d'HSPs.

Cependant niveaux de transcription des ARNm ne sont pas aussi stables que les protéines en elles mêmes. Lurie et *al.* (1996) observent que dans les tomates, les niveaux de mARN codant pour les HSP17 déclinent après un jour à 38 °C alors que les protéines HSP17 se maintiennent pendant trois jours. Kimpel et Key (1985) observent une perte du message de transcription ARNm codant sur des smHSPs sur plantules de soja alors que l'exposition aux fortes températures persiste. DeRocher et *al.* (1991) démontrent que l'expression des gènes ARNm codant pour HSP17.9 et HSP18.1 sur *Pisum sativum* L. est très rapide, quelques minutes après l'application du stress mais déclinent dès le stress disparaît alors que les températures des feuilles restent élevées et avant même que les protéines synthétisées atteignent leur maximum. Ces dernières ont des demi vies de $37 \text{ h} \pm 8 \text{ h}$. Des observations similaires sont faites sur les cultures cellulaires de pommes par Bowen et *al.* (2002). De même une perte de transcription et de traduction des HSP17.4 est observée dans les avocats sur l'arbre après les fortes températures de l'ensoleillement (Woolf et *al.*, 1999a ; Woolf et Ferguson 2000). En fait les smHSPs sont des protéines très stables. De Rocher et *al.* (1991) suggèrent qu'elles persistent après le stress afin de réparer les dégâts des cellules ou afin d'anticiper un autre stress par une thermotolérance adaptative. Ces deux alternatives ne sont pas exclusives. Les smHSPs pourraient s'autoréguler ou être régulées par d'autres HSPs telles que les HSP70.

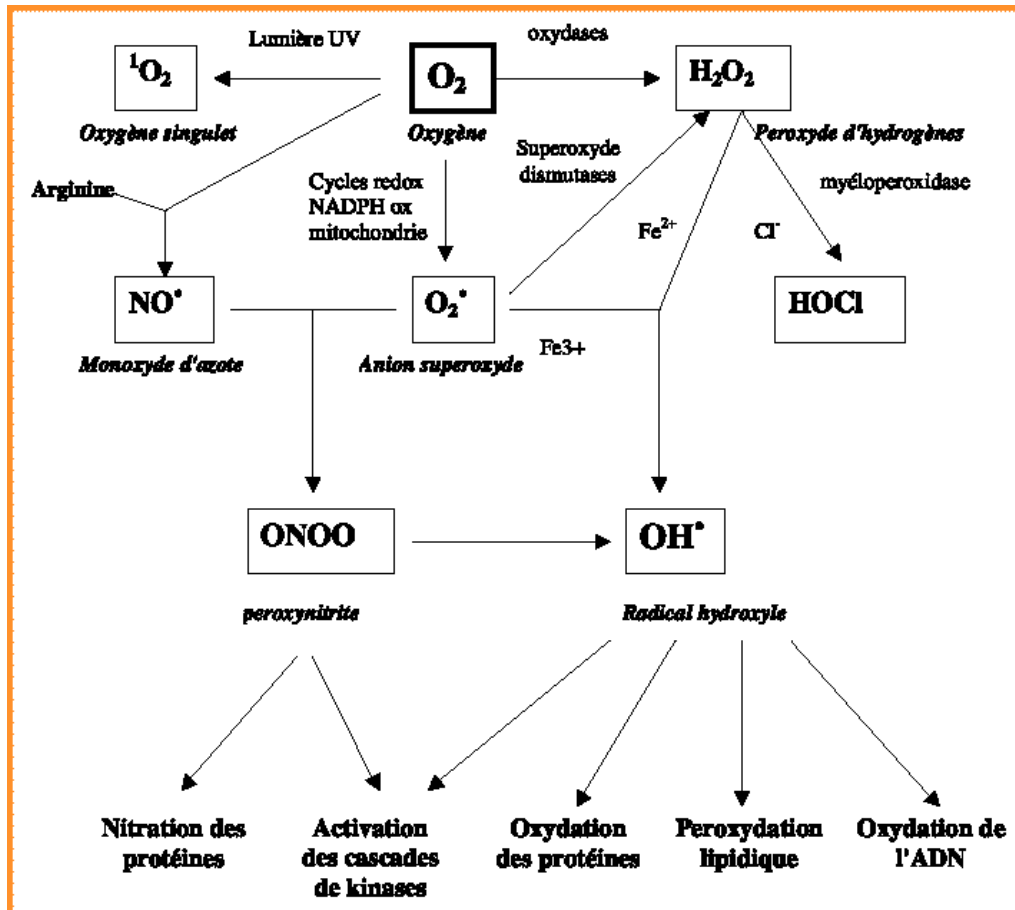


Figure 15. Origine des différents radicaux libres oxygénés et espèces réactives de l'oxygène impliqués en biologie (Favier, 2003).

Ainsi en climat tempéré, la thermotolérance acquise par l'ensoleillement en condition de pré récolte a été démontrée sur fruits (pomme et avocat) consécutivement à des traitements après récolte à la chaleur et au froid. Les smHSPs et particulièrement les HSP17.4 ont été impliquées dans le mécanisme de protection contre le stress thermique avec des phénomènes d'expression et persistance durant le cycle diurne de températures (Woolf et Ferguson, 2000).

5.2 Les antioxydants

Selon la synthèse bibliographique de Bouvier et *al.* (1998), les plantes sont exposées à un stress oxydatif de par leur immobilité et leur photosynthèse. En effet, en pré récolte, elles sont soumises à un stress dû à une forte lumière et à un stress thermique lié aux fortes températures. Ces deux phénomènes engendrent également un stress oxydatif (Larkindale et Knight, 2002). Les plantes ont la plus forte concentration d'oxygène interne parmi tous les organismes vivants (Scandalios, 1993). Dans ces conditions, les électrons énergétiquement très activés vont en s'associant à des molécules d'oxygène former des 'Reactive Oxygen Species' (ROS). Ces derniers, tels que le radical hydroxyle OH[•] ; l'oxygène O₂ ; le peroxyde d'oxygène H₂O₂ ; l'ion superoxyde O₂⁻, sont des molécules dangereuses pour la cellule et vont être responsables de dégâts oxydatifs sur les protéines, l'ADN et les lipides (Mittler, 2002) (**figure 15**). Bouvier et *al.* (1998) estiment que 1 % de l'oxygène consommé par les plantes est transformé en ROS ce qui leur est potentiellement toxique.

Le stress thermique engendre des perturbations des fonctions mitochondriales avec la peroxydation des lipides membranaires (Larkindale et Knight, 2002). Les niveaux de transcriptions et de protéines d'une majorité d'enzymes éliminateurs de ROS se sont révélés plus élevés en cas de stress à la chaleur (Rainwater et *al.*, 1996). Mais une forte intensité de lumière implique également la production de ROS et peut endommager l'appareil photosynthétique de la plante (Niyogi, 1999). Un stress lié à l'intensité de lumière pourrait aggraver les dégâts liés aux ROS pendant le stress thermique (Larkindale et Knight, 2002). Ces résultats suggèrent que les enzymes éliminateurs de ROS pourraient jouer un rôle important en limitant les dégâts dus aux stress photoxydatif liés à une combinaison de forte température et de forte luminosité.

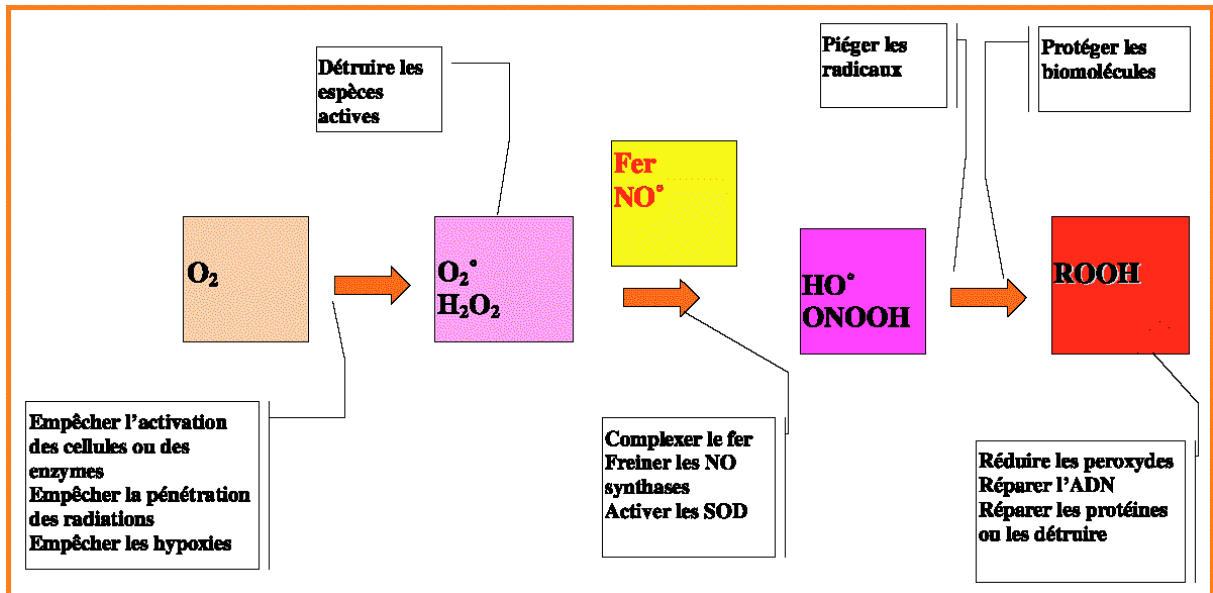


Figure 16. Stratégie de conception de systèmes oxydants susceptibles de prévenir la formation de radicaux libres oxygénés ou de permettre leur destruction (Favier, 2003)

Ainsi selon Polle et Renneberg (1994), les plantes ont développé des systèmes de défense composés de plusieurs mécanismes enzymatiques et non enzymatiques avec des stratégies complémentaires ou interdépendantes afin d'éliminer de leurs cellules ces produits toxiques (**figure 16**). Les systèmes enzymatiques permettent l'élimination des ROS par la catalase, la glutathione peroxydase, l'ascorbate peroxydase et la superoxyde dismutase (Foyer et *al.*, 1994). Et dans les mécanismes non enzymatiques des plantes, certains composés du métabolisme et antioxydants peuvent jouer un rôle de protection contre l'oxydation des tissus en inhibant celle des lipides et en minimisant les produits d'oxydation toxiques (Lako et *al.*, 2007). En effet, ces molécules sont capables en s'oxydant de récupérer l'électron libre de ROS les transformant ainsi en molécule ou en ions stables et de le conduire vers une voie métabolique de destruction ou de régénération. Ce processus se produit par une réaction en chaîne antioxydante qui consiste au transfert de l'électron non apparié. L'acceptant final de cette réaction en chaîne sera au final un système enzymatique (Favier, 2003).

Compte tenu de toutes ces informations, les antioxydants non enzymatiques : les polyphénols, anthocyanes, caroténoïdes totaux présents dans les tissus des fruits ainsi que la capacité antioxydante du fruit sont étudiés dans cette thèse afin d'apprécier leur rôle dans une éventuelle thermotolérance acquise en pré récolte des mangues.

5.2.1 Le rôle et le métabolisme des composés phytochimiques et antioxydants

Les fruits et légumes contiennent toute une gamme d'antioxydants avec différents niveaux d'activité antioxydante (Lako et *al.*, 2007). Ce sont les polyphénols (flavonols eg. quercetin, kaempferol, myricetin ; anthocyanes qui appartiennent au sous groupe des flavonoïdes), les caroténoïdes (lutéine, lycopène ainsi que des α et β carotènes) et les vitamines traditionnelles telles que la vitamine E et la vitamine C (Lako et *al.*, 2007).

Les polyphénols constituent une famille de molécules organiques largement présentes dans le règne végétal. Ils sont caractérisés par plusieurs regroupements phénoliques associés en structures plus ou moins complexes, hydrosolubles et en général de masse moléculaire importante (300 et 5000 kDa). Ils comprennent un noyau aromatique et un ou plusieurs groupes hydroxyles. Les polyphénols sont communément divisés en tanins, lignines et flavonoïdes.

Les anthocyanes appartiennent au sous-groupe des flavonoïdes. Ce sont des pigments naturels hydrosolubles allant du rouge au bleu dans le spectre du visible. Ils ont en général, deux maxima d'absorption l'un entre 270 et 290 nm et l'autre dans le spectre du visible entre 500 et 550 nm (Markham, 1982). La majorité des anthocyanes est présente dans la peau des fruits, dans les feuilles et les racines des plantes, mais uniquement dans les vacuoles de ces tissus des plantes. Leur biosynthèse nécessite des éléments chimiques de base dérivés de la photosynthèse.

Les caroténoïdes sont des pigments naturels de couleur jaune à rouge, liposolubles qui sont largement présents dans la nature. Ils absorbent la lumière dans la région de 400-500 nm du spectre visible. Chez les plantes, ce sont des pigments accessoires de la photosynthèse. Ils peuvent avoir un rôle de collecteur de lumière en transférant à la chlorophylle, l'énergie lumineuse qu'ils absorbent, ou un rôle de photoprotection en récupérant l'énergie de la chlorophylle, comme par exemple en cas de forte intensité de lumière, et la répandre en chaleur. Ce sont les pigments les plus abondants des plantes et des aliments issus de ces dernières. Environ 560 caroténoïdes sont présents de façon spontanée dans la nature (Khachik et *al.*, 1991). Ils sont contenus dans les chloroplastes et plus particulièrement dans les chromoplastes (Bouvier et *al.*, 1998). Les caroténoïdes hydrocarbonés sont classés comme des carotènes alors que ceux contenant de l'oxygène sont des xanthophylles.

L'induction de la synthèse et de l'accumulation de ces métabolites (et de leurs enzymes associés) et plus particulièrement des flavonoïdes (kaempferol, quercetin) dans les cellules de la cuticule ou de l'épiderme (Mazza et *al.* 2000) sont fortement influencées par le cultivar, le stade de maturité et l'exposition à l'ensoleillement (Prior et Cao, 2000 ; Wang et *al.*, 2000 ; Reay et Lancaster, 2001 ; Merzlyak *al.*, 2002 ; Solovchenko et Schmitz-Eiberger, 2003) et plus particulièrement aux radiations UV (Beggs et Wellman, 1985). En effet, ces éléments vont permettre aux plantes supérieures d'atténuer les radiations par des structures superficielles des organes des plants et ainsi développer des mécanismes de protection (Solovchenko et Schmitz-Eiberger, 2003).

Ces mêmes auteurs démontrent, par ailleurs, que le contenu phénolique de la peau des pommes est corrélé à la protection du système photosynthétique contre les UV-B (et plus particulièrement du photosystème II). Ces derniers absorbent toutes les radiations UV-B et agissent comme de véritables écrans solaires. Des observations similaires ont été faites par

(DeLucia et *al.*, 1992 ; Day et *al.*, 1994) qui précisent que les flavonoïdes atténuent les radiations UV dans les feuilles vertes matures et dans le mésophylle lors de la croissance des feuilles alors qu'elles n'ont pas de cuticule ou d'épiderme bien formés, permettant ainsi à la plante de s'adapter à son environnement.

En outre, Solovchenko et Schmitz-Eiberger (2003) mettent en évidence, sur deux cultivars de pomme, que les niveaux et la composition des pigments vont différer et résulter de l'adaptation à un fort ensoleillement. Parallèlement à un fort taux d'anthocyanes, une accumulation massive de flavonoïdes (et plus particulièrement la quercetin glycoside majoritaire dans la peau des pommes) est observée sur les faces de fruit au soleil de cv. Braeburn alors que les niveaux des faces non exposées, ou des fruits à l'ombre sans anthocyanes, pour le même cultivar, auront un niveau moyen de flavonoïdes. Les fruits sans anthocyanes, comme le cv Granny Smith, s'adaptent à un fort ensoleillement en diminuant leur teneur en chlorophylle et en caroténoïdes, limitant ainsi la quantité d'énergie lumineuse pouvant être absorbée. Les fruits contenant des anthocyanes auront des quantités équivalentes ou supérieures de chlorophylle et de caroténoïdes sur leur face exposée comparativement à la face non exposée. Ces phénomènes mettent en avant la fonction photo protectrice des anthocyanes qui pourrait réduire les risques de dégâts de photo oxydation en absorbant la l'énergie lumineuse afin de limiter celle qui pourrait être absorbée par les chlorophylles (Merzlyak et Chivkunova, 2000).

Cependant les anthocyanes ont un spectre avec des faibles coefficients d'extinction dans les UV (Strack et Wray, 1989). Seule une contribution relative des anthocyanes comparativement à la quercetin glycoside (flavonoïdes) dans l'absorbance des UV par les extraits de peau de pomme pourrait expliquer la faible corrélation des anthocyanes avec l'absorbance des UV-B (Solovchenko et Schmitz-Eiberger, 2003). Ces résultats sont en accord avec ceux de Woodall et Stewart (1998) qui confirment le moindre rôle des anthocyanes comme UV-B protecteur du fait de l'absence d'acides aromatiques phénoliques et de leur faible proportion par rapport aux autres composés phénoliques. Les anthocyanes pourraient cependant être impliqués dans la protection contre les radiations vert bleu du spectre visible (Merzlyak et Chivkunova, 2000).

Plusieurs travaux de recherche ont démontré une très forte corrélation entre l'activité antioxydante totale avec la quantité totale de polyphénols (TPP). Les anthocyanes font partie

des polyphénols mais leur contribution à l'activité antioxydante totale est relative (Simonetti et al., 1997 ; Pelligrini et al., 2000).

Les caroténoïdes peuvent dissiper un excès d'énergie comme la chaleur par des piègeages non photochimiques et prévenir ainsi de la formation de ROS (Frank et al., 1999). Le stress oxydatif par l'intermédiaire d'une accumulation de ROS est une force potentielle pour l'expression des gènes de synthèse des caroténoïdes et plus particulièrement le β -carotène comparativement aux xanthophylles (Bouvier et al., 1998). De nombreux travaux ont démontré que le stress oxydatif régule la biosynthèse des caroténoïdes pendant la transition chloroplaste-chromoplaste dans les plantes. Des stress de forte irradiance ou de basse température ont permis une accumulation *de novo* de caroténoïdes (rhodoxanthin et de anhydroescholtzxanthin) dans les chloroplastes de *Aloe vera* et *Cryptomeri* (dans la synthèse bibliographique de Bouvier et al., 1998). Elle précise qu'en général, les caroténoïdes accumulés *de novo* procurent une meilleure protection phyto dynamique que les caroténoïdes présentes normalement.

Ces antioxydants agissent dans les tissus des plantes comme des métabolites photo protectifs qui permettent de réduire les dégâts induits par une irradiance excessive (Merzlyak et al., 2002 ; Solovchenko and Schmitz-Eiberger, 2003). Cette hypothèse expliquerait que les tomates rouge matures (Retig et Kedar, 1967) et de la même façon, les pommes rouges (Brooks et Fisher, 1926 ; Barden et Bramlage, 1994) et les poivrons rouges (Rabinowitch et al., 1986) seraient plus tolérants aux brûlures.

5.2.2 Les antioxydants dans les mangues

Dans la pulpe des mangues, les teneurs en polyphénols totaux sont différentes selon les cultivars. Elles varient de environ de 50 mg à 100 GAE/ 150 g de MF pour respectivement le cv. Haden et le cv. Palmer (Machado Rocha Ribeiro et al. 2007). Les travaux de Reyes et Cisneros-Zevallos (2007) montrent que les polyphénols dans la pulpe des mangues sont essentiellement composés d'acides phénoliques tels que l'acide gallique et l'acide benzoïque. Ces résultats sont en accord avec Talcott et al. (2005) qui citent l'acide gallique, avec 16.8 mg/ 100 g de MS, et ses précurseurs sous forme de gallo tannins hydrolysables comme les

polyphénols prédominants dans la chair des mangues du cv. Tommy Atkins immature. Ces résultats sont confirmés par Kim *et al.* (2007). Prabha et Patwardhan (1986) suggèrent que l'acide gallique est le substrat pour l'oxydase polyphénol dans la chair de la mangue alors que l'acide ellagique est le substrat prédominant dans la peau des mangues.

Dans la peau des mangues, Berardini *et al.* (2005) mettent en évidence la prépondérance des flavonols et xanthones mais aussi la variabilité dans le contenu polyphénolique selon le cultivar. Ainsi pour le cv. Tommy Atkins la mangiferin est prépondérante alors que pour la majorité des autres cultivars c'est la quercetin 3-O-galactoside qui sera le principal composant des polyphénols. Leurs résultats démontrent que la teneur en flavonols et xanthones est de 36 à 486 mg/ 100 g de MS en fonction des cultivars et ils en concluent que la peau des mangues est une source riche en polyphénols.

D'autres travaux tels que ceux de Schieber *et al.* (2000) montrent que les polyphénols sont essentiellement des flavonols et dérivés et sont très dépendants du stade de maturité et du cultivar. Les travaux de Reyes et Cisneros-Zevallos (2007) suggèrent que des flavonols pourraient être produits si les fruits sont soumis à des stress abiotiques.

Lakshminarayana *et al.*, (1970) mettent en évidence que les polyphénols totaux sont en quantité plus importante dans la peau que dans la chair. En effet, la quantité de polyphénols dans la chair des cultivars de mangues est quant à elle difficilement quantifiable du fait des différents tannins hydrolysables présents (gallo tanins).

Schieber *et al.* (2003) sur le cv. Tommy Atkins et Berardini *et al.* (2005) sur un screening de quatorze cultivars différents, observent dans la peau des mangues un nombre important de flavonols-O (kaempferol, quercetin, rhamnetin) et xanthone C-glycosides (mangiferin et isomangiferin). Berardini *et al.* (2005) mesurent dans la peau des mangues, un taux de quercetin 3-O-galactoside de 12.2 mg/ 100 g de MS et un taux de mangiferin de 12.7 mg/ 100 g de MS pour le cv Tommy Atkins alors qu'ils sont respectivement pour le cv. Haden de 13.1 et 0.01 mg /100 g de MS suggérant ainsi une importante variabilité entre cultivars.

Les anthocyanes de la peau des mangues ont été identifiés comme le peonidin-3-galactoside (Panhwar, 2005). Mais Berardini *et al.*, (2005) observent la présence du cyanidin 3-O-galactosidase et d'un autre hexoside. Ils mesurent des teneurs de TAT de 0.02 à 0.37 mg/ 100 g de MS selon les différents cultivars.

Ainsi une grande variabilité existe sur les quantités de polyphénols totaux et leurs constituants en fonction des cultivars (Berardini et *al.*, 2005). Cependant différents facteurs génotypiques ou de pré récolte tels que les conditions climatiques, les pratiques agricoles et le stade de maturité peuvent également altérer la teneur et la composition des polyphénols de la chair des mangues (Talcott et *al.*, 2005).

La chair des mangues est également riche en caroténoïdes et plus particulièrement en β -carotène qui est un précurseur de la vitamine A (Machado Rocha Ribeiro et *al.*, 2007). Hulme (1971) et Bhaskarachary et *al.* (1995) mentionnent que le β -carotène représente respectivement 60 et 75 % des caroténoïdes totaux. Cependant, Mercadante et *al.* (1997) et Reyes et Cisneros-Zevallos (2007) mettent en évidence par HPLC que les principaux caroténoïdes identifiés dans la pulpe des mangues sont des dérivés de la violaxanthin (50 à 60 %) et le β - carotène (12 à 27 %) ce qui rejoint les résultats de Talcott et *al.* (2005) sur le cv. Tommy Atkins. Hulme (1971) observe que les cv. Keitt, cv. Haden et cv. Kent contiennent entre 400 à 2500 UI β carotène/ 100 g de MF (soit 0.24 à 0.75 mg/ 100 g de MF) alors que Hymavathi et Kadher (2005) mentionnent 0.8 à 13 mg/ 100 g de MF en fonction des cultivars. Ces résultats mettent en évidence une grande variabilité de la teneur en caroténoïdes totaux et en β -carotène. Des oxycaroténoïdes, lutéoxanthin, violaxanthin et cis-violaxanthin sont aussi présents en quantités significatives (Hulme, 1971 ; Godoy et Rodriguez-Amaya, 1987, 1989, 1994 ; Marin et *al.*, 1992 ; Cano et de Ancos, 1994). Mais selon Kim et *al.* (2007) les caroténoïdes ne contribuent que très faiblement à l'activité antioxydante totale.

Les antioxydants induits dans les différents tissus des mangues par les conditions en pré récolte pourraient permettre une meilleure adaptation des fruits au stress oxydatif de l'ensoleillement mais aussi éventuellement modifier le comportement des mangues aux traitements à la chaleur en association avec d'autres mécanismes biochimiques et moléculaires d'adaptation aux stress.

En résumé, la mangue a un avenir prometteur sur les marchés d'exportation. En Nouvelle Calédonie, elle fait partie des fruits à fort potentiel de développement économique sur le marché local mais surtout à l'export si toutefois les désinsectisations sont réalisées et les produits ainsi traités sont de qualité irréprochable. Cependant l'étude bibliographique nous montre que la physiologie et la réponse physiologique des mangues au traitement à la chaleur sont variables selon les cultivars. De plus, les techniques de désinsectisation qui leur sont appliquées diffèrent, à la fois dans leur principe et dans leur mise en œuvre. Tout ceci augmente les facteurs de variation dans une situation déjà complexe. Ainsi le choix du cultivar, des techniques et modalités des traitements est particulièrement important pour réduire les dégâts physiologiques observés pendant les désinsectisations et ainsi optimiser la qualité des mangues sur les marchés d'exportation.

Les travaux de McCollum *et al.* (1993), Joyce et Shorter (1994), Jacobi *et al.*, (1995 ; 2000 ; 2001a ; 2001b) suggèrent que les dégâts physiologiques sur les mangues pourraient être réduits si un pré conditionnement thermique était réalisé entre 38 et 42 °C en préalable aux traitements de désinsectisation, mais que la réponse des fruits varie selon le cultivar, le stade de maturité et les délais entre ce conditionnement et la désinsectisation. C'est ce que nous allons tenter de vérifier dans le contexte calédonien.

Par ailleurs le comportement des fruits en après récolte est aussi conditionné par de nombreux facteurs de pré récolte tels que le climat et les conditions de culture (Monselise et Goren, 1987). Aucune référence n'existe sur mangue mais les travaux de recherche sur pomme et avocat de Ferguson *et al.* (1998), Woolf *et al.* (1999a, 1999b, 2000) et Woolf et Ferguson (2000) soutiennent l'hypothèse que les conditions d'ensoleillement de pré récolte pourraient induire des HSPs dans les tissus des fruits. De plus les travaux de Solovchenko et Schmitz-Eiberger (2003) sur pomme montrent qu'elles pourraient également permettre l'acquisition par le fruit d'un système de défense antioxydant.

Ces travaux de recherche sur mangues, mais également sur pomme et avocat, sont les références bibliographiques qui ont permis l'élaboration des différentes hypothèses de recherche développées dans cette thèse.

MATERIEL ET METHODES

1.1. Les fruits	57
1.1.1. <i>Cultivars</i>	58
1.1.2. <i>Mesure des températures internes</i>	58
1.1.3. <i>Développement d'un protocole expérimental de la récolte au traitement</i>	60
1.1.4. <i>Evaluation des caractéristiques biochimiques des mangues</i>	61
1.2. Développement des traitements à la chaleur expérimentaux.....	63
1.2.1. <i>Traitement à l'eau chaude par immersion</i>	63
1.2.2. <i>Traitement à l'air chaud pulsé</i>	64
1.2.3. <i>La réponse physiologique des mangues. Développement de grilles d'évaluation</i>	64
1.3. Analyses histologiques	66
1.3.1. <i>Découpe et fixation des tissus</i>	67
1.3.2. <i>Déshydratation et inclusion dans la paraffine</i>	67
1.3.3. <i>Préparation des lames d'observation</i>	67
1.3.4. <i>Observation et analyses</i>	68
1.4. Caractérisation des protéines de choc thermique	69
1.4.1. <i>Extraction et dosage des protéines totales</i>	70
1.4.2. <i>Séparation des protéines sur gel de polyacrylamide SDS-PAGE</i>	71
1.4.3. <i>Western Blots et immunodétection</i>	72
1.4.4. <i>Révélation par chimioluminescence</i>	72
1.5. Mesure de l'activité antioxydante, des polyphénols, des caroténoïdes et des anthocyanes totaux.....	73
1.5.1. <i>Extractions d'échantillons</i>	73
1.5.2. <i>Mesure de l'activité antioxydante totale par la méthode TEAC</i>	74
1.5.3. <i>Mesure des polyphénols totaux</i>	75
1.5.4. <i>Mesure des anthocyanes totaux</i>	75
1.5.5. <i>Mesures des caroténoïdes totaux</i>	76
1.6. Analyse statistique.....	76

PLUIE ET TEMPERATURES - POCQUEREUX
données 2007/ données 1986-2006

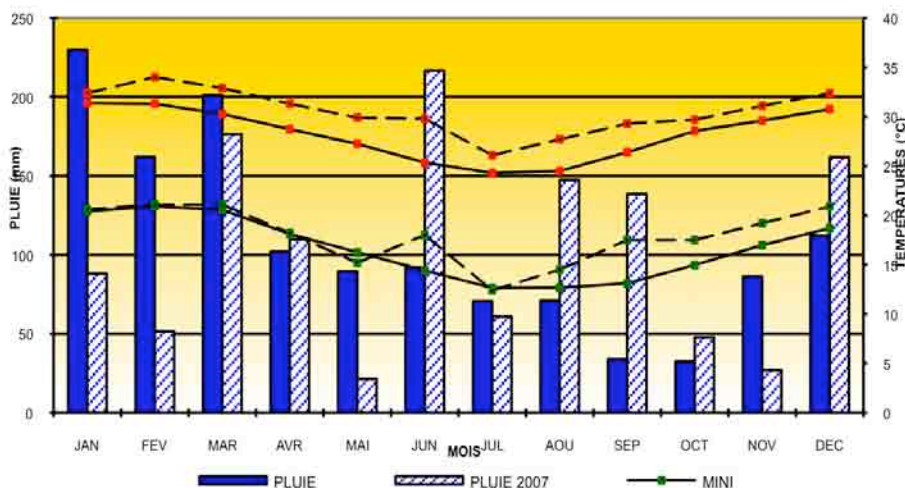


Figure 17. Températures moyennes, minimales et maximales, pluviométrie mensuelles de 2007, en comparaison avec les statistiques de la période 1986-2006 enregistrées sur le site de la SRA de Pocquereux (La Foa).

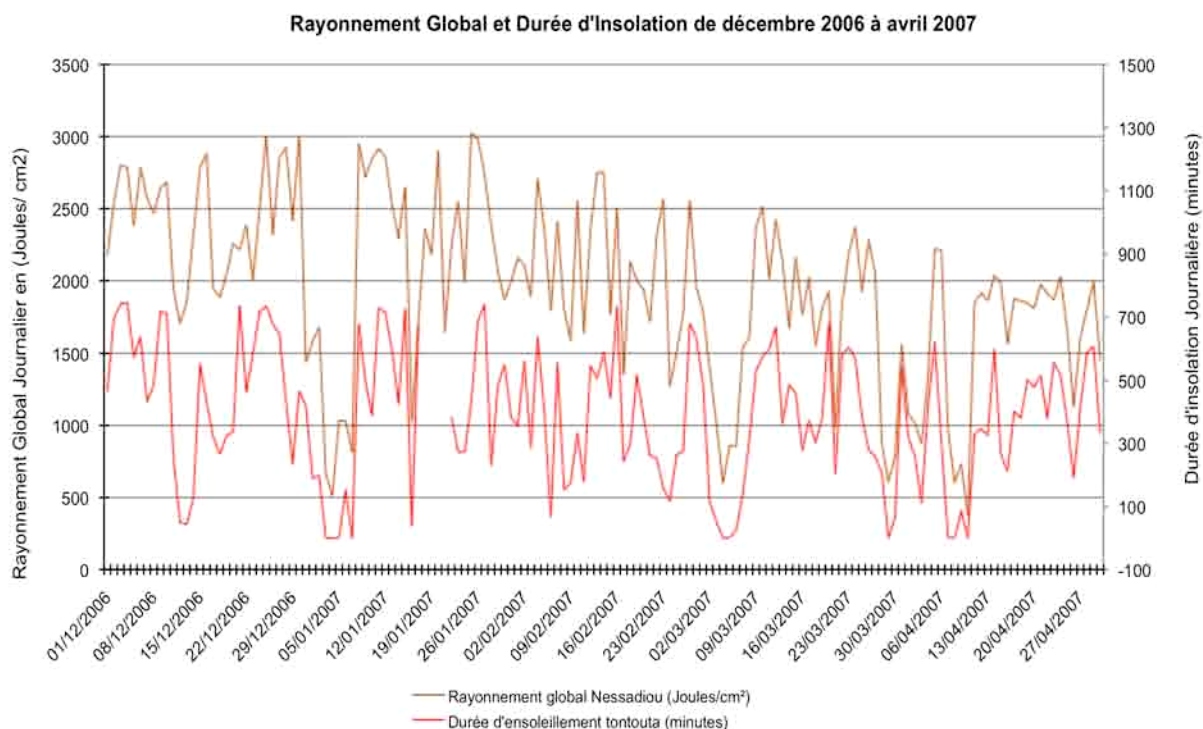


Figure 18. Rayonnement global (Nessadiou) et durée d'insolation de décembre 2006 à avril 2007 sur la côte Ouest de la Nouvelle-Calédonie (Météo France).

CHAPITRE 1

MATERIEL ET METHODES

1.1 Les fruits

Toutes les mangues des différents cultivars qui ont servi aux expérimentations sont issues des vergers expérimentaux de la SRA de Pocquereux -IAC- située sur la commune de La Foa, en Province Sud sur la côte ouest de l'île principale de la Nouvelle-Calédonie (21°S, 168°E). Le climat néo-calédonien est un climat subtropical. En fonction de la variation annuelle de la ceinture cyclonique subtropicale et des basses pressions intertropicales, quatre saisons se distinguent. Deux saisons des pluies existent, une de décembre à mi-avril qui est également la saison cyclonique et une de mi-mai à mi-septembre. Deux saisons sèches sont observées, l'une peu marquée de mi-avril à mi-mai, l'autre, importante, de septembre à novembre. Le niveau des précipitations est de 1200 mm en moyenne par an à La Foa. La température moyenne varie de 22 à 24 °C avec des extrêmes allant de 7 à 37 °C sur le site de Pocquereux (**figure 17**). L'humidité relative est comprise entre 75 et 81 %. Le rayonnement global journalier varie entre 500 et 3000 joules/ cm² pendant la période de production des mangues de décembre 2006 à avril 2007 (**figure 18**). Les données climatiques ayant servi à cette étude ont été enregistrées *in situ*, à l'exception des données de rayonnement global et de durée d'insolation qui ont été fournies par Météo France à partir des sites les plus proches de Nessadiou (commune de Bourail) et de Tontouta (commune de Païta).

Les fruits ont été récoltés sur des arbres non irrigués qui ont été plantés entre 1991 et 1994 à une densité de 5 x 7 m sur des lignes orientées sud/nord. Ces arbres sont maintenus, par une taille annuelle à une hauteur de 4.5 m afin de favoriser la pénétration du soleil. La période de production des arbres des différents cultivars s'étale de fin décembre/ début janvier avec le cv. Kensington jusqu'à mi/ fin avril avec le cv. Keitt (**tableau 1**).

1.1.1 Cultivars

Le potentiel commercial, la disponibilité en qualité et en quantité à l'issue d'une période climatique propice pour les besoins de chacune des expérimentations sont les critères de sélection des cultivars. Afin d'approcher la réponse physiologique des mangues aux traitements à la chaleur, une première évaluation, a été réalisée en 2006 avec les douze cultivars suivants : Fascell, Florigon, Haden, Irwin, Keitt, Kensington, Kent, Nam Doc Mai, Palmer, Reynal, Smith, Tommy Atkins. En 2007, six cultivars, déjà étudiés en 2006, ont été disponibles (sur les mêmes critères) et ont permis d'approfondir les réponses physiologiques aux traitements à la chaleur et les mécanismes biochimiques des mangues. Ces cultivars sont Cogs Hall, Keitt, Nam Doc Mai, Palmer, Reynal et Smith. Les principales caractéristiques de ces cultivars sont données dans le **tableau 1** du contexte bibliographique.

1.1.2 Mesure des températures internes

La température interne des mangues est la résultante d'un ensemble de facteurs : lumière, intensité des radiations, humidité relative, vitesse du vent, durée d'exposition continue ou discontinue au soleil et/ou à l'ombre ainsi que la densité et la conductivité des tissus. En fonction de cette température interne, le comportement après récolte des fruits pourra varier (Ferguson et *al.*, 1998).

Le choix des cultivars pour chacune des expérimentations n'est pas délibéré. En effet, compte tenu des contraintes d'ensoleillement et de disponibilité du matériel, la sélection des cultivars a été adaptative sauf pour la mesure de la température interne des mangues de couleur différente où les critères de sélection ont été la couleur (peau colorée et peau verte) mais également la forme et le poids moyen des fruits qui se devaient d'être similaires pour tenter de minimiser les biais dus aux caractéristiques physiques.

Pour chacun des enregistrements des différentes expérimentations et compte tenu des équipements, seule la température interne d'un fruit par exposition a pu être mesurée. Ainsi chaque fruit a été précautionneusement choisi de façon à être le plus représentatif du cultivar dans une localisation spatiale pouvant représenter les expositions extrêmes : plein



Photo 2. Sondes d'enregistrement de température interne dans le cv. Kensington



Photo 3. Filtres de sisalation (aluminium) et anti UV-A et UV-B (transparent) sur le cv. Palmer.

ensoleillement ou ombre. Ainsi compte tenu du dispositif expérimental, les expérimentations sur les mesures de températures internes des mangues de cette étude ont plus une valeur informative que démonstrative mais vont permettre d'approcher des hypothèses.

Les méthodes utilisées pour les mesures de températures internes des fruits ont été adaptées à partir des protocoles que Ferguson et *al.* (1998) et Woolf et *al.* (1999a) ont utilisés sur pomme et avocat. Les températures internes des mangues ont été mesurées sur les deux faces d'un même fruit exposé au soleil ou à l'ombre afin de comparer des différences dans l'hypothèse où ce paramètre pourrait expliquer certains comportements physiologiques en après récolte. Les enregistrements ont été réalisés en moyenne 5 à 7 jours avant la récolte en insérant des sondes Squirrel Thermistor de précision ± 0.05 °C (CM-UU-V5-1 ; Grant Inc., Cambridge, UK) dans un angle tel que l'extrémité de la sonde soit à 10 mm de profondeur dans la chair. Les températures ont été relevées à l'aide d'un enregistreur Squirrel Data (Modèle 1022 ; Grant Inc., Cambridge, UK) avec des fréquences d'enregistrement de 15 min pendant la durée nécessaire prévue dans le protocole. Les fruits ont été choisis à hauteur d'homme entre 1.5 m et 2 m, de taille similaire. Les fruits au soleil ont été sélectionnés à l'extérieur de la canopée sur le quartier d'arbre le plus exposé au soleil et les fruits à l'ombre à l'intérieur de la canopée. Les sondes ont été introduites dans l'épaule du fruit (**figure 2**) avec un angle d'insertion orienté de haut en bas afin d'éviter leur chute pendant le développement du fruit. L'extrémité de la sonde a été ainsi enfoncée dans le fruit de façon à être positionnée entre le noyau et la peau à une distance variant entre 1 à 1.5 cm de profondeur de chair (à partir de la peau). Sur chaque fruit choisi, une sonde dans la face exposée et une autre dans la face non exposée a été placée. La température de l'air a été également relevée à l'aide d'une sonde positionnée à l'air libre, à l'ombre au milieu de la canopée (**photo 2**).

En fonction de la saison et de l'heure de la journée, l'angle d'incidence des radiations du soleil varie. Ainsi une mangue à l'ombre pourra bénéficier de l'influence de quelques radiations à certaines heures de la journée. Afin de s'affranchir de ce biais potentiel, pour les expérimentations de 2007, les fruits non exposés au soleil, ont eu un effet d'ombre renforcé, avec un cône de sisalation constitué de deux feuilles argentées d'aluminium entre lesquelles une couche d'isolant (papier kraft) a été placé. Par ailleurs, les effets des UV peuvent être néfastes en entraînant des dégâts tissulaires mais ils peuvent être également bénéfiques pour le réchauffement des fruits et la mise en place de mécanismes de protection. Ainsi afin de



Photo 4. Différence de coloration entre une mangue exposée au soleil (à gauche) et une mangue à l'ombre sous la canopée (à droite) du cv. Keitt



Photo 5. Mangues du cv. Haden disposées sur des grilles, zone pédonculaire vers le bas pour permettre l'écoulement de sève.

séparer la contribution des UV aux réponses physiologiques des mangues en après récolte, des filtres anti UV-A et UV-B transparents (3M ScotchshieldTMSH7 CLARL filtrant 99 % des UV) ont été également disposés sur des fruits exposés au soleil (**photo 3**).

Des compléments d'information sur chaque protocole d'enregistrement de température sont détaillés au préalable des paragraphes de résultats en fonction de la spécificité des expérimentations.

1.1.3 Développement d'un protocole expérimental de la récolte au traitement

Afin de réduire les facteurs de variation dans la récolte et la préparation des fruits avant les traitements à la chaleur, un protocole expérimental de la récolte au traitement a été standardisé. Les dates des différentes expérimentations ont été choisies en fonction de l'historique climatique sur 48 h au moins et au préalable, et sur la disponibilité en matériel (quantité suffisante de fruits exposés au soleil et de fruits à l'ombre de qualité et de calibre homogène) pour un cultivar qui arrive à maturité dans la période considérée. Comme indiqué précédemment, la méthode d'évaluation de la bonne maturité des mangues est difficile et est spécifique à chacun des cultivars, c'est pourquoi, la date de récolte de chacun des cultivars étudiés a été déterminée sur des critères visuels et physiques : premières chutes de fruits, remplissage des épaules et léger jaunissement de la coloration de la pulpe.

Les mangues ont été alors récoltées en fonction de leur exposition au soleil ou à l'ombre, puis ont été traitées. Les fruits à l'ombre ont été choisis, à l'intérieur de la canopée, volontairement sans aucune tache de couleur (ce qui pourrait suggérer le cas échéant une incidence de radiations). Les fruits exposés au soleil ont été choisis préférentiellement sur le quartier d'arbre le plus exposé, en l'occurrence au Nord-Est, à l'extérieur et en haut de la canopée. D'une façon générale, ces mangues portent une tache de couleur plus ou moins marquée sous l'influence de l'ensoleillement (**photo 4**). La récolte a eu lieu à 11 h ou à 15 h de l'après midi c'est à dire aux heures les plus chaudes de la journée. Les fruits ont été aussi récoltés avec un pédoncule long de 10 cm pour limiter les écoulements de sève sur le corps et ont été placés dans des cageots de récolte. Acheminés au dock, le pédoncule a été sectionné à ras et les mangues ont été disposées sur des grilles pendant au moins une heure, zone pédonculaire vers le bas afin de limiter les brûlures pouvant être occasionnées par la sève (**photo 5**) et le risque qu'elles n'interfèrent dans l'évaluation des dégâts physiologiques des traitements à la chaleur. Elles ont été ensuite lavées à l'eau et essuyées soigneusement avec un tissu afin d'éliminer la

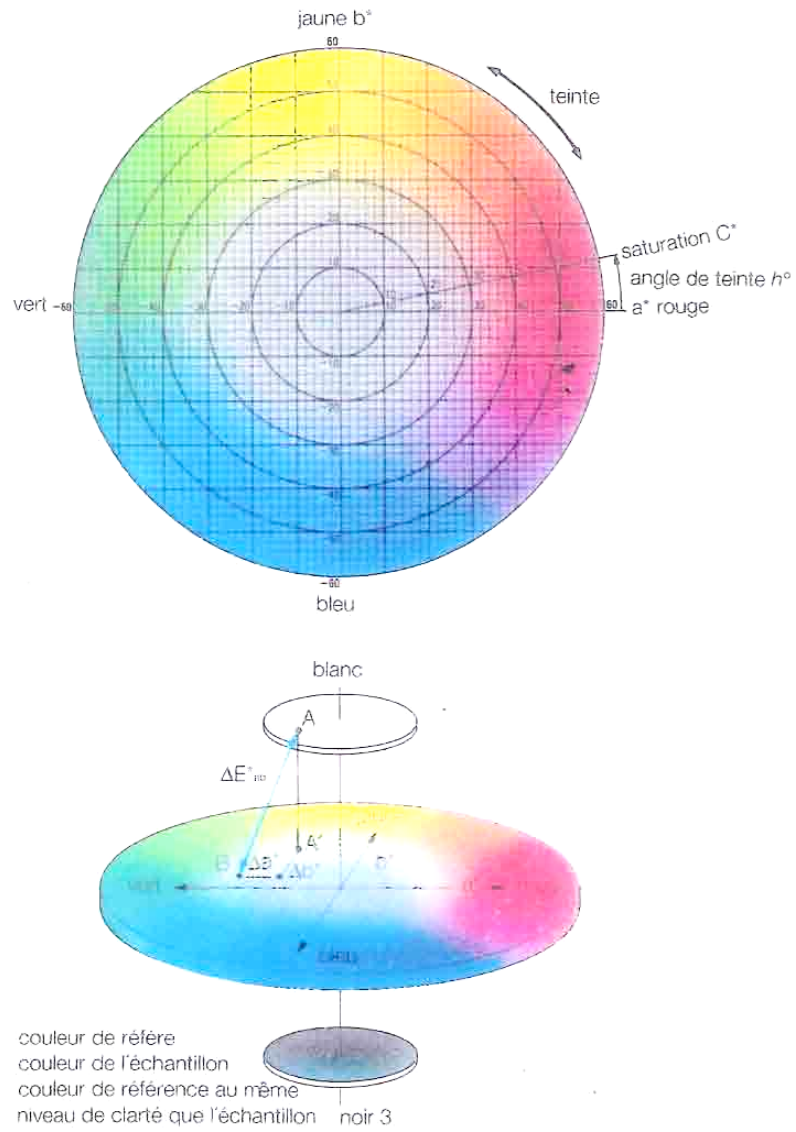


Figure 19. Sphère colorimétrique Cie L*a*b*

pruine pour permettre, après les traitements, une meilleure visibilité des dégâts. Les lots ont été alors constitués de la façon suivante pour chacun des cultivars, exposition (ombre et soleil) et expérimentation :

- un lot de récolte (10 fruits) sur lequel ont été mesurées les caractéristiques biochimiques nécessitant la destruction des fruits,
- trois répétitions (de 8 à 10 fruits) pour chacun des traitements à la chaleur appliqués selon les dispositifs expérimentaux,
- trois répétitions (de 8 à 10 fruits) non traités.

1.1.4 Evaluation des caractéristiques biochimiques des mangues

Les caractéristiques biochimiques des mangues ont été mesurées à la récolte et après chacun des traitements. À la récolte, ces paramètres ont permis d'apprécier le stade phénologique des fruits et de comparer les spécificités de chacun des cultivars en fonction de l'ensoleillement. Après chacun des traitements, leurs éventuelles variations représentent des éléments importants pour la compréhension de la réponse physiologique des mangues et des mécanismes de protection pouvant être mis en place face aux différents stress appliqués.

a) Couleur de la peau et de la pulpe

La couleur de la pulpe et de la peau est mesurée avec un chromamètre (Minolta CR-300). Elle est évaluée grâce à une sphère colorimétrique Cie Lab $L^*a^* b^*$. L^* mesure la luminosité et varie de 0 (noir) à 100 (blanc), les paramètres a^* et b^* mesurent les chromaticités et leur saturation (Jha et al., 2007). Des valeurs $+a$ indiquent le rouge, $-a$ le vert et les valeurs $+b$ indiquent le jaune et $-b$ le bleu (**figure 19**). Dans cette étude, la chromaticité des mangues est mesurée distinctement par les paramètres a^* et b^* et non par C la chroma (saturation de la couleur) et h (l'angle de teinte) fréquemment utilisés pour la mesure des couleurs des fruits dont la mangue (Kim et al., 2007). En effet, si effectivement les valeurs h et C positionnent bien la couleur sur le diagramme du système CIE $L^*a^*b^*$ comme un équilibre entre les couleurs vert/rouge (a^*) et bleu/jaune (b^*), quelques études sur les fruits ont permis de corréler différents pigments de couleur avec ces paramètres. Ainsi Vera de Rosso et Mercandante (2007) chez Acerola (*Malpighia emarginata* DC) et Açai (*Euterpe oleracea* Mart.) et Schmitzer et al. (2009) chez *Acer palmatum* Thunb. mettent en évidence une forte corrélation positive des anthocyanes cyanidin-3-glucoside, composé important dans la peau

des mangues selon Berardini et *al.* (2005), avec le paramètre a^* et négative avec le paramètre b^* . Par ailleurs Tourjee et *al.* (1998) démontrent une forte corrélation du β -carotène, principal caroténoïde dans la pulpe des mangues selon Machado Rocha Ribeiro et *al.* (2007), avec le paramètre b^* dans la chair de pêches. Ainsi la mesure des chromaticités a^* et b^* distinctement donneraient une mesure globale comparative, entre cultivars ou entre traitements, des pigments présents dans les tissus.

La couleur de la pulpe a été mesurée entre le centre et le bord (moyenne de trois mesures par mangue) sur la joue la plus exposée au soleil. Les mesures ont été effectuées sur tous les individus d'une répétition d'un même lot et les résultats ont été exprimés par la moyenne des trois répétitions. La couleur de la peau a été mesurée sur la tache de couleur et sur la couleur du fond, en veillant à prendre en compte la couleur la plus représentative sur la peau. Une moyenne de trois mesures a été également effectuée. La couleur de la peau a été mesurée à la récolte, un jour après le traitement et au stade consommable. La mesure de la couleur de la chair a été mesurée au stade de la récolte et au stade consommable pour chacun des traitements en fonction des différents protocoles.

b) La teneur en Extraits Secs Solubles et l'Acidité Titrable

La teneur en Extraits Secs Solubles (ESS), principalement les sucres, a été mesurée à partir du jus de mangues à l'aide d'un réfractomètre (BrixStix Bioblock Scientific) selon la méthode AOAC (1996). Le réfractomètre utilise certains principes optiques pour estimer la concentration d'une solution en fonction de la réfraction de la lumière à travers cette solution. Chaque substance dissoute dans un liquide influence le déplacement de la lumière par rapport à de l'eau pure. L'échelle Brix est calibrée grâce à une solution de saccharose pure. La concentration en ESS est donnée en degré Brix de 1 à 20 en comparant à une solution de référence de saccharose pure. Ainsi 1 ° Brix correspond à 1 % d' Extraits Secs Solubles dans la solution. Il a été mesuré à la récolte sur le lot de départ et après le traitement ainsi qu'au stade consommable.

La teneur en Acidité Titrable (TA) est donnée en volume de NaOH 0.1 M nécessaire pour neutraliser l'acide (ions H^+) contenu dans le jus pur de la pulpe de mangue dans lequel ont été additionnées quelques gouttes de phénolphthaléine en accord avec la méthode AOAC (1996). Elle donne une approximation de la teneur en acidité totale. La teneur en TA a été mesurée à la récolte et après le traitement ainsi qu'au stade consommable.

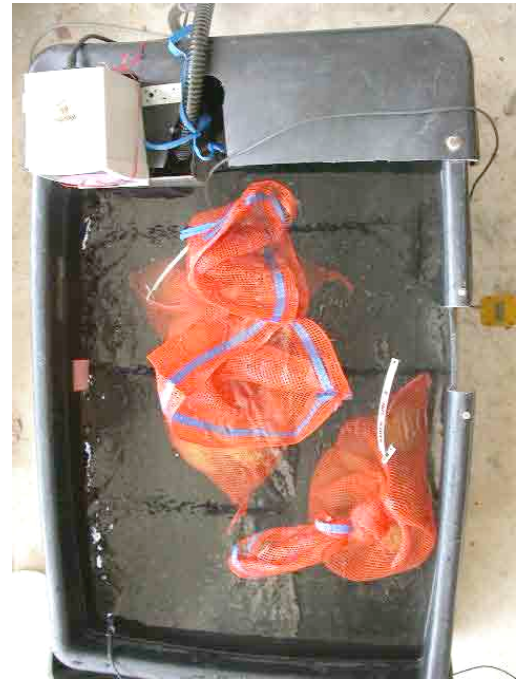
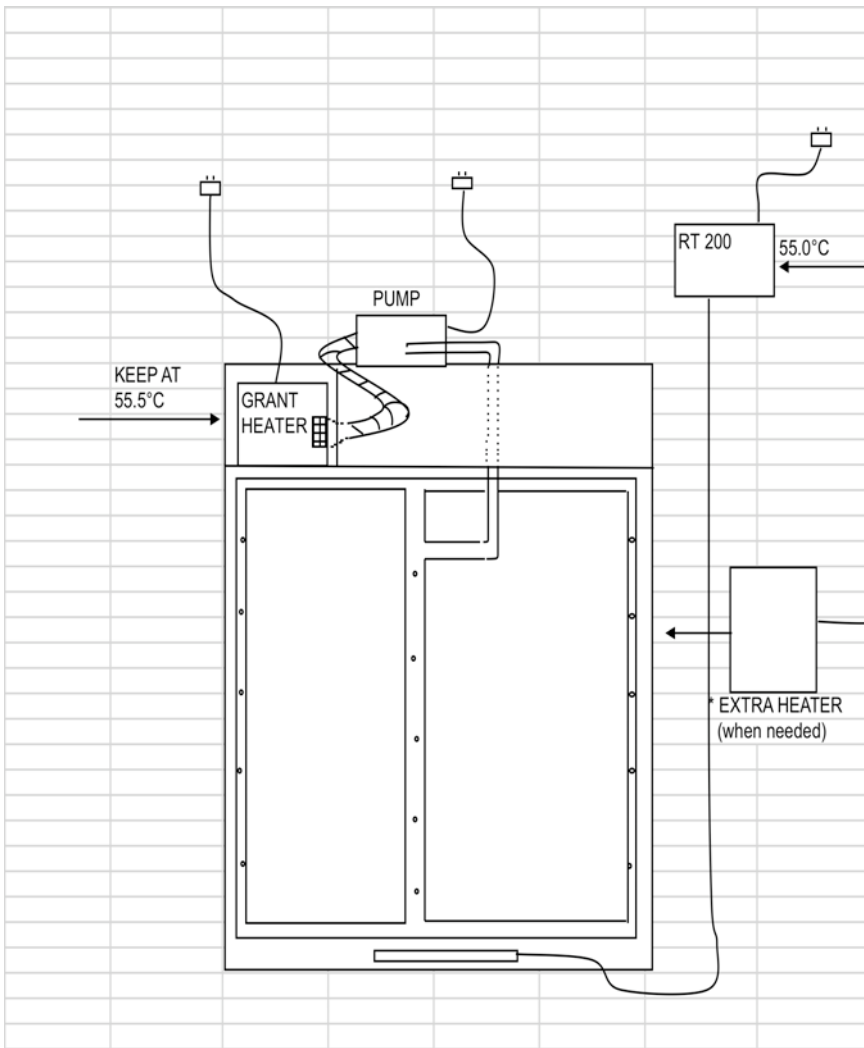


Figure 20. Vue de dessus du prototype expérimental du bain en immersion dans l'eau chaude. Un circuit fermé d'eau chaude (55°C grâce à des résistances Grant Heater et Extra Heater) est propulsé, à l'aide d'une pompe (pump), de façon continue dans un réseau de tubes percés afin de maintenir une turbulence et température homogène à l'intérieur du bac. Un thermomètre de référence (RT 200) est placé dans l'eau pour contrôler la température du bain. A droite les fruits sont mis dans des filets pour le trempage.

Par cultivar et par expérimentation, les joues des mangues du lot témoin et de chaque répétition des différents traitements appliqués ont été découpées en cubes 2 x 2 cm et congelées. Elles ont été ensuite décongelées à température ambiante, broyées par centrifugation afin d'en extraire le jus pour réaliser les analyses de ESS et de TA. Ainsi les résultats sont présentés en moyenne des trois répétitions des traitements et une moyenne de dix fruits pour le lot de la récolte.

1.2 Développement des traitements à la chaleur expérimentaux

Afin de vérifier la réponse physiologique des différents cultivars de mangues en fonction de l'ensoleillement, deux dispositifs expérimentaux ont été développés. Un, en immersion dans un bain d'eau chaude (HWT) et l'autre à air chaud (HA). Ces deux dispositifs, utilisant des techniques différentes, existent en application commerciale pour la désinsectisation des mangues. Mais la température et la durée des traitements ont été volontairement rendues sévères pour exacerber la réponse des fruits à la chaleur.

1.2.1 Traitement à l'eau chaude par immersion

Un bac en plastique rectangulaire (0.84 x 0.38 x 0.40 m) d'une contenance de 125 litres a été équipé d'un système composé d'une résistance (Grant GD100, 0-100 °C +/- 0.05 °C, 240 V 1.4 kW), d'une pompe (DAB VA55/130) et d'un circuit fermé de tuyaux en PVC perforés tous les huit centimètres afin de répartir de façon homogène et dynamique l'eau à une température constante ± 0.2 °C à l'intérieur du bac (**figure 20**) selon la technique décrite par Woolf et Lay-Yee (1997). Différentes températures et durées de traitement ont fait l'objet de tests préliminaires (en 2004 et 2005) afin de déterminer un traitement en immersion à l'eau chaude, suffisamment sévère, pour mettre en évidence, à travers des dégâts externes et internes, les réponses physiologiques en fonction des cultivars, des expositions et des différentes expérimentations. Ainsi le traitement expérimental HWT 55.0 °C/ 50 min s'est révélé sévère et pertinent pour apprécier les différentes réponses physiologiques des fruits selon les cultivars. L'application de ce traitement nous a permis également de développer une charte de dégâts (**sous chapitre 1.2.3**).

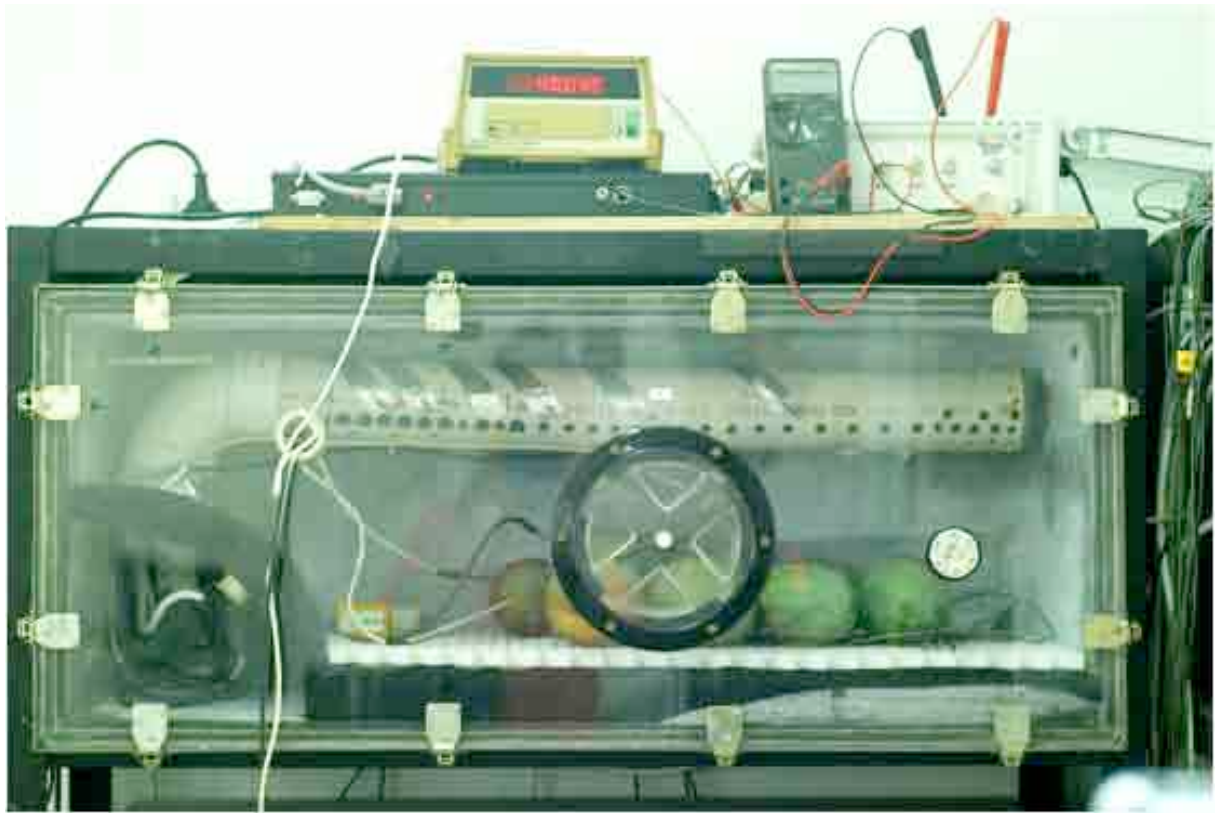


Photo 6. Détail d'un cabinet de traitement HA de la machine expérimentale développée par le Plant and Food Research Institute de Nouvelle-Zélande.

1.2.2 Traitement à l'air chaud pulsé

Les traitements à air chaud ont été réalisés, en accord avec la méthode mise au point sur avocat par Woolf et *al.*, (1995), dans une machine expérimentale de six compartiments de 147 litres chacun, développée par le Plant and Food Institute de Nouvelle-Zélande (**photo 6**). Cette machine permet de réaliser six traitements expérimentaux avec des températures et des durées de traitements différents en simultané. Les montées en température, la température de l'air et la température interne des fruits sont contrôlées par ordinateur grâce à des sondes. L'humidité relative de l'air n'est pas contrôlée mais a été maintenue saturée à l'aide de bacs remplis d'eau à l'intérieur de chaque compartiment. Des ventilateurs ont permis d'injecter de l'air chaud à une vitesse de 10 m/ s dans chaque compartiment et de maintenir une homogénéité de température à l'intérieur de chaque enceinte. En 2005, une calibration de chacun des compartiments a été réalisée, à l'aide d'enregistreurs de températures Grant à 16 sondes Squirrel Thermistor (CM-UU-V5-1 ; Grant Inc., Cambridge, UK) afin de définir les points chauds et les points froids et de réduire les variabilités d'élévation de température liés à l'équipement. Ces informations ont été prises en compte lors de la charge en fruits de la machine et ont permis d'éviter les points froids et chauds de la machine. De même que pour les traitements en immersion dans l'eau chaude, des tests préliminaires ont été réalisés en 2004 et 2005 afin de déterminer les conditions de température et de durée du traitement les plus adéquates par rapport aux objectifs de l'étude. Le protocole appliqué commercialement en Nouvelle-Calédonie (HA 47.0 °C/ 20 min) et un protocole plus sévère (HA 49.0 °C/ 90 min), qui simule les conditions extrêmes que certains produits peuvent subir aux points les plus chauds de la machine, ont été retenus. Les fruits (soleil ou ombre) ont été placés dans la machine avec des températures internes de 29 à 30 °C. La montée en température a été programmée pour arriver à 47 °C et 49 °C à cœur de fruit selon le traitement en 3 h 30 min. Une fois cette température atteinte à cœur de fruit, la durée du traitement a été appliquée.

1.2.3 La réponse physiologique des mangues. Développement de grilles d'évaluation.

Pour évaluer la réponse physiologique des mangues de différents cultivars aux traitements à la chaleur, trois répétitions de huit à dix fruits par cultivar, par exposition (soleil ou ombre) et par traitement appliqué (non traité, HWT 55.0 °C/ 50 min, HA 47.0 °C/ 20 min et/ou HA 49.0 °C/ 90 min) ont été utilisées. Un lot témoin non traité de dix fruits par cultivar et par

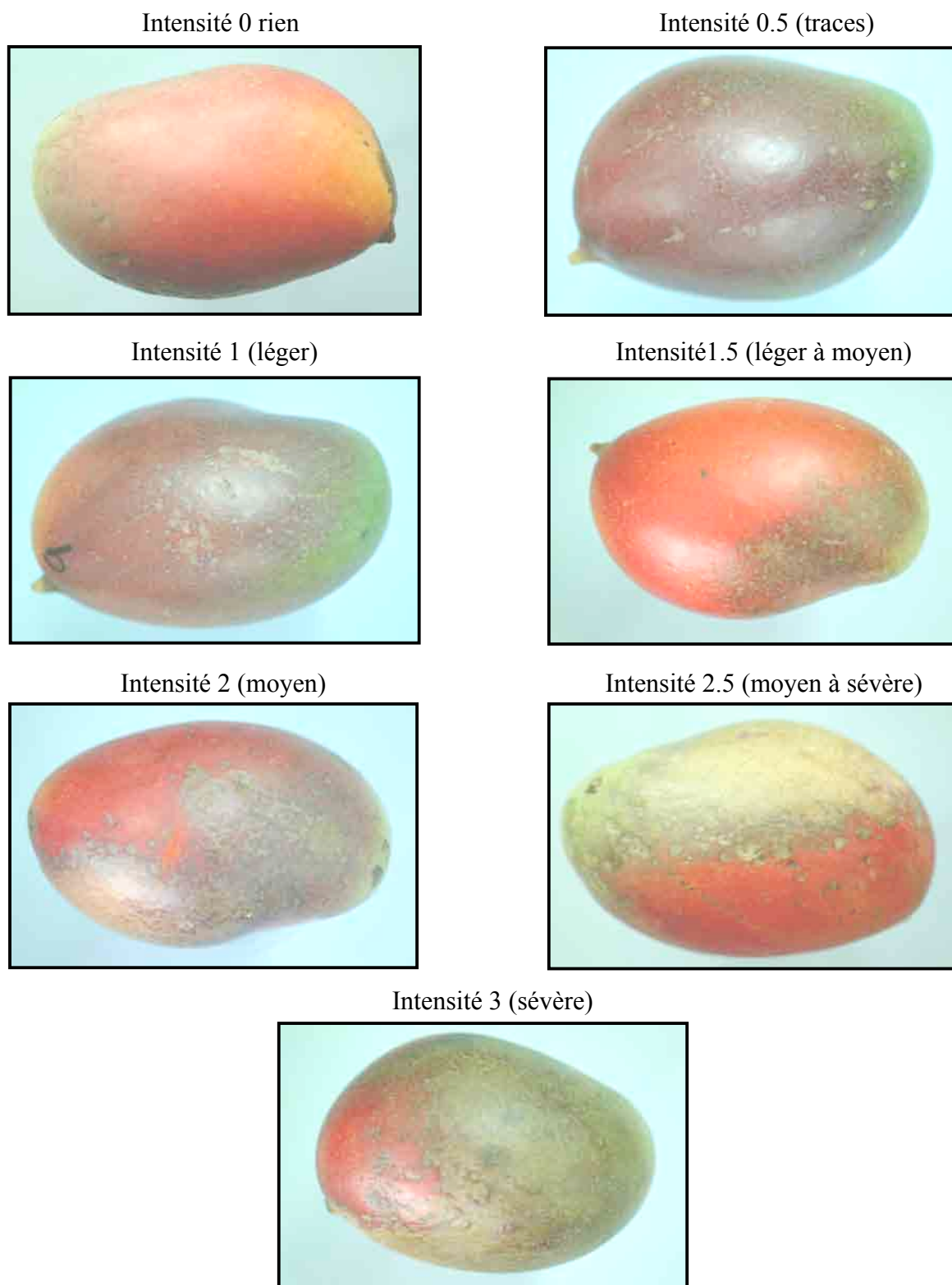


Figure 21. Scores d'intensité de dégâts physiologiques dus aux traitements à la chaleur sur la tache colorée (It) sur le cv. Palmer. Il semble qu'il y ait une relation entre une forte intensité et un pourcentage élevé de dégâts sur la surface de la tache. L'observation et l'évaluation sont faites indépendamment du fond ce qui nécessite une bonne délimitation. Les dégâts de forte intensité sont observés essentiellement sur la périphérie de la tache.

exposition a été détruit pour les mesures biochimiques initiales. Nous donnerons dans les résultats, en préalable aux sous chapitres, quelques compléments sur chaque protocole, dans la mesure des spécificités de chacune des expérimentations.

L'évaluation n'a pu se faire sans tout d'abord vérifier que les différents traitements à la chaleur engendraient les mêmes symptômes externes et internes en considérant cependant, qu'ils pouvaient être plus ou moins importants ou intenses et notamment pour le traitement HWT. Les expérimentations préliminaires de 2004 et de 2005 ont permis d'une part, cette vérification et d'autre part l'élaboration une grille de dégâts externes et internes. Jacobi (1999) a observé des dégâts similaires sur cv. Kensington traités HWT 47.0 °C/ 15 min et a établi alors une grille d'évaluation de dégâts en surface sur le fruit entier. Mais les premières observations réalisées dans le cadre de cette étude, ont mis en évidence, même si les symptômes étaient similaires, des différences de réponses physiologiques aux traitements à la chaleur sur la peau de la tache colorée et sur la peau du reste du corps du fruit. Ainsi les évaluations sur la peau de la tache colorée ont été réalisées de façon distincte de celles sur la peau du reste du fruit en différenciant l'intensité et la surface du dégât qu'ils représentent sur la tache de couleur ou le reste du fruit. En ce qui concerne les dégâts internes, ils étaient indifféremment localisés sous la peau et au centre du fruit et une évaluation globale a été retenue.

Dégâts externes

Des dégâts physiologiques externes sur la peau des mangues ont été observés suite aux différents traitements à la chaleur et plus particulièrement suite au traitement en immersion en eau chaude à 55.0 °C/ 50 min. Ils se présentent sous la forme de ponctuations brunes plus ou moins en dépression et plus ou moins foncées selon l'intensité du dégât. Une faible dépression et coloration correspond à une faible intensité et inversement. Ces dégâts plus ou moins intenses peuvent coalescer en plages brunes pouvant recouvrir toute la surface de la peau au niveau de la tache colorée ou du fond du fruit. Ce dernier est défini comme la surface de peau hors tache de couleur. Les différents paramètres observés sont :

- pourcentage de la tache colorée sur la mangue entière (% tache colorée)
- pourcentage de fond sur la mangue entière (% fond)
- intensité des dégâts sur la tache colorée (It) qui représente la sévérité des dégâts si la dépression est plus ou moins accentuée et la coloration plus ou moins brune

Intensité 0 rien



Intensité 1 (léger)



Intensité 2 (moyen)



Intensité 3 (sévère)



Figure 22. Scores d'intensité de dégâts physiologiques dus aux traitements à la chaleur sur le fond (If) du cv. Keitt. L'observation et l'évaluation sont faites indépendamment de la tache colorée, seulement sur les parties vertes. Les scores intermédiaires ne sont pas présentés dans cette figure.

comme illustrée sur la **figure 21** (0/ rien ; 0.5/ traces ; 1/ léger ; 1.5/ léger à moyen ; 2/ moyen ; 2.5/ moyen à sévère ; 3/ sévère). Cette observation se limite à la tache colorée.

- pourcentage de la surface de dégâts sur la tache colorée qui représente l'étendue des dégâts sur la tache (% dégâts tache)
- intensité des dégâts sur le fond (If) qui représente la sévérité des dégâts si la dépression est plus ou moins accentuée et la coloration plus ou moins brune comme illustrée sur la **figure 22** (0/ rien ; 0.5/ traces ; 1/ léger ; 1.5/ léger à moyen ; 2/ moyen ; 2.5/ moyen à sévère ; 3/ sévère). Cette observation se limite au fond de la mangue.
- pourcentage de la surface de dégâts sur le fond qui représente l'étendue des dégâts sur le fond (% dégâts fond)
- un indice général I (0 à 600) qui se calcule à partir des quatre critères ci dessus selon la formule suivante :

$$I = (It \times \% \text{ dégâts tache}) + (If \times \% \text{ dégâts fond})$$

Dégâts internes

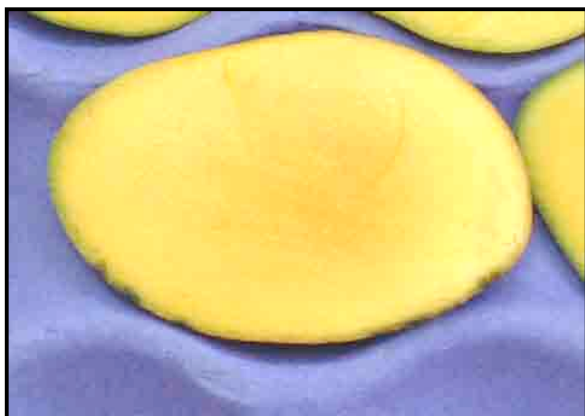
Les dégâts internes ont été évalués à la découpe des joues des mangues. Ils se manifestent par des petits points blancs durs dans la pulpe des mangues qui peuvent se densifier et former des plages dures blanches plus ou moins étendues et dans les cas les plus sévères des cavités internes. Ces dégâts se localisent au centre de la pulpe ou en périphérie sous la peau. Une charte a été développée sur une échelle de 0 à 6 (0/ rien ; 1/ traces ; 2/ léger ; 3/ léger à moyen ; 4/ moyen ; 5/ sévère ; 6/ très sévère) en fonction seulement de la sévérité des lésions compte tenu de la faible surface qu'ils représentent sur la joue (**figure 23**).

Les évaluations des dégâts internes ont été faites sur chaque mangue de chacune des trois répétitions par exposition (ombre ou soleil) pour un même traitement et par cultivar. Les résultats représentent la moyenne des notes des trois répétitions.

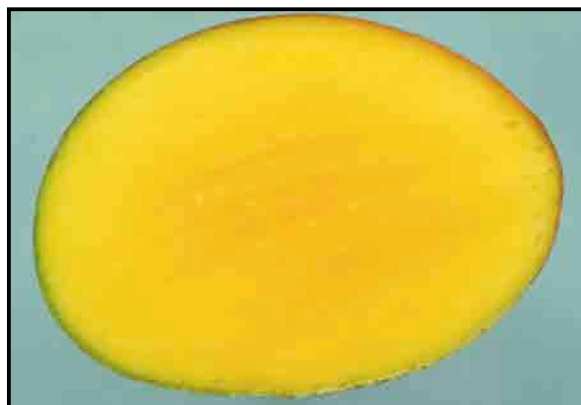
1.3 Analyses histologiques

L'observation des échantillons de fruits pour les analyses histologiques a permis de vérifier plus finement l'intégrité des tissus et des cellules face aux différents stress appliqués : ensoleillement en pré récolte ou traitements à la chaleur en après récolte. Les fruits échantillonnés ont été récoltés entre 14 et 15 h, heures où la température interne des fruits est

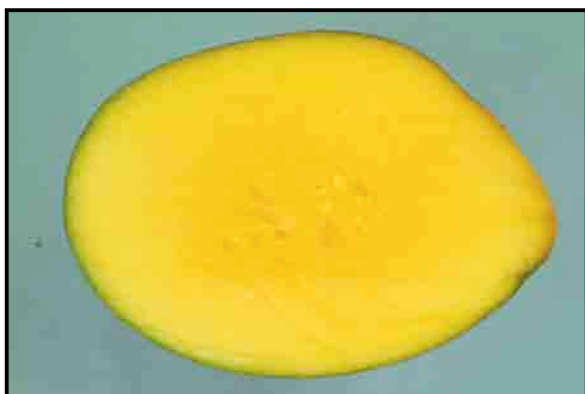
Intensité 0 rien



Intensité 1 (léger)



Intensité 2 (moyen)



Intensité 3 (sévère)



Figure 23. Scores de dégâts physiologiques dus aux traitements à la chaleur dans la pulpe de différents cultivars de mangues.

la plus élevée, selon leur exposition au soleil ou à l'ombre. La découpe des blocs a été faite immédiatement après la récolte ou après le traitement après récolte si il y en a eu un. Un prélèvement a été effectué dans une zone allant de l'épicarpe jusqu'au parenchyme profond. Pour une même mangue et un même traitement cinq à huit blocs de tissus ont été échantillonnés afin de constituer des répétitions.

1.3.1 Découpe et fixation des tissus

La fixation des tissus est nécessaire pour préserver les cellules et les tissus dans une situation la plus proche de celle de la nature. Les tissus de mangues ont été fixés dans de l'alcool formolé acétique (FAA) à 70 % pendant au moins 12 h. Le fixateur (FAA) comprend 60 ml de formol pur (37 à 40 %), 500 ml d'éthanol à 95 °, 40 ml d'acide acétique glacial et 400 ml d'eau distillée pour un litre (Johansen, 1940).

1.3.2 Déshydratation et inclusion dans la paraffine

Les explants ont été ensuite déshydratés progressivement selon la technique de Johansen (1940), par une succession de trois bains : un mélange butanol tertiaire et éthanol à 85 ° (v/v) pendant 20 min, puis un mélange butanol tertiaire et éthanol à 95 ° (v/v) pendant 20 min et enfin un mélange de butanol tertiaire et éthanol absolu (v/v) pendant 20 min. Ils ont été ensuite transférés dans un bain de butanol neuf à 100 % et laissées à l'étuve à 40 °C pendant 2 h. L'inclusion des pièces dans la paraffine a été ensuite réalisée dans un mélange égal de butanol à 100 ° et de paraffine liquide à 60 °C pendant une heure, puis dans un bain de paraffine à 60 °C qui a été renouvelé une fois au bout d'une heure et dans lequel les pièces sont restées toute une nuit à 60 °C. Au bout de 24 h, l'état des tissus et leur inclusion dans la paraffine ont été vérifiés avant de procéder à la découpe.

1.3.3 Préparation des lames d'observation

Des coupes de tissus de 5 µm d'épaisseur ont été découpées à partir des inclusions à l'aide d'un microtome Leica (Model JUNG RM2055). Elles ont ensuite été placées sur des lames à microscope. Avant la coloration, les lames ont été déparaffinées en étuve à 60 °C pendant 2 h,

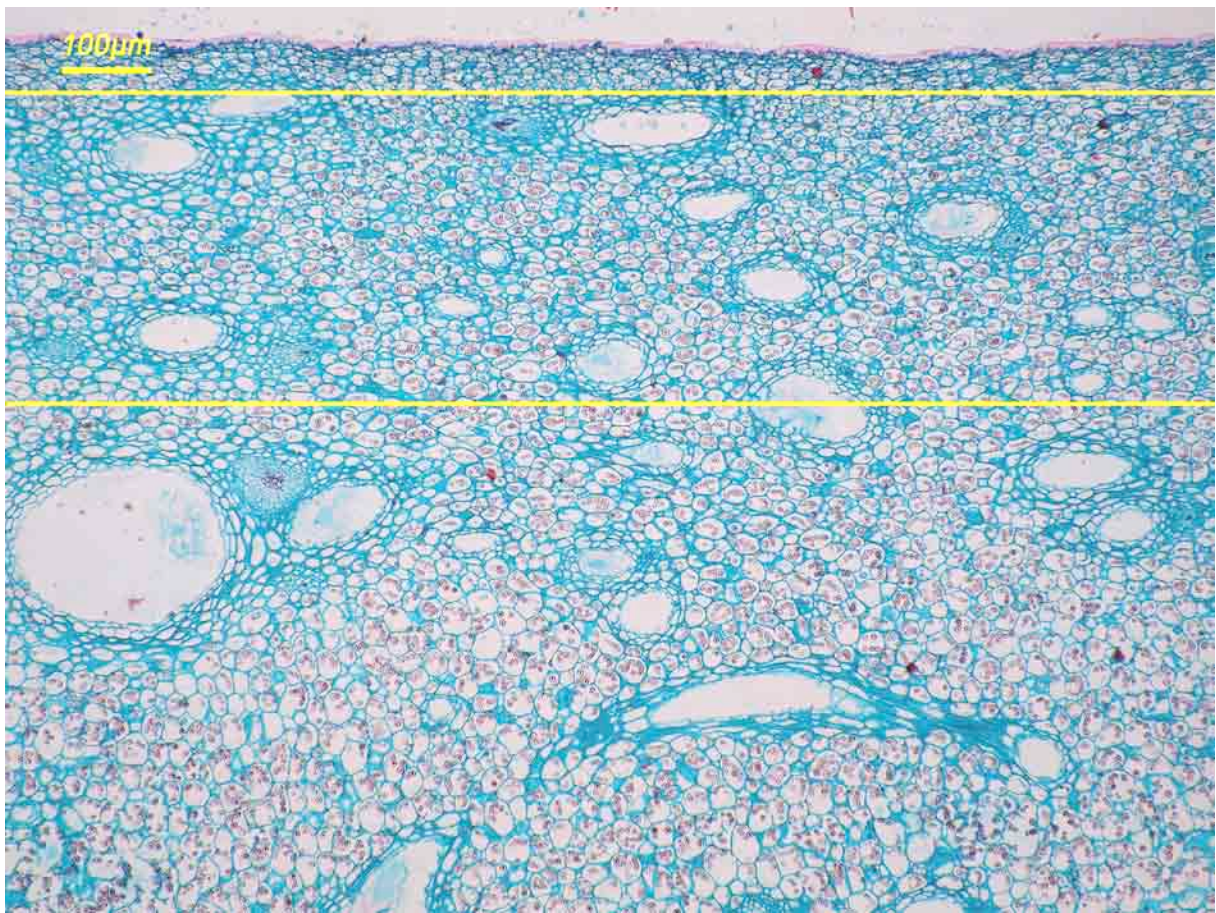


Photo 7. Délimitation des trois zones d'observation au microscope : épicarpe et cellules sous-jacentes, parenchyme intermédiaire et parenchyme profond.

puis dans deux bains successifs de 10 min de xylène et deux bains successifs d'1 min d'éthanol. Les coupes ont ensuite été hydratées dans un bain d'éthanol 70 ° puis un bain d'eau distillée. Les lames ont été colorées selon la méthode décrite dans Jacobi (1999) dans un bain de safranine aqueuse à 1 %, pendant 15 min, pour la coloration des noyaux et des parois cellulaires lignifiées, avant de subir une déshydratation de deux bains successifs de 1 min dans de l'éthanol 70 °, deux bains successifs de 1 min dans de l'éthanol 90 ° et enfin deux bains successifs de 1 min dans de l'éthanol absolu. La lame a subi une deuxième coloration de 15 à 30 s dans du Fast Green 1 % dans de l'éthanol et 1 % d'huile essentielle de girofle pour la coloration du cytoplasme et des parois cellulaires non lignifiées. La décoloration a été faite dans un bain de 2 min d'éthanol à 1 % d'huile essentielle de girofle, puis dans un bain de 2 min de xylène à 1 % d'huile essentielle de girofle. Un dernier trempage de xylène a été réalisé avant le montage entre lame et lamelle.

1.3.4 Observation et analyses

Un microscope Olympus BX 50 est utilisé pour les observations. Les photos ont été réalisées avec un Olympus Camedia C-7070 wide zoom, couplé au microscope, dont le réglage flash et iso ont été laissés en automatique. Le logiciel Olympus Master a été utilisé pour visualiser les photos.

Sur chacune des lames, les observations microscopiques ont été faites à trois niveaux tissulaires (**photo 7**) :

- au niveau de l'épicarpe et du parenchyme (mésocarpe) sous-jacent jusqu'à trois couches cellulaires,
- au niveau du parenchyme intermédiaire entre la zone décrite ci-dessus et jusqu'à environ dix couches de cellules vers le centre de la mangue,
- au niveau du parenchyme profond.

Pour chacune des lames ou répétitions des photographies ont été prises :

- une photographie d'ensemble au grossissement x 40 qui permet de voir l'état général des tissus ainsi que de définir les différents niveaux tissulaires. C'est à partir de ce cliché que les canaux conducteurs ont été observés,

- trois photographies par zone d'observation (précédemment décrites) au grossissement x 100.

Afin de standardiser la taille des photographies et pour avoir un champ complet sans bordure, le zoom de l'appareil photo x 20 a toujours été utilisé à son maximum. Ainsi en fonction de la focale du microscope x 40 ou x1 00, les photographies sont données respectivement avec un grossissement x 800 ou x 2000.

Les observations et mesures effectuées à partir des photographies sont :

- le nombre de canaux conducteurs sur 800 μm de profondeur à partir de l'épicarpe sur la photographie d'ensemble. Cette distance permet de couvrir toutes les zones d'observation. Un seul comptage a été effectué car la taille de ces canaux n'a pas été jugée pertinente du fait du biais que les différents angles de découpe du tissu représente,
- le nombre de grains d'amidon a été dénombré sur trois répétitions de trente cellules par zone d'observation. Compte tenu de la variabilité du plan de coupe, ce comptage vise plus à comparer les valeurs entre traitements qu'à donner des mesures réelles de la quantité d'amidon,
- observation de l'état et de l'intégrité de la cuticule et des cellules composant le péricarpe.

1.4 Caractérisation des protéines de choc thermique

Pour chacun des cultivars et selon les protocoles des différentes expérimentations, dix fruits par exposition et par traitement ont été prélevés et séparés en trois lots (formant ainsi trois répétitions) afin de prélever de la chair et de la peau. Tous ces prélèvements et analyses ont été faits à l'abri de la lumière et dans une pièce climatisée à 22 °C dans le laboratoire de la SRA de Pocquereux -IAC-. Les westerns blots ont été reproduits deux fois pour chacun des trois lots. Les quantifications des HSP17.4 ont été faites avec le logiciel d'analyse d'Image J 1.42q (Wayne Rasband, NIH, USA) par la mesure de l'intensité des bandes.

Pour la chair, les prélèvements ont réalisés à l'aide d'un emporte pièce en cuivre. Il a permis de découper des carottes de 0.8 cm de diamètre sur la face la plus exposée (sous la tache de

couleur) et sur la face non exposée de la mangue au soleil et de la mangue à l'ombre. Seule la partie de chair prélevée à au moins à 0.5 cm sous la peau et sur 1 cm de profondeur a été conservée. La peau a été prélevée délicatement à l'aide d'un scalpel de façon à l'isoler de la chair sous jacente. Les échantillons de chair et de peau ont été découpés en morceaux de 2 à 3 mm de côté afin d'être mis dans des micro tubes de 2 ml pour congélation à -80 °C (Forma -86 °C ULT Freezer, Thermo Electron Corporation).

1.4.1 Extraction et dosage des protéines totales

Toutes les extractions ont été réalisées à 4 °C. La matière fraîche (MF) congelée à -80 °C dans un microtube a été extraite et pesée. Elle a été broyée, dans de l'azote liquide, avec du PVPP (1:0.5) w/w. La fine poudre obtenue a été ensuite suspendue dans 3 ml/ g de MF dans un tampon d'extraction à pH 7 (NaCitrate 0.1 M, NaCl 1.3 M, EDTA 13 mM, PVP10 1 % w/v, Cystéine HCl 0.1 % w/v et PMSF 0.1 % w/v) d'après les données de Prasanna *et al.* (2006). Ce mélange a été centrifugé à 15000 g pendant 20 min à 4 °C. Le surnageant contenant les protéines extraites a été transféré dans un tube à essai qui a été déposé dans de la glace pilée.

La quantité de protéines est estimée par la méthode de Bradford (1976). C'est une méthode de dosage colorimétrique qui est basé sur l'interaction en milieu acide entre les protéines et le Bleu de Coomassie Brilliant. Ce dernier a une longueur d'onde maximale de 450 nm. En présence de protéines (et des acides aminés) un déplacement du spectre vers le rouge avec une longueur d'onde maximale de 620 nm est constaté. De ce fait plus la concentration de protéine est élevée, plus l'absorbance à 465 nm baisse et l'absorbance jusqu'à 595 nm augmente. Ainsi le ratio de l'absorbance à 595 nm sur l'absorbance à 465 nm est la fonction de la concentration protéique. Cette méthode a un seuil de détection de 0.1 à 0.5 µg de protéines.

Un volume de 100 µl d'extrait a été déposé dans une cuve à spectrophotomètre dans laquelle ont été rajoutés 2 ml du réactif de Bradford. La lecture a été faite au bout de 5 min à une absorbance de 595 nm. Le dosage des protéines de l'extrait est calculé avec l'équation d'une courbe de calibration réalisée avec des solutions de sérum d'albumine bovine (BSA) à concentrations connues.

1.4.2 Séparation des protéines sur gel de polyacrylamide SDS-PAGE

L'électrophorèse en gel de polyacrylamide SDS-PAGE permet la séparation des protéines en fonction de leur poids moléculaire. Les paramètres à prendre en compte pour l'optimisation d'une séparation sur gel de polyacrylamide sont la taille des pores du gel, le tampon utilisé pour le gel et les propriétés de la protéine d'intérêt. Les protéines ont été séparées sur un gel d'acrylamide constitué d'un gel de concentration de 3 % et d'un gel de séparation de 14 % selon la méthode de Schägger et von Jagow (1987). Le gel de concentration est composé de : 0.6 ml d'acrylamide; 1.55 ml de solution tampon Tris base pH 8.45; 3.85 ml d'eau ultra pure ; 7 µl d'APS et 7.5 µl de Temed. Le gel de séparation est composé de : 5.6 ml d'acrylamide 30 % ; 4 ml de solution tampon Tris base pH 8.45, 1.28 ml de glycérol, 1.12 ml d'eau ultra pure, 60 µl d'APS 10 % et 6 µl de Temed. L'extrait a été chauffé au bain marie afin de parfaire le dépliement des protéines. Un volume d'extrait équivalent à 4 µg pour 100 µl de protéines totales a été complété à 20 µl avec le tampon de charge puis a été déposé dans chacun des puits. Ainsi chaque puit a été standardisé avec une concentration égale en protéines totales. Le tampon de charge est composé de : glycerol 50 %, bleu de bromophénol 0.5 %, SDS 10 %, Tris 0.5 M pH 6.8, DTT 1 M. Un puit a été chargé avec 4-5 µl du marqueur de taille (Precision Plus Protein Prestained Standards Bio-Rad Laboratories) et un autre puit a été chargé avec 5 µl d'une protéine HSP17.4 témoin (Proteogenix) soit 83 ng. Une électrophorèse mono dimensionnelle SDS-PAGE a été réalisée à l'aide d'un système vertical Mini-Protean III Cell (Bio-Rad Laboratories, CA, USA) pour la migration et la séparation des protéines pendant 15 min à 80 V puis 1 h à 120 V. Le tampon de migration TGS est composé de Tris base 25 mM, Glycine 0.25 M, SDS 10 %, pH 8.3.

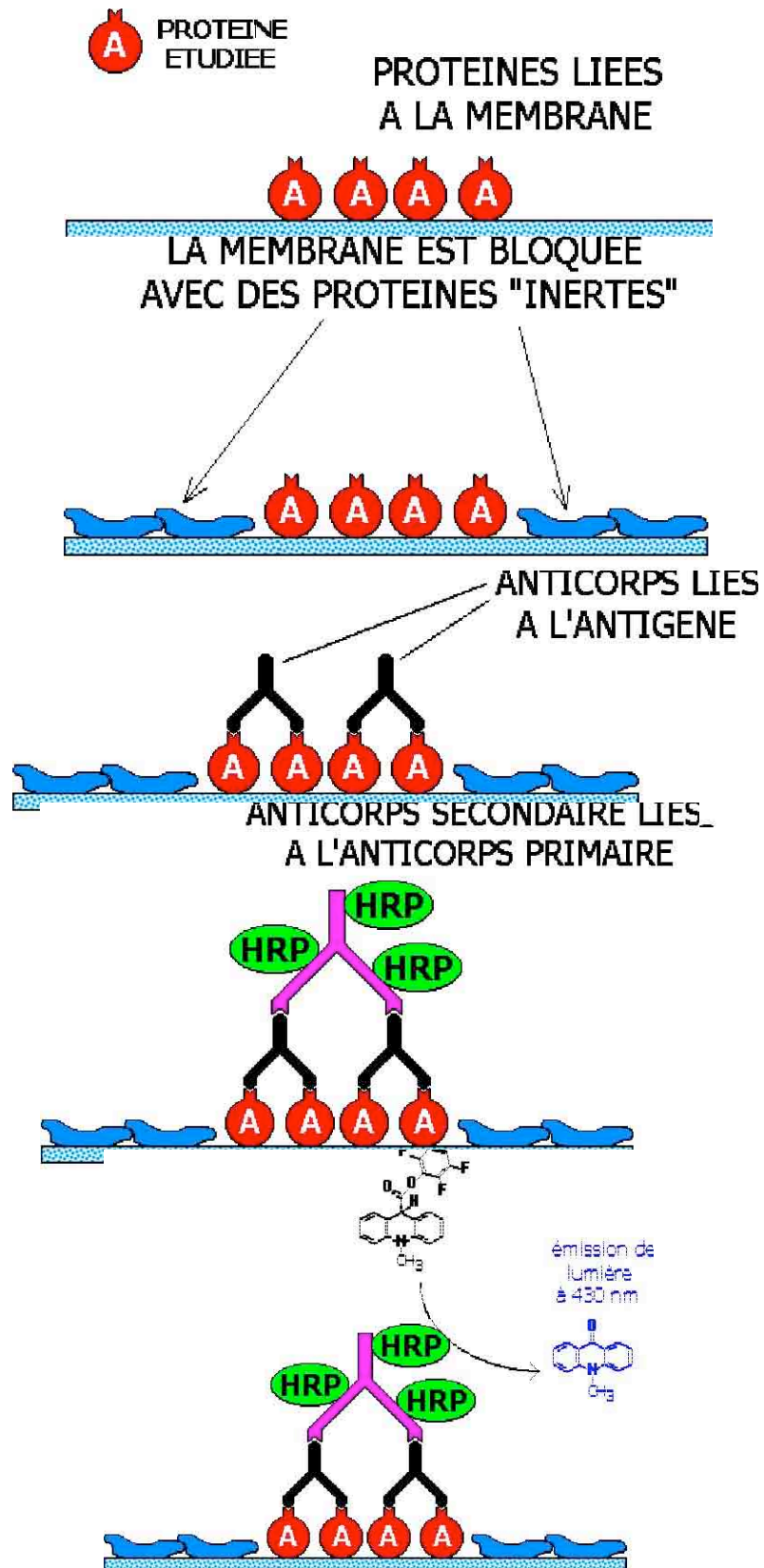


Figure 24. Représentation schématique des étapes d'une immunodétection - A : protéines, HRP : Horseshoe Radish Peroxidase - (De Almeida, 2005)

1.4.3 Western Blots et immunodétection

Les protéines ont été transférées sur des membranes PVDF (Bio-Rad Laboratories, CA, USA) au préalable activées avec du MeOH et rincées à l'eau distillée. Le transfert par western blot s'est fait dans le système Kit transfert Bio-Rad (Bio-Rad Laboratories, CA, USA) avec un tampon de transfert Tris 25 mM, Glycine 20 mM, pH 8,3 à 100 V 350 mA pendant 1 h à température ambiante puis toute une nuit à 30 V 90 mA à 4 °C (Towbin et *al.* 1979). Les membranes ont été ensuite transférées et laissées 2 h à température ambiante sous agitation dans une solution bloquante PBST- lait à 6 % (Tris base 1 M pH8, NaCl 5 M, Tween 20 5 %, lait en poudre 6 %). Elles ont été ensuite rincées avec du PBST avant d'être incubées pendant 2 h à température ambiante sous agitation continue avec une solution d'anticorps primaires monoclonaux composée de 10 ml de PBST-lait à 6 % et 2 µl de solution de sérum de lapin d'anticorps anti AtHSP17.4 dilution (1 :5000). Les anti AtHSP17.4-CI ont été produits par Protéogénix (Paris, France) à partir de l'ADNc de la protéine recombinante HSP17.4 d'*Arabidopsis thaliana* gracieusement offert par E.Vierling. Après cette première incubation, les membranes PVDF ont été rincées trois fois 5 min avec du PBST. Les anticorps anti AtHSP17.4 liés ont été détectés en réalisant une deuxième incubation dans une solution de 10 ml de PBST-lait 6 % et 1µl d'une solution d'anticorps secondaires polyclonaux anti lapin conjugués avec une peroxydase horseradish Anti Rabbit IgG : HRP conjugate, dilution 1 :10000 (Stressgen SAB-300) pendant 1 h à température ambiante sous agitation continue. Les membranes PVDF ont été rincées trois fois 5 min avec du PBST (**figure 24**).

1.4.4 Révélation par chimioluminescence

La révélation a été faite avec le kit de révélation Lumilight Plus Western Blotting Substrate (Roche Diagnostic) à l'obscurité. Une quantité de 1.5 ml de chacun des réactifs A et B du kit sont mélangés et versés sur la surface de la membrane. Le mélange des réactifs doit recouvrir soigneusement toute la membrane et doit agir pendant 5 min. La membrane a été ensuite ressuyée avant d'être placée dans la cassette d'exposition (Bio-Rad Exposure Cassette K). A l'obscurité, un film radiologique (Lumi-Film Chemiluminescent Detection Roche) a été placé sur la membrane pendant 30 s à 5 min en fonction de l'intensité des bandes visibles à l'œil nu dans le noir. Le film a alors été traité dans un bain de révélateur dans un bain de rinçage et dans un bain de fixateur. Le film peut alors être observé à la lumière naturelle. Il a été rincé et séché.

1.5 Mesure de l'activité antioxydante, des polyphénols, des caroténoïdes et des anthocyanes totaux.

Pour chacun des cultivars et selon les protocoles des différentes expérimentations, dix fruits par exposition et par traitement ont été prélevés et découpés en trois lots (répétitions) afin de prélever de la chair et de la peau. Tous ces prélèvements ont été fait faits à l'abri de la lumière et dans une pièce climatisée à 22 °C. Les analyses sont réalisées deux fois sur chacun des trois lots correspondant aux répétitions.

Pour la chair, les prélèvements ont été réalisés à l'aide d'un emporte pièce en cuivre. Il a permis de découper des carottes de 0.8 cm de diamètre sur la face la plus exposée (sous la tache de couleur) et sur la face non exposée de la mangue au soleil et de la mangue à l'ombre. Seule la partie de chair prélevée au moins à 0.5 cm sous la peau et sur 1 cm de profondeur a été conservée. La peau a été, quant à elle, prélevée délicatement à l'aide d'un scalpel de façon à l'isoler de la chair sous jacente. Les échantillons de chair et de peau ont été découpés en morceaux de 2 à 3 mm de côté afin d'être mis dans des micro tubes de 2ml pour congélation à -80 °C (Forma -86 °C ULT Freezer, Thermo Electron Corporation).

Toutes les mesures pour le dosage de la capacité antioxydante totale (TEAC), des polyphénols totaux (TPP), les anthocyanes totaux (TAT) et les caroténoïdes totaux ont été effectuées avec un spectrophotomètre Jenway 6405 UV/Vis. Les mesures sont répétées trois fois pour un même échantillon pour chacune des extractions. Les moyennes sont données pour trois extractions.

1.5.1 Extractions d'échantillons

Les extractions d'échantillons pour les mesures de la capacité antioxydante totale (TEAC), des polyphénols totaux (TPP), des anthocyanes totaux (TAT) et des caroténoïdes totaux ont été adaptées d'après les méthodes de Prior *et al.* (1998), Sellappan et Akoh (2002), Sellappan *et al.* (2002).

Des études préliminaires ont été réalisées afin de déterminer la quantité de MF de peau ou de chair afin d'optimiser les analyses de laboratoire. Les échantillons de peau (0.5 g) et de chair (1 g) conservés en frais à -80 °C ont été finement broyés dans de l'azote liquide avant d'être placés dans un tube à centrifugation avec 10 ml d'acétone à 80 %. Après agitation au vortex pendant 5 s, les tubes ont été placés à 4 °C pendant 4 h sous agitation continue. Une centrifugation à 5500 g pendant 10 min à 4 °C a permis la séparation des phases et la récupération du surnageant. Le culot a été ensuite remis en suspension dans 10 ml d'acétone 80 % et l'opération a été renouvelée trois fois afin d'en extraire le maximum. Le volume de surnageant obtenu a été de 30 ml. L'extrait ainsi préparé a été placé à 20 °C à l'obscurité. Il a été utilisé dans les 48 h de son obtention pour limiter tous les biais liés à d'éventuelles dégradations.

1.5.2 Mesure de l'activité antioxydante totale par la méthode TEAC

La mesure de l'activité antioxydante totale a été réalisée selon la méthode du Trolox Equivalent Antioxidant Capacity développée par Miller *et al.* (1993, 1996) et réactualisée par Re *et al.* (1999) et Arts *et al.* (2004). La méthode implique la production de composés types de radicaux libres : l'acide 2,2'-azinobis-3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonique (ABTS) cation (ABTS⁺) par oxydation du ABTS 7 mM par du persulfate de potassium 2.45 mM pendant 16 h à température ambiante, à l'obscurité. Ces radicaux libres qui disposent d'un chromogène bleu/vert avec une absorbance caractéristique à 734 nm, disparaissent en présence des antioxydants présents dans la solution. Avant utilisation la solution ABTS⁺ a été filtrée à 0.2 µm et calibrée pour une absorbance de 0.700 ± 0.2 par dilution avec de l'éthanol 95 %, à une longueur d'onde de 734 nm et maintenue à 30 °C.

Le potentiel antioxydant de l'extrait est donné en comparaison avec celui de volumes standards de Trolox, vitamine hydrosoluble proche de la vitamine E. Une courbe étalon a été alors réalisée avec différentes concentrations connues de Trolox de façon à avoir un niveau d'inhibition de radicaux libres compris entre 20 et 80 % et d'avoir une linéarité fiable. L'absorbance de 2 ml de la solution ABTS⁺ à 734 nm a été vérifiée avant d'y ajouter 200 µl d'extrait. Ce mélange a été agité pendant 10 s et son absorbance mesurée au bout d'une minute à 734 nm. En effet, c'est la capacité d'éliminer les radicaux libres en une minute qui définit le potentiel oxydant antioxydante de l'extrait. La capacité antioxydante totale de

l'extrait est calculée avec l'équation de la courbe étalon. Les résultats sont exprimés en mg de Trolox Equivalent Antioxydant Capacity par 100 g de matière fraîche (MF).

1.5.3 Mesure des polyphénols totaux

La mesure des polyphénols totaux (TPP) dans les extraits a été réalisée selon la méthode de Folin-Ciocalteu (Sellapan et Akoh, 2002 ; Sellapan et *al.* 2002). L'extrait de pulpe ou de peau (0.5 ml) a été mélangé avec 2.5 ml du réactif de Folin-Ciocalteu (1:10) et laissé pendant 8 min à température ambiante afin de permettre au réactif de réagir complètement avec les phénolates ou les substances oxydables. Une solution de 2.0 ml de Na₂CO₃ (7.5 % dilué dans de l'eau) a été ensuite additionnée afin d'éliminer les résidus du réactif. Les absorbances ont été mesurées à 760 nm après incubation à température ambiante pendant 2 h. Des solutions d'acide gallique à des concentrations connues ont été utilisées pour établir une courbe étalon de référence. Les teneurs en polyphénols totaux de l'extrait sont déterminées sur la base de l'équation de calibration de cette courbe étalon avec des valeurs exprimées en mg d'équivalent d'acide gallique (GAE) pour 100 g de MF.

1.5.4 Mesure des anthocyanes totaux

Le dosage des anthocyanes totaux (TAT) a été réalisé selon la méthode du différentiel de pH (Sellappan et Akoh, 2002, Sellappan et *al.*, 2002) utilisant deux solutions tampons de pH différents : KCl 0.025 mM pH 1 et C₂H₃O₂Na 0.4 M pH 4. Les extraits (0.4 µl) ont été mélangés avec 3.6 ml de chacun des tampons et leur absorbance a été mesurée à 510 et 700 nm et comparée à l'absorbance de blancs (sans extrait). L'absorbance de l'extrait est calculée selon la formule suivante : $A = (A_{510} - A_{700})_{pH\ 1} - (A_{510} - A_{700})_{pH\ 4}$. La concentration en pigments anthocyanes monomériques dans l'extrait est calculée en : cyanidin-3-glucoside (mg/l) = $A \times MW \times DF \times 1000 / (MA \times l)$ avec A = absorbance, MW = poids moléculaire (449.2 g), DF = facteur de dilution, MA = absorptivité molaire (26900). La teneur en anthocyanes totaux est exprimée en mg de cyanidin-3-glucoside par 100 g de MF.

1.5.5 Mesures des caroténoïdes totaux

La saponification est utilisée pour éliminer les composés (chlorophylle a et chlorophylle b) qui absorbent à la même longueur d'onde que les β -carotènes. Ces derniers en solution dans de l'éther de pétrole absorbent à 446 nm. L'absorbance à 550 nm est utilisée pour mesurer la turbidité. Un mélange de 15 ml d'extrait et de 15 ml d'éther de pétrole a été préparé dans une ampoule à décanter. L'addition de 4.5 ml de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ saturé à 50 % a été effectuée. Après retournements successifs qui permettent d'éliminer les gaz et d'homogénéiser le mélange, les deux phases inférieures ont été retirées. L'opération a été renouvelée deux fois. Puis, 1.5 ml KOH 25 % m/v dans du MeOH ont été ajoutés et ce mélange a été retourné toutes les 5 min pendant 15 min et les dégagements gazeux ont été éliminés. Après décantation, la phase inférieure a de nouveau été retirée. La phase supérieure a été lavée avec 7.5 ml d'eau distillée autant de fois que nécessaire. Les mesures ont été réalisées 1 h après à 446 et 550 nm (Lako, communication personnelle).

1.6 Analyse statistique

Les figures graphiques et les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel SPSS pour Windows (Version 15.0, SPSS Inc. Chicago, IL. USA). Dans les graphiques, les estimations de la variabilité des résultats sont données en terme d'erreur standard à la moyenne (+/- 1). L'analyse de variance (ANOVA) établissant des différences significatives et les comparaisons de moyennes ont été faites à l'aide du test de Tukey au seuil de 5 %. Pour les effets des facteurs ou des interactions de facteurs, une analyse General Linear Model (GLM) univariée a été réalisée avec un seuil de signification de 5 %. Enfin, les relations entre les différents paramètres ont été établies à l'aide du test de corrélations bilatérales de Spearman avec des seuils de signification de 1 et 5 %.

L'ENSOLEILLEMENT ET LES TEMPERATURES INTERNES DES MANGUES

2.1. Effet de l'ensoleillement sur la température interne des mangues.....	78
2.1.1. <i>Effet de l'exposition.....</i>	78
2.1.2. <i>Gradient de température interne en fonction de l'exposition</i>	79
2.1.3. <i>Effet d'un filtre anti UV</i>	80
2.2. Effet des caractéristiques de la mangue sur la température interne.....	81
2.2.1. <i>Effet de la taille du fruit</i>	81
2.2.2. <i>Effet de la couleur de la mangue.....</i>	82
2.3. Discussion.....	84

CHAPITRE 2

L'ENSOLEILLEMENT ET LES TEMPERATURES INTERNES DES MANGUES

La chaleur d'un fruit est apportée par la convection de l'air environnant ou par les radiations solaires, ou dans une moindre mesure par la chaleur métabolique des réactions chimiques à l'intérieur des tissus (Bergh *et al.*, 1980). Ainsi les conditions d'enseillement en pré récolte peuvent induire des variations journalières de température interne dans les mangues, ce qui implique une constante adaptation du fruit à son environnement. L'hypothèse de cette étude est fondée sur le fait que la mangue mise en situation d'adaptation face à des stress environnementaux (intensité de lumière, températures internes élevées et exposition aux radiations du soleil) peut mettre en œuvre des mécanismes de protection et ainsi acquérir une thermotolérance en pré récolte. Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, les références bibliographiques montrent que des températures internes de 38 à 42 °C peuvent durcir les fruits en après récolte (Jacobi *et al.*, 2001a). Quelques travaux en pré récolte sur pomme, avocat et papaye (Woolf et Ferguson, 2000) ont été réalisés, mais aucune référence de mesure de température en pré récolte de mangue n'existe. Ainsi dans les conditions de culture et de production de la mangue en Nouvelle-Calédonie et dans le contexte de l'hypothèse d'étude, il convenait de vérifier si la température interne des mangues au champ se situe bien dans cet intervalle de température d'endurcissement et de mettre en avant les différents paramètres pouvant influencer toute variation de cet intervalle telles que la taille, la couleur et l'influence de l'enseillement et des radiations UV.

Températures internes des mangues cv. Keitt en fonction de leur exposition au soleil du 12 au 15 mars 2002

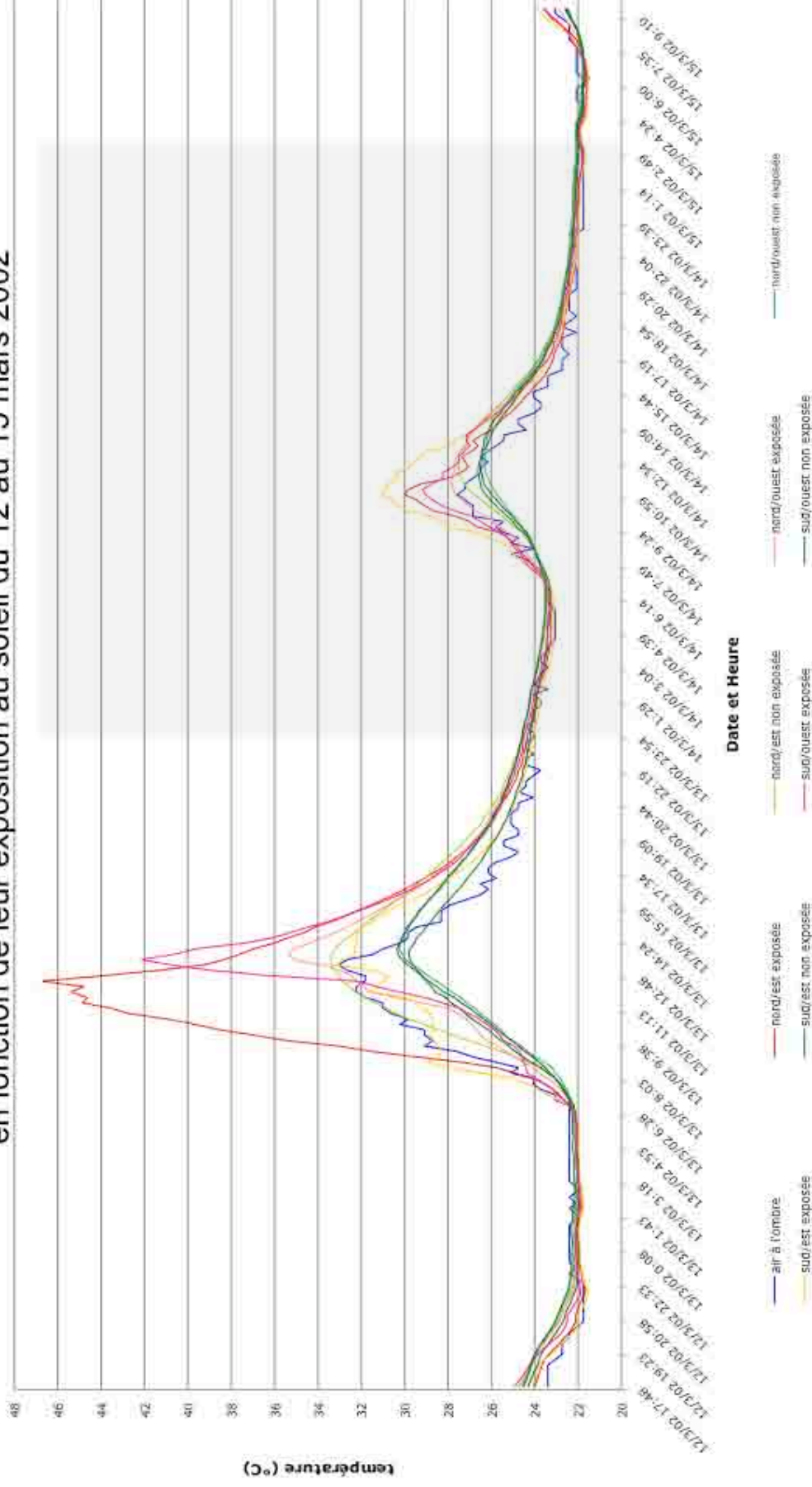


Figure 25. Températures internes des mangues du cv. Keitt en fonction de différentes expositions au soleil du 12 au 15 mars 2002. La zone en gris correspond à un jour ombragé.

2.1 Effet de l'enseillement sur la température interne des mangues

2.1.1 Effet de l'exposition

Compléments de matériel et méthodes

La température interne de quatre mangues du cv. Keitt a été mesurée au champ du 12 au 15 mars 2002. La canopée de l'arbre a été découpée en quatre quartiers selon leur exposition : Nord/Est, Nord/Ouest, Sud/Est, Sud/Ouest. Au centre de chaque quartier d'arbre exposé, un fruit a été choisi d'un poids moyen représentatif de la variété (environ 400 g), à une hauteur du sol entre 1 m 50 et 2 m, de diamètre polaire moyen compris entre 110 et 145 mm et de diamètre équatorial compris entre 92 à 130 mm. Les températures internes de la face exposée et de la face à l'ombre ont été enregistrées sur un fruit pour chaque exposition.

Résultats

La **figure 25** illustre les températures internes des faces exposées et non exposées au soleil des fruits localisés dans les différents quartiers de l'arbre, un jour ensoleillé et un jour ombragé. D'une façon générale, les fruits se réchauffent un peu plus vite que l'air à partir de 6 ou 7 h du matin. En cas de fort ensoleillement et avec des températures de l'air à l'ombre n'excédant pas 33 °C, la température interne des faces exposées des mangues du cv. Keitt varient entre 32.8 à 46.7 °C entre 12 h et 14 h. C'est la face exposée des mangues orientées au Nord/Est qui atteint son maxima de température interne en premier, environ une heure avant les faces exposées des mangues des autres quartiers. Seules les faces exposées des mangues au Nord/Est et au Sud/Ouest atteignent des maxima supérieurs à 38 °C, température de conditionnement thermique citée dans la littérature. En effet, la face exposée des mangues des quartiers d'arbres orientés au Sud/Est ont un maximum similaire à celui de la température de l'air à l'ombre. Sur la période étudiée et selon l'enseillement, ces maxima sont supérieurs de 0 à 14 °C avec la température de l'air sous abri, à l'ombre de la canopée.

Les faces non directement exposées se réchauffent plus lentement que les faces exposées et même que l'air. Elles atteignent des maxima qui sont très largement en deçà de ceux des faces exposées avec des écarts pouvant aller jusqu'à 14 °C pour la mangue orientée au Nord/Est, et

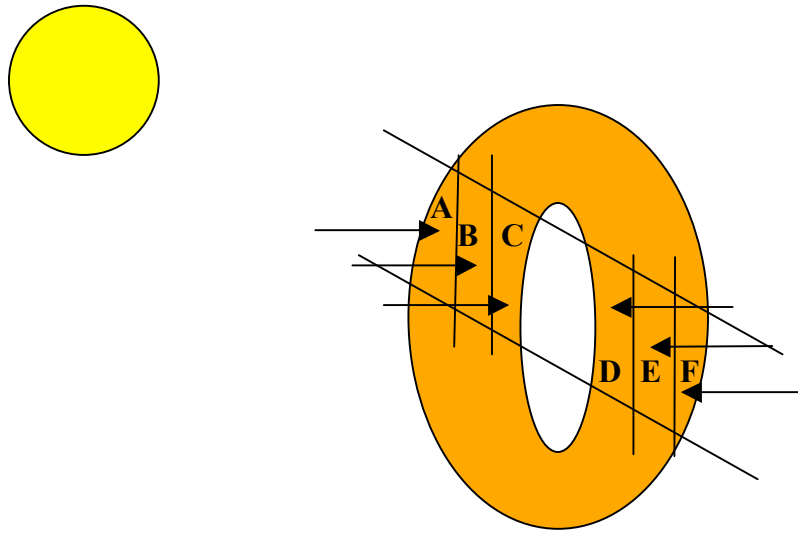


Figure 26. Mesure des températures internes des mangues du cv. Cogs Hall en fonction de la profondeur des tissus.

jusqu'à 3 °C pour la mangue exposée au Sud/Est. En cas de jour ombragé, les températures des faces exposées accusent une variation de 0 à 3 °C seulement avec la température de l'air et de 0 à 4 °C avec la température interne des mangues non exposées.

D'une façon générale, dès que la température de l'air commence à diminuer dans l'après midi, la température interne des fruits à l'ombre chute rapidement. Les températures internes des différentes faces ensoleillées des mangues vont également diminuer mais de façon plus lente. Les températures internes des fruits et de l'air se stabilisent en début et fin de nuit pendant laquelle plus aucune différence significative n'est observée entre elles.

2.1.2 Gradient de température interne de la mangue en fonction de l'exposition

Compléments de matériel et méthodes

La température interne des fruits cv. Cogs Hall a été mesurée au champ du 15 au 17 janvier 2007. Les enregistrements ont été faits toutes les 10 min sur une mangue dans laquelle ont été placées six sondes (trois sondes sur la face exposée au soleil et trois sondes sur la face non exposée) environ à 1 cm d'écart en profondeur des unes des autres pour chacune des faces. Les sondes de la face exposée ont été placées sous la tache de couleur qui détermine le point le plus ensoleillé et les sondes de la face non exposée ont été placées exactement à l'opposé pour avoir le contraste le plus important (**figure 26**). La température de l'air a été également relevée à l'aide d'une sonde positionnée à l'ombre sous la canopée, au centre de l'arbre.

Résultats

L'allure générale des enregistrements (**figure 27**) montre que quels que soient l'ensoleillement et la face, exposée ou non exposée, les températures internes relevées, sont dégressives en partant des couches de pulpe sous la peau puis dans la partie médiane et enfin près du noyau de la joue exposée. Les écarts de températures mesurés entre les sondes placées sur la joue exposée et celles placées sur la joue non exposée, sont plus importants le jour que la nuit. Par fort ensoleillement (15 janvier 2007) les maxima enregistrés dans la pulpe de la face exposée sont de 45.3 °C, 44.2 °C et 41.8 °C pour respectivement les zones A, B et C, entre 14 h 30 min et 15 h 30 min, les couches internes des tissus accusant une différence de température interne entre elles de 0.9 à 3.5 °C. Les couches les plus proches du noyau

Gradient de température interne d'une mangue ensoleillée cv. CogsHall
du 15 au 17 janvier 2007

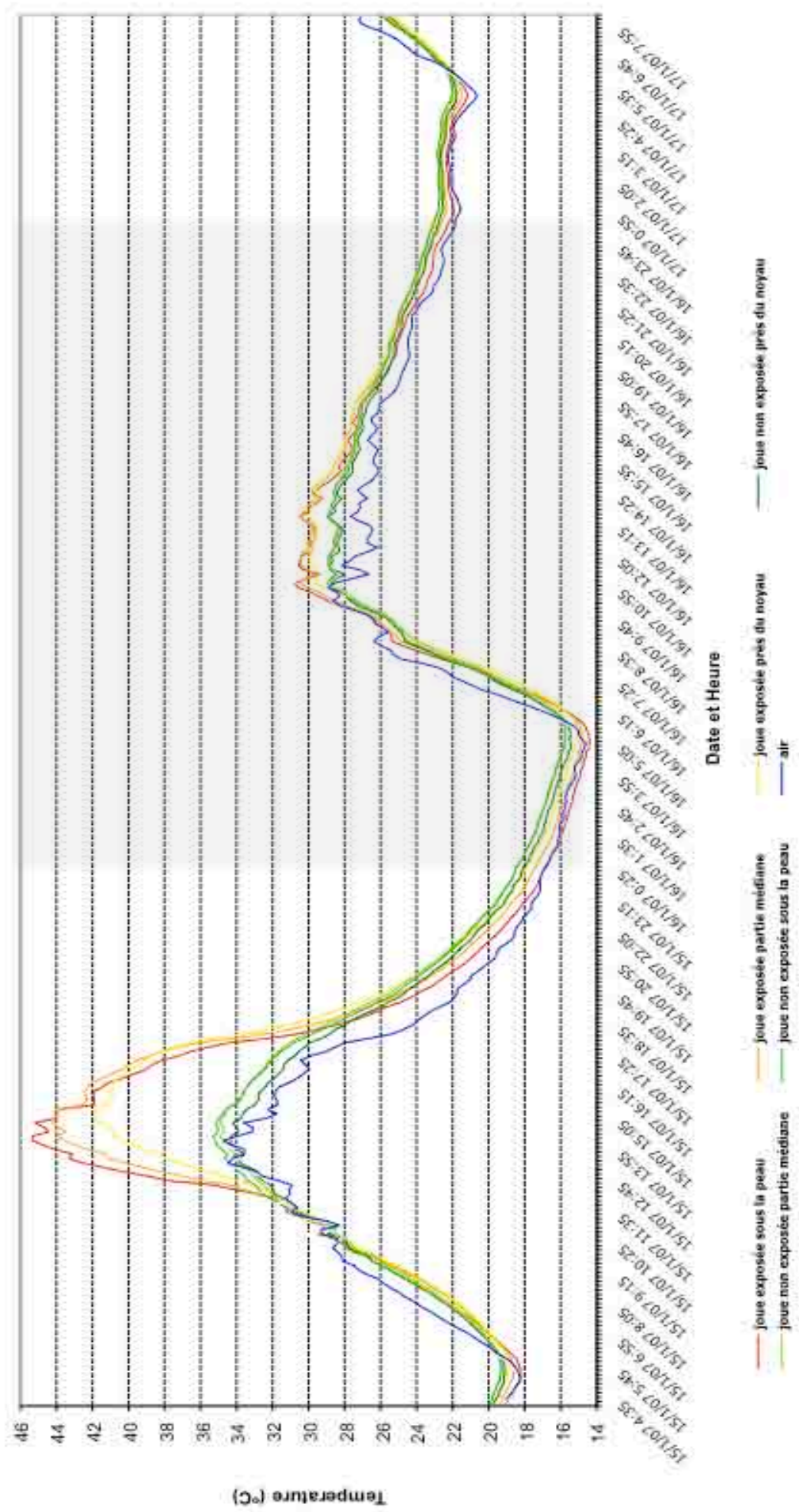


Figure 27. Gradient de température interne d'une mangue ensoleillée du cv. Cogs Halls. Enregistrement du 15 au 17 janvier 2007. La zone en gris correspond à un jour ombragé.

atteignent toujours leur maximum avec un différé dans le temps de 15 à 30 min qui correspond au temps de transfert par conduction de la chaleur. Les températures internes des couches non exposées ont des maxima de températures internes de l'ordre de 34.5 à 35.5 °C avec un même gradient dégressif de la partie externe (sous la peau) vers la partie interne (près du noyau).

Ainsi un gradient de température existe au sein d'une même mangue qui peut aller jusqu'à 10 °C. Par faible ensoleillement (16 janvier 2007) les couches internes d'une même face ont des températures internes qui ne se différencient pas entre elles. Par contre entre les deux faces, un différentiel de température de 1 à 2 °C est observé. La température de l'air sous abri est inférieure de 1 à 2 °C si on la compare à la température interne la plus faible de la mangue.

2.1.3 Effet d'un filtre anti UV

Les rayonnements infrarouges sont responsables de l'élévation de température (Barber et Sharpe, 1970) mais il ne faut pas non plus négliger la contribution des rayonnements UV dans le réchauffement des mangues en pré récolte (Lipton et O'Grady, 1980). Cependant ces derniers peuvent occasionner de nombreux dégâts (Glenn *et al.*, 2002) sur la peau des mangues directement soumise aux radiations et leur contribution à un éventuel durcissement des mangues en pré récolte pourrait ainsi être remis en cause.

Compléments de matériel et méthodes

La température interne de mangues du cv. Reynal exposées 80 ° Nord/Est, placées à environ 1 m 70 de hauteur a été mesurée dans des fruits munis d'un filtre anti UV-A et UV-B et sans filtre. Les enregistrements ont été effectués du 4 au 6 février 2007 inclus. Les filtres anti UV ont été découpés et façonnés en cône, ouvert en haut (diamètre de 10 cm) et en bas (diamètre de 25 à 30 cm) de façon à permettre une circulation d'air (**photo 3**).

Résultats

La **figure 28** montre que par fort ensoleillement, aux heures les plus chaudes de la journée, la température de l'air à l'intérieur du filtre anti UV est plus élevée de 1 à 3 °C par rapport à la température de l'air à l'ombre sous la canopée. La mangue sous filtre anti UV du cv. Reynal, face exposée et face non exposée, se réchauffe plus vite et se refroidit plus lentement que la mangue sans filtre. Ce dernier semble permettre une accumulation plus grande et plus longue de la chaleur dans les fruits (jusqu'à 5 h). La température interne maximum enregistrée pour

Effet du filtre anti-UV sur les températures internes des mangues cv. Reynal au soleil du 4 au 6 février 2007

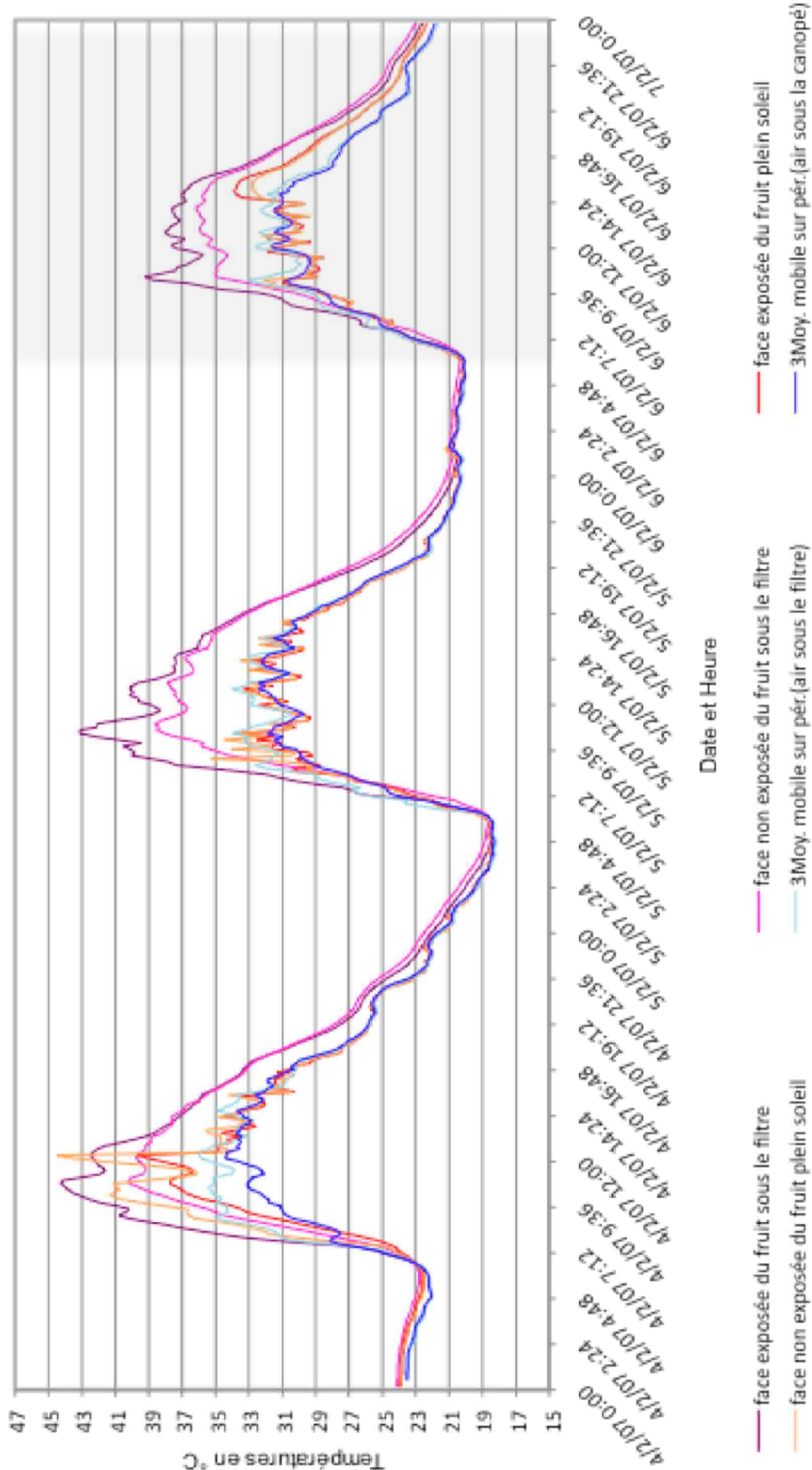


Figure 28. Températures internes des mangues du cv. Reynal avec et sans filtre anti UV du 4 au 6 février 2007. La zone en gris correspond à un jour ombragé

la face exposée de la mangue sous filtre peut être jusqu'à 4 °C plus élevée que la température de la face non exposée sous filtre et jusqu'à 10 °C que la température de l'air à l'ombre sous canopée. La température interne de la face exposée de la mangue au soleil sans filtre est du même niveau que celle de la face non exposée de la mangue avec filtre. Elles sont entre 4 et 8 °C supérieures à la température de l'air à l'ombre sous la canopée. Mais c'est surtout par faible ensoleillement que le filtre permet une augmentation significative des températures internes des mangues de 6 à 8 °C qui peuvent être maintenues à des niveaux équivalents à ceux observés par fort ensoleillement. En comparaison, les températures internes de la mangue sans filtre ne se distinguent pas de celles de l'air à l'ombre sous canopée. Le filtre anti UV procurerait un microclimat plus chaud autour du fruit et favoriserait l'élévation de la température du fruit. Mais pour une température de l'air sous filtre de seulement 1 à 3 °C supérieure voire moins, la température du fruit sous filtre peut dépasser de 4 à 10 °C celle du fruit sans filtre, indépendamment de la face ou même de l'ensoleillement.

On peut se poser cependant la question de savoir si le dispositif expérimental est le plus pertinent. Il se pourrait qu'une aération insuffisante sous le filtre ne limite la ventilation du fruit par l'air environnant, ce qui permettrait une augmentation et un maintien de la température interne mais également une meilleure régulation de la température interne du fruit entre les deux faces par conduction de la chaleur.

2.2 Effet des caractéristiques de la mangue sur la température interne

2.2.1 Effet de la taille du fruit

Compléments de matériel et méthodes

La température interne de deux mangues de deux poids moyens différents (350 et 510 g) du cv. Kensington a été mesurée au champ du 29 janvier au 1^{er} février 2004. Les fruits ont été choisis à 60 ° Est (ensoleillement moyen) à une hauteur de 1m 80.

Températures internes des mangues cv. Kensington en fonction de leur taille du 29 janvier au 01 février 2004

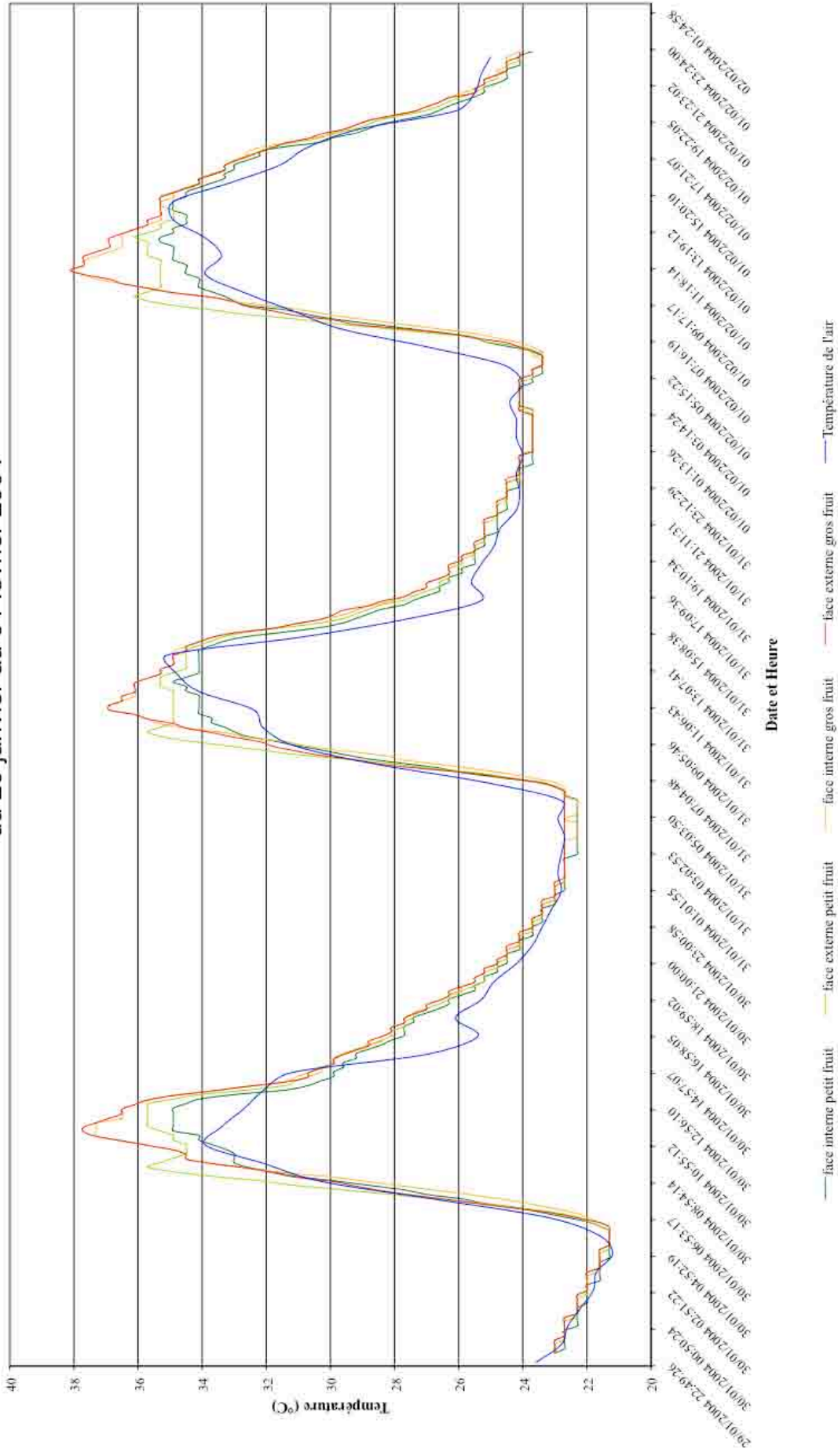


Figure 29. Températures internes des mangues du cv. Kensington en fonction de leur taille. Enregistrement du 29 janvier au 1 février 2004.

Résultats

L'enregistrement des températures du 29 janvier au 1^{er} février 2004 (**figure 29**) permet la comparaison de deux grosseurs de fruit du cv. Kensington en condition d'enseillement moyen (60° Est) avec un maximum de température de l'air et de température interne, respectivement de 35 °C et de 38 °C.

Pendant les premières heures de la matinée, le petit fruit se réchauffe légèrement plus vite que l'air et que le gros fruit. Mais aux heures les plus chaudes de la journée, entre 11 h et 14 h, selon les jours et l'enseillement, la tendance va s'inverser et c'est le plus gros fruit qui a une température interne plus élevée (38.1 °C) suggérant que ce dernier accumule davantage de chaleur. Des écarts jusqu'à plus de 3 °C entre gros et petits fruits et jusqu'à 4 °C avec l'air sont observés et cela indépendamment des faces. Ainsi, en situation d'enseillement moyen le petit fruit n'est pas plus chaud et bien au contraire.

Il est fort probable que ce différentiel soit plus prononcé dans des conditions d'enseillement plus importantes. Mais d'une façon générale, c'est la face exposée du gros fruit qui atteint les maxima de température interne sans qu'il y ait de différence significative avec la température de sa face non exposée. Cette absence d'écart est probablement due à un enseillement moyen qui limite le différentiel de température entre les deux faces, favorisant ainsi une diffusion de la chaleur par conduction et une température homogène au sein du fruit. En effet, les températures internes de la face exposée sont plus élevées de seulement 1 à 2 °C par rapport à la face non exposée du petit fruit.

2.2.2 Effet de la couleur de la mangue

La couleur de peau des mangues des différents cultivars est variable. Certains ont sur leur face exposée au soleil une tache de couleur de teinte jaune, orangé ou rouge et une couleur de fond verte, alors que d'autres peuvent avoir une couleur de fond colorée. Les anthocyanes contribuent très largement à la coloration de la peau des mangues, dans une moindre mesure les caroténoïdes. L'absorbance des IR est favorisée par la couleur rouge (Barber et Sharpe, 1970). Ainsi, un cultivar à peau colorée pourrait avoir une température interne différente d'un cultivar à peau verte. De même une face de fruit comportant une tache pigmentée rouge pourrait également contribuer à augmenter le différentiel interne déjà observé entre les deux faces d'un même fruit.



Photo 8. Fruits exposés au soleil des cv Sensation (à gauche) et. Smith (à droite) à un stade vert mature

Tableau 7. Paramètres de couleur de deux cultivars cv. Smith et cv. Sensation de leur tache colorée, leur face externe exposée et leur face interne non exposée.

		L*	a*	b*
Tache colorée	cv. Smith	42,1	10,2	4,8
	cv. Sensation	42,5	5,1	-1,9
Face exposée au soleil	cv. Smith	42,7	-8,7	12,8
	cv. Sensation	40,1	2,5	3,8
Face exposée à l'ombre	cv. Smith	42,7	-16,4	17,8
	cv. Sensation	43,2	6,9	9,7

Compléments de matériel et méthodes

La température interne de mangues de deux cultivars de couleurs différentes (mais de forme similaire) a été mesurée du 10 février au 14 février 2005 (**photo 8**) :

- le cv. Smith, à tache colorée rouge clair et avec une coloration de fond jaune/vert prédominante à maturité,
- le cv. Sensation, à tache colorée rouge et une coloration de fond rouge foncé prédominante à maturité.

Les caractéristiques de couleur définies par les paramètres L^* , a^* et b^* des fruits des deux cultivars sont regroupées dans le **tableau 7**. Elles ont été choisies avec un poids moyen d'environ 250 g, à une hauteur de 3 m, exposées à 90 ° Nord/Est.

Résultats

La **figure 30** montre que la mangue du cv. Sensation de couleur rouge/mauve a une température interne plus élevée que la mangue du cv. Smith pendant les heures les plus chaudes, entre 9 h et 13 h. En cas de fort ensoleillement (le 12 et 13 février 2005) la face externe, exposée au soleil de la mangue du cv. Sensation atteint son maximum de température interne (46 °C) entre 10 et 11 h. Les écarts sont alors importants, de l'ordre de 8 °C avec sa face interne, orientée vers la canopée, de 5 à 6 °C si l'on compare avec les faces externes et internes de la mangue du cv. Smith et de 13 °C avec l'air. Par faible ensoleillement (14 février 2005), seule la face externe de la mangue du cv. Sensation se distingue pour une température interne plus élevée (35 °C), soit environ 3 °C supérieure à celle de sa face interne, de la face externe et la face interne du cv. Smith qui ne se distinguent pas entre elles. La température de l'air sous abri est en général de 0.5 à 2.0 °C plus faible que celle des mangues les moins chaudes. La coloration rouge/mauve de la mangue du cv. Sensation permet une accumulation de chaleur surtout pour les faces exposées directement au soleil.

Températures internes de mangues cv. Smith de coloration différente
du 11 au 14 février 2005

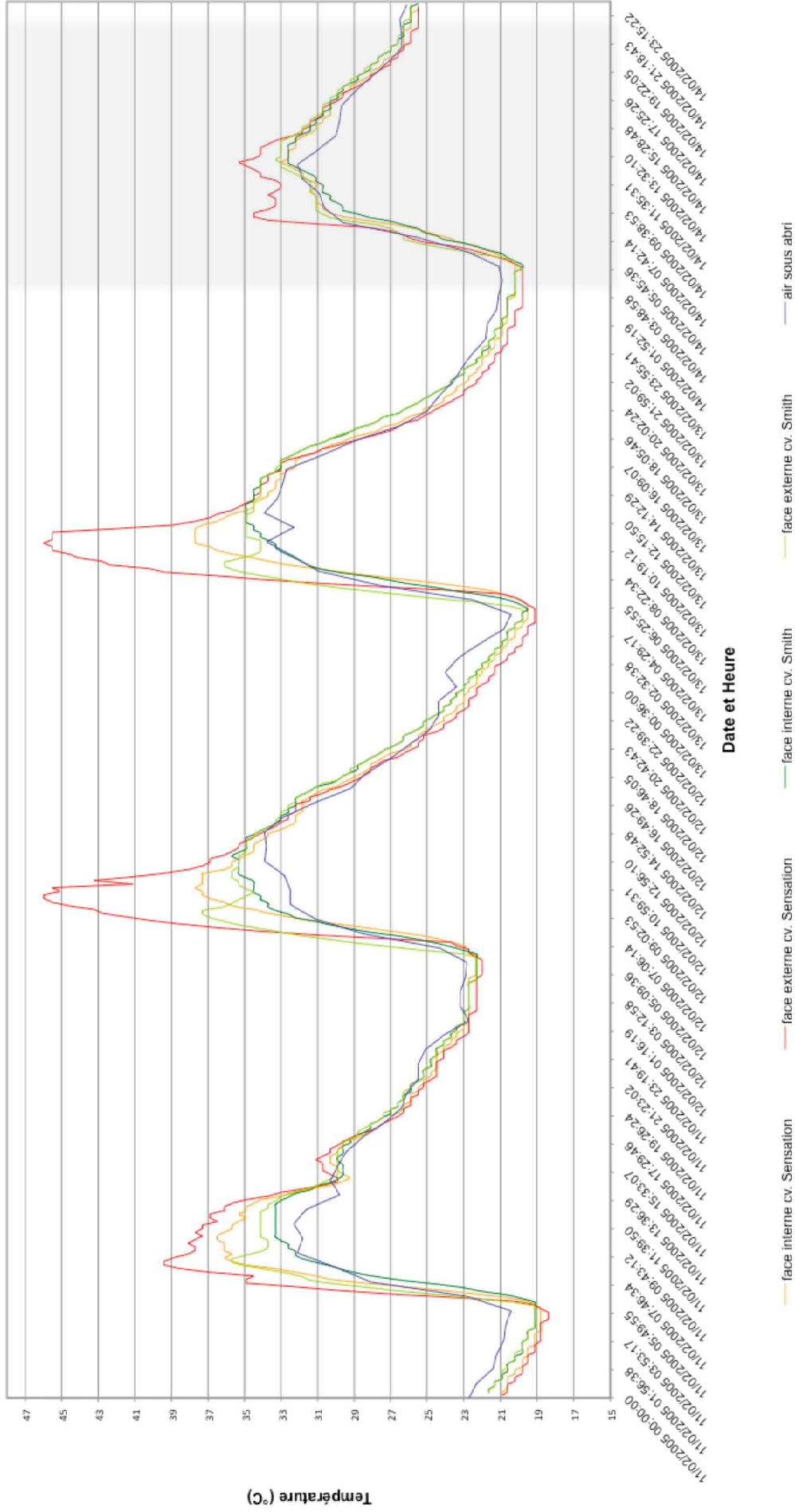


Figure 30. Températures internes des mangues des cv. Smith et Sensation qui diffèrent par leur couleur. Enregistrement du 11 au 14 février 2005. La zone en gris correspond à un jour ombragé.

2.3 Discussion

Préambule : La comparaison des résultats issus des différentes expérimentations est aléatoire du fait que chacune d'elle est réalisée dans des conditions climatiques différentes et que les caractéristiques physico-chimiques sont propres à chacun des cultivars. La sélection de ces derniers, n'est pas délibérée et est adaptative selon les disponibilités en fruits (quantité et qualité), en équipement au moment propice pour le déroulement de l'expérimentation (ensoleillement). Par ailleurs, les enregistrements de températures internes (face exposée et face non exposée) n'ont été réalisés que sur seulement un fruit par exposition compte tenu de la disponibilité en matériel. Ainsi les résultats ont plus une valeur informative qui permettent d'approcher dans la discussion des hypothèses. Toutes ces différentes contraintes soulignent la complexité d'une approche expérimentale de terrain et justifient que les résultats ne soient discutés que par expérimentation.

Il paraît maintenant évident, au vu des variations journalières des températures des mangues du cv. Keitt selon leur exposition, que le fruit joue un rôle d'accumulateur de chaleur pendant les heures d'ensoleillement.

Les fruits vont se réchauffer beaucoup plus vite que l'air et mettront plus de temps à restituer la chaleur en fin de journée comparativement à la température de l'air à l'ombre sous canopée. Ainsi plus le fruit est gros, plus il accumulera de la chaleur qu'il pourra ensuite diffuser dans ses tissus. En cas de fort ensoleillement et avec des températures maxima de l'air à l'ombre sous canopée entre 30 et 35 °C, la température des mangues au soleil peut atteindre jusqu'à 47 °C et celle des mangues à l'ombre jusqu'à 36 °C aux heures les plus chaudes de la journée. Ce phénomène a déjà été observé sur pomme et avocats sous le climat tempéré de Nouvelle-Zélande par Ferguson *et al* (1998) et Woolf *et al.* (1999b) avec des températures d'air n'excédant pas 30 °C et une température interne des fruits supérieure à 40 °C avec des maxima jusqu'à 45 °C. L'ensoleillement direct et la capacité des fruits à absorber et à diffuser la chaleur apparaissent plus importants que la température de l'air pour l'élévation des températures internes des fruits.

Les températures internes des mangues vont cependant être variables dans la journée selon un cycle diurne et selon les facteurs climatiques auxquels elles sont soumises. En effet, par le biais de l'enseillement, la température interne du fruit est la résultante de plusieurs facteurs tels que la lumière, l'intensité de la radiation, la vitesse du vent, la durée d'exposition continue ou discontinue au soleil et/ou à l'ombre ainsi que la densité et la conductivité des tissus.

Ainsi les variations de cette température interne vont donner des réponses différentes sur le comportement des fruits et légumes en après récolte. Cependant selon Ferguson *et al.* (1998), ces températures internes liées à l'exposition sont suffisantes pour induire des changements métaboliques dans les tissus des fruits et les travaux en après récolte de Liu (1978), Porritt et Lidster (1978), Klein et Lurie (1990) sur pomme montrent que des pré traitements après récolte entre 38 °C et 42 °C permettraient de maintenir la fermeté et de diminuer l'acidité pendant le mûrissement des fruits. Par ailleurs des pré traitements entre 38 et 42 °C en après récolte sur mangues ont permis l'acquisition d'une thermotolérance permettant à ces fruits de supporter les températures extrêmes des traitements de désinsectisation (McCollum *et al.*, 1993 ; Joyce et Shorter, 1994 ; Jacobi *et al.*, 1995, 2000, 2001a, 2001c). Même si les pré traitements appliqués ont en général des durées plus longues, les travaux de Ferguson *et al.* (1998) sur pomme en pré récolte précisent que des similitudes de réponses physiologiques existent entre ces prétraitements après récolte et l'exposition à de fortes températures des pommes en pré récolte. Il nous faudra également considérer que les maxima de températures internes enregistrés sont très élevés (jusqu'à 47 °C dans la chair du fruit et 52 °C sur la peau des fruits) pendant des durées variables. Et qu'en climat subtropical l'incidence de fortes températures pourraient être plus fréquentes et plus durables qu'en climat tempéré ce qui leur permettrait de rassembler des conditions moins adéquates pour l'acquisition d'une thermotolérance en pré récolte (Ferguson *et al.*, 1998). Par ailleurs une forte exposition aux radiations du soleil (et notamment aux UV) ainsi que de fortes températures peuvent également altérer les tissus et perturber la physiologie des fruits.

La température interne au sein d'un même fruit n'est pas homogène et un gradient existe de la source de chaleur en surface vers l'intérieur des tissus. Ce phénomène a été modélisé par Thorpe en 1974 sur pomme en enseillement direct. La face exposée des mangues du cv. Cogs Hall est beaucoup plus chaude que celle non exposée avec des écarts pouvant aller jusqu'à 10 °C. De plus au sein même de chacune des faces, les couches de tissus les plus

externes sont plus chaudes que celles proches du noyau. La face non exposée des mangues du cv. Cogs Hall exposées au soleil n'est pas soumise à une radiation directe mais ses températures internes vont jusqu'à des maxima de 34.5 à 35.5 °C soit 1 à 2 °C plus élevées que les maxima de l'air à l'ombre sous canopée.

Ces résultats confirment donc qu'en situation de faible ensoleillement ou en l'absence de rayonnement, le réchauffement des faces peut se faire par convection de l'air dans la peau puis par conduction de la chaleur dans la pulpe (Bergh *et al.*, 1980 ; Woolf *et al.*, 1999a, 1999b). Cependant, les températures internes beaucoup plus élevées de la face exposée au soleil (de 43 à 45 °C) suggèrent que la source principale de chaleur est due aux radiations incidentes du soleil sur la surface du fruit (Bergh *et al.*, 1980) et plus particulièrement aux radiations infrarouges.

En effet 50 % de la radiation directe du soleil sont dans la portion des infrarouges du spectre et ces derniers seraient responsables de l'augmentation des températures internes des fruits (Hopp, 1947 ; Lipton et O'Grady, 1980). Par ailleurs la masse totale de la mangue est composée d'environ 80 % d'eau et Harvey, en 1924, précise que l'eau est un bon absorbeur des infrarouges. Mais les pigments rouges de la peau pourraient également absorber davantage les infrarouges (Retig et Kedar, 1967). En effet, Schroeder (1965) met en évidence que les tomates rouges sont 4 à 8 °C plus chaudes que des tomates vertes sous les mêmes conditions de températures pré récolte. De même, Schroeder et Kay (1961), en Californie, ont constaté que les avocats à peau brune avaient une température de chair plus élevée (> 40 °C) que ceux à peaux vertes (< 40 °C). Ainsi nos résultats sont en accord avec ces travaux. La mangue du cv. Sensation, dont la surface rouge est plus importante, a une température supérieure à celle du cv. Smith avec des écarts de 5 à 6 °C. La prédominance de la tache de couleur sur les mangues pourra donc influencer fortement la température de la peau et de la chair selon l'exposition. Cependant d'autres expérimentations sur d'autres cultivars avec des teneurs similaires en pigments rouges devront être menées afin confirmer ces résultats

L'élimination des radiations UV par un filtre n'a pas effectivement eu d'effet négatif sur l'élévation de température interne des fruits du cv. Reynal exposés au soleil, mais ces résultats doivent être relativisés. En effet, il est possible que dans le dispositif expérimental, le filtre anti UV n'ait pas permis une aération suffisante autour du fruit engendrant ainsi, par

l'établissement d'un micro climat chaud, une élévation et un maintien de la température de l'air de 1 à 3 °C pendant plusieurs heures. La mise en place d'un contrôle avec un même cône transparent ne filtrant pas les UV aurait permis de rendre compte davantage de l'effet de ces rayonnements indépendamment de l'effet de serre. Ainsi le micro climat créé probablement par le filtre, a induit, par convection de la chaleur, une augmentation de la température interne du fruit de 4 à 10 °C en comparaison à la température interne d'un fruit sans filtre anti UV. Harvey (1924) remarque que le vent permet la dissipation de l'énergie produite par le soleil. Une bonne aération permet de refroidir le fruit de plusieurs degrés en ôtant l'air chaud autour du fruit (Retig et Kedar, 1967). Si la contribution des UV ne doit pas être négligée, nos résultats suggèrent que les mangues peuvent avoir une température interne très élevée même en leur absence.

A partir de ces diverses sources de chaleur, le transfert d'énergie va se faire plus lentement à travers les tissus des fruits. Le différentiel de températures internes (jusqu'à 14 °C dans certaines conditions d'expérimentation) entre la face exposée et la face non exposée d'une mangue soumise à l'enseillement direct permet de penser que le noyau pourrait dans certains cas être une barrière thermique de conduction de la chaleur. La diffusion de la chaleur dans les tissus sera cependant d'autant plus rapide et plus aisée que le fruit est gros et donc qu'il aura accumulé davantage de chaleur. En effet les résultats montrent, bien qu'ils se réchauffent plus vite, les petits fruits du cv. Kensington ont une moins grande capacité à accumuler et diffuser la chaleur dans les gros fruits du même cultivar. Ces observations sont confirmées par l'effet du filtre anti UV qui permet également une meilleure accumulation et rétention de la chaleur du fruit (jusqu'à 5 h) et ainsi améliore les capacités de diffusion de la chaleur au sein des tissus des mangues, équilibrant par là même les températures internes des deux faces. Ce différentiel de température entre deux faces pourrait avoir des conséquences physiologiques et ainsi induire des comportements après récolte différents selon les faces exposée ou non exposée des mangues, de la même façon que l'ont démontré Woolf *et al.* (1999a, 1999b, 2000) sur avocats.

Les résultats montrent que les mangues exposées au soleil et, sous certaines conditions, les mangues à l'ombre, ont des températures internes maxima qui se situent bien dans l'intervalle des conditionnement thermiques cités dans la littérature (entre 38 °C et 42 °C) selon Joyce et Shorter (1994) et Jacobi *et al.*, (1995, 2001a) et quelquefois même bien au delà de 42 °C pour les fruits directement soumis aux radiations du soleil. Cependant, certains critères vont avoir un effet sur une potentielle acquisition d'une thermotolérance au champ :

- les caractéristiques intrinsèques des différents cultivars (taille, présence d'une tache colorée, couleur),
- la disposition spatiale sur l'arbre (orientation),
- l'angle d'incidence des rayons du soleil sur le fruit, lui même conditionné par la disposition spatiale.

Dans ces conditions, il n'est pas exclu que les niveaux de températures et de radiations intenses subis par les fruits en pré récolte puissent être des facteurs limitants à un éventuel endurcissement des mangues au champ. Dans le **chapitre 3** la réponse physiologique de différents cultivars de mangues aux traitements à la chaleur est évaluée afin de définir si l'enseillement permet une acquisition d'une thermotolérance.

CHAPITRE 3

CARACTERISATION DES MANGUES A LA RECOLTE

3.1. Chromaticité des mangues	89
3.1.1. <i>Surface et couleur de la tache colorée</i>	89
3.1.2. <i>Couleur du fond en fonction de l'exposition au soleil.....</i>	90
3.1.3. <i>Couleur de la pulpe en fonction de l'exposition au soleil.....</i>	92
3.2. Caractéristiques de maturité.....	93
3.2.1. <i>Teneur en Extraits Secs Solubles (ESS)</i>	93
3.2.2. <i>Teneur en Acidité Titrable (TA)</i>	94
3.3. Relations entre chromaticité des fruits et les paramètres de maturité	95
3.4. Caractéristiques histologiques des tissus des mangues par rapport à l'ensoleillement... 	96
3.4.1. <i>La structure des tissus</i>	96
3.4.2. <i>La teneur en amidon.....</i>	96

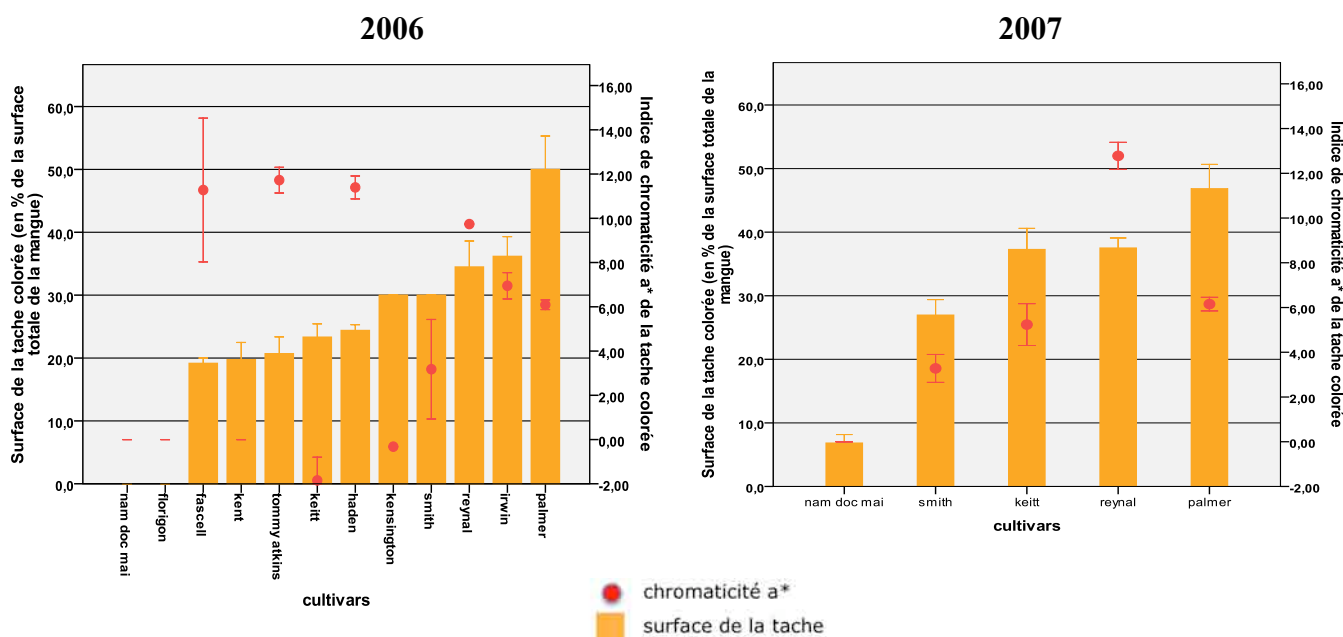


Figure 31. Surface (en %) et chromaticité a* (CIE Lab) de la tache colorée des mangues de différents cultivars à la récolte. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard à la moyenne (± 1). N = 24

Tableau 8. Pourcentage de la surface de la tache colorée et mesure de la chromaticité et luminosité (CIE, Lab) de la tache colorée des mangues de différents cultivars de 2006. ES (erreur standard à la moyenne ± 1). N = 24

Cultivar	Surface de la tache colorée (en % de la surface totale du fruit)		Indice de chromaticité a* sur la tache		Indice de chromaticité b* sur la tache		Indice de luminosité L sur la tache	
	moyenne	ES	moyenne	ES	moyenne	ES	moyenne	ES
Fascell	19,2 a	0,8	11,3 c	-	23,6 ef	1,5	48,3 c	1,0
Kent	19,7 a	2,7	Néant	-	Néant	-	Néant	-
Tommy Atkins	20,7 a	2,6	11,7 c	0	11,9 bc	0,8	37,6 ab	0,9
Keitt	23,3 a	2,1	-1,8 a	3,2	20,2 de	1,2	43,1 bc	1,5
Haden	24,3 a	0,9	11,4 c	2,2	18,7 cde	0,4	46,0 c	0,3
Kensington	30 ab	0	-0,32 ab	-	29,8 f	-	48,9 c	-
Smith	30 ab	0	3,2 abc	0,6	15,3 bcd	1,3	39,9 ab	1,2
Reynal	34,5 ab	4,1	9,7 bc	0	10,5 ab	-	35,3 a	-
Irwin	36,2 ab	3,1	6,9 abc	1,0	12,3 bcd	0,7	37,9 ab	0,5
Palmer	50 b	5,3	6,1 abc	0,5	3,7 a	0,3	40,1 ab	0,3

Néant mentionne qu'aucune tache de couleur n'a été observée sur ces cultivars. Les valeurs qui ne sont pas suivies en colonne de la même lettre minuscule sur les colonnes diffèrent au seuil de 5 % selon le test de Tukey

CHAPITRE 3

CARACTERISATION DES MANGUES A LA RECOLTE

Avant d'analyser les différentes réponses physiologiques des mangues aux traitements à la chaleur, une caractérisation physico-chimique des différents cultivars a été réalisée au préalable à la récolte, pour fixer les conditions des fruits en début d'expérimentation.

3.1 Chromaticité des mangues

3.1.1 Surface et couleur de la tache colorée

Seuls les fruits bien exposés au soleil peuvent exhiber une tache colorée mais certains cultivars n'en développent pas. Pour cette évaluation, seules les mangues exposées au soleil pour lesquelles la tache était bien prononcée ont été choisies. Les fruits avec seulement une zone de couleur diffuse sur le fond, pouvant s'expliquer par une interaction du feuillage ou un ensoleillement relatif, ont été écartés.

Les résultats obtenus (**figure 31** et **tableaux 8 et 9**) permettent de classer quelques cultivars en fonction de la surface et la chromaticité (a^* et b^*) de la tache de couleur développée sur les fruits soumis à un ensoleillement direct :

- les cv. Florigon, Nam Doc Mai n'ont pas de tache colorée en 2006 mais le cv. Nam Doc Mai en a développé une en 2007 qui reste cependant négligeable avec 6.8 % de la surface totale du fruit,
- les cv. Fascell, Kent, Tommy Atkins, Keitt, Haden ont une tache de couleur inférieure à 30 % de la surface totale du fruit. La surface de la tache colorée pour le cv. Keitt est légèrement supérieure en 2007 (37.3 % de la surface totale du fruit). Les taches de ces cultivars sont bien prononcées en rouge/orange (a^* de 11.3 à 11.7 et b^* de 18.7 à 23.3) excepté pour le cv. Keitt dont la valeur a^* est plus faible (-1.8 en 2006 et 5.2 en 2007) impliquant une tache plutôt jaune/orangée et pour le cv. Tommy Atkins pour lequel b^* est faible (11.9) impliquant une tache bien rouge,

Tableau 9. Pourcentage de la surface et mesure de la chromaticité et luminosité (CIE, Lab) de la tache colorée des mangues de différents cultivars de 2007. ES (erreur standard à la moyenne ± 1). N = 24

Cultivar	Surface de la tache colorée (en % de la surface totale de la mangue)		Indice de chromaticité a* sur la tache		Indice de chromaticité b° sur la tache		Indice de luminosité L sur la tache	
	moyenne	ES	moyenne	ES	moyenne	ES	moyenne	ES
Nam Doc Mai	6,8 a	1,3	Néant	-	Néant	-	Néant	-
Smith	27,0 b	3,3	3,3 a	0,6	11,6 b	0,4	44,1 b	0,3
Keitt	37,3 bc	1,6	5,2 a	0,9	21,9 c	1,6	50,5 c	0,9
Reynal	37,5 bc	3,8	12,8 b	0,6	11,2 b	0,5	40,5 a	0,4
Palmer	46,8 c	2,4	6,1 a	0,3	3,9 a	0,4	39,7 a	0,4

Néant mentionne qu'aucune tache de couleur n'a été observée sur ces cultivars.. Les valeurs qui ne sont pas suivies en colonne de la même lettre minuscule sur les colonnes diffèrent au seuil de 5 % selon le test de Tukey

Tableau 10. Coefficients des corrélations bilatérales de Spearman, significatifs au seuil de 5 % pour les paramètres de couleur de la peau des mangues. Les tableaux de corrélations complets sont donnés en **annexe 1**.

		L* tache	b* tache	L* fond	a* fond	b* fond
L* tache	2006	1.000				
	2007	1.000				
b* tache	2006	0.683	1.000			
	2007	0.605	1.000			
L* fond	2006			1.000		
	2007			1.000		
a* fond	2006			-0.681	1.000	
	2007			-0.646	1.000	
b* fond	2006			0.801		1.000
	2007			0.782		1.000

- les cv. Kensington, Smith, Reynal et Irwin sont des mangues avec une tache colorée moyenne (entre 30 et 40 % de la surface totale du fruit) en 2006 et 2007. Les cv. Reynal et Irwin ont des chromaticités a^* (6.9 à 12.8) et b^* (10.5 à 12.3) similaires et sont caractérisés par une tache plutôt rouge alors que les cv. Kensington et Smith ont une chromaticité a^* faible (-0.3 à 3.3) et une chromaticité b^* (11.6 à 29.8) relativement élevée qui se traduit par une coloration plus jaune de la tache.
- Les mangues du cv. Palmer ont une tache colorée représentant en moyenne 50 % de surface totale du fruit. Cette tache est rouge sombre, légèrement teintée de jaune à la récolte (a^* 6.1 et b^* 3.7 à 3.9).

La luminosité L^* de la tache varie selon les cultivars de 35.3 à 50.5. Elle est fortement liée à la chromaticité b^* et donc à la coloration jaune de la tache (**tableau 10** et **annexe 1**). D'une façon générale, les mangues de tous les cultivars ont, en 2007, une tache de couleur plus importante par rapport à 2006 (**figure 31**) mais d'une coloration moins soutenue, excepté le cv. Palmer pour lequel les chromaticités ne varient pas.

3.1.2 Couleur du fond en fonction de l'exposition au soleil

Si les mangues exposées au soleil développent une tache colorée sur certains cultivars, les mangues complètement à l'ombre n'en ont pas et sont entièrement vertes. Les données présentées dans les **tableaux 11** et **12** correspondent à la couleur du fond des mangues des cultivars étudiés indépendamment de leur exposition. Ils montrent que les valeurs du paramètre a^* , pour la plupart des cultivars, sont négatives et correspondent à une dominance verte sur le fond sauf pour le cv. Keitt en 2006 pour lequel, le fond est plus foncé avec une valeur a^* positive. Les valeurs du paramètre b^* sont positives, et associées à la chromaticité a^* , vont révéler des nuances jaunes sur le fond vert. Un classement des cultivars étudiés, en relation avec leur couleur de fond, a été réalisé :

- 1) les cv. Kensington et Nam Doc Mai ont une chromaticité a^* de fond relativement claire (-20.8 à -19.2) mais elles ont aussi les valeurs de chromaticité b^* les plus élevées (31.8 à 39.9). Elles sont ainsi caractérisées par une couleur de fond vert clair,
- 2) les cv. Smith, Reynal, Fascell, Haden, Florigon, Tommy Atkins et Irwin ont une chromaticité a^* (-18.3 à -13.3) et b^* (19.6 à 32.3) moyennes,

Tableau 11. Chromaticité et luminosité (CIE, Lab) du fond des mangues de différents cultivars de 2006. ES (erreur standard à la moyenne ± 1). N = 48

Cultivar	Indice de chromaticité a* sur le fond		Indice de chromaticité b* sur le fond		Indice de luminosité L sur le fond	
	moyenne	ES	moyenne	ES	moyenne	ES
Kensington	-20,8 a	0,2	39,9 a	0,3	61,6 a	0,5
Nam Doc Mai	-20,5 a	0,1	35,9 b	0,2	60,0 a	0,5
Fascell	-18,3 b	0,8	30,5 cde	0,2	54,9 b	0,3
Reynal	-17,9 b	0,2	32,3 c	0,3	53,1 bc	0,3
Haden	-17,8 b	0,1	28,1 def	0,2	52,8 bc	0,2
Florigon	-16,8 b	0,2	25,3 fg	0,5	49,6 de	0,3
Smith	-14,3 c	0,9	24,5 gh	0,8	46,5 ef	0,8
Tommy Atkins	-14,1 c	0,3	31,2 cd	1,3	52,9 bc	0,5
Irwin	-13,3 c	0,3	28,0 ef	0,5	50,7 cd	0,3
Kent	-9,4 d	0,7	19,7 i	0,8	43,7 f	0,8
Palmer	-1,3 e	0,6	12,0 j	0,6	36,5 g	0,8
Keitt	9,2 f	2,4	21,9 hj	2,1	44,5 f	2,3

Les valeurs qui ne sont pas suivies en colonne de la même lettre minuscule sur les colonnes diffèrent au seuil de 5 % selon le test de Tukey

Tableau 12. Chromaticité et luminosité (CIE, Lab) du fond des mangues de différents cultivars de 2007. ES (erreur standard à la moyenne ± 1). N = 48

Cultivar	Indice de chromaticité a* du fond		Indice de chromaticité b° du fond		Indice de luminosité L du fond	
	moyenne	ES	moyenne	ES	moyenne	ES
Nam Doc Mai	-19,2 a	0,1	31,8 a	0,4	61,5 a	0,5
Smith	-15,4 b	0,1	19,6 c	0,3	47,9 c	0,2
Reynal	-14,2 b	0,3	25,3 b	0,3	52,0 b	0,2
Keitt	-14,0 b	0,2	17,2 d	0,6	51,2 b	0,4
Palmer	-11,2 c	0,2	14,9 d	0,4	48,8 c	0,3

Les valeurs qui ne sont pas suivies en colonne de la même lettre minuscule sur les colonnes diffèrent au seuil de 5 % selon le test de Tukey

- 3) les cv. Kent, Palmer et Keitt ont une chromaticité a^* élevée (-14.0 à 9.2) mais une valeur de b^* plutôt faible (12 à 21.9) et auront une teinte de fond plutôt sombre. Les cv. Palmer et Keitt accusent des variations d'une année sur l'autre avec un fond beaucoup plus foncé en 2006 comparativement à 2007.

Les analyses General Linear Model (GLM) univariées (**annexe 2**) montrent que les chromaticités (a^* et b^*) du fond des mangues sont influencées par le facteur 'cultivar' et l'interaction 'cultivar x exposition' mais pas par le facteur 'exposition' seul.

En effet, en 2006, seules des différences significatives (**annexe 3**) entre les mangues au soleil et celles à l'ombre ont été observées pour a^* et b^* du fond sur les cv. Florigon, Kensington (différences négligeables) et le cv. Palmer (différence marquée). Ce dernier cultivar a une couleur de fond qui varie du vert à rouge mauve à maturité. En général, les différences sont plus nettes pour la chromaticité b^* avec une valeur plus élevée pour les mangues à l'ombre. Ainsi les mangues au soleil ont une couleur de fond plus foncée que les mangues à l'ombre. Pour le cv. Keitt, la variabilité est trop grande pour définir s'il y a une différence significative de couleur entre les fruits à l'ombre et ceux au soleil.

En 2007, pourtant, des différences significatives de la couleur de fond, selon l'exposition, sont observées mais pour d'autres cultivars (**annexe 3**). En effet, l'ombre induit une valeur a^* plus élevée pour les cv. Reynal et Keitt mais plus faible pour le cv. Palmer. Pour la chromaticité b^* , des différences significatives existent seulement pour les cv. Keitt et Reynal pour lesquels b^* est plus faible pour les mangues l'ombre. Mais d'une façon générale, c'est l'apparition de la couleur jaune du fond et l'absence de rouge qui permet au fond de la mangue d'être lumineux (**tableau 10**). Ainsi, la couleur du fond des mangues est spécifique aux cultivars. Les paramètres de chromaticité et de luminosité du fond des cultivars sont peu influencés par l'exposition au soleil sauf pour les cultivars de couleur de fond sombre (a^* faible).

Tableau 13. Mesure de la chromaticité (CIE, Lab) de la pulpe des mangues des cultivars pour lesquels il existe une différence significative entre les expositions (ombre et soleil) en 2006, selon le test de Tukey au seuil de 5 %. ES est l'erreur standard à la moyenne (± 1). N= 24

Cultivar	Exposition	Indice de chromaticité a*		Indice de chromaticité b* de	
		moyenne	ES	moyenne	ES
Reynal	Soleil	-5,6	0,1	60,1	0,4
	Ombre	-4,5	0,1	63,1	0,5
Florigon	Soleil	-8,8	0,3	51,8	1,4
	Ombre	-6,3	0,3	62,1	1,4
Fascell	Soleil	-7,9	0,1	51,3	0,8
	Ombre	-5	0,5	61,1	1,8
Tommy Atkins	Soleil	-6,6	0,7	61,6	0,9
	Ombre	-9,9	0,3	54,6	0,9
Haden	Soleil	-9,4	0,2	54,1	0,7
	Ombre	-11,1	0,1	43,6	0,9
Palmer	Soleil	-2,4	0,1	69,9	0,1
	Ombre	-7,5	0,4	58,6	1,6
Smith	Soleil	-8,3	0,2	56,7	1,1
	Ombre	-5,5	1,2	55,7	0,6

Tableau 14. Mesure de la chromaticité (CIE, Lab) de la pulpe des mangues des cultivars pour lesquels il existe une différence significative entre les expositions (ombre et soleil) en 2007, selon le test de Tukey au seuil de 5 %. ES est l'erreur standard à la moyenne (± 1). N = 24

Cultivar	Exposition	Indice de chromaticité a* de la pulpe		Indice de chromaticité b* de la pulpe	
		moyenne	ES	moyenne	ES
Keitt	Soleil	-3,7	0,4	62,4	0,8
	Ombre	-5,6	0,2	61,1	0,5
Reynal	Soleil	0,1	0,5	67,6	0,4
	Ombre	-2,3	0,3	66,2	0,4
Palmer	Soleil	-2,9	0,7	67,3	0,9
	Ombre	-6,6	0,2	62,3	1,2

3.1.3 Couleur de la pulpe en fonction de l'exposition

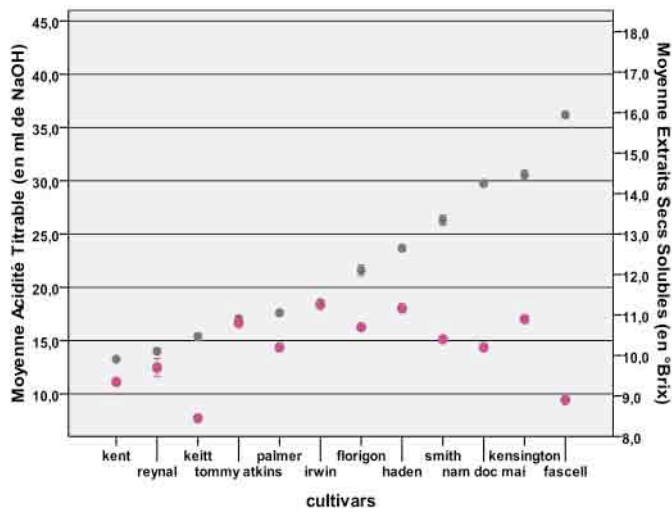
De la même façon que pour la coloration du fond des mangues, les analyses General Linear Model (GLM) univariées (**annexe 4**) montrent que seul le facteur 'cultivar' et l'interaction 'cultivar x exposition' influent fortement sur la coloration de la pulpe des mangues à la récolte et que le facteur 'exposition' n'a aucune influence. En 2006, a^* varie de -11.1 à -2.4 et b^* varie de 43.6 à 63.1 mais aucun ne permet la distinction de groupes. En 2007, si ces paramètres varient d'une façon similaire qu'en 2006 entre les cultivars, ils permettent de définir des groupes car seulement cinq cultivars ont été étudiés. Ce sont les cv. Reynal et Palmer qui ont les pulpes les plus colorées et le cv Nam Doc Mai qui a la pulpe la moins colorée. Ainsi ces résultats suggèrent que la couleur de la pulpe est spécifique à chacun des cultivars ce qui limite les comparaisons entre eux.

Ainsi en 2006, seuls les cv. Tommy Atkins, Florigon, Smith, Fascell, Haden, Palmer et Reynal montrent une coloration de pulpe qui va être significativement différente selon leur exposition au soleil. Cependant les paramètres ne varieront pas forcément dans le même sens. Les valeurs de a^* et b^* seront plus élevées pour les mangues au soleil pour les cv. Tommy Atkins, Haden et Palmer qui auront une pulpe plus jaune orangée. A l'inverse, elles seront plus élevées pour les mangues à l'ombre pour les cv. Reynal, Florigon, Fascell et Smith (**tableau 13**).

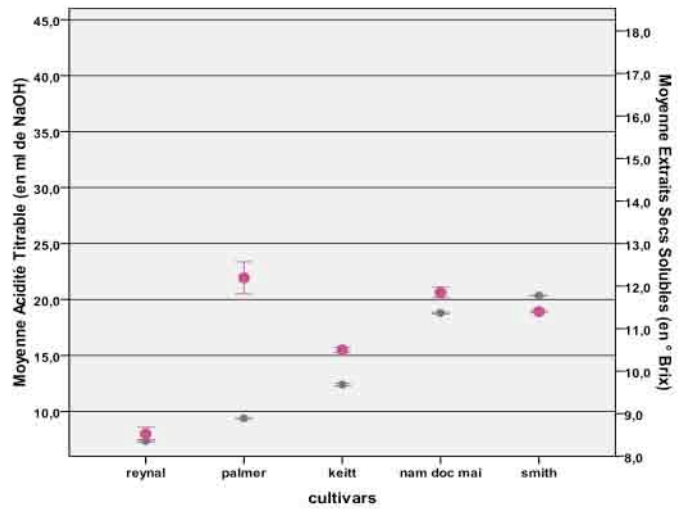
En 2007, l'exposition au soleil va induire des valeurs a^* et b^* significativement plus élevées pour le cv. Palmer mais également pour le cv. Reynal dont la réponse de la coloration de la pulpe diffère alors de celle de 2006. Seule la valeur de a^* est significativement différente entre les mangues au soleil et à l'ombre pour le cv. Keitt (**tableau 14**).

Ainsi l'analyse des paramètres de couleur à la récolte permet de constater que les couleurs développées sur la tache, sur le fond ou dans la pulpe des mangues sont très spécifiques au cultivar. L'influence de l'exposition est négligeable sur les colorations du fond et de la pulpe qui sont principalement dépendantes du stade de maturité, des conditions climatiques et de culture.

2006



2007



● teneur en acidité titrable
● teneur en extraits secs solubles

Figure 32. Teneur en Acidité Titrable (TA) et Extraits Secs Solubles des mangues vert matures de différents cultivars à la récolte de 2006 et 2007. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard à la moyenne (± 1).

3.2 Caractéristiques de maturité

Les caractéristiques biochimiques (ESS et TA) permettent d'apprécier le stade phénologique des fruits à la récolte et ainsi de mieux comprendre les différences de coloration en fonction du stade de maturité du fruit.

3.2.1 Teneurs en Extraits Secs Solubles (ESS)

Le ESS varie peu entre les différents cultivars à la récolte (**figure 32**). Des sous-groupes homogènes sont cependant identifiés pour les cultivars de 2006 (**annexe 5**) :

- les cv. Kent, Fascell et Keitt qui ont été récoltés avec un ESS très faible < 10.0 ° brix,
- les cv. Kensington, Nam Doc Mai, Smith, Haden, Florigon, Irwin, Palmer, Tommy Atkins, Reynal qui ont été récoltés avec un ESS faible > 10.0 ° brix avec un maximum de 11.2 ° brix pour les cv. Irwin et Haden.

Excepté pour le cv. Reynal, les mangues en 2007 (**figure 32**) ont été récoltées à des niveaux de ESS plus élevés qu'en 2006 mais de la même façon ils varient de 8.5 à 11.8 ° brix, ce qui reste néanmoins faible. Ce faible taux en ESS s'explique par le fait toutes les mangues ont été récoltées à un stade vert mature, avant la crise climactérique et la totale transformation de l'amidon en sucres solubles.

Les données de 2006 et 2007 montrent qu'à ce stade vert mature, il n'y a pas de différence significative entre les teneurs en ESS selon l'exposition (variation jusqu'à seulement un degré brix) pour la majorité des cultivars. Seulement en 2007, les mangues à l'ombre du cv. Nam Doc Mai ont un ESS de 2 ° brix supérieur à celui des mangues au soleil, mais à l'inverse les cv. Reynal et Palmer ont un ESS de 4 à 5 ° brix supérieur pour les mangues au soleil (**annexe 6**). Ces deux cultivars présentent une tache colorée importante en surface et en chromaticité a^*

3.2.2 Teneur en Acidité Titrable (TA)

Les différents cultivars ont été récoltés à des teneurs en TA variables (**figure 32**). Les analyses statistiques (**annexe 5**) permettent de distinguer trois groupes :

- 1) les cv. Kent, Reynal et Keitt ont des TA faibles en 2006 (13.2 à 15.3 ml NaOH) et en 2007 (7.3 à 12.4 ml NaOH),
- 2) les cv. Tommy Atkins, Palmer, Irwin ont des TA moyennes (17.0 à 18.5 ml NaOH) en 2006 excepté le cv. Palmer en 2007 qui a été récolté avec une teneur de TA de 9.4 ml NaOH,
- 3) les cv. Florigon, Haden, Smith, Nam Doc Mai, Kensington, Fascell ont des TA élevés (de 18.8 à 36.2 ml NaOH) en 2006 et 2007.

Mais d'une façon générale, pour un même cultivar, les mangues ont été récoltées en 2007 avec un TA plus faible ce qui suggère un stade phénologique un peu plus avancé pour cette campagne. Par ailleurs, les mangues à l'ombre ont un TA qui est légèrement plus élevé (environ 1 à 2 ml NaOH) que les mangues au soleil mais les différences sont plus marquées en 2006 et sur les cv. Smith et Kensington (différence de 5 ml NaOH). Ces différences sont présentées en **annexe 6**.

Les cultivars diffèrent à la récolte surtout par leur TA et peu par leur ESS. L'exposition n'a pas d'influence significative sauf pour les cv. Smith et Kensington (TA) et les cv. Reynal et Palmer (ESS). Pour ces cultivars, l'exposition au soleil semble favoriser une maturation plus rapide des fruits, mais ces paramètres chimiques ne permettent pas de comparaison entre cultivars compte tenu des teneurs qui leur sont propres. Par contre la comparaison d'une année à l'autre permet de constater que les mangues ont été récoltées à un stade de maturité légèrement plus avancé en 2007 par rapport à 2006.

3.3 Relations entre chromaticité des fruits et les paramètres de maturité

La présence et la couleur de la tache, la couleur du fond et de la pulpe ainsi que les ESS et TA sont des paramètres qui sont souvent été associés au stade de maturité du fruit. En effet à la fin de sa maturation et pendant son mûrissement, les mangues ont leur ESS qui augmente et leur TA qui décroît. De plus, d'une façon générale, plus la mangue est mûre et plus elle est colorée sur la peau et dans la pulpe. Des analyses de corrélations bilatérales (**annexe 1**) vont nous renseigner sur les relations qui lient ces différents paramètres d'une part, entre eux et d'autre part, avec l'exposition. Les résultats majeurs sont les suivants :

- la teneur en Acidité Titrable augmente sensiblement avec la surface du fond et est donc relativement liée à l'exposition mais également avec la coloration du fond. En effet, elle sera plus importante si a^* du fond est faible mais aussi elle sera variable en fonction de b^* du fond selon les années. De même, sa relation avec la tache de couleur est variable selon les différentes récoltes. En 2006 la teneur en TA augmente avec la valeur b^* alors qu'en 2007 elle est importante si a^* est faible. Ainsi la relation du TA avec la coloration de la tache et du fond reste aléatoire, certainement très dépendante de la variabilité des cultivars, de leur stade phénologique et de leur historique climatique. Par contre, le TA sera d'autant plus important que la coloration de la pulpe est faible.
- à l'inverse les Extraits Secs Solubles seront d'autant plus importants que la surface du fond est faible et est donc relativement lié à l'exposition. Cependant de même que pour le TA, et certainement pour les mêmes raisons, sa relation avec la coloration de la tache, du fond et même de la pulpe est aléatoire.

Un fruit sera d'autant plus acide et peu sucré si la surface de son fond est importante (mangues à l'ombre) et si la couleur de la pulpe est pâle. Mais on constate que l'analyse de corrélation (**annexe 1**) ne permet pas de relier les paramètres de couleur du fond, de la tache ou de la pulpe avec le facteur exposition ni en 2006 et ni en 2007. Il semble donc que le facteur 'cultivar' soit prédominant.

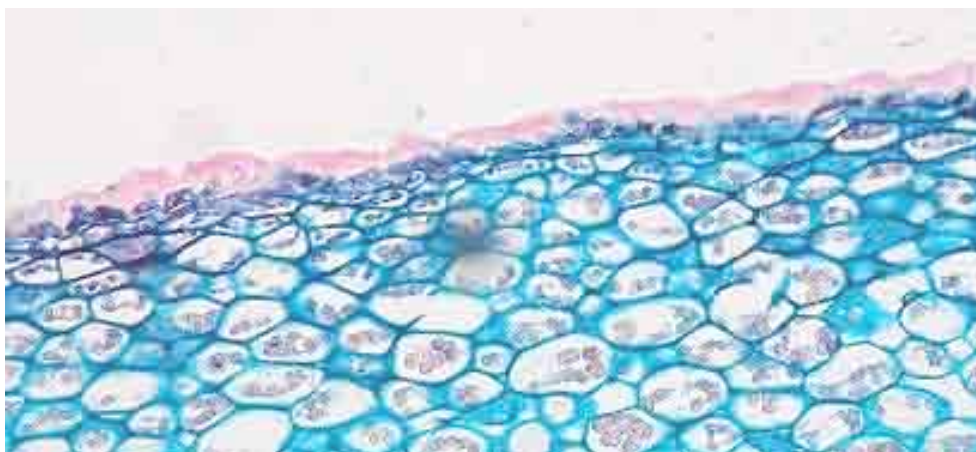


Photo 9. Cuticule et structure cellulaire de l'épiderme et parenchyme moyen de la face exposée d'une mangue au soleil du cv. Keitt.

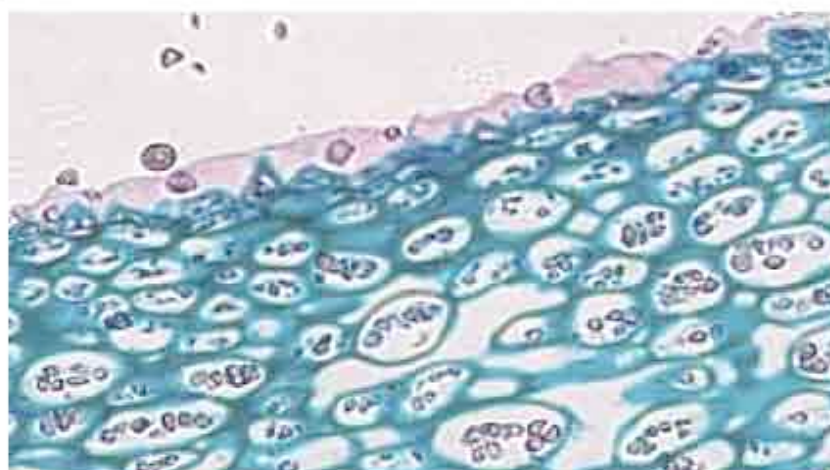


Photo 10. Cuticule et structure cellulaire de l'épiderme et parenchyme moyen de la face non exposée d'une mangue au soleil du cv. Keitt.

3.4 Caractéristiques histologiques dans mangues par rapport à l'ensoleillement

La mangue est un fruit qui comporte de nombreux vaisseaux conducteurs à travers lesquels se fait la circulation de la sève élaborée. Organe de réserve, la mangue, pendant son développement, accumule dans ses cellules de l'amidon. Ce dernier va pendant la maturation et le mûrissement se transformer en sucres solubles. Ainsi l'observation de l'organisation et du contenu cellulaire des fruits sous certaines conditions d'ensoleillement est importante dans cette réflexion. Deux aspects ressortent de cette étude.

3.4.1 La structure des tissus

Les observations histologiques mettent en évidence que la face exposée des mangues au soleil a une cuticule d'épaisseur irrégulière mais continue. Des cellules partiellement nécrosées de la première à environ la quatrième couche cellulaire sont cependant observées (**photo 9**). Sur leur face non exposée, il n'y a pas de différence au niveau de la cuticule, mais les nécroses partielles ne touchent que la première voire la deuxième couche de cellules sous la cuticule (**photo 10**). Les observations faites sur la cuticule et la structure des couches cellulaires de l'épicarpe sur la face non exposée des mangues à l'ombre sont similaires.

3.4.2 La teneur en amidon

Abstraction faite de la taille des grains d'amidon dans les plans de coupe observés du parenchyme profond, la face exposée et la face non exposée des mangues au soleil montrent le même nombre moyen de grains d'amidon par cellule (entre 4.7 et 5.3). Par contre le nombre moyen de grains d'amidon contenu dans les cellules d'une mangue au soleil est différent du nombre de grains d'amidon d'une mangue à l'ombre (6.7). Ce dernier est significativement plus élevé (**photo 11** et **tableau 15**). Ces différences n'ont pas été observées dans le parenchyme intermédiaire dans lequel les cellules contiennent en moyenne 3 à 3.5 grains d'amidon et ce quelle que soit leur exposition.

Tableau 15. Nombre de grains d'amidon dans les cellules du parenchyme profond des mangues exposées au soleil et à l'ombre du cv. Keitt. ES est l'erreur standard à la moyenne (± 1).

Exposition	Face	N	Grains d'amidon		Canaux de sève	
			moyenne	ES	moyenne	ES
soleil	exposée	7	4,7 a	0,3	17,0 a	1,4
	non exposée	6	5,3 a	0,3	22,8 a	1,6
ombre	non exposée	3	6,7 b	0,2	37,7 b	5,5

Les valeurs qui ne sont pas suivies en colonne de la même lettre minuscule sur les colonnes diffèrent au seuil de 5 % selon le test de Tukey. N représente le nombre de répétitions. Chaque répétition est l'observation de 30 cellules.

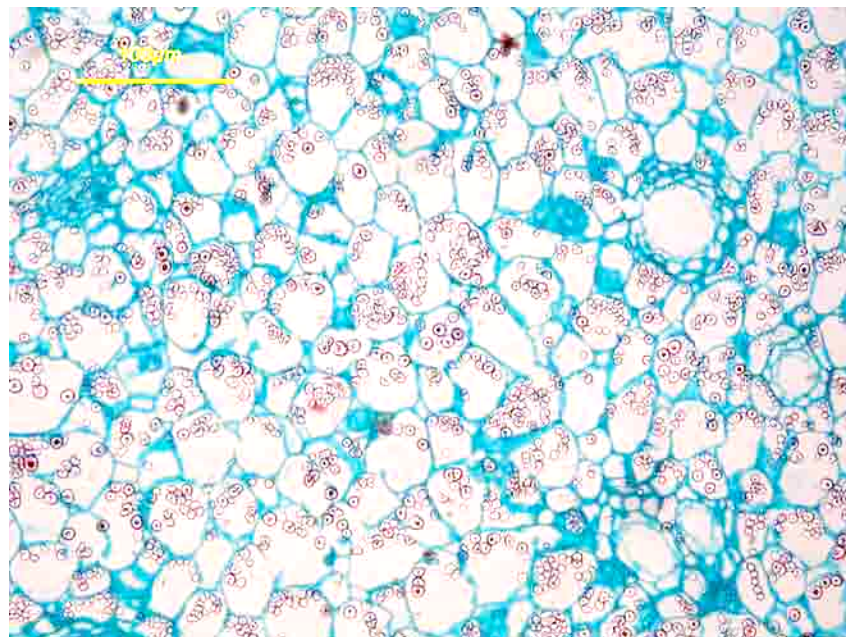


Photo 11. Grains d'amidon dans le parenchyme profond d'une mangue du cv. Keitt à l'ombre.

Par ailleurs, les mangues exposées au soleil ont un nombre moyen de canaux conducteurs de sèves plus faible (entre 17 et 23) que celui des mangues à l'ombre (38) comme le montre le **tableau 15**.

Les observations histologiques suggèrent d'une part que les mangues peuvent avoir leur épicarpe physiquement endommagé par une exposition directe au soleil et, d'autre part, que les mangues à l'ombre (voire la face non exposée des fruits au soleil) pourraient être à un stade phénologique moins avancé. Ce dernier se caractérise par une plus grande quantité d'amidon dans les cellules du parenchyme profond et un système vasculaire plus dense comparativement aux mangues au soleil.

CHAPITRE 4

LA REPONSE PHYSIOLOGIQUE DES MANGUES AU TRAITEMENT THERMIQUE HWT 55 °C PENDANT 50 MIN

4.1. Comparaison, des dégâts physiologiques occasionnés par le traitement HWT 55 °C pendant 50 min à ceux engendrés par les traitements HA (47 °C pendant 20 min et 49 °C pendant 90 min.....	99
4.2. Influence du cultivar sur la réponse physiologique au traitement HWT 55 °C pendant 50 min et classement de sensibilité variétale.....	101
4.2.1. <i>Dégâts sur la tache de couleur des fruits au soleil</i>	<i>101</i>
4.2.2. <i>Dégâts sur le fond des fruits.....</i>	<i>101</i>
4.2.3. <i>Surface et intensité de dégâts externes.....</i>	<i>103</i>
4.2.4. <i>Dégâts dans la pulpe.....</i>	<i>104</i>
4.3. Analyse globale de l'effet de l'exposition sur la réponse physiologique des mangues au traitement HWT 55 °C pendant 50 min.....	105
4.3.1. <i>Dégâts externes</i>	<i>105</i>
4.3.2. <i>Dégâts internes.....</i>	<i>106</i>
4.3.3. <i>Recherche de facteurs explicatifs.....</i>	<i>106</i>
4.4. Etudes de cas : effet de l'exposition sur la réponse physiologique des mangues au traitement HWT 55 °C pendant 50 min.....	108
4.4.1. <i>Le cultivar Reynal</i>	<i>108</i>
4.4.2. <i>Le cultivar Keitt.....</i>	<i>111</i>
4.4.3. <i>Le cultivar Palmer.....</i>	<i>114</i>
4.4.4. <i>Le cultivar Smith</i>	<i>117</i>
4.4.5. <i>Le cultivar Nam Doc Mai.....</i>	<i>119</i>
4.4.6. <i>Synthèse des résultats.....</i>	<i>122</i>
4.5. Influence du filtre anti UV	123

4.6. Effet de l'heure de récolte et de l'ensoleillement sur la réponse physiologique des mangues du cv. Reynal au traitement HWT 55 °C pendant 50 min	124
4.6.1. <i>Effet de l'heure de récolte indépendamment de l'exposition</i>	<i>124</i>
4.6.2. <i>Effet de l'ensoleillement</i>	<i>126</i>
4.7. Influence du délai et de la conservation entre la récolte et le traitement HWT sur la réponse physiologique des mangues du cv. Keitt	127
4.7.1. <i>Influence des délais de 42 à 167h à 5, 12 et 20 °C entre la récolte et le traitement HWT sur la réponse physiologique des mangues du cv. Keitt</i>	<i>128</i>
4.7.2. <i>Influence des délais de 42, 114 et 167h à 12 °C entre la récolte et le traitement HWT sur la réponse physiologique des mangues du cv. Keitt.....</i>	<i>129</i>
4.8. Discussion.....	131

CHAPITRE 4

LA REPOSE PHYSIOLOGIQUE DES MANGUES AU TRAITEMENT THERMIQUE HWT 55 °C PENDANT 50 MIN

De nombreux travaux de recherche concernant les effets des traitements à la chaleur sur mangues ont été menés (Jacobi *et al.*, 2001a). Mais la disparité des traitements (HWT, VHT et HTFA), des conditions de traitement (températures et durées), des cultivars expérimentés, des conditions de pré (et notamment de l'ensoleillement) et après récolte ne permettent pas de dissocier les facteurs pouvant influencer les réponses physiologiques observées. Ces dernières peuvent être, par ailleurs, divergentes selon les auteurs, comme cela été souligné dans le contexte bibliographique.

L'acquisition potentielle d'une thermotolérance des mangues sous le climat calédonien est possible compte tenu de la gamme de températures rencontrées (McCollum *et al.*, 1993 ; Joyce et Shorter, 1994 ; Jacobi *et al.*, 1995 ; 2000 ; 2001a). Mais aucune étude n'a, pour l'instant, démontré ce phénomène.

Dans le cadre de cette étude, trois traitements expérimentaux ont été appliqués. Le traitement HA 47 °C/ 20 min est un protocole utilisé commercialement dans de nombreux pays (Lurie, 1998) et en Nouvelle-Calédonie (Ducamp Collin *et al.*, 2007). Le traitement HA 49 °C/ 90 min utilise la même technologie de l'air chaud mais a été volontairement sévère afin de simuler les conditions extrêmes (température et durée) des fruits placés dans le fond des caisses aux points les plus chauds de la machine commerciale de désinsectisation de Tontouta (identifiés lors de travaux ultérieurs à des températures entre 48 et 49 °C pendant 80 min cf. enregistrements des traitements commerciaux - Arbofruits). Enfin le traitement en immersion à l'eau chaude sévère HWT 55 °C/ 50 min qui s'est avéré, lors des essais préliminaires sur plusieurs variétés à des températures et durées différentes, le plus adéquat pour permettre de marquer les différences de réponse physiologique à la chaleur entre les cultivars et les expositions.

Ainsi, les expérimentations mises en place durant ces travaux ont visé :

- à comparer les effets des traitements HWT 55.0 °C/ 50 min, HA 47.0 °C/ 20 min et 49.0 °C/ 90 min sur la qualité externe et interne des mangues de différents cultivars,
- à établir, sur une même saison de production (janvier à avril 2006), un classement de sensibilité au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min pour douze cultivars selon leur exposition. Une analyse de corrélations des dégâts avec les paramètres physico chimiques, pouvant être influencés par l'ensoleillement et la température des mangues, a été réalisée,
- à évaluer, sur la saison de production 2007 (janvier à avril 2007), la réponse physiologique de cinq cultivars au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min selon leur exposition et de vérifier si cette réponse était reproductible d'une saison à une autre en fonction des variations des différents paramètres physico chimiques,
- à évaluer l'influence des radiations UV dans la réponse physiologique des mangues au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min,
- à évaluer l'influence de l'heure de récolte sur 24 h, en conditions de maturité et de coloration des fruits invariables,
- à évaluer les conditions de maintien, en d'une éventuelle thermotolérance acquise en fonction d'un délai de conservation entre la récolte et le traitement HWT 55.0 °C/ 50 min.

4.1 Comparaison des dégâts physiologiques occasionnés par le traitement HWT 55 °C/ 50 min à ceux occasionnés par le traitement HA (47 °C/ 20 min et 49 °C/ 90 min)

En 2006, seul le traitement HWT 55.0 °C/ 50 min a provoqué des dégâts physiologiques externes sur la peau. Par contre tous les traitements ont engendré des dégâts internes (**tableau 16**). Pour les cv. Florigon, Fascell, Irwin, Haden et Kensington, les dégâts internes sont significativement plus importants (indices de 2.3 à 4.4) pour le traitement HWT que ceux consécutifs aux traitements HA (0.0 à 1.4). Pour les cv Kent et Smith, les dégâts internes engendrés par le traitement HWT (respectivement 1.8 et 2.2) ne sont pas significativement

Tableau 16. Indice de dégâts internes des mangues, traitées à la chaleur, des différents cultivars en 2006. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard à la moyenne ± 1 .

cultivars	N	Non Traité		HWT 55°C 50 min		HA 49°C 90 min		HA 47°C 20 min	
		moyenne	ES	moyenne	ES	moyenne	ES	moyenne	ES
florigon	48	0,0 a	0,0	2,4 b	0,2	0,1 a	0,0	0,0 a	0,0
fascell	48	0,0 a	0,0	3,7 c	0,2	1,4 b	0,2	1,0 b	0,2
kent	48	0,0 a	0,0	1,8 b	0,2	1,4 b	0,2	0,6 a	0,2
tommy atkins	45	0,0 a	0,0	1,6 a	0,3	2,5 b	0,2	1,1 a	0,2
haden	384	0,0 a	0,0	2,3 c	0,1	0,9 b	0,2	0,3 a	0,1
irwin	36	0,0 a	0,0	3,9 c	0,2	0,4 b	0,1	0,04 ab	0,0
kensington	48	0,0 a	0,0	4,4 b	0,2	0,6 a	0,1	0,5 a	0,1
smith	28	0,0 a	0,0	2,2 b	0,2	2,4 b	0,2	1,2 a	0,2

les chiffres qui ne sont pas suivis, en ligne, de la même lettre sont significativement différents selon le test de Tukey au seuil de 0.05

Tableau 17. Dégâts physiologiques externes et internes des mangues, traitées à la chaleur, des différents cultivars en 2007. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard à la moyenne ± 1 .

	cultivars	N	Non traité		HWT 55°C 50 min		HA 49°C 90 min		HA 47°C 20 min	
			moyenne	ES	moyenne	ES	moyenne	ES	moyenne	ES
Surface de dégâts sur la tache (% par rapport à la surface tache)	nam doc mai	13	0,0 a	0,0	9,3 a	7,6	0,5 a	0,5	0,0 a	0,0
	keitt	24	0,0 a	0,0	51,4 b	6,4	0,8 a	0,5	0,6 a	0,6
	smith	28	0,0 a	0,0	2,1 a	1,3	0,5 a	0,4	0,0 a	0,0
Intensité de dégâts sur la tache (0 à 3)	nam doc mai	13	0,0 a	0,0	0,7 b	0,3	0,2 ab	0,2	0,0 a	0,0
	keitt	24	0,0 a	0,0	2,3 c	0,1	0,7 b	0,4	0,2 a	0,2
	smith	28	0,0 a	0,0	0,5 b	0,2	0,1 ab	0,1	0,0 a	0,0
Surface de dégâts sur le fond (% par rapport surface fond)	nam doc mai	60	0,0 a	0,0	9,9 b	2,1	0,0 a	0,0	0,1 a	0,1
	keitt	45	0,0 a	0,0	36,3 b	4,2	0,9 a	0,5	0,3 a	0,3
	smith	57	0,0 a	0,0	14,5 b	1,9	0,0 a	0,0	0,0 a	0,0
Intensité de dégâts sur le fond (0 à 3)	nam doc mai	60	0,0 a	0,0	1,6 b	0,1	0,0 a	0,0	0,0 a	0,0
	keitt	45	0,0 a	0,0	2,3 b	0,1	0,5 a	0,2	0,2 a	0,2
	smith	57	0,0 a	0,0	2,1 b	0,1	0,0 a	0,0	0,0 a	0,0
Indice général de dégâts externes (0 à 600)	nam doc mai	60	0,0 a	0,0	26,7 b	6,2	0,0 a	0,0	0,1 a	0,1
	keitt	45	0,0 a	0,0	93,8 b	10,0	2,2 a	0,9	1,0 a	0,7
	smith	57	0,0 a	0,0	30,6 b	4,2	0,3 a	0,2	0,0 a	0,0
Indice de dégâts internes (0 à 6)	nam doc mai	60	0,0 a	0,0	2,7 c	0,1	0,5 b	0,2	0,2 a	0,1
	keitt	45	0,0 a	0,0	3,0 b	0,1	2,3 ab	0,5	2,1 a	0,5
	smith	57	0,0 a	0,0	2,9 c	0,2	1,2 b	0,3	0,6 ab	0,2

Les chiffres qui ne sont pas suivis, en ligne, de la même lettre sont significativement différents selon le test de Tukey au seuil de 0.05

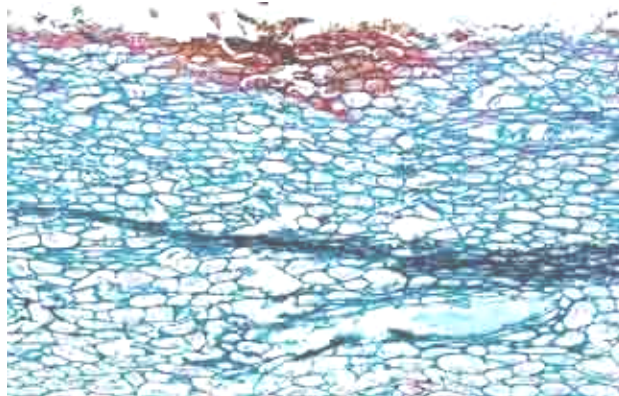


Photo 12. Dégâts sur la cuticule et les premières couches de cellules sur l'épiderme (lenticelles) d'une mangue à l'ombre, traitée HWT 55.0 °C/ 50 min du cv. Keitt

différents de ceux du traitement HA 49.0 °C/ 90 min (respectivement 1.4 et 2.4). Enfin pour le cv. Tommy Atkins c'est le traitement HA 49.0 °C/ 90 min qui induit le plus fort indice de dégâts internes (2.5) comparativement aux traitements HWT et HA 47.0 °C/ 20 min qui ne se distinguent pas entre eux (respectivement 1.6 et 1.1). D'une façon générale le traitement HWT engendre des dégâts internes plus importants que les traitements HA sur la majorité des cultivars étudiés.

En 2007, trois cultivars ont subi les trois mêmes traitements expérimentaux : les cv Nam Doc Mai, Keitt et Smith. Les dégâts externes dus aux traitements HA sont significativement différents de ceux du traitement HWT et sont négligeables. Les surfaces ou indices de dégâts externes des traitements HA 47.0 °C/ 20 min et HA 49.0 °C/90 min ne se distinguent pas entre eux. Le cv. Keitt reste le plus sensible aux différents traitements (**tableau 17**). Ces résultats suggèrent que les traitements HA affectent peu la qualité externe et interne des mangues pour la majorité des cultivars même si le traitement est sévère comme à 49.0 °C/ 90 min.

C'est le traitement HWT 55.0 °C/ 50 min qui engendre les dégâts les plus importants sur la peau. Ce phénomène est confirmé par les observations histologiques qui ont permis de constater que les mangues traitées HA ont un profil histologique identique à celui des mangues non traitées alors que les mangues traitées HWT auront jusqu'à leur dix premières couches de cellules (de l'épiderme et du parenchyme supérieur) très abimées et plus particulièrement autour des lenticelles (**photo 12**).

Ainsi c'est le traitement HWT 55.0 °C/ 50 min qui a été retenu pour les expérimentations de ce chapitre. En effet, il s'est révélé suffisamment sévère pour l'étude des différents gradients de réponse physiologique externe et interne des différents cultivars et à d'autres conditions pouvant influencer sur cette réponse (ensoleillement avec ou sans UV, heure de récolte, délai de conservation entre la récolte et le traitement). Bien évidemment, le traitement HWT 55.0 °C/ 50 min n'est pas réaliste en vue d'une application commerciale, mais l'utilisation de ce protocole expérimental n'avait pour but que d'apporter des éléments de compréhension à la réponse physiologique des mangues aux traitements à la chaleur selon l'ensoleillement.

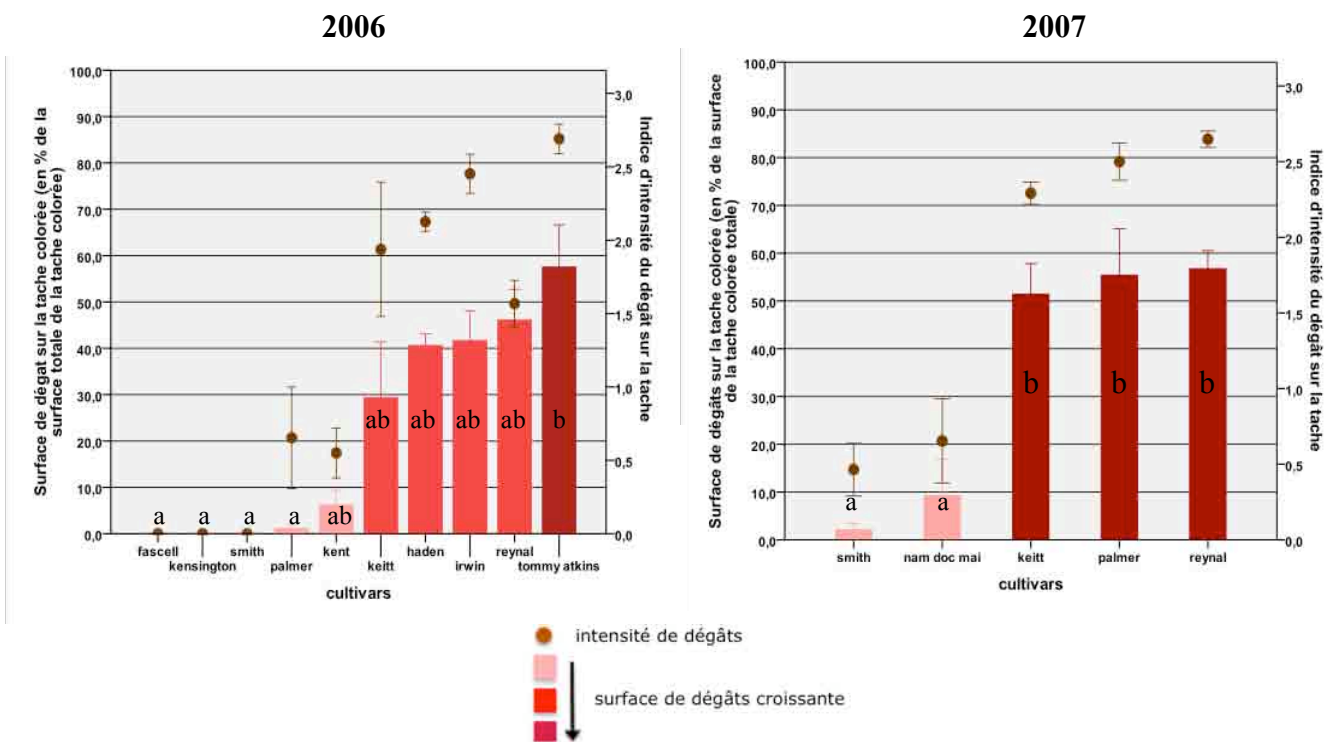


Figure 33. Surface et intensité des dégâts physiologiques sur la tache colorée des mangues traitées HWT 55.0 °C/ 50 min de différents cultivars. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard à la moyenne ± 1 . N = 24 sauf pour cv. Reynal et Haden pour lesquels N = 30. Les lettres sont issues du test de Tukey. Les barres qui n'ont pas la même lettre représentent des valeurs différentes au seuil de 5 %.

4.2 Influence du cultivar sur la réponse physiologique au traitement HWT 55 °C/ 50 min et classement de sensibilité variétale

Un certain nombre de cultivars ont été traités HWT 55.0 °C/ 50 min en 2006 et 2007 afin de comparer leur réponse à ce traitement et d'établir un classement de sensibilité.

4.2.1 Dégâts sur la tache de couleur des fruits au soleil

Les taches colorées des mangues au soleil des différents cultivars répondent différemment au HWT 55.0 °C/ 50 min (**figure 33 et annexe 7**).

- 1) les cv Fascell, Kensington et Smith ne manifestent aucun dégât sur leur tache colorée en 2006,
- 2) d'autres cultivars manifestent une surface et une intensité de dégâts faibles (respectivement inférieures à 10 % et un indice de 1) tels que les cv. Palmer et Kent en 2006 et les cv. Smith et Nam Doc Mai en 2007,
- 3) les cv. Keitt, Haden, Irwin et Reynal en 2006 présentent une surface de lésions entre 29.4 % et 46.1 % et une intensité supérieure à 1.5,
- 4) enfin les cv. Tommy Atkins en 2006 et les cv. Reynal, Keitt, Palmer ont, en 2007, plus de 45 % de la surface de la tache colorée dégradée avec des intensités de dégâts moyens à sévères.

Cependant les cv Palmer et Keitt ont des réponses variables en fonction des années. Leur sensibilité au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min est plus grande en 2007 qu'en 2006.

4.2.2 Dégâts sur le fond des fruits

De même que pour la tache colorée, le fond de mangues répond différemment au HWT 55.0°C /50 min en fonction des cultivars (**figure 34 et annexe 7**). Quatre grands groupes de sensibilité sont mis en évidence :

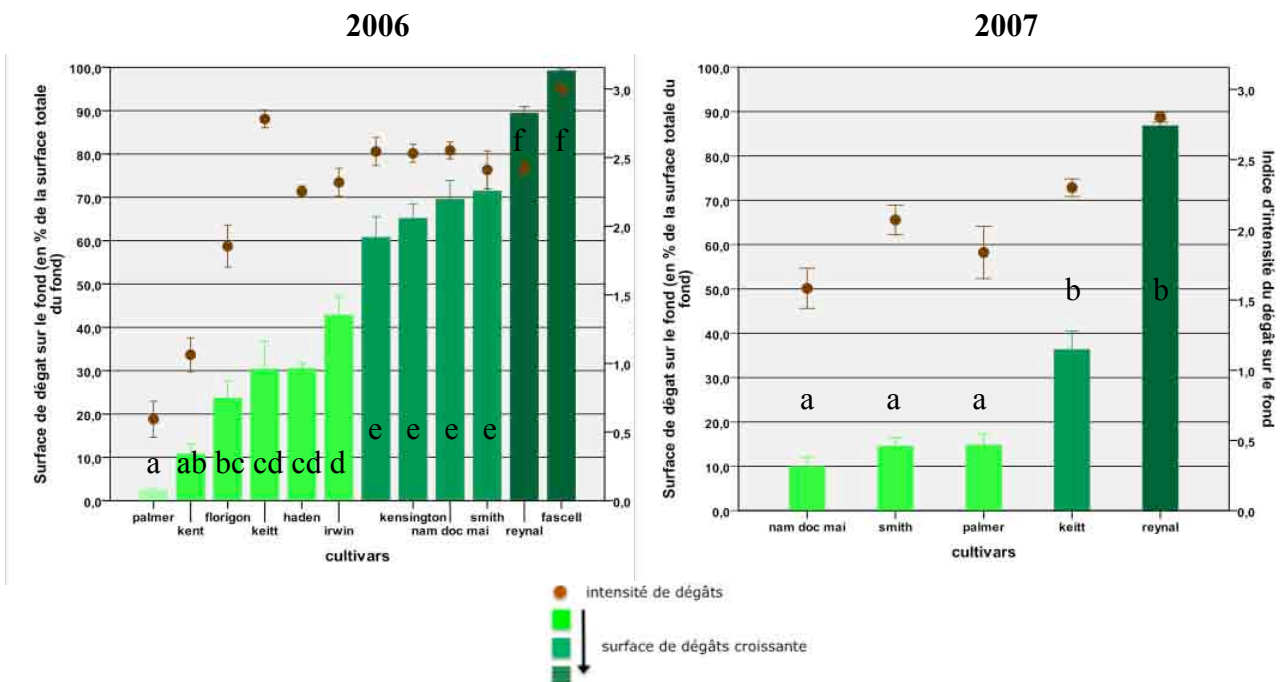
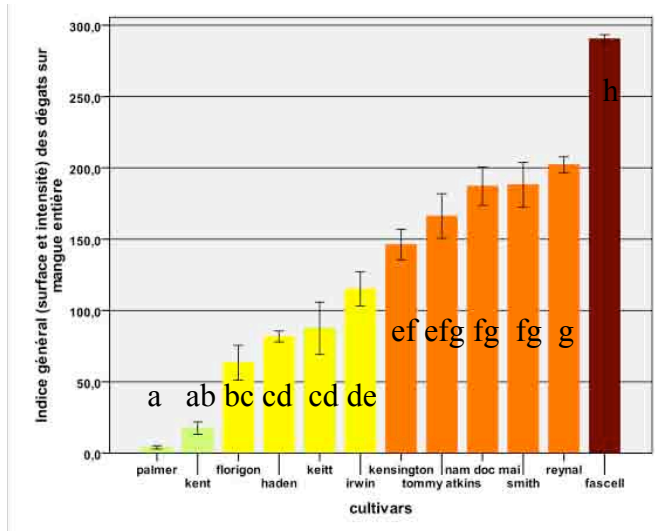


Figure 34. Surface et intensité des dégâts physiologiques sur le fond des mangues traitées HWT 55.0 °C/ 50 min de différents cultivars. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard à la moyenne ± 1 . N = 48 sauf pour cv. Reynal pour lequel N = 60. Les lettres sont issues du test de Tukey. Les barres qui n'ont pas la même lettre représentent des valeurs différentes au seuil de 5 %.

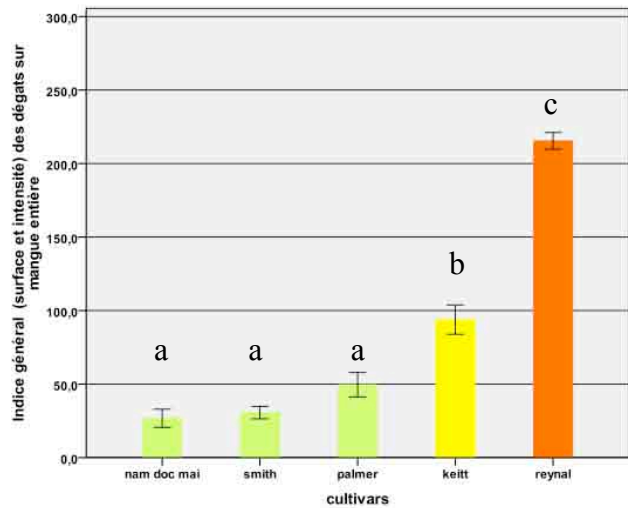
- 1) le cv. Palmer a une surface (2.4 %) et une intensité de dégâts (0.6) sur le fond très faibles en 2006,
- 2) les cv. Kent, Florigon, Keitt, Haden et Irwin ont une surface de dégâts sur le fond (entre 10.7 et 42.8 %) et une intensité de dégâts (< 1.5) moyennes en 2006. En 2007, ce sont les cv. Nam Doc Mai, Smith et Palmer qui avec une surface de dégâts (entre 9.9 et 17.5 %) et une intensité inférieure à 1.5 se classent dans ce groupe,
- 3) les cv. Tommy Atkins, Kensington, Nam Doc Mai et Smith en 2006 ont une surface de dégâts (de 60.7 à 71.4 %) et une intensité (de 2.4 à 2.5) sévères. Le cv. Keitt en 2007 a une surface de dégâts moins importante (< 40 %) et une intensité de dégâts sévère.
- 4) les cv. Reynal en 2006 et 2007 et cv. Fascell en 2006 sont les cultivars les plus sensibles sur leur fond au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min avec plus de 85 % jusqu'à 100 % de dégâts. Les intensités de dégâts sont moyennes à sévères.

La surface de dégâts dus aux traitements à la chaleur des cv Nam Doc Mai et Smith (mangues vertes) diffèrent significativement entre 2006 et 2007. Contrairement aux résultats sur les dégâts sur tache, c'est en 2007 que les dégâts sont plus faibles.

La réponse physiologique de certains cultivars au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min est donc variable au sein d'une même année et pour un même cultivar d'une année sur l'autre. Les classements de sensibilité restent cependant quasiment les mêmes sauf pour le cv. Palmer et Keitt (mangues rouges) sur la tache colorée pour lesquels les dégâts sont plus importants en 2007, et pour les cv. Smith et Nam Doc Mai (mangues vertes) pour lesquels les dégâts sur le fond sont moins importants en 2007.



2006



2007

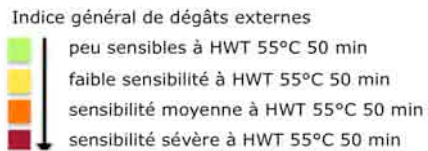


Figure 35. Indice général de dégâts externes (0 à 600) sur les mangues traitées HWT 55.0 °C/ 50 min de différents cultivars. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard à la moyenne ± 1 . N = 48 sauf pour cv. Reynal et Haden pour lesquels N = 60. Les lettres sont issues du test de Tukey. Les barres qui n'ont pas la même lettre représentent des valeurs différentes au seuil de 5 %.

4.2.3 Surface et intensité de dégâts externes

Afin de synthétiser les résultats précédents et de se placer dans un contexte commercial dans lequel la surface de dégâts revêt plus d'importance que l'intensité, nous avons développé un indice général de dégâts externes. Cet indice qui varie de 0 à 600, prend en compte la mesure de la surface et l'intensité des dégâts sur la tache colorée et sur le fond des mangues des cultivars. Il est obtenu de la manière suivante :

Indice général de dégâts externes = (intensité de dégâts sur la tache x surface de dégâts sur la tache colorée ramené à la mangue entière) + (intensité de dégâts sur la tache x surface de dégâts sur le fond ramené à la mangue entière)

Cet indice général de dégâts externes (**figure 35** et **annexe 7**) permet ainsi d'ordonner les cultivars en quatre grands groupes définis arbitrairement selon leur sensibilité globale au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min et de donner une information pratique aux professionnels.

- 1) les cv. Kent et Palmer sont les plus moins sensibles (indice inférieur à 50)
- 2) les cv. Florigon, Haden, Keitt, Irwin, Palmer ont une sensibilité moyenne au traitement (indice compris entre 50 et 125)
- 3) les cv. Kensington, Tommy Atkins, Reynal ont une sensibilité forte au traitement (indice entre 125 et 225)
- 4) le cv. Fascell a une sensibilité très forte au traitement à la chaleur (supérieur à 225)

Cependant les limites de ces groupes ne sont pas figées et des informations supplémentaires (autres cultivars ou autres lieux d'expérimentation) pourraient aider à bien définir les délimitations entre les groupes. Les cv. Nam Doc Mai et Smith ont du mal à se placer dans ce classement. Ils ont une sensibilité sévère en 2006 et faible en 2007. A l'inverse le cv. Palmer a une sensibilité moyenne en 2007 et faible en 2006. La faible sensibilité du cv. Kent n'a pu être vérifiée en 2007 faute de fruits.

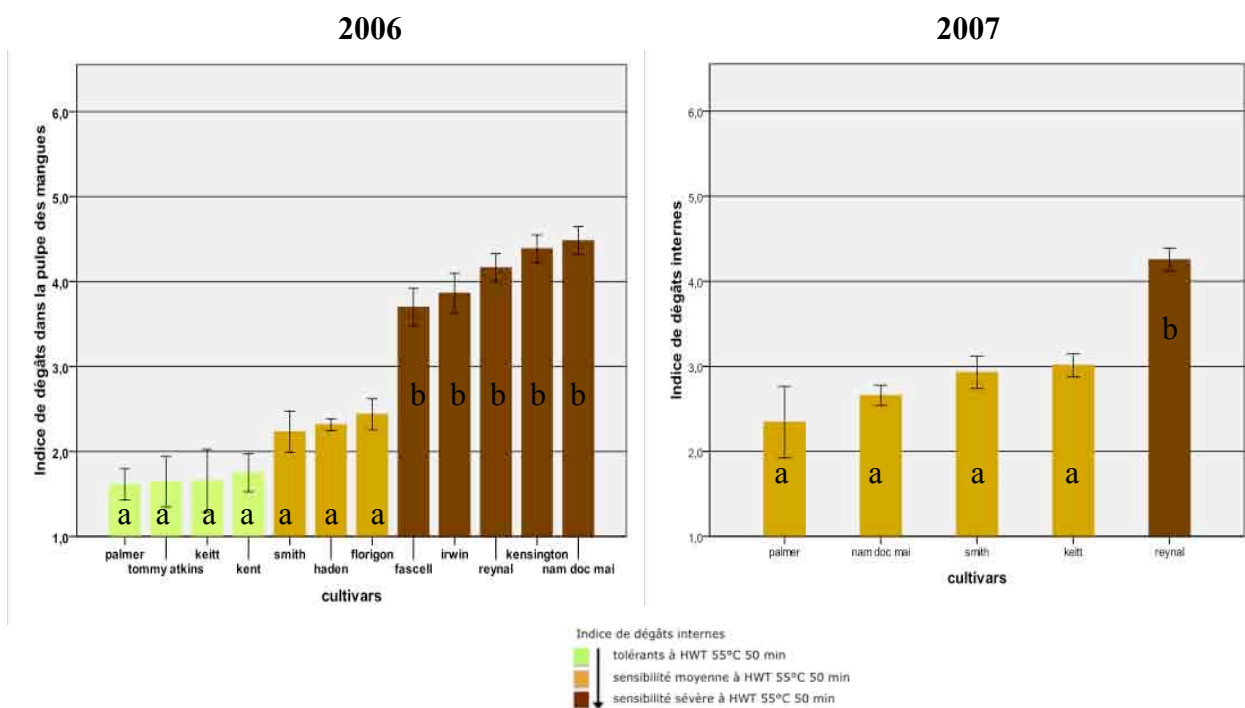


Figure 36. Indice de dégâts dans la pulpe des mangues traitées HWT 55.0 °C/ 50 min de différents cultivars. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard à la moyenne ± 1 . N = 48 sauf pour cv. Reynal et Haden pour lesquels N = 60. Les lettres sont issues du test de Tukey. Les barres qui n'ont pas la même lettre représentent des valeurs différentes au seuil de 5 %.

4.2.4 Dégâts dans la pulpe

Pour tous les cultivars, les mangues traitées HWT 55.0 °C/ 50 min présentent des dégâts au sein de leur pulpe (au centre ou sous l'épicarpe). Des différences dans l'intensité des dégâts sont cependant observées (**figure 36** et **annexe 7**) :

- 1) les cultivars les plus moins sensibles aux dégâts internes sont les cv. Palmer en 2006, les cv. Tommy Atkins, Keitt, Kent avec un indice inférieur ou égal à 2,
- 2) les cultivars qui présentent une sensibilité moyenne aux dégâts internes sont les cv. Smith, Haden et Florigon en 2006 et les cv. Palmer, Nam Doc Mai, Smith et Keitt en 2007 avec un indice compris entre 2 à 3,
- 3) les cultivars qui présentent une forte sensibilité aux dégâts internes sont les cv. Fascell, Irwin, Reynal, Kensington et Nam Doc Mai en 2006 et Reynal en 2007.

De la même manière que pour les dégâts externes, les limites entre les différents groupes ne sont pas figées. Ainsi il est difficile de placer les cv. Palmer, Keitt, Nam Doc Mai dans ces groupes de sensibilité. Les cv. Palmer et Keitt ont des dégâts internes plus importants en 2007 et à l'inverse les dégâts internes sur le cv. Nam Doc Mai sont plus importants en 2006. D'une façon générale, les mangues des cultivars qui présentent peu de dégâts externes ont une intensité de dégâts de la pulpe faible et vice versa. Quelques comportements particuliers sont cependant observés pour le cv. Irwin qui a peu de dégâts externes mais un fort indice de dégâts internes en 2006 et à l'inverse pour les cv. Tommy Atkins, Smith en 2006 et le cv. Nam Doc Mai en 2007 qui ont un fort indice de dégâts externes mais un indice de dégâts internes relativement faible.

Au final, les différents classements de sensibilité au traitement à la chaleur permettent de constater que la sensibilité sur la tache, le fond et la pulpe du fruit sont indépendantes les unes des autres et que chaque cultivar réagit différemment.

Tableau 18. Indice général de dégâts externes des mangues traitées HWT 55.0 C/ 50 min, pour les cultivars 2006 et 2007, pour lesquels une différence significative de réponse existe entre les fruits exposés au soleil et ceux à l'ombre. ES représente l'erreur standard à la moyenne ± 1 .

Cultivars	Exposition	N	2006		2007	
			Indice général (surface et intensité) de dégâts externes sur mangue entière HWT 55°C pendant 50 min			
			moyenne	ES	moyenne	ES
Florigon	Ombre	24	23,9	7,8	-	-
	Soleil	24	102,9	20,3	-	-
Tommy Atkins	Ombre	24	122,2	23,4	-	-
	Soleil	24	204,8	17,7	-	-
Reynal	Ombre	30	225,5	6,9	252,1	11,2
	Soleil	30	178,8	7,5	204,6	6,2
Nam Doc Mai	Ombre	24	183,4	18,8	11,4	5,3
	Soleil	24	190,7	19,7	42,1	10,5
Palmer	Ombre	24	6,9	1,9	21,2	10,9
	Soleil	24	1,1	0,8	88,8	14
Kensington	Ombre	24	176,1	16,4	-	-
	Soleil	24	116,3	11,1	-	-

4.3 Analyse globale de l'effet de l'exposition sur la réponse physiologique des mangues au traitement HWT 55°C pendant 50 min

4.3.1 Dégâts externes

Seules les mangues de certains cultivars exposées au soleil présentent, sur la tache colorée, des dégâts physiologiques dus au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min. Cette réponse physiologique est donc liée à la présence de la tache et donc à l'exposition, mais également au cultivar.

Par contre, pour les dégâts physiologiques dus au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min sur le fond ou l'indice général des dégâts externes des mangues, les analyses GLM univariées (**annexe 8**) permettent de mettre en évidence qu'il n'y a pas d'effet du facteur seul 'exposition'. Il existe aussi un effet 'cultivar', et surtout une interaction 'exposition x cultivar' qui influencent la sensibilité des fruits aux dégâts physiologiques externes. Ainsi seuls certains cultivars donneront une réponse différente entre les fruits exposés au soleil et ceux à l'ombre (**tableau 18**).

Ce sont les cv. Florigon, Tommy Atkins en 2006 et le cv. Nam Doc Mai en 2007 qui présentent le plus de dégâts externes sur les fruits exposés au soleil que ceux à l'ombre et plus particulièrement les cv. Florigon et Tommy Atkins. A l'inverse, pour les cv. Reynal, Palmer et Kensington en 2006 et le cv. Reynal en 2007, les fruits exposés au soleil semblent avoir acquis une certaine thermotolérance. Pour les autres cultivars, il n'y a aucune différence significative de l'indice général des dégâts externes selon l'exposition. D'une année sur l'autre, pour chacune des variétés, même si des différences significatives n'apparaissent pas obligatoirement, chaque cultivar semble avoir un comportement qui lui est propre.

Tableau 19. Indice général de dégâts internes des mangues traitées HWT 55.0 °C/ 50 min, pour les cultivars 2006, pour lesquelles une différence significative de réponse existe entre les fruits exposés au soleil et ceux à l'ombre. ES représente l'erreur standard à la moyenne ± 1 .

Cultivars	Exposition	N	Indice général de dégâts internes (dans la pulpe) des mangues traitées HWT 55°C pendant 50 min	
			moyenne	ES
Tommy Atkins	Ombre	24	0,9	0,4
	Soleil	24	2,3	0,4
Palmer	Ombre	24	2,5	0,2
	Soleil	24	0,7	0,2
Kent	Ombre	24	1,1	0,3
	Soleil	24	2,4	0,3
Reynal	Ombre	30	4,6	0,2
	Soleil	30	3,7	0,2

Tableau 20. Tableau récapitulatif des différences significatives dans l'expression des dégâts physiologiques liés au traitement HWT 55 °C/ 50 min des mangues des cultivars 2006 et 2007 selon l'exposition.

	Soleil		Ombre	
	dégâts externes	dégâts internes	dégâts externes	dégâts internes
Tommy Atkins	+	+	-	-
Florigon	+	=	-	=
Nam Doc Mai	+	=	-	=
Palmer	-	-	+	+
Reynal	-	=	+	=
Kensington	-	=	+	=
Kent	=	-	=	+

+ plus de dégâts ; - moins de dégâts ; = pas de différence significative selon l'exposition

4.3.2 Dégâts internes

De même que pour les dégâts externes, l'analyse statistique GLM univariée (**annexe 8**) met en évidence un effet du 'cultivar' et un effet de l'interaction 'cultivar x exposition' sur l'indice de dégâts internes dus aux traitements HWT 55.0 °C/ 50 min en 2006 (**tableau 19**). Par contre en 2007, seul le facteur 'cultivar' va interagir sur les dégâts internes dans la pulpe. Pour les cv. Tommy Atkins et Kent en 2006, les mangues exposées au soleil présentent plus de dégâts dans leur chair que les mangues à l'ombre. A l'inverse, pour les cv. Palmer et Reynal, les mangues à l'ombre ont plus de dégâts internes que les mangues exposées au soleil. Pour les autres cultivars en 2006 et pour les cultivars de 2007, il n'y a aucune différence significative entre les mangues au soleil ou à l'ombre par rapport aux dégâts internes.

Le **tableau 20** illustre les différences significatives dans la réponse des cultivars étudiés en 2006 et 2007, en fonction de leur exposition et le sens dans lequel varie l'expression des dégâts physiologiques externes ou internes, liés au traitements HWT 55.0 °C/ 50 min. Ainsi sur les douze cultivars étudiés, seulement sept manifestent au moins une différence significative dans leur réponse physiologique vis à vis de l'ensoleillement. Mais les comportements sont variables selon les cultivars ce qui montre encore une fois que chaque cultivar réagit différemment par rapport à l'ensoleillement et par rapport à l'acquisition éventuelle d'une thermotolérance.

4.3.3 Recherche de facteurs explicatifs

Les données de corrélations bilatérales de Spearman pour les années 2006 et 2007 sont présentées en **annexe 9** et sont résumées de façon synthétique dans le **tableau 21**. Les analyses montrent que le pourcentage de surface, de la tache colorée ou du fond, est corrélé significativement avec les critères de dégâts mesurés sur le fruit, mais que leur influence est relative. De plus le pourcentage de surface de la tache de couleur, qui est corrélé de façon négative avec l'intensité de dégâts sur la tache en 2006, l'est de façon positive en 2007. Pour cette même année, elle est également corrélée avec la surface de dégâts sur la tache mais ne semble pas influencer sur les autres critères de dégâts mesurés sur le fond et dans la pulpe.

Tableau 21. Tableau synthétique des coefficients des corrélations bilatérales de Spearman entre les paramètres de dégâts dus au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min et les paramètres biochimiques à la récolte pour l'ensemble des cultivars de 2006 et 2007. Le tableau complet est donné en **annexe 9**.

		Surface de la tache	Surface du fond	Intensité du dégât sur la tache	Surface de dégât sur la tache	Intensité du dégât sur le fond	Surface de dégât sur le fond	Indice general de dégâts externes	Indice de dégâts internes	ESS	TA	a fond	b fond	a tache	a pulpe	b pulpe
Surface de la tache	2006	1														
	2007	1														
Surface du fond	2006	-1,000**	1													
	2007	-1,000**	1													
intensité du dégât sur la tache	2006	-,133*	,133*	1												
	2007	,246**	-,246**	1												
Surface de dégât sur la tache	2006			,761**	1											
	2007	,162*	-,162*	,610**	1											
intensité du dégât sur le fond	2006		,185**	,561**	,507**	1										
	2007			,487**	,425**	1										
Surface de dégât sur le fond	2006		,089**	,324**	,410**	,633**	1									
	2007		-,244**	,551**	,574**	,715**	1									
Indice de dégâts internes	2006		,106**	,160**	,220**	,212**	,382**	0,379**	1							
	2007			,287**	,352**	,344**	,474**	0,471**	1							
ESS	2006		-,204**	,409**	,245**		-,079*			1						
	2007			-,376**	-,479**		-,662**	-0,674**	-,404**	1						
TA	2006	-,199**	,336**			,277**	,144**	-0,117**	,099**		1					
	2007	-,276**	,527**	-,635**	-,474**	-,502**	-,718**	-0,715**	-,344**	,573**	1					
a fond	2006		-,171**		-,133*	-,118**	-,243**	-0,294**	-,323**			1				
	2007	,432**	-,423**	,183*	,151*		,161**	0,209**			-,307**	1				
b fond	2006			,156**	,149**	,137**	,403**	0,428	,393**				1			
	2007	-,310**	,289**	,177*		,171**			,182**	-,229**	-,131*	-,791**	1			
a tache	2006			,135*					-,240**	,540**				1		
	2007			,520**	,347**	,602**	,677**	0,683**	,423**	-,569**	-,891**	-,252**	,826**	1		
a pulpe	2006	,164**		-,174**	-,115*	-,168**			,140**	-,393**	-,529**	-,074*	,195**	-,205**	1	
	2007	,400**	-,512**	,674**	,499**	,455**	,704**	0,712**	,336**	-,399**	-,785**	,400**	-,138*	,946**	1	
b pulpe	2006		-,161**			-,277**	-,163**	-0,114**		-,194**	-,669**	,120**			,826**	1
	2007	,408**	-,533**	,643**	,492**	,431**	,682**	0,712**	,315**	-,389**	-,854**	,546**	-,238**	,845**	,945**	1

** . La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral).

* . La corrélation est significative au niveau 0,05 (bilatéral).

Le pourcentage de la surface du fond est corrélé avec tous les critères de dégâts mesurés. Cependant le sens de ces corrélations est inverse en fonction des années et la contribution de ce paramètre semble faible.

En ce qui concerne les paramètres de maturité (ESS et TA) en 2006, seules l'intensité et la surface de dégâts sur la tache varient de façon significative et positive avec la teneur en ESS. En 2007, par contre, tous les critères de mesures de dégâts sur la tache, le fond ou la pulpe sont corrélés de façon négative avec la teneur en ESS et avec le TA.

Tout ces résultats suggèrent que le stade de maturité pourrait être un facteur à prendre en compte en matière de sensibilité des mangues au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min. Les relations qui lient les paramètres de couleur aux paramètres de dégâts sont variables selon les années et leur influence semble relative. Des exceptions existent comme, par exemple, la surface de dégâts sur le fond qui est corrélée positivement avec le paramètre b^* du fond et négativement avec le paramètre a^* du fond en 2006. Ainsi plus le fond est vert clair plus nous observerons de dégâts, mais seulement en 2006.

En 2007, cependant, la surface des dégâts sur la tache et le fond semblent dépendantes de la chromaticité a^* de la tache colorée et de la chromaticité de la pulpe. En d'autres termes, plus la tache est rouge et plus la chair est orangée, plus les dégâts sont importants sur la mangue. Enfin, durant les deux années d'étude, aucune corrélation des paramètres de dégâts avec l'exposition des fruits n'a pu être mise en évidence.

Il résulte de ces analyses que nos tentatives pour relier la nature et l'intensité des dégâts à certains critères physico-chimiques sont très variables et que peu d'éléments explicatifs en ressortent. Une conclusion d'impose : si les dégâts semblent varier avec les paramètres chimiques TA et ESS et les paramètres de la couleur de la tache et du fond, aucune relation solide n'a pu être mise en évidence. Les paramètres chimiques et les couleurs évoluent de façon spécifique pour chacun des cultivars et ces critères ne permettent pas de générer des tendances indiscutables sur l'ensemble des données.

Ainsi l'hypothèse selon laquelle l'exposition au soleil et les températures internes permettraient d'induire une thermotolérance n'est pas envisageable et c'est le facteur 'cultivar' qui semble être l'élément prédominant. Chaque cultivar répond de manière particulière à chaque situation climatique, d'ensoleillement et au traitement HWT.

C'est pourquoi, pour une meilleure compréhension des phénomènes, des analyses plus spécifiques et plus approfondies ont été réalisées pour cinq des cultivars étudiés, choisis pour leur réactivité particulière. Ce sont les cv. Reynal, Keitt, Palmer, Smith et Nam Doc Mai. Cette approche transverse devrait permettre de mieux répondre aux questions posées, à la fois pour orienter les recherches ultérieures sur les mécanismes d'adaptation des fruits à la chaleur et pour envisager des solutions applicables en production.

4.4 Etudes de cas : effet de l'exposition sur la réponse physiologique des mangues au traitement HWT 55 °C pendant 50 min.

Ces études de cas ont été menées pour les cinq cultivars expérimentés en 2006 et en 2007 en reprenant les résultats des expérimentations présentés dans les sous chapitres précédents.

4.4.1 Le cultivar Reynal

Compte tenu des résultats précédents (**chapitre 3** et **sous chapitre 4.2**) le cv Reynal est un cultivar pour lequel plus de 30 % de la surface du fruit est recouvert d'une tache colorée. Les chromaticités (a* et b*) de la tache et du fond sont moyennes, par contre sa pulpe est colorée à la récolte. En 2006, aucune différence significative n'existe pour la couleur de fond entre une mangue exposée au soleil ou à l'ombre. En 2007, par contre sur le fond, la chromaticité a* est plus élevée mais b* est plus faible pour les mangues à l'ombre. En ce qui concerne les caractéristiques de maturité, le cv. Reynal présente à la récolte des niveaux très faibles de teneur en ESS et en TA. Enfin le cv. Reynal est un des cultivars les plus sensibles au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min. Il présente d'importants dégâts (surface et intensité) sur la tache colorée, sur le fond et dans la pulpe. Il semble cependant que l'ensoleillement à une influence sur sa réponse physiologique au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min.

a) Dégâts externes

Les résultats du **sous-chapitre 4.2** montrent que le traitement HWT 55.0 °C/50 min provoque des dégâts physiologiques, en surface et en intensité, sur la tache de couleur. Entre 2006 et 2007, c'est 46 à 57 % de la tache de couleur qui est affectée mais sans différence significative entre les deux années. Cependant le niveau de sévérité est plus faible en 2006 (indice 1.7) qu'en 2007 (indice 2.6). Quelle que soit l'année, environ 87 % de la surface de fond est affectée par les dégâts physiologiques dus au traitement HWT 55.0°C /50 min. De même que pour la tache de couleur, si les dégâts observés en surface ne sont pas significativement

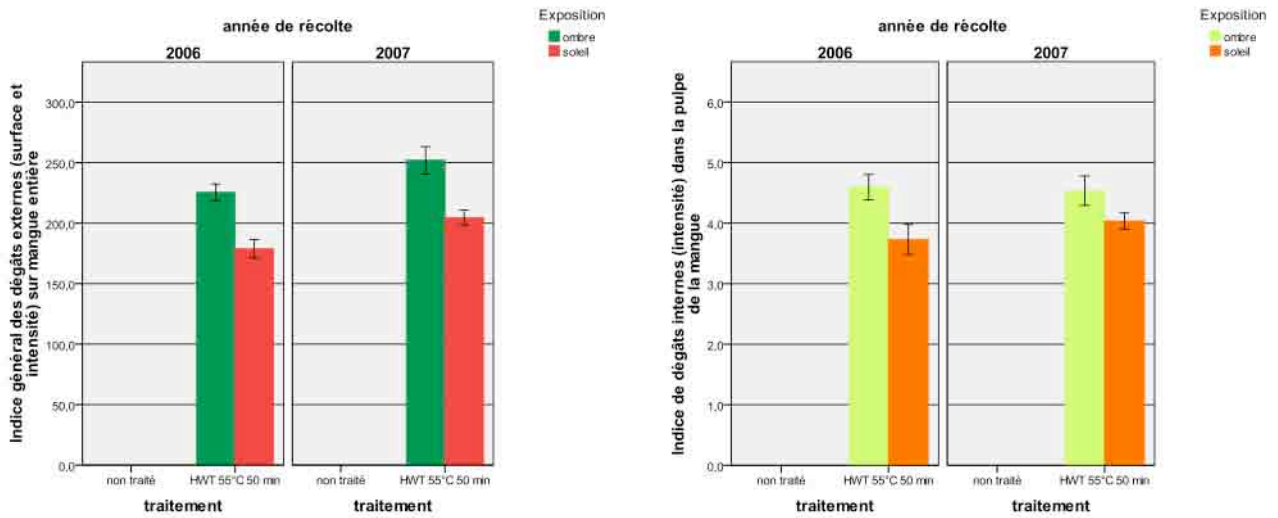


Figure 37. Dégâts physiologiques externes (gauche) et internes (droite) sur les mangues du cv. Reynal, traitées HWT 55.0 °C/ 50 min en fonction de l'exposition. Les barres d'erreur montrent l'erreur standard à la moyenne ± 1 . N = 30



Photo 13. Influence de la tache colorée du cv. Reynal exposé au soleil sur la réponse physiologique des mangues au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min.

différents entre deux années, ils ont par contre, un niveau de sévérité plus faible en 2006 (indice 2.4) qu'en 2007 (indice 2.8). Cependant, la **figure 37** met bien en évidence une différence significative entre les mangues au soleil et celles à l'ombre aussi bien en 2006 qu'en 2007 : les mangues au soleil ont un niveau général de dégâts externes plus faible mais seulement du à une moins grande proportion (en surface) de dégâts sur la tache colorée que sur le fond comme l'illustre la **photo 13**.

b) Dégâts internes

La **figure 37** ne met en évidence aucune différence significative entre la réponse des mangues du cv. Reynal au niveau des dégâts internes d'une année sur l'autre. Par contre, elle met en évidence une différence significative entre les mangues exposées au soleil et celles à l'ombre. Les mangues au soleil semblent ainsi moins affectées par les dégâts internes au niveau de leur pulpe.

c) Recherche de facteurs explicatifs (**tableau 22** et **annexe 10**)

Au niveau de la tache colorée

En 2007, à surface égale, la tache colorée est plus rouge qu'en 2006. L'intensité des dégâts est plus importante en 2007. Quelle que soit l'année, elle est avant tout liée à la valeur de a^* suggérant que les dégâts sont plus sévères sur des taches rouges comme c'est le cas en 2007. L'intensité de dégâts sur la tache est proportionnelle à l'intensité des dégâts sur le fond. Comme sur la tache, l'intensité de dégâts sera d'autant plus importante que le fond a une valeur a^* plus élevée et une valeur b^* faible ainsi qu'une pulpe colorée.

Les niveaux de coloration de la tache, du fond et de la pulpe, pouvant être liés à l'intensité des dégâts sur la tache en réponse au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min, suggèrent un stade de maturité plus avancé. Cette hypothèse pourrait se confirmer au vu de la corrélation négative de l'intensité de dégâts sur la tache et la teneur en TA. Par contre la surface des dégâts sur la tache ne semble pas être reliée à une coloration de la tache, du fond ou de la pulpe. Elle ne varie pas de façon significative entre les deux années. Et si elle n'est pas reliée au TA, elle sera cependant d'autant plus grande que le taux d'ESS est faible. Cependant ce dernier reste relativement constant. Ainsi la surface des dégâts sur la tache pourrait être, quant à elle, indépendante du stade de maturité. Elle évolue de façon proportionnelle à l'intensité et à la surface du fond et donc à la sévérité du traitement.

Tableau 22. Tableau synthétique des corrélations bilatérales de Spearman entre les paramètres de dégâts dus au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min, les paramètres biochimiques à la récolte, l'exposition et l'année de récolte pour le cv. Reynal. Le tableau complet des corrélations est donné en **annexe 10**.

cv Reynal		année	dégâts tache		dégâts fond		dégâts internes	exposition
			surface	intensité	surface	intensité		
année				+++		++		++
tache	chromaticité a*	+++		++		++		
	chromaticité b*	-						
fond	chromaticité a*	++++		++	-	++		++
	chromaticité b*	----		--		--		--
pulpe	chromaticité a*	++++		+++	-	++		
	chromaticité b*	+++		+++		++		
TA		----		---	+	--		---
ESS			--					++
exposition		++						

++++ très forte corrélation ($0.750 < r < 1.000$)
 +++ forte corrélation ($0.500 < r < 0.750$)
 ++ corrélation moyenne ($0.250 < r < 0.500$)
 + faible corrélation ($r < 0.250$)

le + et le - indiquent le sens de la corrélation

Au niveau du fond

En 2007, la couleur du fond des mangues est plus foncée et plus rouge. Comme pour la tache colorée, l'intensité des dégâts sur le fond est plus important en 2007 et ce phénomène pourrait être dû à la différence de coloration du fond des mangues selon les années. Cette hypothèse est renforcée par la corrélation négative avec le TA. Par contre la surface de dégâts sur le fond semble évoluer de façon indépendante de l'intensité et n'est pas influencée par l'année de récolte, ni par l'exposition. A l'inverse, elle pourrait être plus importante si le niveau de TA est élevé et si le fond a peu développé sa chromaticité a^* donc rouge. Ainsi, l'intensité de dégâts sur le fond est d'autant plus importante que les mangues manifestent les caractères externes de couleur et les caractéristiques de maturité de stade de maturité avancé. Par contre la surface de dégâts sur le fond sera plus grande pour des mangues dont le stade vert mature est peu avancé.

Au niveau de la pulpe

La pulpe des mangues du cv. Reynal récoltées en 2007 est plus colorée qu'en 2006. Par contre aucune différence significative de couleur de pulpe n'est mise en évidence par l'exposition. Cette dernière aura cependant une influence sur la réponse de la pulpe du cv. Reynal au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min. En effet, l'indice de dégâts internes sera d'autant plus élevé pour les mangues à l'ombre. Cependant aucune relation ne lie les paramètres de coloration (tache, fond et pulpe) et les paramètres de maturité (ESS et TA) avec l'indice de dégâts internes. Il semble cependant proportionnel à la surface du fond et à la surface de la tache.

Influence des paramètres de maturité

En 2007, le niveau du TA est plus faible qu'en 2006. Par contre il n'y a pas de différence significative pour le ESS qui est sensiblement le même. Les paramètres de maturité vont également évoluer en fonction de l'exposition. Les mangues les plus exposées au soleil auront une teneur en ESS plus élevée et une teneur en TA plus faible que les mangues à l'ombre.

Tous ces résultats suggèrent que les mangues du cv. Reynal récoltées en 2007 ont un stade de maturité plus avancé que celles récoltées en 2006. Globalement ces dernières se caractérisent par une coloration rouge plus importante sur la tache et sur le fond et un TA plus faible. Ces différences de coloration et notamment une chromaticité a^* plus élevée et une acidité plus faible, pourraient expliquer en partie l'intensité des dégâts sur la tache et sur le fond plus élevée en 2007. Inversement ce sont sur les mangues aux stades de maturité les moins avancés, que la surface de dégâts sur le fond est la plus importante. Si l'année de récolte permet de différencier des réponses (dégâts externes) des mangues du cv. Reynal au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min en fonction de la coloration de la tache et du fond et de la teneur en TA, l'exposition au soleil, pour laquelle des phénomènes similaires sont observés, ne le permet pas. L'exposition des fruits au soleil limiterait cependant l'incidence des dégâts internes. Ainsi la différence significative de la réponse (dégâts externes) des mangues du cv. Reynal au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min, selon l'exposition, ne réside que dans la présence de la tache des mangues au soleil sur laquelle la surface de dégâts est plus faible (sans que de facteurs explicatifs n'aient pu être suggérés). Par contre l'exposition des mangues du cv. Reynal influe sur l'incidence des dégâts internes.

4.4.2 Le cultivar Keitt

Compte tenu des résultats précédents (**sous chapitre 4.2**), le cv. Keitt est un cultivar dont la tache colorée moyenne des fruits au soleil recouvre en 2006 et 2007 plus de 23.3 à 37.5 % de la surface du fruit. Les chromaticités (a^* et b^*) de la tache et du fond sont élevées en 2006 et moyennes en 2007. En 2006, la variabilité des réponses ne permet pas de statuer si une différence significative existe pour la couleur de fond entre une mangue exposée au soleil et une mangue exposée à l'ombre. En ce qui concerne les caractéristiques de maturité, le cv. Keitt présente à la récolte des niveaux faibles de ESS et de TA. Enfin dans le classement de sensibilité au traitement HWT 55.0°C/ 50 min, le cv. Keitt est moyennement sensible en 2006 et très sensible en 2007 sur la tache colorée, en surface et en intensité. Par contre il présente une sensibilité faible à moyenne sur le fond. Ainsi en reprenant l'indice général de dégâts externes et les dégâts internes, il se classe dans les cultivars à sensibilité moyenne. Par contre, il ne semble pas répondre à un ensoleillement particulier.

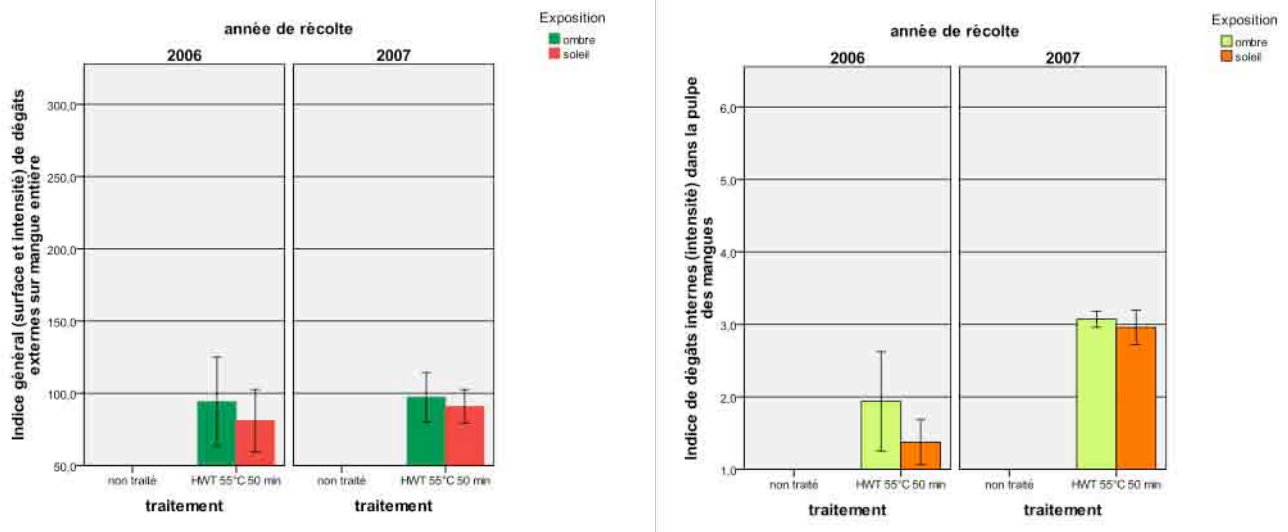


Figure 38. Dégâts physiologiques externes (gauche) et internes (droite) sur les mangues, traitées HWT 55.0 °C/ 50 min, du cv. Keitt, en fonction de l'exposition. Les barres d'erreur montrent l'erreur standard à la moyenne ± 1 . N = 24

Tableau 23. Tableau synthétique des corrélations bilatérales de Spearman entre les paramètres de dégâts dus au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min et les paramètres biochimiques à la récolte ainsi que l'exposition et l'année pour le cv. Keitt. Le tableau complet des corrélations est donné en **annexe 11**.

cv Keitt		année	dégâts tache		dégâts fond		dégâts internes	exposition
			surface	intensité	surface	intensité		
année						--	++	
tache	chromaticité a*	++++					++	
	chromaticité b*							
fond	chromaticité a*	----	--			++	--	++
	chromaticité b*	--	--				--	--
pulpe	chromaticité a*							
	chromaticité b*	++++				--	++	
TA		----				++	--	---
ESS		++++	--			--	++	++
exposition								

++++ très forte corrélation ($0.750 < r < 1.000$)
 +++ forte corrélation ($0.500 < r < 0.750$)
 ++ corrélation moyenne ($0.250 < r < 0.500$)
 + faible corrélation ($r < 0.250$)

le + et le - indiquent le sens de la corrélation

a) Dégâts externes

Les résultats du **chapitre 3** et **sous-chapitre 4.2** ont mis en évidence que le traitement HWT 55.0 °C/ 50 min provoque des dégâts physiologiques (surface et en intensité) sur la tache de couleur. Entre 2006 et 2007, c'est 29.5 à 51.4 % de la tache de couleur qui est affectée. Cependant le niveau de sévérité est plus faible en 2006 (indice 1.9) qu'en 2007 (indice 2.3). Mais la variabilité des réponses tant au niveau de l'intensité et de la surface des dégâts est telle que les différences ne sont pas statistiquement significatives d'une année sur l'autre. Entre 2006 et 2007, c'est 30.3 à 36.3 % environ de la surface de fond qui est affectée par les dégâts physiologiques dus au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min. Les données ne permettent pas de mettre en évidence une différence significative entre les années pour la surface des dégâts sur le fond mais seulement pour l'intensité de dégâts. De même que pour la tache de couleur, les dégâts observés sur le fond ont un niveau de sévérité plus élevé en 2006 (indice 2.8) par rapport à 2007 (indice 2.3). Par contre, il n'y a pas de différence significative en surface et en intensité de dégâts sur le fond sur une mangue du cv. Keitt exposée au soleil ou à l'ombre. La **figure 38** représentant l'indice général des dégâts externes confirme la sensibilité modérée de la mangue cv. Keitt au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min sans différenciation de l'année ou de l'exposition. En effet, l'indice de sévérité des dégâts sur le fond plus faible en 2007, ne permet pas de distinguer une différence de réponse physiologique nette entre 2006 et 2007 sur l'indice général de dégâts externes.

b) Dégâts internes

Au niveau des dégâts internes, la **figure 38** ne met en évidence aucune différence significative entre la réponse des mangues du cv. Keitt en fonction de l'exposition. Mais elle montre une différence significative entre les mangues récoltées en 2006 et 2007. Les dégâts internes consécutifs au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min sont beaucoup plus sévères en 2007 qu'en 2006.

c) Recherche de facteurs explicatifs (**tableau 23** et **annexe 11**)

Au niveau de la tache colorée

Il n'y a pas de différence significative entre les réponses de la tache colorée au traitement entre 2006 et 2007, ni en fonction de l'exposition. Pourtant, le **tableau 23** permet de mettre en évidence une surface et une chromaticité a* de la tache colorée plus importantes en 2007 mais

ces variations ne sont pas assez importantes pour influencer sur la surface et l'intensité de dégâts. Cette dernière n'est reliée à aucun paramètre de couleur ou de maturité. Par contre la surface de dégâts sur la tache est corrélée de façon négative avec la coloration du fond. Ceci indique que la surface de dégâts sera d'autant plus importante que la couleur du fond est foncée. Elle est par ailleurs corrélée positivement avec l'indice de dégâts internes. Aucune corrélation n'est observée avec les paramètres de maturité.

Au niveau du fond

L'intensité de dégâts sur le fond est plus intense en 2006 qu'en 2007. Elle le sera d'autant plus si la mangue du cv. Keitt a un fond avec une chromaticité a^* et une pulpe peu teintée de jaune avec un b^* faible, un TA et un ESS faibles, suggérant ainsi un stade de maturité vert mature peu avancé. Par contre, la surface de dégâts n'est reliée à aucun paramètre de maturité et de couleur. Les différences de chromaticité de fond entre une mangue au soleil ou à l'ombre ne permettent cependant pas de mettre en avant une réponse physiologique des mangues de ce cultivar différente selon les expositions.

Au niveau de la pulpe

La **figure 38** ne met pas en évidence une différence significative de dégâts internes entre 2006 et 2007 mais il semble qu'une tendance existe. En 2007, le niveau de dégâts internes est plus important. Quelle que soit l'année, l'indice de dégâts internes est d'autant plus important que la tache colorée est rouge que le fond est vert foncé avec des valeurs a^* et b^* faibles et que la pulpe est colorée de jaune avec un b^* plus élevé. Il est également corrélé avec les paramètres de maturité et évoluera positivement avec l'ESS et de façon négative avec le TA. Ainsi ces résultats suggèrent que les mangues du cv. Keitt à un stade de maturité plus avancé seront plus sensibles aux dégâts internes.

Influence des paramètres de maturité

En 2007, les mangues ont un ESS plus élevé et un TA plus faible. Ces données caractérisent un stade de maturité plus avancé comparativement à 2006. En 2007, les mangues du cv. Keitt exposées au soleil seront sensiblement moins acides et auront une teneur en ESS légèrement supérieure à 2006. Mais ces différences n'influent pas de façon significative sur la réponse physiologique des mangues du cv. Keitt au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min.



Figure 39. Surface et indice d'intensité des dégâts physiologiques sur la tache colorée des mangues, du cv. Palmer, traitées HWT 55.0 °C/ 50 min en 2006 et 2007. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard à la moyenne ± 1 . N = 24



Photo 14. Illustration de la réponse physiologique des mangues exposées au soleil du cv. Palmer consécutivement au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min. A gauche la tache est épargnée, à droite, elle présente des dégâts sévères en périphérie de la coloration rouge.

Les paramètres de maturité, la surface et la coloration rouge de la tache et la coloration jaune de la pulpe suggèrent un stade de maturité plus avancé en 2007. Ainsi il semble que la sensibilité des mangues du cv. Keitt résulte d'un équilibre subtil entre tous ces paramètres qui n'évoluent pas forcément dans le même sens et de façon concomitante. Mais ces différences n'influent pas sur le comportement même si des tendances semblent exister. Les résultats nous permettent de considérer que le cv. Keitt a une réponse physiologique controversée au traitement à la chaleur, en fonction de son stade de maturité, qui n'avait pas été observée pour le cv. Reynal. Il semble qu'à un certain seuil de maturité peu avancé et surtout par l'absence de la coloration jaune du fond, la surface des dégâts sur la tache et l'intensité des dégâts sur le fond soient favorisées. A l'inverse, la sévérité des dégâts internes est plus importante que la pulpe se colore. Cependant la surface des dégâts sur le fond, un élément majeur dans la réponse du fruit au traitement, n'est reliée à aucun paramètre mesuré.

4.4.3 Le cultivar Palmer

Compte tenu des résultats précédents (**chapitre 3** et **sous chapitre 4.2**) le cv. Palmer est un cultivar pour lequel les fruits exposés au soleil présentent une tache colorée recouvrant en 2007 et 2006 plus de 46.8 à 50 % de la surface du fruit. Sur la tache colorée comme sur le fond, la chromaticité a* est moyenne et la chromaticité b* est faible. Par contre sa pulpe est bien colorée à la récolte. Les mangues exposées au soleil ont un fond avec une chromaticité a* plus élevée et une chromaticité b* plus faible ainsi qu'une pulpe beaucoup plus colorée que les mangues à l'ombre. Par ailleurs, le cv. Palmer présente à la récolte des niveaux moyens de ESS et de TA. Enfin dans le classement variétal de sensibilité au traitement à la chaleur HWT 55.0 °C/ 50 min, le cv. Palmer est peu sensible en 2006 et sensible en 2007 et présente peu de surface de dégâts sur la tache colorée (avec des intensités variables) ainsi que sur le fond (surface et intensité). Ainsi en reprenant l'indice général de dégâts externes et les dégâts internes, il se classe dans les cultivars sensibles aux traitements à la chaleur HWT 55.0 °C/ 50 min.

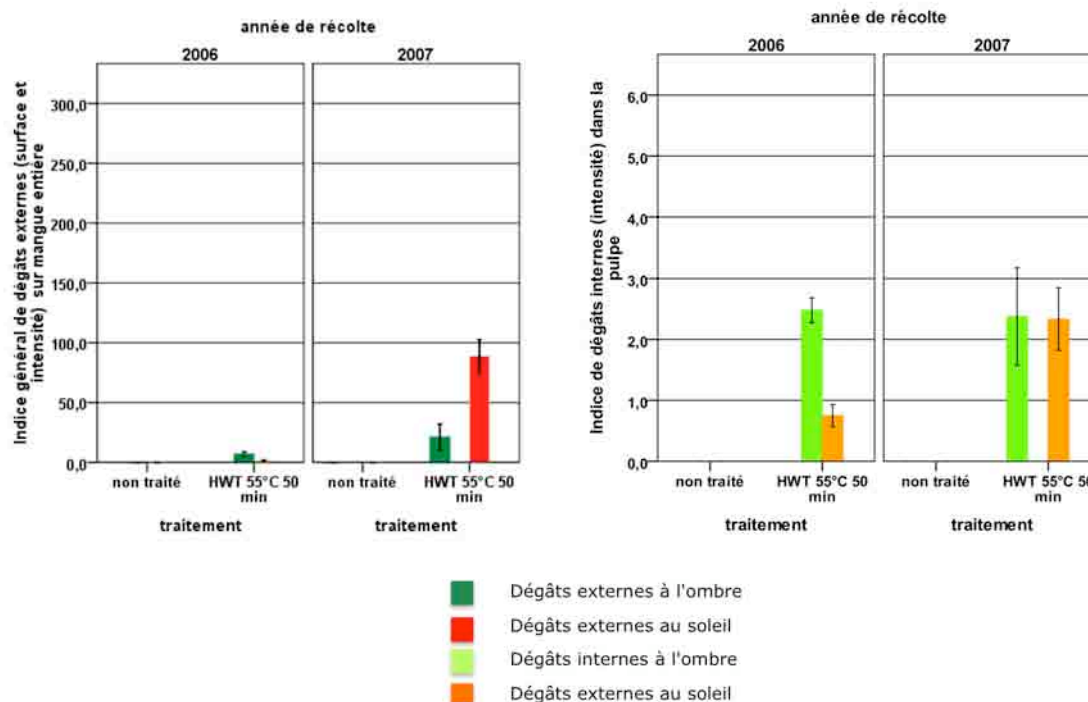


Figure 40. Dégâts physiologiques externes (gauche) et internes (droite) sur mangues, traitées HWT 55.0 °C/ 50 min, du cv. Palmer, en fonction de l'exposition. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard à la moyenne ± 1 . N = 24

Tableau 24. Tableau synthétique des corrélations bilatérales de Spearman entre les paramètres de dégâts dus au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min, les paramètres biochimiques à la récolte, l'exposition et l'année de récolte pour le cv. Palmer. Le tableau complet des corrélations est donné en **annexe 12**.

cv Palmer		année	dégâts tache		dégâts fond		dégâts internes	exposition
			surface	intensité	surface	intensité		
année			+++	++	+++	+++		++
tache	chromaticité a*							
	chromaticité b*							
fond	chromaticité a*	++++	+++	++	++	++		++
	chromaticité b*	----	---	--	--	---		--
pulpe	chromaticité a*				--	--	--	++++
	chromaticité b*				++	++	++	++++
TA		----	----	--	--	--		---
ESS		+++	++++	++	+++	+++	+	
exposition		++					--	

++++ très forte corrélation ($0.750 < r < 1.000$)

+++ forte corrélation ($0.500 < r < 0.750$)

++ corrélation moyenne ($0.250 < r < 0.500$)

+ faible corrélation ($r < 0.250$)

le + et le - indiquent le sens de la corrélation

a) Dégâts externes

Les résultats du **sous-chapitre 4.2** montrent que le traitement à la chaleur HWT 55.0 °C/ 50 min provoque des dégâts physiologiques (en surface et en intensité) sur la tache de couleur. Entre 2006 et 2007, il présente des particularités d'une réponse physiologique au traitement HWT comme illustré par la **figure 39**. En effet, la surface de la tache de couleur affectée par le traitement va varier de 1.1 % (2006) à 55.4 % (2007). Cette dernière représente entre 50 % (2006) à 46.8 % (2007) de la surface totale du fruit. Le niveau de sévérité est plus faible en 2006 (indice 0.6) qu'en 2007 (indice 2.5). La surface et l'intensité des dégâts sur la tache colorée sont significativement plus élevées en 2007 qu'en 2006. La surface de dégâts sur le fond est significativement différente entre 2006 (2.4 %) et 2007 (17.5 %). De même que pour la tache de couleur, les dégâts observés sur le fond ont un niveau de sévérité plus élevé en 2006 (indice 0.6) par rapport à 2007 (indice 2). Une différence significative de réponse physiologique au traitement HWT existe entre les mangues au soleil et les mangues à l'ombre. Ainsi en 2006, les mangues au soleil seraient moins sensibles au traitement mais le phénomène s'inverse en 2007. La **figure 40** représentant l'indice général des dégâts externes confirme la faible sensibilité de la mangue cv. Palmer au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min avec cependant une différenciation selon l'année ou l'exposition. En 2007, les dégâts externes ont été plus importants et plus particulièrement sur les mangues au soleil comme l'illustrent la **photo 14**.

b) Dégâts internes

La **figure 40** ne met en évidence aucune différence significative entre la réponse des mangues du cv. Palmer au niveau des dégâts internes d'une année sur l'autre. Par contre elle met en évidence un effet 'exposition' dans la réponse de la pulpe des mangues du cv. Palmer au traitement HWT. Les mangues au soleil ont moins de dégâts internes mais cela n'a été observé que seulement en 2006

c) Recherche de facteurs explicatifs (**tableau 24** et **annexe 12**)

Au niveau de la tache colorée

Les mangues récoltées en 2007 ont une surface de fond plus faible. Quelle que soit l'année, aucune différence de coloration de la tache, qui pourrait expliquer une différence de sensibilité, n'a été observée. L'intensité et la surface des dégâts de la tache varient ensemble et avec également avec l'intensité et la surface de dégâts sur le fond. Seule la surface de dégâts est reliée avec les dégâts internes. L'intensité et la surface des dégâts sur la tache colorée sont indépendantes de la couleur de la tache ou de la pulpe. Elles seront d'autant plus

importantes que le fond a une couleur rouge marquée et peu de jaune. Elles sont corrélées positivement avec le ESS et négativement avec le TA. Ainsi la surface et l'intensité des dégâts sur la tache colorée semblent dépendantes de la coloration du fond des mangues et des paramètres de maturité suggérant un accroissement de ces dégâts avec un stade de maturité avancé indépendamment du facteur exposition.

Au niveau du fond

La coloration du fond des mangues du cv. Palmer en 2007 pourrait indiquer qu'au moment de la récolte, le fruit était à un tournant rouge, signe de maturation. L'intensité et la surface de dégâts sur le fond sont dépendantes et varient dans le même sens. Elles sont corrélées avec l'indice de dégâts internes mais sont indépendantes de l'exposition. Par contre elles sont significativement plus élevées pour les mangues récoltées en 2007. L'intensité et la surface des dégâts sur le fond seront d'autant plus importantes que le fond a une valeur de a^* élevée et une valeur de b^* faible que le brix est élevé et que le TA est faible ce qui caractérise une mangue à un stade de maturité plus avancé. Seule l'intensité des dégâts sur le fond semble reliée avec la coloration de la pulpe, mais paradoxalement, les dégâts seront plus sévères si la pulpe est peu colorée de rouge.

Au niveau de la pulpe

Il n'y a pas de différence de coloration de la pulpe entre les deux années de récolte qui pourrait expliquer un comportement différent. Les dégâts internes dans la pulpe des mangues sont plus importants pour les mangues à l'ombre et si la pulpe est peu colorée.

Influence des paramètres de maturité

En 2007 les mangues ont un ESS plus élevé et un TA plus faible qui pourraient caractériser un stade de maturité plus avancé des mangues à la récolte comparativement à 2006.

Ces résultats nous permettent de considérer que le cv. Palmer, comme le cv. Keitt, a une réponse physiologique controversée au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min. A un stade de maturité plus avancé, l'intensité des dégâts sur la tache et la surface des dégâts sur la tache et sur le fond est plus importante. A l'inverse, l'intensité des dégâts sur le fond et les dégâts internes concernent davantage les mangues à l'ombre qui ont des pulpes peu colorées. Encore une fois les notions de seuils et d'équilibre dans l'évolution des différents paramètres physico-chimiques sont mises en évidence dans la réponse au traitement HWT.

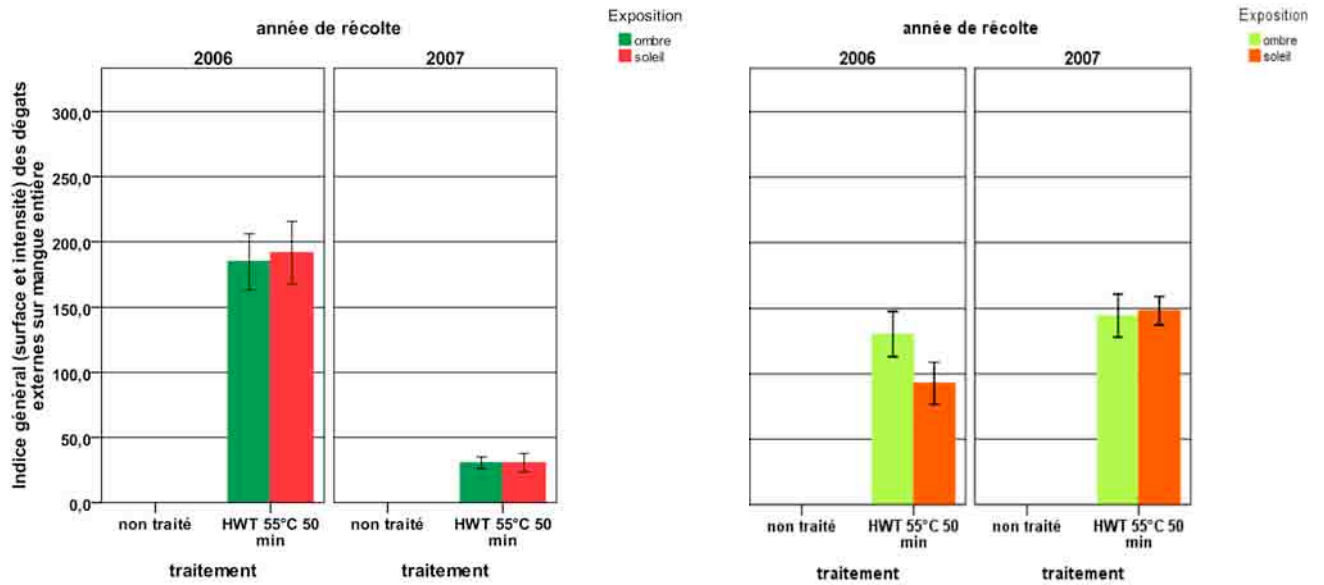


Figure 41. Dégâts physiologiques externes (gauche) et internes (droite) sur les mangues, du cv. Smith, traitées HWT 55.0 °C/ 50 min en fonction de l'exposition. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard à la moyenne ± 1 . N = 24

Tableau 25. Tableau synthétique des corrélations bilatérales de Spearman entre les paramètres de dégâts dus au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min, les paramètres biochimiques à la récolte, l'exposition et l'année de récolte pour le cv. Smith. Le tableau complet des corrélations est donné en **annexe 13**.

cv Palmer		année	dégâts tache		dégâts fond		dégâts internes	exposition
			surface	intensité	surface	intensité		
année			+++	++	+++	+++		++
tache	chromaticité a*							
	chromaticité b*							
fond	chromaticité a*	++++	+++	++	++	++		++
	chromaticité b*	----	---	--	--	---		--
pulpe	chromaticité a*				--	--	--	++++
	chromaticité b*				++	++	++	++++
TA		----	----	--	--	--		---
ESS		+++	++++	++	+++	+++	+	
exposition		++					--	

++++ très forte corrélation ($0.750 < r < 1.000$)
 +++ forte corrélation ($0.500 < r < 0.750$)
 ++ corrélation moyenne ($0.250 < r < 0.500$)
 + faible corrélation ($r < 0.250$)

le + et le - indiquent le sens de la corrélation

4.4.4 Le cultivar Smith

Compte tenu des résultats précédents (**chapitre 3** et **sous chapitre 4.2**), le cv Smith est un cultivar dont la tache colorée représente 27 à 30 % de la surface du fruit. Les chromaticités a* et b* sont faibles à moyennes sur la tache comme sur le fond. La coloration de la pulpe à la récolte est moyenne. Il n'y a pas de différence significative entre la couleur du fond des mangues exposées au soleil et celles à l'ombre. En ce qui concerne les caractéristiques de maturité, le cv. Smith présente à la récolte un niveau faible de ESS et élevé de TA. Si la teneur en ESS ne varie pas beaucoup entre les différentes expositions, le TA est nettement plus élevé (jusqu'à 5 ml supérieur) pour les mangues à l'ombre. Enfin dans le classement de sensibilité au traitement à la chaleur HWT 55.0 °C/ 50 min, le cv. Smith est relativement sensible en 2006 et peu sensible en 2007. S'il présente peu de surface et une faible intensité de dégâts sur la tache aussi bien en 2006 qu'en 2007, il est très sensible en surface et en intensité de dégâts sur le fond en 2006 et de façon relative en 2007. Par contre, dans la pulpe, ce cultivar manifeste une sensibilité moyenne mais plus marquée en 2007.

a) Dégâts externes

Les résultats du **sous-chapitre 4.2** montrent que le traitement HWT 55.0 °C/ 50 min provoque des dégâts physiologiques très négligeables sur la tache de couleur sans aucune différence significative de réponse entre les deux années. Par contre sur le fond, la surface de dégâts varie de 71.4 % (en 2006) et 14.5 % (en 2007). Les intensités de ces dégâts diffèrent également avec un indice moyen de 2.4 en 2006 et de 2.1 en 2007. Ces données permettent de mettre en évidence une différence significative entre les années. A l'inverse de la tache colorée, les dégâts sur le fond sont plus faibles en 2007 qu'en 2006. Aucune différence significative de réponse physiologique au traitement HWT n'existe entre les mangues au soleil et celles à l'ombre. La **figure 41** représentant l'indice général des dégâts externes confirme une différence de réponse au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min seulement entre 2006 et 2007 mais pas selon l'exposition.

b) Dégâts internes

La **figure 41** ne met en évidence aucune différence significative entre la réponse des mangues du cv. Smith au niveau des dégâts internes d'une année sur l'autre. Par contre elle montre un

effet 'exposition' pour les dégâts internes mais seulement en 2006 où les mangues au soleil sont moins affectées.

c) Recherche de facteurs explicatifs (**tableau 25** et **annexe 13**)

Au niveau de la tache colorée

En 2007, la surface de la tache colorée et les dégâts (surface et intensité) sur cette tache sont similaires à ceux de 2006 malgré une légère différence de coloration de la tache. En effet, en 2007, la tache est moins colorée. Ces différences de coloration n'affectent visiblement pas la réponse de la tache colorée de la mangue du cv. Smith au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min. La surface et l'intensité de dégâts sur la tache ne sont corrélées avec aucun des paramètres de maturité ou de coloration du fruit mais sont fortement corrélées entre elles.

Au niveau du fond

Une grande surface de fond caractérise les mangues qui sont à l'ombre avec un ESS faible et un TA élevé ainsi qu'une coloration verte foncée. Ces résultats suggèrent que les mangues à l'ombre pourraient être à un stade phénologique différent des mangues au soleil. L'intensité de dégâts et la surface de dégâts sur le fond sont corrélées négativement avec l'ESS et positivement avec le TA. Si l'intensité de dégâts sur le fond n'est associée à aucun paramètre de couleur du fruit, la surface de dégâts sur le fond sera d'autant plus importante que le fruit développe une chromaticité b^* élevée et une tache colorée de rouge mais aussi une pulpe peu colorée. Ces résultats par le TSS, le TA et la coloration de la pulpe suggèrent un stade de maturité peu avancé qui caractérisent les mangues de 2006.

Au niveau de la pulpe

La pulpe des mangues du cv. Smith est plus colorée en 2007 et suggèrent que les fruits pourraient être alors à un stade de maturité plus avancé. L'indice de dégâts internes est d'autant plus important que la chromaticité b^* de la tache est faible.

Influence des paramètres de maturité

En 2007 les mangues ont un ESS plus élevé et un TA plus faible ce qui suggère un stade de maturité plus avancé des mangues à la récolte comparativement à 2006. Ces mangues auront cependant une chromaticité b^* sur le fond plus faible et une coloration de tache moins marquée ainsi qu'une pulpe plus colorée.

De même que pour les cv. Reynal, cv. Keitt et cv Palmer, les mangues du cv. Smith ont été récoltées en 2007 avec un stade de maturité plus avancé comme le suggèrent les paramètres ESS et TA et la coloration de la pulpe. Cependant, la faible coloration de la peau des fruits de ces mangues confirme également que la pigmentation des fruits se développe seulement de façon relative avec la maturation et est probablement influencée par le facteur 'cultivar' et par les conditions environnementales. Ces résultats suggèrent que la surface de dégâts sur le fond et les dégâts internes sont plus importants à un stade de maturité peu avancé des mangues de la récolte de 2006, indépendamment de l'exposition. Les autres critères d'évaluation de dégâts sur la tache et sur le fond sont indépendants des paramètres de couleur ou de maturité de la mangue, de l'année de récolte ou de l'exposition.

4.4.5 Le cultivar Nam Doc Mai

Compte tenu des résultats précédents (**chapitre 3** et **sous chapitre 4.2**) le cv. Nam Doc Mai est un cultivar pour lequel aucune tache colorée n'a été observée en 2006. Seulement en 2007, une tache colorée recouvre 6.8 % de la surface du fruit au soleil. La chromaticité a^* est très faible et la chromaticité b^* élevée sur le fond. A la récolte, la pulpe des mangues n'est pratiquement pas colorée. Il n'y a pas de différence significative pour la couleur de fond et celle de la pulpe entre une mangue exposée au soleil ou à l'ombre, ni entre les années. En ce qui concerne les caractéristiques de maturité, le cv. Nam Doc Mai présente à la récolte un niveau faible de ESS et élevé de TA en 2006. Ce dernier sera cependant nettement plus faible en 2007. Enfin dans le classement de sensibilité au traitement à la chaleur HWT 55.0 °C/ 50 min, le cv. Nam Doc Mai est très peu sensible en 2007 (pas de tache en 2006) et présente peu de surface et d'intensité de dégâts sur la tache colorée. Par contre sur le fond, la surface et l'intensité des dégâts sont sévères en 2006 alors qu'en 2007, la surface de dégâts sur le fond est peu importante (inférieure à 10 %) et l'intensité de dégâts est moyenne. Ainsi en reprenant l'indice général de dégâts externes et les dégâts internes, il se classe dans les cultivars sensibles en 2006 et peu sensibles en 2007 au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min. Au niveau des dégâts internes, il est, et plus particulièrement en 2006, relativement sensible au traitement.

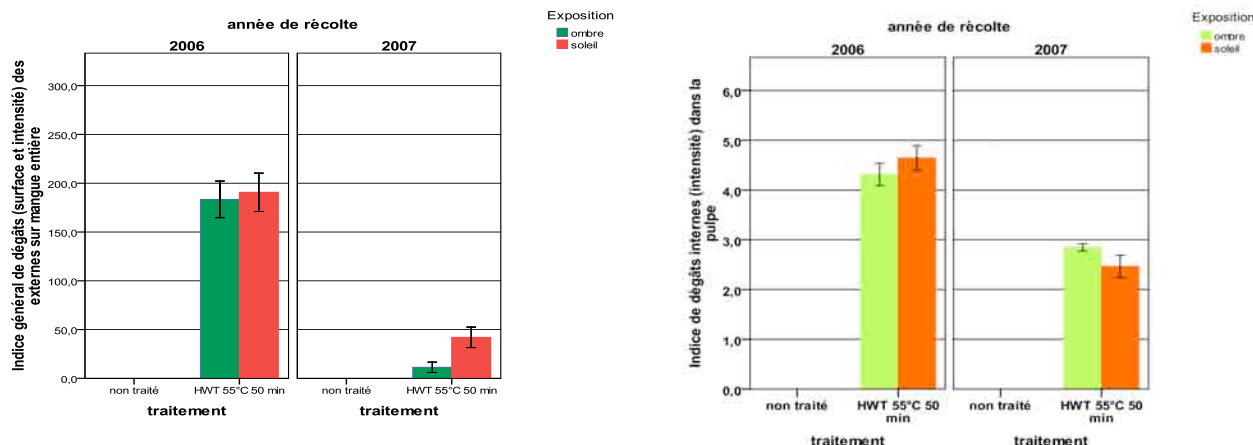


Figure 42. Dégâts physiologiques externes (gauche) et internes (droites) sur mangues, traitées HWT 55.0 °C/ 50 min, du cv. Nam Doc Mai, en fonction de l'exposition en 2007. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard à la moyenne ± 1 . N = 24

Tableau 26. Tableau synthétique des corrélations bilatérales de Spearman entre les paramètres de dégâts dus au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min, les paramètres biochimiques à la récolte, l'exposition et l'année de récolte pour le cv. Nam Doc Mai. Le tableau complet des corrélations est donné en **annexe 14**.

cv Nam Doc Mai		année	dégâts tache		dégâts fond		dégâts internes	exposition
année	tache		surface	intensité	surface	intensité		
année					---	--	---	
tache	chromaticité a*							
	chromaticité b*							
fond	chromaticité a*	++++			---	--	---	
	chromaticité b*	----			++++	++	+++	+
pulpe	chromaticité a*	++++			---	--	---	--
	chromaticité b*	++++			---	--	---	--
TA		----			+++	++	+++	
ESS		++++			---	--	---	
exposition								

++++ très forte corrélation ($0.750 < r < 1.000$)
 +++ forte corrélation ($0.500 < r < 0.750$)
 ++ corrélation moyenne ($0.250 < r < 0.500$)
 + faible corrélation ($r < 0.250$)

le + et le - indiquent le sens de la corrélation

a) Dégâts externes

Les résultats du **sous-chapitre 4.2** montrent qu'en 2007, le traitement HWT 55.0 °C/ 50 min provoque des dégâts physiologiques sur la tache de couleur mesurés en surface (9.3 %) et en intensité. L'incidence de ces dégâts sur l'indice général est faible du fait de la proportion (6.8 %) de la tache colorée sur la surface du fruit. Ainsi les dégâts en surface et en intensité sur la tache colorée sont très négligeables. Une grande différence de réponse physiologique du fond des mangues du cv. Nam doc Mai existe entre 2006 et 2007. En 2006, c'est 69.5 % de la surface totale du fond qui est affectée par les dégâts physiologiques dus au traitement HWT contre seulement 9.9 % en 2007. De même, pour l'intensité des dégâts, elle est plus sévère en 2006 (2.5) qu'en 2007 (1.6). Ainsi, les données permettent de mettre en évidence une différence significative entre les années pour la surface et l'intensité des dégâts sur le fond. Par contre aucune différence significative de réponse physiologique au traitement HWT n'existe entre les mangues au soleil et les mangues à l'ombre excepté pour la surface des dégâts sur le fond en 2007 où les mangues au soleil ont une surface de dégâts plus importante sur le fond que les mangues à l'ombre (**figure 42**).

b) Dégâts internes

La **figure 42** ne met en évidence aucune différence significative entre la réponse des mangues du cv. Nam Doc Mai au niveau des dégâts internes par rapport à l'exposition. Seule une différence de réponse existe entre 2006 et 2007.

c) Recherche de facteurs explicatifs (**tableau 26** et **annexe 14**)

Au niveau de la tache colorée

Seules les mangues du cv. Nam Doc Mai exposées au soleil en 2007 ont une tache colorée. L'intensité et la surface de dégâts sur cette tache, si elles sont corrélées entre elles, ne sont associées à aucun paramètre de maturité ou de couleur du fruit. Par contre, les mangues de 2007 se distinguent par un ESS élevé et un TA faible, des chromaticités a* élevée et b* faible du fond et une forte coloration de pulpe. Mais ces différences n'interviennent pas dans la réponse physiologique de la tache colorée au traitement HWT.

Au niveau du fond

L'intensité et la surface de dégâts sur le fond sont plus importantes sur les mangues de 2006. Elles le seront d'autant plus que le ESS est faible, que le TA est élevé et si la pulpe est faiblement colorée. Ces paramètres sont également très corrélés avec l'indice de dégâts

internes. Ainsi les dégâts du fond et d'une façon générale, l'indice général des dégâts externes, sont plus importants et plus sévères sur les mangues qui présentent les caractéristiques d'un stade de maturité peu avancé. L'exposition n'influe pas sur la réponse des mangues du cv. Nam Doc Mai au traitement à la chaleur HWT 55.0 °C/ 50 min malgré les différences de TA et ESS entre les expositions.

Au niveau de la pulpe

Les mangues récoltées en 2007 ont une pulpe plus colorée. Les dégâts internes interviennent préférentiellement sur des mangues dont les caractéristiques de couleur sont celles de mangues peu mures : une pulpe peu colorée, un ESS faible et un TA élevé. Aucune différence significative de dégâts internes n'a pu être mise en évidence entre les expositions malgré une différence de paramètres de maturité. Les chromaticités similaires des mangues à l'ombre ou au soleil pourraient expliquer ce phénomène.

Influence des paramètres de maturité

Les mangues de 2007 ont un ESS plus élevé et un TA plus faible. Le ESS est corrélé positivement avec la chromaticité a* du fond mais négativement avec la chromaticité b*. Ainsi les mangues 2007 pourraient être à un stade de maturité plus avancé que les mangues 2006. Ce stade de maturité se traduit par une coloration relativement plus foncée du fond (plus de rouge et moins de jaune) et de la pulpe.

Ces résultats nous permettent de considérer que le cv. Nam Doc Mai a une réponse physiologique au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min qui est variable selon le tissu. Pour la tache colorée, les dégâts sont négligeables et aucun paramètre de maturité ou de couleur n'y est associé. En ce qui concerne le fond, les dégâts seront d'autant plus importants que les mangues sont à un stade de maturité peu avancé. Mais cette différence de maturité et plus particulièrement la teneur en TA, entre une mangue au soleil ou à l'ombre ne permet pas de mettre en avant une réponse différente au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min sauf pour les dégâts internes dans la pulpe des mangues.

4.4.6 Synthèse des résultats

Les résultats des études de cas (synthétisés dans le **tableau 27**) confirment la complexité des facteurs et de leurs interactions pouvant influencer la réponse physiologique des mangues au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min. Ils replacent ainsi toute l'importance du facteur 'cultivar' et du 'stade de maturité' bien que, sur ce dernier point, des seuils précis n'ont pas pu être mis clairement en évidence. A partir des paramètres mesurés, on peut définir trois schémas de développement de dégâts sur les mangues soumises au traitement par la chaleur :

Modalité 1 : un stade de maturité peu avancé peut favoriser les dégâts physiologiques externes et internes dus au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min.

D'une façon générale, un stade de maturité peu avancé va accroître les dégâts sur le fond et les dégâts internes dus au traitement. Ce phénomène a été vérifié pour plusieurs cultivars : le cv. Nam Doc Mai et le cv. Smith sans préjuger de l'exposition. Les dégâts sur la tache colorée de ces cultivars n'ont pas pu être reliés à des paramètres de maturité ou de couleur. Ces cultivars ont une tache faiblement prononcée (en surface et en coloration) et une couleur de fond verte à maturité.

Modalité 2 : un stade de maturité avancé peut favoriser les dégâts physiologiques externes mais pas les dégâts internes dus au traitement HWT 55 °C/ 50 min,

Seul le cv. Palmer a des dégâts externes sur la tache et le fond des mangues qui sont plus importants pour les fruits à un stade de maturité avancé, mais avec des réponses variables selon l'ensoleillement. Par contre les dégâts internes sont favorisés par une faible coloration de pulpe suggérant un stade de maturité peu avancé. Ce cultivar est caractérisé par une tache très rouge sur les mangues au soleil et un fond qui va virer du vert au mauve à maturité.

Modalité 3 : un stade de maturité avancé peut favoriser les dégâts physiologiques sur la tache colorée ou les dégâts internes dus au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min mais les dégâts externes du fond seront à l'inverse favorisés par un stade de maturité peu avancé.

Le cv. Reynal appartient cette catégorie bien que sa surface de dégâts sur la tache colorée et les dégâts internes ne soient pas reliés à des paramètres de maturité ou de couleur. Seule l'intensité des dégâts sur la tache colorée est favorisée par un stade de

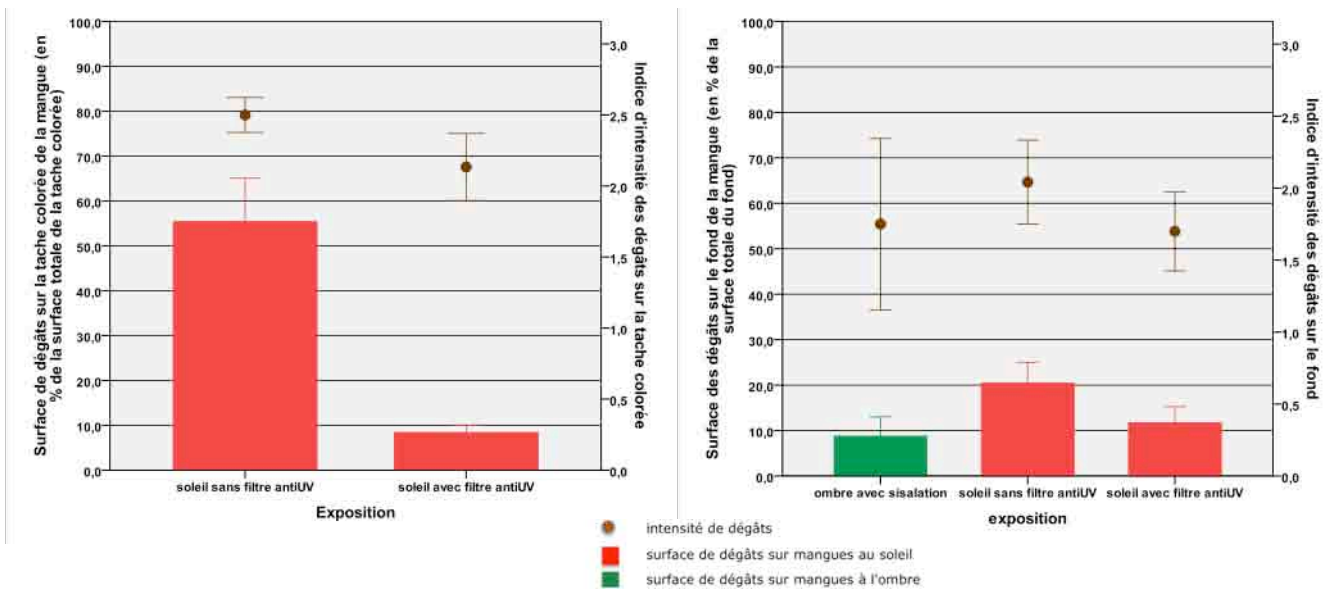


Figure 43. Surface et intensité de dégâts sur la tache colorée des mangues au soleil (gauche) et sur le fond des mangues (droite), traitées HWT 55.0 °C/ 50 min, du cv. Palmer en 2007, en fonction de leur exposition et de la présence d'un filtre anti UV au champ. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard à la moyenne ± 1 . N = 15

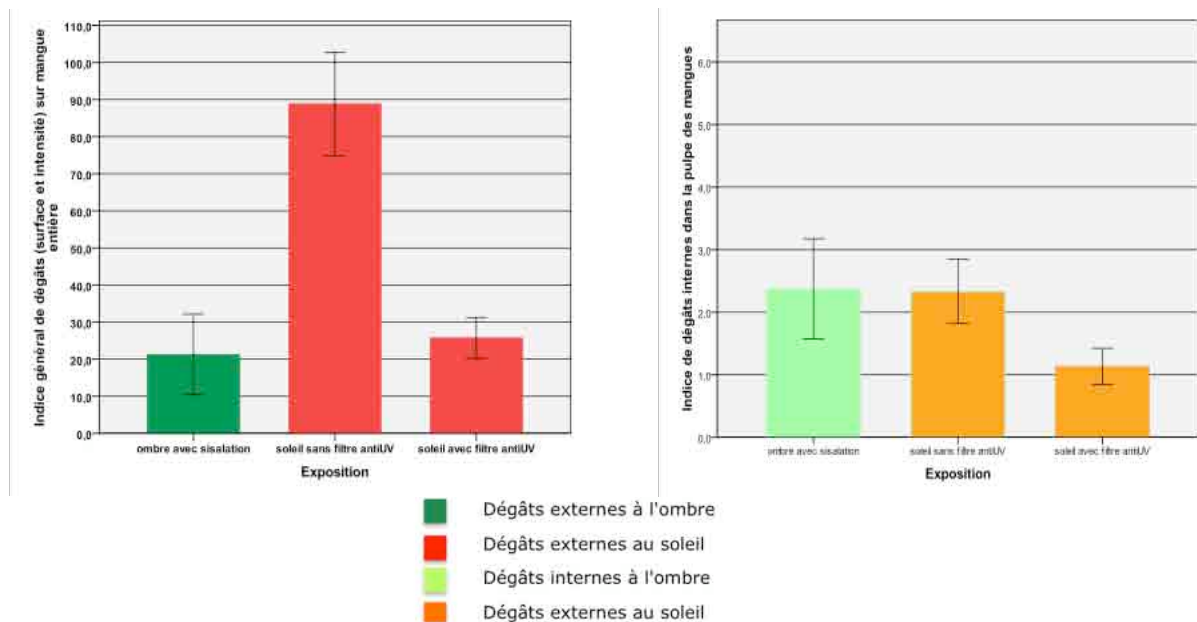


Figure 44. Indices généraux de dégâts externes (gauche) et internes (droite) des mangues, traitées HWT 55.0 °C/ 50 min, du cv. Palmer, en fonction de leur exposition et de la présence d'un filtre anti UV au champ. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard à la moyenne ± 1 . N = 15

maturité avancé. Ce cultivar est caractérisé comme le cv. Palmer par une large tache de couleur rouge qui peut recouvrir à maturité plus de la moitié du fruit. Le cv. Keitt a été placé également dans cette catégorie, bien que les dégâts sur sa tache colorée ne soient pas liés à des paramètres de maturité. Ce cultivar est caractérisé par une tache très colorée jaune/orangé et un fond vert.

Le facteur 'exposition' ne s'est jamais révélé prédominant mais a pu contribuer aux changements physiologiques intervenant dans l'évolution de la maturité. Cependant certains dégâts ne s'expliquent pas par les paramètres mesurés et il est évident que d'autres facteurs interviennent dans cette réponse physiologique au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min. Ainsi chacun des cultivars répond de façon spécifique aux conditions environnementales et au traitement HWT en fonction de sa propre physiologie et des changements biochimiques qui interviennent à ce stade vert mature.

4.5 Influence du filtre anti UV

Des filtres anti UV ont été placés sur des mangues du cv. Palmer exposées au soleil afin de dissocier les effets des UV de ceux de l'ensemble des radiations. La **figure 43** illustre que la présence d'un filtre anti UV sur les mangues au soleil du cv. Palmer permet de réduire de façon significative de 85 % les dégâts sur la tache colorée (8.4 % de la surface est affectée contre 55.4 % pour la mangue sans le filtre). L'intensité des dégâts sur la tache colorée n'est réduite par contre que de 12 % (2.1 au lieu de 2.5). L'influence du filtre UV induit également une réduction de 45 % de la surface et de 15 % de l'intensité des dégâts sur le fond qui sont ramenées au niveau de ceux du fond des mangues à l'ombre (environ 10 % et 1.7).

Ainsi en considérant l'indice général des dégâts externes de la **figure 44**, les mangues du cv. Palmer, soumises à l'ensoleillement avec élimination de 99 % des UV A et B, montrent une réduction de la surface lésée de 70 % et d'intensité de dégâts de 15 % comparativement aux mangues exposées au soleil qui reçoivent l'ensemble des radiations du soleil. Cette réduction de dégâts s'applique également (**figure 44**) à l'indice de dégâts internes (environ 50 %) permettant de les distinguer des mangues à l'ombre.

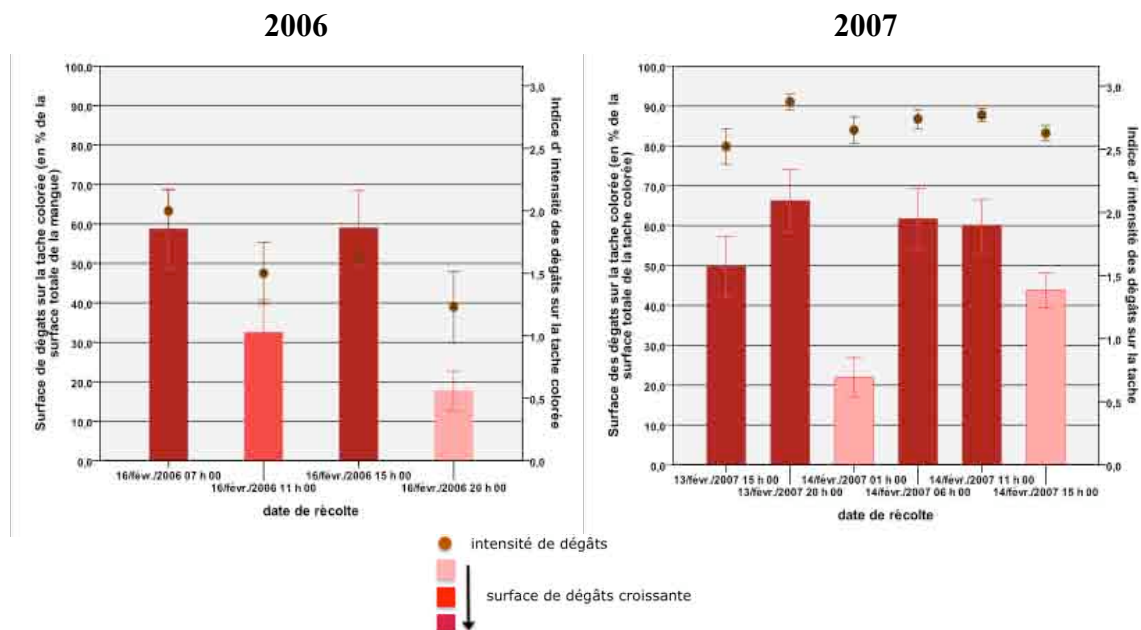


Figure 45. Surface et intensité de dégâts sur la tache colorée sur mangues, récoltées à différentes heures sur 24 h et traitées HWT 55.0 °C/ 50 min, du cv. Reynal, en 2006 et 2007. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard à la moyenne ± 1 . N = 24

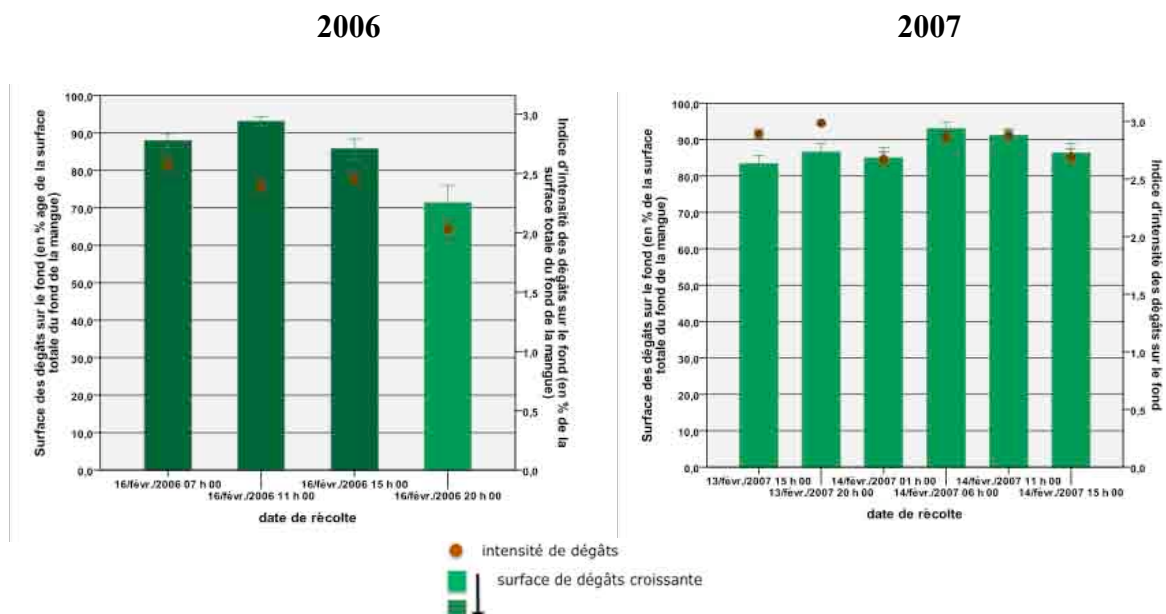


Figure 46. Surface et intensité de dégâts sur le fond sur mangues, récoltées à différentes heures sur 24 h et traitées HWT 55.0 °C/ 50 min, du cv. Reynal en 2006 et 2007. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard à la moyenne ± 1 . N = 24

Ces résultats suggèrent que les radiations UV peuvent endommager les cellules des mangues du cv. Palmer et particulièrement les tissus rouges ou ceux directement soumis aux radiations du soleil. Cependant le dispositif expérimental du filtre anti UV, comme décrit dans le **sous-chapitre 2.1.3**, ne permet pas de confirmer totalement cette observation. En effet, une augmentation de la température interne du fruit sous le filtre (ventilation insuffisante) pourrait aussi avoir contribué à la mise en place de mécanismes de protection.

Bien évidemment, ces observations ne peuvent être généralisées à l'ensemble des autres cultivars, surtout chez ceux qui ne présentent pas la même coloration, mais ces résultats ouvrent des perspectives sur les mécanismes de réponse au stress chez la mangue.

4.6 Effet de l'heure de récolte et de l'ensoleillement sur la réponse physiologique des mangues du cv. Reynal au traitement HWT 55 °C/ 50 min

Compte tenu des résultats du **chapitre 3** et du **sous-chapitre 4.6**, les paramètres de couleur et de maturité des fruits pourraient avoir une influence sans que nous ayons été en mesure de préciser leur importance. Certes, il est fort peu probable que ces facteurs varient de façon significative au cours de la journée et de la nuit, mais à l'inverse, comme nous l'avons vu dans le **chapitre 2**, l'ensoleillement (rayonnement et durée d'insolation) et les températures de l'air et du fruit présentent une variation diurne. La réponse physiologique au traitement HWT des mangues récoltées à différentes heures sur périodes de 12 à 24 h permettra de comprendre si ces paramètres abiotiques influent.

4.6.1 Effet de l'heure de récolte indépendamment de l'exposition

La **figure 45** montre qu'en 2006, c'est à la récolte de 20 h que les mangues traitées HWT 55.0 °C/ 50 min ont la surface de dégâts sur la tache la plus faible (17.7 %). Cette dernière se distingue significativement des résultats de la récolte de 7 h et de 15 h pour lesquelles les mangues présentent les surface les plus importantes de dégâts sur la tache (respectivement, 58.7 et 58.9 %). Les mangues de la récolte de 11 h avec une surface de 32.5 % de dégâts sur

la tache ne se différencie pas des deux groupes précédemment cités. Ainsi la récolte de 20 h a permis une réduction de la surface de dégâts de près de 72 %. Par contre il n'y a aucune différence significative pour l'indice d'intensité de dégâts sur la tache colorée entre les différentes heures de récolte.

Sur le fond (**figure 46**), c'est également à 20 h que la surface (57.3 %) et l'intensité (1.9) des dégâts vont être significativement moins élevées comparativement aux mangues récoltées à 7, 11 et 15 h qui répondent sensiblement de façon similaire au traitement à la chaleur (en moyenne 86.7 % de surface et 2.4 d'intensité de dégâts). Ainsi la récolte de 20 h a permis une réduction de la surface de dégâts sur le fond de près de 34 % et de 0.5 sur l'intensité de dégâts.

Au final, l'indice général des dégâts externes sur le cv. Reynal permet de confirmer que seule la récolte de 20 h réduit significativement les dégâts sur l'ensemble de la mangue (**figure 47**). La réponse physiologique au traitement HWT des mangues du cv. Reynal récoltées à 11 h (la faible surface de dégâts sur la tache colorée) n'apparaît plus du fait d'une surface élevée de dégâts sur le fond. Cette réponse suggère une réaction très localisée de la tache colorée aux heures les plus chaudes de la journée. Enfin, l'heure de récolte n'a aucune influence sur les dégâts internes de la mangue du cv Reynal.

En 2007, la surface de la tache colorée est en moyenne de 37.3 %. Faisant suite au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min, seule la surface des dégâts sur la tache du 14 février à 1 h (21.9 %) est significativement différente de celle sur la tache de la récolte du 13 février à 20 h (66.2 %). Aux autres dates et heures de récolte, la surface des dégâts sur la tache colorée varie entre ces extrêmes sans distinction notable (**figure 45**).

Ces résultats diffèrent cependant quelque peu de ceux obtenus en 2006. En effet en 2007, ce sont les mangues récoltées le 14 février à 1 h qui ont la surface de dégâts sur la tache la plus faible (21.9 %) et les mangues des récoltes du 13 février 15 h (49.8 %), 20 h (66.2 %) et du 14 février 6 h (61.7 %), 11 h (60 %) qui ont les surfaces de dégâts sur la tache les plus élevées sans distinction significative entre elles. La surface des dégâts sur la tache de la récolte du 14 février 15 h (43.8 %) se situe entre ces deux grands groupes. Ainsi les récoltes du 14 février à 1 h et 15 h ont permis une réduction moyenne de la surface de dégâts sur la tache colorée de respectivement de 65 % et de 30 %. De même que pour 2006, il n'y a aucune différence

2006

2007

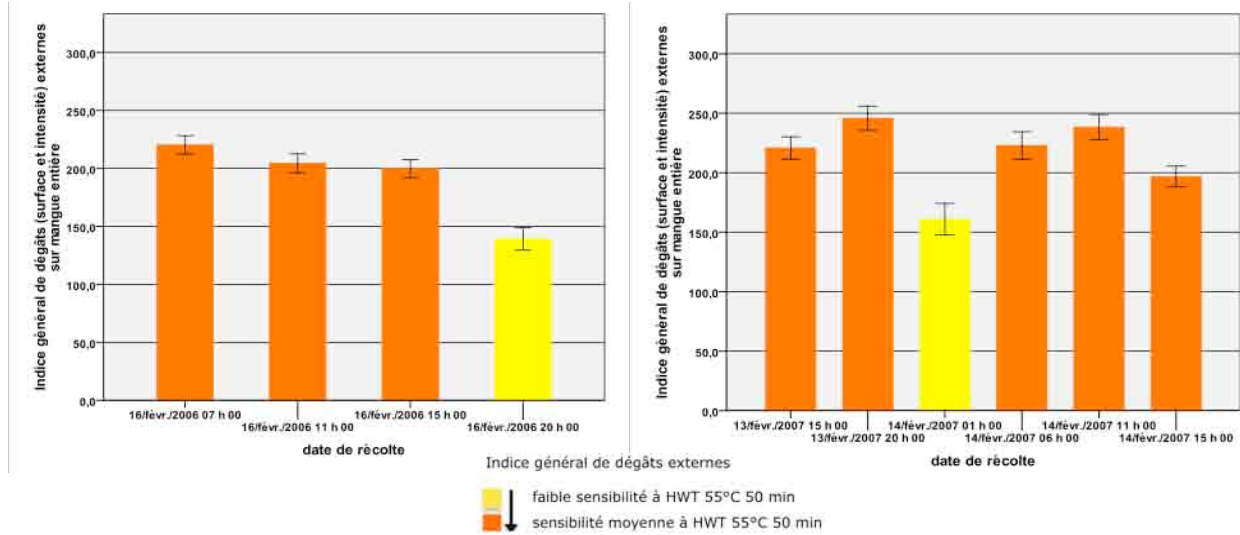


Figure 47. Indice général de dégâts externes sur mangues, récoltées à différentes heures sur 24 h et traitées HWT 55.0 °C/ 50 min et, du cv. Reynal et en 2006 et 2007. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard à la moyenne ± 1 . N = 24

significative pour l'indice d'intensité de dégâts sur la tache colorée entre les différentes heures de récolte.

Par contre le moment de la récolte ne semble pas influencer sur la surface de dégâts sur le fond qui représente en moyenne de 87.3 % de la surface totale du fond (**figure 46**). Les mangues récoltées le 14 février à 1 h et 15 h montrent une intensité de dégâts sur le fond significativement plus faible (2.7) que celle des mangues récoltées le 13 février (3.0). Les mangues récoltées aux autres dates et heures de récolte ont un indice de dégâts sur le fond de 2.9. La réduction de l'intensité de dégâts sur le fond, liée aux heures de récolte, reste ainsi négligeable.

Ainsi en reprenant l'indice général de dégâts externes, seules les mangues récoltées à 1 h du matin expriment une thermotolérance (**figure 47**). De même que pour 2006, la récolte de 15 h du 14 février ne permet pas d'apprécier une meilleure réponse physiologique globale des mangues du cv. Reynal au traitement HWT. En effet, l'importante surface de dégâts sur le fond masque les effets de la thermotolérance acquise de façon localisée sur la tache colorée. Au niveau des dégâts internes il n'y a pas de différence significative de réponse physiologique selon l'heure de récolte.

L'ensemble de ces résultats démontre qu'il y a une thermotolérance acquise pour les mangues du cv. Reynal récoltées la nuit à 20 h (en 2006) ou 1 h (en 2007) alors que la température interne des fruits est en diminution. Cette thermotolérance se traduit surtout par la réduction significative de la surface des dégâts sur la tache colorée en moyenne de 55 % et sur le fond, seulement en 2006, jusqu'à 30 %. Cette réduction se fait indépendamment de l'intensité des dégâts sur la tache et sur le fond ou encore de l'indice de dégâts internes qui varient peu ou pas selon l'heure de récolte. Une thermotolérance relative, essentiellement à travers une réduction de la surface de dégâts de la tache colorée est également observée à 11 h (2006) et à 15 h (2007) soit aux heures les plus chaudes de la journée.

4.6.2 Effet de l'ensoleillement

Les mangues exposées au soleil, pour toutes les heures de récolte (2006) et pour 15 h, 20 h, 1 h et 11 h (2007), sont significativement plus thermotolérantes si on considère l'indice général

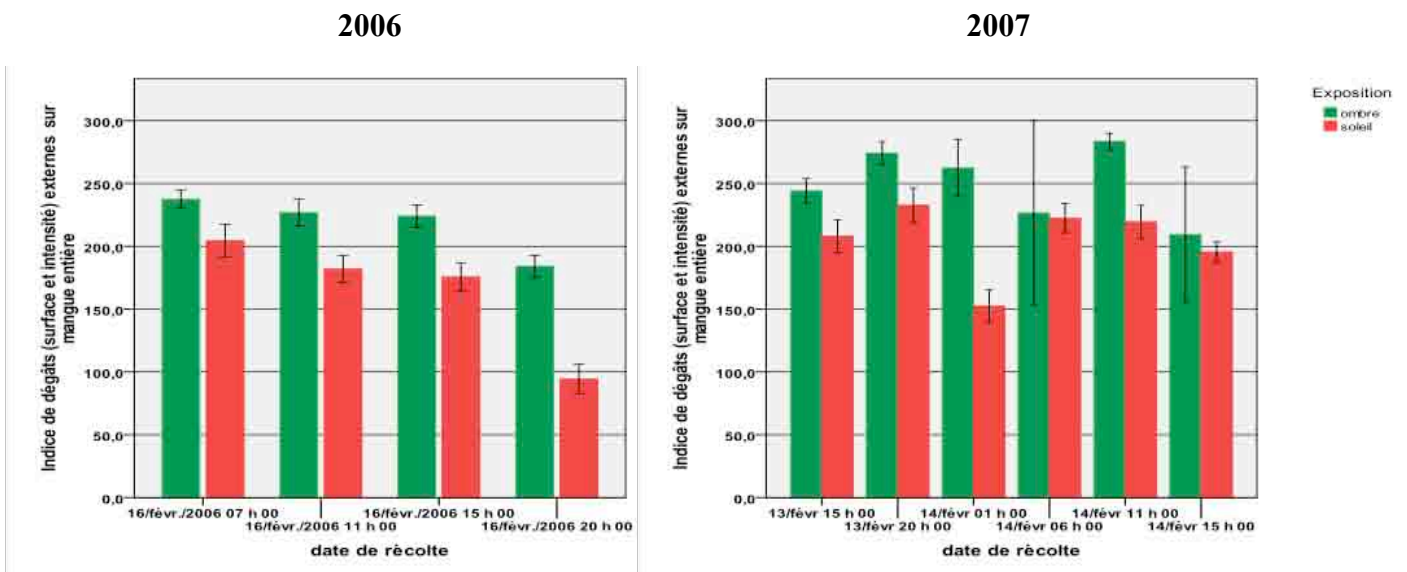


Figure 48. Influence de l'exposition sur l'indice général de dégâts externes sur mangues, récoltées à différentes heures sur 24 h et traitées HWT 55.0 °C/ 50 min, du cv. Reynal en 2006 et 2007. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard à la moyenne ± 1 . N = 24

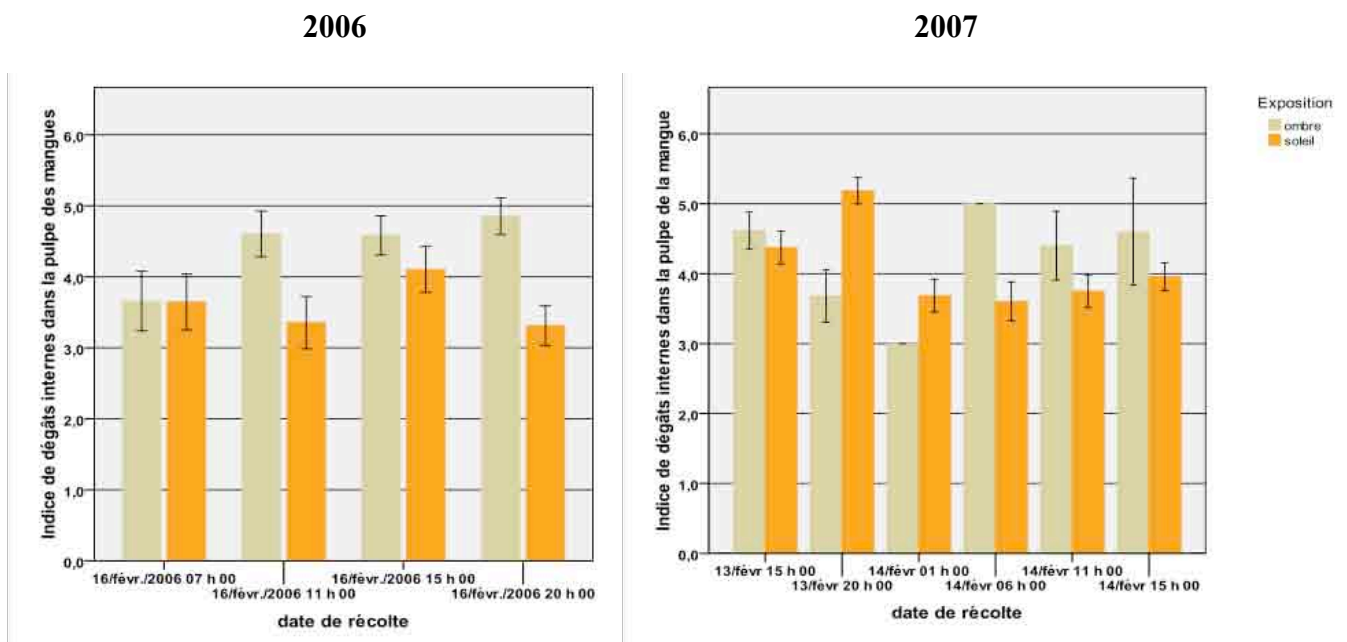


Figure 49. Influence de l'exposition sur l'indice de dégâts internes sur mangues, récoltées à différentes heures sur 24 h et traitées HWT 55.0 °C/ 50 min, du cv. Reynal, en 2006 et 2007. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard à la moyenne ± 1 . N = 24

de dégâts externes (**figure 48**). Cette observation est plus flagrante, en 2006, dans l'après midi à 15 h (avec une réduction de la surface de dégâts sur les mangues exposées de 21,6 %) et le soir à 20 h (avec une réduction de la surface de dégâts sur les mangues exposées de 48,6 % et d'intensité de 0.3 unités). En 2007, les réductions de surface et d'intensité sont plus faibles. Cependant elles apparaissent plus flagrantes sensiblement aux mêmes heures 20 h (réduction de la surface de dégâts de 15 %) et 1 h (réduction de la surface de dégâts de 42 %) qu'en 2006. De même que pour les dégâts internes (**figure 49**), une thermotolérance des mangues au soleil s'exprime à 11 h et 20 h en 2006 (réduction d'1.2 à 1.5 d'unités de l'indice) et à 6 h en 2007 (réduction de 1.4 unités de l'indice). A 20 h et 1 h en 2007 ce sont les mangues à l'ombre qui expriment cette thermotolérance.

L'heure de la récolte et l'exposition des mangues du cv. Reynal influent donc sur la réponse physiologique des fruits aux traitements HWT 55.0 °C/ 50 min. Les résultats suggèrent qu'aux heures les plus chaudes de la journée, une thermotolérance est observée de façon très localisée sur la tache colorée des mangues exposées au soleil. Les paramètres de maturité et de couleur ne varient pas de façon significative au cours de 24 h, c'est l'ensoleillement (température, rayonnement, durée d'insolation) qui pourrait induire cette thermotolérance. Cette dernière serait ponctuelle aux heures plus chaudes de la journée mais elle pourrait s'exprimer et perdurer pendant les heures plus fraîches de la nuit et ainsi influencer la réponse physiologique du fond des mangues du cv. Reynal au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min selon l'heure de récolte.

4.7 Influence du délai et de la conservation entre la récolte et le traitement HWT sur la réponse physiologique des mangues du cv. Keitt.

En 2006, les mangues cv. Keitt ont été conservées à 5, 12 et 20 °C pendant différentes durées. Le lot contrôle est laissé pendant 2 à 3 h à température ambiante au plus après la récolte. En 2007, seule la température de 12 °C a été retenue car, selon l'étude bibliographique, elle permet de ralentir le processus physiologique de mûrissement en limitant les dégâts dus au froid. Le fait de s'affranchir du froid (5 °C) et du mûrissement (20 °C) doit permettre de mieux comprendre les phénomènes de thermotolérance qui pourraient être uniquement dus à l'exposition des fruits.

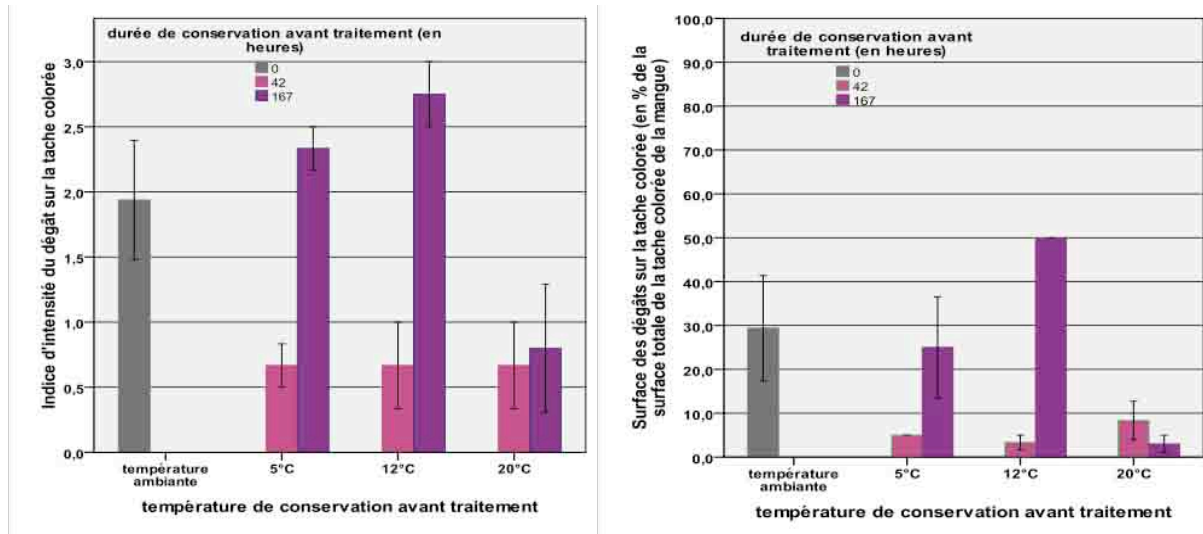


Figure 50. Influence d'un délai de 42 à 167 h en conservation à 5, 12 et 20 °C entre la récolte et le traitement HWT 55.0 °C/ 50 min sur la réponse physiologique des mangues du cv. Keitt 2006 : intensité (gauche) et surface (droite) des dégâts sur la tache colorée. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard à la moyenne ± 1 , N = 24

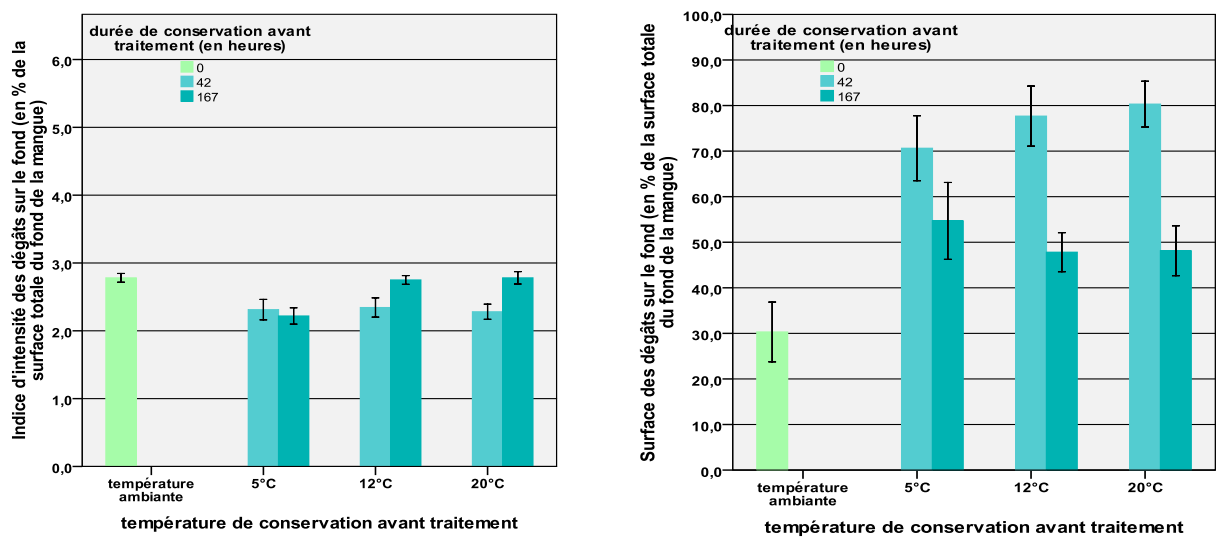


Figure 51. Influence d'un délai de 42 à 167 h en conservation à 5, 12 et 20 °C entre la récolte et le traitement HWT 55.0 °C/ 50 min sur la réponse physiologique des mangues du cv. Keitt 2006 : intensité (gauche) et surface (droite) des dégâts sur le fond. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard à la moyenne ± 1 , N = 24

4.7.1 Influence des délais de 42 à 167 h à 5, 12 et 20 °C entre la récolte et le traitement HWT sur la réponse physiologique des mangues du cv. Keitt

Quelle soit la température, la conservation pendant 42 h permet une réduction d'intensité de 1.2 unités et de la surface de dégâts sur la tache colorée des mangues au soleil de plus de 2/3 par rapport au contrôle, traité 2 ou 3 h à température ambiante après la récolte (**figure 50**). Par contre si la conservation à ces températures est maintenue pendant 167 h, soit quasiment 7 jours, l'intensité et la surface des dégâts sur la tache colorée sont supérieures ou similaires à celles du témoin pour 5 °C (2.3 et 25 %) et 12 °C (2.7 et 50 %) mais la réduction reste effective pour les mangues conservées à 20 °C à la fois en intensité et en surface.

Cependant le délai entre la récolte et le traitement et la conservation des mangues du cv. Keitt pendant 42 à 167 h à 5, 12 et 20 °C n'implique pas une réponse physiologique du fond aussi flagrante (**figure 51**). En effet, pour une durée de 42 h à 5, 12 et 20°C, une légère réduction de l'intensité (0.5 unités) mais aussi une augmentation de la surface de dégâts (plus de 50%) sont observées par rapport au témoin. A 167 h, l'intensité des dégâts s'aggrave de façon significative surtout à 12 et 20 °C et la surface de dégâts sur le fond diminue mais reste supérieure d'environ 20 % de surface du fond par rapport à celle du témoin. Ainsi les délais de 42 et 167 h à 5, 12 et 20°C n'induisent pas de façon significative de thermotolérance du fond des mangues face au traitement HWT 55.0°C/ 50 min. Cependant, aucune différence n'est constatée entre les mangues placées sous différentes expositions.

En considérant l'indice général des dégâts externes, les délais de 42 et 167 h entre la récolte et le traitement ainsi que la conservation pendant cette période des mangues du cv. Keitt avant le traitement à 5, 12 et 20 °C ne permettent pas de conserver une thermotolérance éventuellement acquise au champ. Par ailleurs, ni les pré traitements, ni l'exposition ne jouent n'influent sur les niveaux de dégâts internes (**figure 52**).

Ces résultats suggèrent qu'une thermotolérance, mesurée en surface et en intensité de dégâts, existe sur la tache colorée de la mangue au soleil du cv. Keitt quand elle est récoltée et maintenue en conservation pendant 42 h à 5, 12 et 20 °C. Si la mangue est maintenue 167 h à ces mêmes températures, cette thermotolérance diminue de façon significative à 5 et 12 °C mais persiste à 20 °C. Aucune thermotolérance n'est constatée ni sur le fond ni dans la pulpe

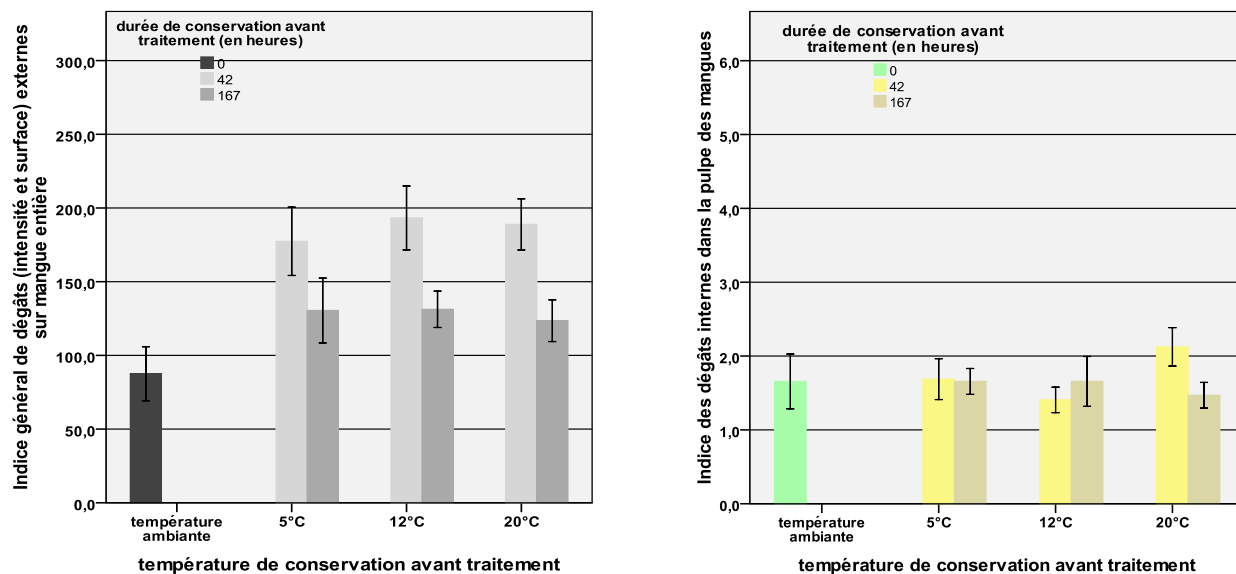


Figure 52. Influence d'un délai de 42 à 167 h en conservation à 5, 12 et 20 °C entre la récolte et le traitement HWT 55.0 °C/ 50 min sur la réponse physiologique des mangues du cv. Keitt en 2006 : indices généraux de dégâts externes (gauche) et internes (droite). Les barres d'erreur représentent l'erreur standard à la moyenne ± 1 . N = 24

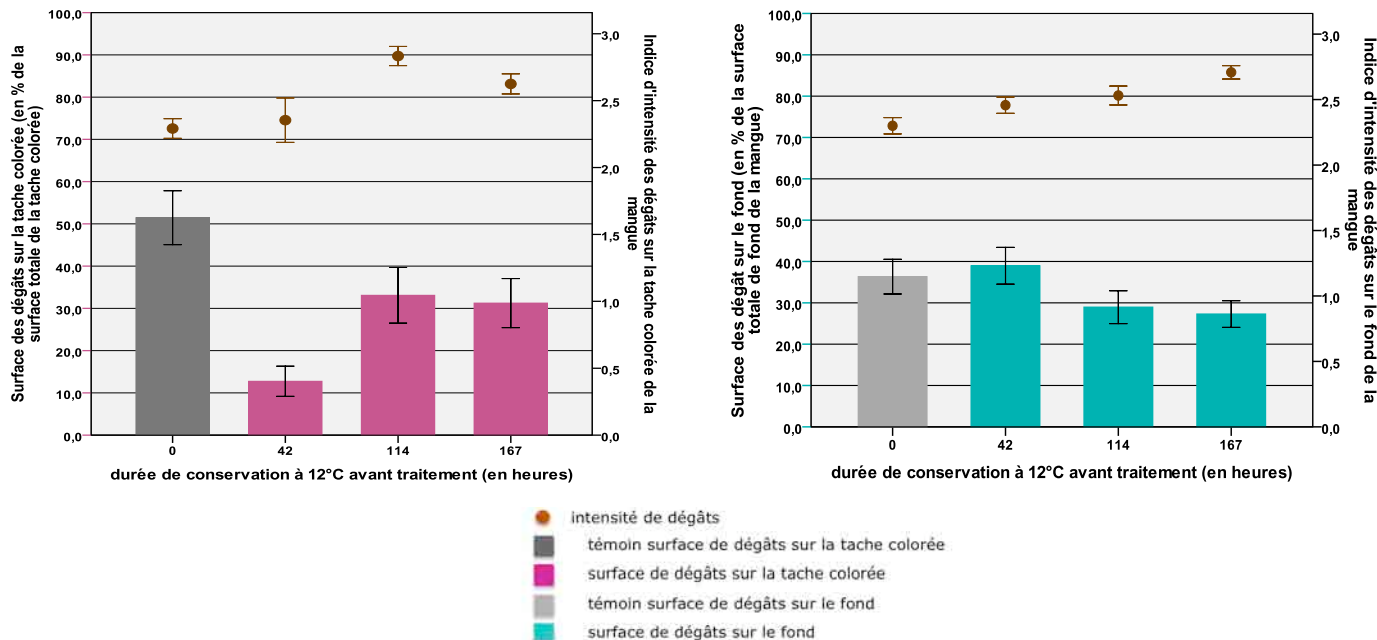


Figure 53. Influence d'un délai de 42, 114 et 167 h en conservation à 12 °C entre la récolte et le traitement HWT 55.0 °C/ 50 min sur la réponse physiologique des mangues du cv. Keitt en 2007 : dégâts (surface et intensité) sur la tache colorée et sur le fond. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard à la moyenne ± 1 . N = 24

avec ces prétraitements mais un phénomène physiologique semble limiter les dégâts sur le fond à 167 h à 20 °C. En considérant tous ces paramètres à travers l'indice général de dégâts externes et l'indice de dégâts internes, les délais de 42 et 167 h à 5, 12 et 20 °C ne permettent pas de maintenir une thermotolérance éventuellement acquise au champ significative pour les mangues du cv. Keitt face au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min.

4.7.2 Influence des délais de 42, 114 et 167 h à 12°C entre la récolte et le traitement HWT sur la réponse physiologique des mangues du cv. Keitt.

Une température de conservation de la mangue comprise entre 10 et 13 °C permet de ralentir tous les processus métaboliques et physiologiques et d'augmenter la durée de vie du produit sans incidence de dégâts physiologiques dus au froid. Seule une conservation de 42 h entre la récolte et le traitement HWT 55.0 °C/ 50 min permet de réduire de façon significative la surface de dégâts sur la tache colorée comparativement au contrôle traité 2 ou 3 h à température ambiante après la récolte : 12.7 % contre 51.4% de surface de dégâts sur la tache, soit une réduction de dégâts sur la tache de 75 % (**figure 53**). Les durées de conservation de 114 et 167 h ne se différencient pas de façon significative par rapport au témoin. Par contre la durée de conservation de 42 h ne permet pas de réduire l'intensité des dégâts sur la tache colorée. Par ailleurs, plus la durée de conservation est longue plus l'intensité du dégâts est sévère mais les différences sont négligeables.

A l'inverse, les prétraitements n'ont pas d'incidence particulière sur la surface des dégâts sur le fond, ni réduction, ni augmentation comme cela a été observé en 2006 par rapport au témoin. Il n'y a pas de différence significative de la surface de dégâts sur le fond entre les différentes durées de conservation bien qu'une légère décroissance est observée pour les durées de conservation les plus longues : 36.3 % pour 0 h, 38.9 % pour 42 h, 28.9 % pour 114 h et 27.5 % pour 167 h (**figure 53**). Aucune différence significative de réponse des mangues à l'ombre ou au soleil n'a été observée, excepté pour la surface de dégâts sur le fond à 167 h à 12 °C où les mangues au soleil accusent une surface de dégâts sur le fond plus faible comparativement aux mangues à l'ombre (20.8 contre 33.7 %).

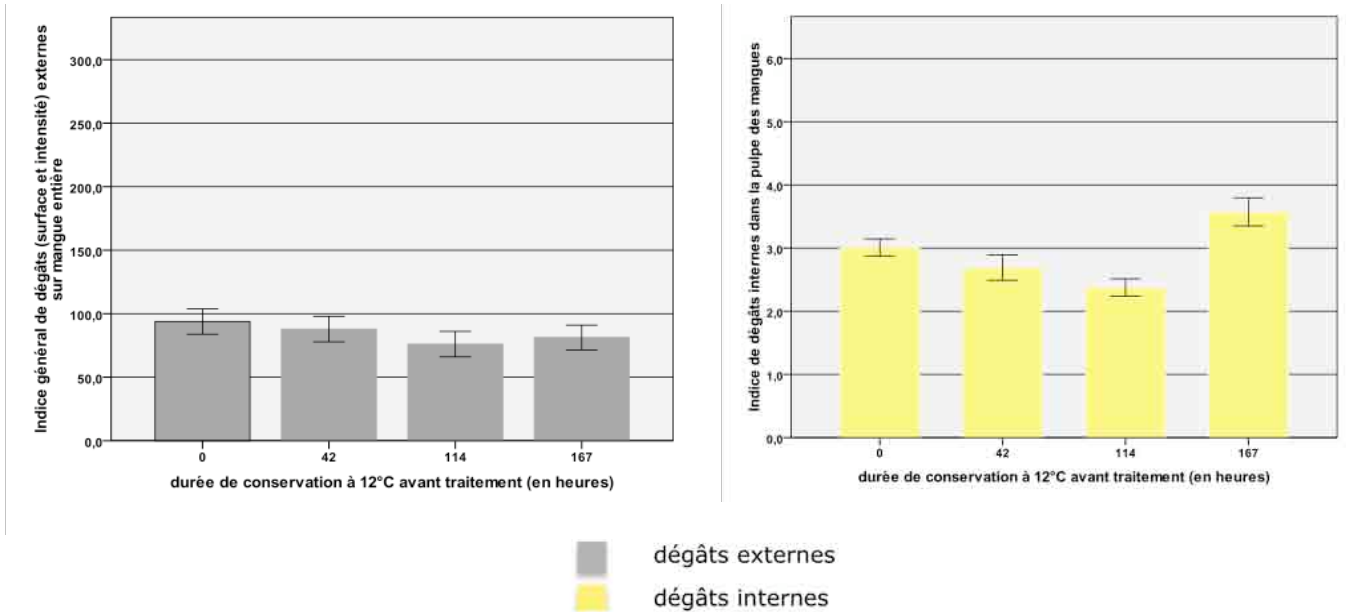


Figure 54. Influence d'un délai de 42, 114 et 167 h en conservation à 12 °C entre la récolte et le traitement HWT 55.0 °C/ 50 min sur la réponse physiologique des mangues du cv. Keitt 2007 : indices généraux de dégâts externes (gauche) et internes (droite). Les barres d'erreur représentent l'erreur standard à la moyenne ± 1 . N = 24

En reprenant l'indice général des dégâts externes (**figure 54**), les durées de conservation à 12 °C ne permettent pas de constater l'induction d'une thermotolérance mais elles ne favorisent pas non plus l'apparition de dégâts externes. Cet indice est similaire à celui du contrôle et pas plus élevé qu'en 2006. L'induction de la thermotolérance de la tache colorée n'est pas suffisante pour influencer sur l'indice général de dégâts externes du fait de la prédominance des dégâts sur le fond. Plus la durée est longue, plus la surface de dégâts sur la tache augmente et celle du fond diminue ce qui permet d'équilibrer le paramètre à un niveau équivalent de celui du témoin. De la même façon, sur les dégâts internes (**figure 54**), les durées de conservation à 12 °C ne permettent pas de constater l'induction d'une thermotolérance mais elles ne favorisent pas non plus l'apparition de dégâts internes qui est moyen (3). Aucune différence significative n'est observée entre les expositions.

En résumé, la durée de conservation de 42 h à 5, 12 et 20 °C induit une thermotolérance qui réduit significativement la surface de dégâts de la tache colorée sans forcément en réduire l'intensité. Cette thermotolérance s'estompe d'une façon plus ou moins variable si les durées de conservation se prolongent à 114 et 167 h sauf à 20 °C. A cette température, la réponse des mangues du cv. Keitt et notamment celles exposées au soleil pourrait interagir avec l'induction de phénomènes physiologiques liés au mûrissement du fruit. Ces prétraitements (durées et températures de conservation) n'induisent pas de thermotolérance sur le fond des mangues du cv. Keitt avec des niveaux de dégâts sur le fond similaires voire supérieurs à celui des témoins. Cependant la surface de dégâts semble décroître avec des durées de conservation plus longues (114 et 167 h) à 12 °C et 20 °C. A 12 °C le processus métabolique de mûrissement de la mangue est juste ralenti. Et ces résultats suggèrent que l'initiation du mûrissement pourrait favoriser l'apparition de phénomènes de protection du fond des fruits. De plus, à 12 °C il est fort probable que l'adaptation des mangues au froid puisse également contribuer à la mise en place de mécanismes de protection.

4.8 Discussion

La méthode d'application de la chaleur influe sur la réponse physiologique des mangues au traitement à la chaleur.

La réponse physiologique des mangues aux traitements à la chaleur est différente selon les cultivars et également selon les traitements. C'est le traitement HWT 55.0 °C/ 50 min qui provoque les dégâts externes et internes les plus importants. Ceux induits par les traitements HA 47.0 °C/ 20 min et 49.0 °C/ 90 min restent négligeables. Ces résultats sont en accord avec ceux de Jacobi et Wong (1992) sur le cv. Kensington. Ils observent qu'un traitement HWT engendre plus de dégâts externes qu'un traitement VHT à des températures de 47.0 °C/ 30 min à cœur de fruit. De même, Miller et McDonald (1991a) notent une présence de dégâts externes négligeables sur le cv. Tommy Atkins traité HA 51.2 °C/ 125 min. Les protocoles des traitements HA sont donnés pour des températures à cœur de fruit de 47.0 et 49.0 °C. Pendant les durées des traitements, de respectivement, 20 et 90 min, les températures de l'air et de la peau des fruits vont atteindre des températures de 53 à 55 °C. En effet, ces paramètres sont fixés dans le programme de la machine expérimentale afin de contrôler une montée en température de 3 h 30 min. A l'inverse, le traitement HWT 55.0 °C/ 50 min est donné pour une température d'eau. La peau des fruits atteint très rapidement cette température mais celle de la pulpe est légèrement inférieure pendant la durée du traitement du fait du délai nécessaire pour le transfert de la chaleur par conduction de la surface vers le centre. (Jordan, 1993). Ainsi pendant les traitements HWT et HA expérimentés, la peau des fruits a été soumise aux mêmes températures. Ainsi, la différence dans la réponse physiologique aux traitements serait plutôt induite par une différence de méthode d'application de la chaleur.

Le contact direct de l'eau chaude sur la peau pourrait être plus néfaste que le contact de l'air chaud. En effet comme nous le confirment les observations histologiques sur les mangues du cv. Keitt, les traitements HWT provoquent des dégâts physiques beaucoup plus importants sur la cuticule, l'épicarpe et les cellules sous jacentes et particulièrement autour des lenticelles. Ces dégâts n'ont pas été observés sur les mangues traitées HA. Ces observations sont en accord avec celles de Jacobi (1999) sur le cv. Kensington et Ponce de Léon et *al.* (1997) sur le cv. Haden décrivent les mêmes dégâts à la suite de traitements HWT de 46 à 48 °C. Si la mangue présente sur son épicarpe, une cuticule et des dépôts de cire associés, cet ensemble

joue un rôle important dans la limitation de la pénétration de l'eau et de composés chimiques (Bukovac et *al.*, 1981). La destruction, même partielle, de cette cuticule favorise la pénétration de l'eau chaude provoquant ainsi des dégâts dans les cellules (Bally, 1999). De plus, une décoloration et un élargissement des lenticelles ont été observés par Jacobi (1999) consécutivement au traitement HWT. Ils varient de façon proportionnelle avec les températures de 46.0 à 47.0 °C et des durées de 5 à 30 min. Obenland et Aung (1997) attribuent le brunissement de la peau de nectarines traitées HWT à l'augmentation du potentiel osmotique des cellules. Tous ces phénomènes vont favoriser un transfert d'eau chaude dans les tissus des fruits.

Mais Jacobi et Gowanlock (1995), sur cv. Kensington, suggèrent également que la destruction partielle des tissus, consécutive au traitement HWT 45.0 °C/ 30 min, expose les cellules à l'action de la polyphénol oxydase (PPO). En effet, la PPO provoque la dégradation par oxydation des composés phénoliques qui produit un pigment brun et engendre ainsi le brunissement des tissus des mangues (Underhill et *al.*, 1996 ; Jacobi et *al.*, 2001b).

Par ailleurs, selon Lurie (1998) la montée en température plus lente ainsi que la faible humidité des traitements HA expliqueraient également cette faible incidence de dégâts. Mais Williamson et Wilkenman (1994) et Ducamp Collin et *al.* (2007) mettent en garde contre d'éventuels flétrissements des tissus des fruits traités HA du fait de la faible humidité relative. Cependant dans le cadre de cette étude, aucun flétrissement sur la peau des cultivars traités HA n'a été observé.

Les résultats obtenus montrent que les températures à cœur de fruit de 47.0 à 49.0 °C/ 20 et 90 min des traitements HA favorisent les dégâts internes similaires à ceux du HWT mais à des niveaux légèrement inférieurs. L'incidence et la sévérité des dégâts internes sur les mangues traitées HWT pourraient être reliées à la grosseur des fruits des cultivars au moment de la récolte (Shellie et Mangan, 1994 ; Ducamp Collin et *al.*, 2007). En effet, les plus gros fruits ont présenté un faible indice de dégâts internes (les cv. Palmer, Kent, Keitt et Kent dont les masses sont comprises entre 450 et 700 g), les fruits de taille moyenne ont exprimé une sensibilité moyenne (les cv. Florigon, Haden et Smith dont les masses sont comprises entre 350 à 450 g) et les fruits de petite taille ont été les plus sensibles (les cv. Reynal, Nam Doc Mai, Irwin, Kensington dont les masses sont comprises entre 280 et 320 g). Le transfert de la chaleur par conduction à travers les tissus des fruits se fait de façon plus lente (Stewart et *al.*,

1990) et les petits fruits pourraient subir des températures internes plus élevées que les gros fruits pendant le traitement. Par contre, les dégâts internes dus aux traitements HA seraient moins variables selon la grosseur du fruit du fait que les températures internes soient maintenues constantes pendant le traitement. Des particularités sont cependant observées pour le cv. Smith (500 g) avec une sensibilité moyenne et le cv. Fascell (450 g) avec une sensibilité forte. Mais ces résultats sont donnés indépendamment de la forme (Ducamp Collin et *al.*, 2007) et de la densité et conductivité des tissus des fruits. Ces derniers pourraient également avoir une influence sur l'induction des dégâts internes pendant les traitements.

Par ailleurs, les descentes en températures internes des fruits pourraient être aussi un facteur explicatif de ces températures internes. Lors du traitement HWT, les températures internes des fruits après le traitement (une fois retirées de l'eau chaude) mettent environ deux heures à se refroidir à température ambiante (25-26 °C). Nous n'avons pas d'enregistrement de descente en température de nos traitements expérimentaux du fait de l'arrêt du programme à la fin du traitement. Toutefois les enregistrements de températures internes effectués lors des accompagnements techniques que nous avons réalisés pendant les désinsectisations commerciales de fruits et légumes ont démontré qu'après la durée du traitement, le fruit, agissant comme un accumulateur de chaleur, continue de monter en température (jusqu'à un degré) pendant au moins une heure avant de redescendre lentement à température ambiante. Ainsi les fruits traités à l'air chaud sont soumis à des régimes de températures internes plus importants pendant plus longtemps.

La présence de grains ou couches d'amidon non hydrolysés juste sous l'épicarpe pourrait être due à une perturbation du métabolisme carboné (Joyce et *al.*, 1993) occasionnée par les plus fortes températures des couches externes par rapport aux couches profondes dans la pulpe, lors du traitement HWT. Par contre les cavités observées dans le mésocarpe des fruits seraient plutôt dues à l'expansion des gaz pendant le traitement HWT (Jacobi, 1999). En effet, les espaces intercellulaires du mésocarpe sont trois à quatre fois plus importants que ceux de l'épicarpe (Neuvo et *al.*, 1984 sur cv. Carabao). Les dégagements gazeux produits par le traitement y sont confinés par les barrières physiques formées par l'épicarpe, la cuticule mais également l'eau environnante dans le cas du traitement HWT. Ces phénomènes vont ainsi entraîner des ruptures de tissus et la formation de cavités (Jacobi, 1999). La faible incidence

de dégâts internes dus aux traitements HA suggère cependant que certains cultivars de mangues tolèrent relativement bien des températures internes de 49.0 °C /90 min.

Le facteur ‘cultivar’ est prédominant dans la réponse physiologique des mangues au traitement en immersion en bain d’eau chaude.

L’étude bibliographique montre que peu de travaux de recherche ont été menés dans des conditions expérimentales similaires (historique climatique, conditions de culture, technologies, protocoles de traitement et d’évaluation des dégâts et cultivars). Ainsi la complexité de l’analyse est réelle et ne permet pas de comparaison de la sensibilité entre cultivars bien que les travaux de McDonald et Miller (1994), Pennock et Maldonado (1962), Smith et Chin (1989) aient tenté de classer trois à quatre cultivars selon leur sensibilité aux traitements HWT.

Dans le cadre de notre étude, un classement de sensibilité sur douze cultivars de mangues, sur une même saison de production, dans un même lieu géographique et utilisant une même technologie et un même protocole a été réalisé. Il permet de mettre en évidence que selon les cultivars, les mangues réagissent différemment en intensité et en surface de dégâts externes et également en sévérité de dégâts internes consécutivement au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min. D’une façon similaire, McDonald et Miller (1994) remarquent que le cv. Keitt est plus sensible au traitement HTFA 51.5 °C/ 125 min que le cv. Tommy Atkins. Mais lors des expérimentations, ce dernier s’est révélé plus sensible que le cv. Keitt au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min. De même nos résultats diffèrent de ceux de Smith et Chin (1989) qui attribuent une moins forte sensibilité au cv. Haden par rapport aux cv. Irwin et Kensington traités HWT 48 °C/ 90 min. Plus récemment, Kim et *al.* (2009) n’observent aucun dégât externe sur cv. Tommy Atkins HWT 46.1 °C/ 65 min. Mais encore une fois les conditions expérimentales diffèrent et les comparaisons sont aléatoires. Jacobi (1999) attribue ces différents comportements après récolte entre cultivars à des différences anatomiques telles que l’épaisseur, la structure et la composition de la peau et de la cuticule. Un peu plus tard, elle rajoute que les facteurs environnementaux, de culture ou physiologiques tel que le stade de maturité pourraient interférer (Jacobi et *al.*, 2001c).

Un effet croisé du cultivar et de l'ensoleillement sur la réponse physiologique des mangues au traitement en immersion en bain d'eau chaude existe

En 2000, Woolf et *al.* remarquent des différences de réponses au traitement HWT 55.0 °C/ 25 min entre cultivars d'avocats. Ils les expliquent par les différentes saisons de développement sur l'arbre par rapport à des différentes gammes de températures rencontrées en climat tempéré (Israël et Nouvelle-Zélande) sur quatre mois. Mais en climat subtropical, les variations des températures sur la saison et les amplitudes thermiques sont moindres sur les trois mois de la période production des mangues. De plus, les expérimentations n'ont été réalisées que si au moins deux jours de fort ensoleillement avaient été constatés au préalable.

Dans ces conditions, les résultats obtenus ont démontré que seuls les facteurs 'cultivar' et 'cultivar x exposition' prédominent. Ils mettent en évidence que le développement d'une tache colorée sur les fruits au soleil, sa surface et sa pigmentation et celles du fond des fruits à l'ombre ou au soleil sont spécifiques à chaque cultivar au moment de la récolte. Ces spécificités pourraient être des éléments à prendre en compte pour l'explication des différentes sensibilités des fruits au traitement HWT. En effet, pour la première fois, une différence de comportement face au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min entre la peau de la tache colorée et la peau du fond des mangues est démontrée. Ces réponses peuvent être indépendantes les unes des autres ou liées au cultivar. Ainsi en plus des différences de réponses physiologiques entre cultivars, une variabilité de réponses intra cultivar est mise en évidence en fonction du tissu considéré. Cependant, si certains paramètres de couleur ont pu être corrélés avec la surface ou l'intensité des dégâts externes (tache ou peau) et internes, aucune généralisation n'a pu être faite. La notion de seuils de valeurs pour ces paramètres a alors été évoquée mais n'a pas pu être vérifiée. Cependant il est évident que la réponse physiologique des mangues n'est pas seulement limitée à des différences de couleur et que d'autres phénomènes physiologiques et biochimiques croisés aient lieu empêchant une lisibilité claire des résultats.

En effet, les résultats ont démontré que le facteur 'exposition 'seul' n'avait pas de rôle prédominant dans la réponse physiologique des mangues aux traitements à la chaleur. Cette réponse va dépendre du cultivar mais également du type de tissu observé et aussi de l'année de récolte. Mais d'une façon synthétique, les cv. Florigon, Tommy Atkins, Nam Doc Mai et

Palmer présentent plus de dégâts externes sur les fruits exposés au soleil tandis que les cv. Reynal et cv. Kensington en ont moins. Par ailleurs, les cv. Tommy Atkins et Kent ont plus de dégâts internes dans les fruits exposés au soleil alors que les cv. Palmer et dans une moindre mesure cv. Reynal en ont moins. Pour les autres cultivars, aucune différence significative de réponse au traitement HWT 55 °C/ 50 min par rapport à l'ensoleillement n'a été observée. Ainsi aucune généralisation n'est possible, et malheureusement aucune référence bibliographique n'existe qui puisse expliquer nos résultats, obtenus dans des conditions particulières.

Nos résultats diffèrent toutefois quelque peu de ceux relevés par Woolf et Ferguson (2000) et Woolf *et al.* (2000) sur avocat, Paull (1995) sur papaye et Ferguson *et al.* (1998) sur pomme qui observent que les conditions de pré récolte (ensoleillement et températures) permettraient l'acquisition d'une thermotolérance afin de mieux supporter certains traitements après récolte utilisant des températures extrêmes. Cependant leurs travaux de recherche ne reposent pas sur un grand nombre de cultivars. Sous le climat tempéré d'Israël, Woolf *et al.* (2000) remarquent une différence significative de réponse au traitement HWT 55 °C/ 25 min entre les fruits exposés au soleil et ceux à l'ombre excepté pour un seul cultivar sur cinq : le cv. Ettinger. Ce dernier qui, par ailleurs, manifeste une thermotolérance à ce traitement, est le plus précoce sur la saison de production d'avocats en Israël. Lors des expérimentations, il a été récolté en fin d'automne quand les amplitudes thermiques journalières de l'air sont peu importantes et que l'air est supérieur à 30 °C. C'est pourquoi ces auteurs suggèrent que les fruits à l'ombre du cv. Ettinger, avec des températures internes moyennes de 34 °C, auraient reçu un stress de température similaire à ceux exposés au soleil dont les températures internes moyennes sont de 40 °C et ce contrairement aux autres cultivars arrivant plus tard dans la saison. Ces conditions seraient comparables, au moins sur les températures internes de nos mangues à l'ombre avec celles de nos expérimentations (**chapitre 2**). Les températures internes mesurées sur les mangues à l'ombre (36 °C) ont pu minimiser les différences de réponses des fruits des cultivars en réponse à l'ensoleillement. Les résultats ont pu alors mettre en évidence la sensibilité intrinsèque de chacun des cultivars pour lesquels un même stress de température a été appliqué.

Une thermotolérance acquise en pré récolte est suggérée mais son expression est modulée par des conditions d'ensoleillement qui peuvent être limitantes

Par contre, les températures internes des mangues exposées au soleil, résultant d'un très fort ensoleillement, sont plus élevées (jusqu'à 48 °C) que celles décrites par Woolf et *al.* (2000) sur avocats. Elles pourraient interférer sur l'acquisition d'une éventuelle thermotolérance des mangues directement soumises aux radiations du soleil. En effet, en 2003, Schrader et *al.* observent des brûlures sur la peau de pommes dont les températures étaient supérieures à 45 °C. Ils définissent ce niveau de température de critique mais précisent qu'il est la résultante de la radiation, de l'humidité relative, du vent mais également de la position des fruits sur l'arbre.

Les observations histologiques réalisées partir des coupes des fruits exposés au soleil du cv. Keitt ont mis en évidence des altérations physiques de la cuticule et des quatre premières couches de cellules. Sur l'épicarpe de la face non exposée des mangues au soleil et plus largement sur les mangues à l'ombre, où seulement une à deux couches de cellules endommagées ont été observées. Ces altérations ont également été décrites sur le cv. Kensington par Jacobi en 1999. Cette dernière explique que les fortes radiations du soleil provoquent des brûlures par les UV (Glenn et *al.*, 2002 sur pomme) et les trop fortes températures, une perte des assises cellulaires à la surface du fruit.

Soutenant ces hypothèses, les résultats sur le cv. Palmer démontrent que l'élimination à 99 % des radiations UV du soleil favorise une réduction de la surface de dégâts dus au traitement HWT sur la tache colorée et sur le fond de, respectivement, 85% et 45% et de 15% de l'intensité des dégâts externes. Ainsi ces observations confirment que les niveaux d'ensoleillement (radiations UV et probablement des températures extrêmes à travers les IR) limiteraient, sur certains cultivars, l'expression d'une thermotolérance ayant pu être acquise pendant des heures en pré récolte pendant lesquelles les conditions auraient pu être plus clémentes.

Cependant, la pigmentation de la peau des fruits, de certains cultivars, pourrait également moduler l'expression de la thermotolérance acquise en pré récolte

Aucun lien direct des paramètres de dégâts dus au traitement HWT avec l'exposition n'a pu être mis en évidence. Cependant des relations entre la coloration des mangues et l'exposition

ont pu être révélées, mais seulement dans certains cas et pour certains cultivars et tissus observés. En effet, l'ensoleillement a pu faire varier certains paramètres de couleur de la tache, du fond ou de la pulpe comme l'ont démontré Ferguson et *al.* (1998) sur pomme, Kliewer (1973) sur raisins. Le changement de couleur de la peau des mangues pendant la maturation et le mûrissement (**annexe 15**) résulte de la perte de la chlorophylle et de l'apparition voire de la synthèse de caroténoïdes présents dans les plastides et d'anthocyanes hydrosolubles présents dans les vacuoles (Medlicott et *al.*, 1986a ; Kader, 2002). Ces pigments sont responsables de la coloration jaune orange (caroténoïdes) et rouge (caroténoïdes et anthocyanes) de la peau et de la chair des mangues (Medlicott et *al.*, 1986a). Leur métabolisme, et plus particulièrement celui des anthocyanes, est fortement influencé à la fois par l'ensoleillement à travers les radiations UV et IR (Whiley et Schaffer, 1997) et par les températures élevées afférentes (Kliewer, 1977 sur raisin; Lipton et O'Grady, 1980 sur melon). Cependant il ne faut pas non plus faire abstraction des conditions de culture pendant le développement de la mangue (Barmore et *al.*, 1974). Toutefois, les seuils de température qui permettent le métabolisme de ces pigments sont différents selon le cultivar et vont également varier avec le stade phénologique de la mangue (Medlicott et *al.* 1986b). C'est pourquoi, la pigmentation de la peau ou de la chair à la récolte et son évolution au cours de son développement résultent d'un équilibre entre les paramètres a^* et b^* qui est spécifique à chacun des cultivars. L'influence de l'ensoleillement pourra influencer sur la variation de ces chromaticités mais dans les limites du potentiel de coloration du cultivar.

Si tous ces éléments permettent d'expliquer en partie les corrélations observées dans le cadre de l'analyse globale entre les indices de dégâts et les paramètres de chromaticité a^* et b^* , ils ne permettent pas non plus de généralisation. Toutefois, des hypothèses explicatives ont été formulées à partir de l'analyse détaillée des cinq cultivars étudiés en 2007. Si elles ne remettent pas en cause la sensibilité intrinsèque de chacun des cultivars au traitement HWT, ni leur réponse à l'ensoleillement, elles permettent d'amener des éléments de réflexion sur les facteurs de variabilité de réponse au traitement HWT, en fonction de l'ensoleillement, à travers la coloration des fruits pour chacun de ces cultivars.

Nos résultats suggèrent que la tache de couleur et le fond des fruits, et particulièrement ceux à forte chromaticité a^* donc rouge comme le cv. Palmer et le cv. Reynal pourraient jusqu'à un certain seuil, favoriser une certaine tolérance de dégâts. En fait il est apparu de façon très flagrante (**photo 12**) par l'analyse détaillée de la réponse physiologique du cv. Reynal au

traitement HWT 55.0 °C/ 50 min, que les seules différences majeures entre un fruit au soleil et un fruit à l'ombre soient la présence et la surface de la tache colorée développée sur la face exposée de la mangue au soleil au niveau de laquelle les dégâts sont minimisés. Un phénomène particulier de thermotolérance est donc apparu sur la tache colorée du fruit et également sur le fond coloré de cv. Palmer qui apparaît être dépendant de l'ensoleillement.

Toutefois, nos résultats indiquent, qu'à partir d'un certain seuil, qui n'a pu être déterminé, les dégâts de la tache colorée et du fond de certains cultivars à forte coloration, évoluent positivement avec la chromaticité élevée a^* et donc avec la couleur rouge. Retig et Kedar en 1967, observent que les tissus rouges des tomates absorbent davantage les IR que les tissus verts. Les IR seraient responsables, plus que les UV de l'augmentation de la température des melons (Lipton et O'Grady, 1980). Par ailleurs la production d'anthocyanes responsables de la coloration rouge est particulièrement plus importante si le tissu est soumis de façon directe aux radiations du soleil et parmi lesquels les UV. Ainsi, dans les conditions climatiques de la Nouvelle Calédonie, les tissus de la tache colorée des mangues et le fond à forte chromaticité a^* pourraient être à des niveaux de températures et de radiations UV élevés et très vite se retrouver en conditions limitantes. Ces éléments pourraient induire des brûlures sur la peau des fruits (Gindaba et *al.*, 2005 sur pomme). Les observations histologiques réalisées sur le cv Keitt soutiennent l'hypothèse d'une altération de la cuticule et des premières couches de cellules de la peau par l'ensoleillement.

La coloration des fruits est liée à la présence des anthocyanes et des caroténoïdes qui sont des antioxydants. Ces pigments permettent une protection du fruit par piégeage et l'élimination des ROS qui sont toxiques pour les cellules, limitant ainsi les dégâts des stress oxydatifs provoqués par une forte lumière ou de fortes températures (Green, 1983). Ils agissent comme des photo protecteurs en absorbant l'énergie de la lumière afin de limiter celle qui pourrait être absorbée par les chlorophylles (Frank et *al.*, 1999 ; Merzlyak et Chivkunova, 2000 sur pomme). Cependant dans des conditions extrêmes, les mécanismes physiologiques sont insuffisants pour utiliser ou dissiper les radiations absorbées par la peau des fruits et des dégâts peuvent apparaître (Blanke et Lenz, 1989). De plus les travaux de Woodall et Stewart (1998) sur *Syzygium* sp. et plus récemment ceux de Solovchenko et Schmitz-Eiberger (2003) sur pomme remettent en cause le rôle des anthocyanes comme UV-B protecteurs du fait de leur faible proportion par rapport à d'autres composés phénoliques présents non colorés (autres polyphénols dont certains flavonoïdes).

Berardini et *al.* (2005) soulignent, en outre, que la peau des mangues ne contient pas beaucoup d'anthocyanes. Ainsi à partir d'un certain seuil de température et d'ensoleillement élevé et limitant, la thermotolérance exprimée sur les tissus rouges de certains cultivars pourrait être diminuée.

Cependant, dans ce présent travail, l'absence de corrélation entre les dégâts physiologiques et la forte chromaticité a^* du fond des mangues sur le cv. Keitt contrairement aux cv. Palmer et Reynal, suggèrent des différences de sensibilités à la chaleur des cultivars (Quimio et Quimio, 1973 ; Medlicott et *al.*, 1986b). Ces corrélations n'ont pas été observées, non plus, sur les cv. Smith et Nam Doc Mai mais les chromaticités a^* de la tache et du fond sont plus faibles et ainsi la surface de la peau pourrait avoir été soumise à des températures moins importantes. En effet, tous les cultivars ne développent pas de tache de coloration quand leurs fruits sont exposés au soleil (Hulme, 1971 ; Whiley et Schaffer, 1997 ; Mukherjee, 1997) et la surface et la coloration de cette tache et du fond peuvent varier.

Les coefficients et le sens des corrélations (si elles existent) des paramètres de chromaticité avec l'ESS et TA (indicateurs du stade de maturité) suggèrent que les changements de coloration du fruit mesurés dans le cadre de ces travaux ne sont pas toujours représentatifs d'un changement flagrant de maturité qui pourrait influencer sur la réponse physiologique des mangues comme le suggère Jacobi et *al.* (2001c). Ainsi dans la partie suivante, seules les variations de l'ESS et TA seront considérées comme des indicateurs de maturité.

De même, le stade de maturité des mangues des cultivars influe sur l'expression de cette thermotolérance acquise en conditions de pré récolte

Medlicott et *al.* (1988) démontrent que le niveau d'ESS est plus élevé et le TA plus faible chez les mangues aux stades de maturité avancés. Pour la majorité des cultivars étudiés, il n'y a pas de différence significative entre les différentes expositions pour les TA et ESS sauf pour les cv. Reynal et Palmer (ESS) ainsi que les cv. Smith et Kensington (TA) pour lesquels les niveaux de ces paramètres (élevé pour ESS et/ou faible pour le TA) varient. Pour ces cultivars l'exposition au soleil aurait pu favoriser une maturation plus avancée des fruits. Woolf et Lay-Yee (1997), dans leur étude sur avocat, suggèrent que les conditions d'ensoleillement de pré récolte pourraient simuler les conditionnements thermiques (entre 38 et 40 °C). Ces conditions

selon Jacobi et *al.* (2001c), changeraient l'âge physiologique des mangues (dans le sens d'une maturation) du cv. Kensington. Ces auteurs constatent en effet, que les acides organiques ont été utilisés induisant une baisse du TA et que l'hydrolyse de l'amidon est amorcée par une augmentation du TSS.

Cependant dans le cadre de cette étude, de telles variations n'ont pas été flagrantes entre un fruit exposé au soleil et un fruit à l'ombre, sauf pour les quatre cultivars cités. A ce stade vert mature de la récolte, les mangues n'ont pas initié leur pic climactérique et il est donc normal de ne constater qu'une faible variation de ces paramètres. Toutefois, les observations histologiques réalisées sur le cv. Keitt ont permis de mettre en évidence un nombre moyen de grains d'amidon par cellule significativement plus élevé et une densité plus importante de canaux de sève dans le parenchyme profond de la mangue à l'ombre. Ces observations confortent et vont dans le sens de l'hypothèse qui avait été également formulée par Jacobi et *al.* (2001c). Les mangues à l'ombre auraient des réserves d'amidon non transformées en sucres solubles et un système vasculaire plus développé pour acheminer la sève élaborée. Ainsi à partir de ces observations, un stade de maturité moins avancé est suggéré pour les mangues à l'ombre de ce cultivar. Il n'est cependant pas improbable que des variations trop faibles ou trop graduelles de l'ESS et du TA n'aient pas permis, à ce stade phénologique, de distinguer des maturités différentes pour la majorité de nos cultivars.

Un certain nombre de travaux de recherches ont démontré que les mangues immatures sont plus sensibles aux dégâts physiologiques liés aux traitements thermiques après récolte (Segarra-Carmona et *al.*, 1990 sur le cv. Keitt traité HWT 46.1 à 46.7 °C/ 20 à 60 min ; Esguerra et Lizada, 1990 ; Esguerra et *al.*, 1990 sur le cv. Carabao traité VHT 46.0 °C/ 10 min). Cependant en 1995, Jacobi et *al.* n'observent aucun dégât externe sur le cv Kensington immature ou mature traité VHT 46.5 °C/ 10 min. Plus récemment, Jacobi et *al.* (2001c) montrent que plus la maturité du cv. Kensington augmente avec des dates de récolte tardives, plus les dégâts externes sont minimisés pendant le traitement. Ces auteurs attribuent les différences de sensibilité du cv. Kensington à des différences biochimiques et notamment les enzymes qui sont responsables des brunissements des tissus tels que la PPO qui a été décrite sur peau de mangue (Underhill et *al.*, 1996). L'activité de la PPO est différente selon le stade de maturité et est plus faible chez les mangues matures (Joshi et Shiralkar, 1977). De plus Kosiyachinda et *al.* (1984) précisent que chez les mangues à un stade de maturité peu avancé, le traitement HWT induit une respiration et ainsi qu'une perte en eau plus importantes.

A l'inverse, mais pour d'autres espèces, Paull et Chen (1990) et Paull (1995) montrent que les papayes du cv. Sunset sont plus sensibles aux traitements à la chaleur si leur stade de maturité est avancé.

L'analyse globale visant à identifier des facteurs explicatifs permet de constater que les mangues en 2007 ont été récoltées à un stade de maturité un peu plus avancé que celles de 2006. Mais cela ne permet pas de mettre en évidence une tendance générale entre les paramètres de dégâts et les teneurs en ESS et TA. De la même façon que pour les chromaticités, l'analyse détaillée du comportement des cinq cultivars a permis indépendamment de la sensibilité intrinsèque de chacun d'eux, d'apporter des éléments de réflexion pour l'explication de l'incidence de dégâts en fonction des évolutions de ESS et de TA.

La surface et l'intensité des dégâts sur le fond des mangues sont d'autant plus importantes que le fruit est à un stade de maturité peu avancé pour les cv. Nam Doc Mai et Smith dont les fonds n'ont pas de coloration rouge. Les cv. Reynal (seulement pour surface de dégâts sur le fond) et Keitt (seulement pour l'intensité de dégâts sur le fond) répondent également à un stade de maturité peu avancé. Le cv. Palmer, quant à lui, présente des dégâts sur le fond fortement influencés par un stade de maturité avancé et une chromaticité a^* élevée de la tache et du fond. Mais il faut cependant préciser que le cv. Palmer est un cultivar dont le fond va changer de couleur, de vert à rouge/mauve, pendant la maturation et le mûrissement. Ainsi les dégâts sur le fond du cv. Palmer pourraient être fortement influencés par la chromaticité a^* de la même façon que la tache colorée en conditions extrêmes d'ensoleillement comme cela a été évoqué ci dessus. Ce phénomène n'est cependant pas observé sur le cv. Keitt qui a également un niveau de chromaticité a^* élevé suggérant que la réponse physiologique des cultivars au traitement HWT pourrait également résulter d'un équilibre en couleur (chromaticité a^*) et stade de maturité (TA). Cependant les résultats mettent en évidence que de nombreux paramètres de dégâts ne sont pas toujours corrélés avec une couleur et un stade de maturité.

Ainsi dans le cadre de nos expérimentations, peu de cultivars ont exprimé de façon significative et constante une thermotolérance qui aurait pu être acquise par l'ensoleillement en pré récolte. Même si elle est suggérée sur la tache de certains cultivars, elle reste variable pour l'ensemble du fruit exposé au soleil. Mais il convient de rappeler que le traitement expérimental choisi a été particulièrement sévère. De plus, les conditions climatiques subtropicales ainsi que les fortes radiations et températures auxquelles les fruits sont soumis pourraient être limitantes pour l'acquisition de cette thermotolérance. Ainsi à certains seuils d'ensoleillement, de coloration et de maturité des fruits spécifiques pour chacun des cultivars, les comportements de sensibilité au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min seront différents. Ces paramètres évoluent au champ avant la récolte de manière non concomitantes et c'est certainement le fragile équilibre de ces facteurs qui détermineront ou exprimeront ou non une éventuelle thermotolérance acquise au champ.

La mise en place et le maintien d'autres mécanismes biochimiques de protection face aux stress abiotiques en conditions de pré récolte sont suggérés

L'ensoleillement et les températures de l'air et du fruit vont évoluer selon un cycle diurne. Les résultats sur le cv. Reynal montrent que les surfaces de dégâts sur la tache et sur le fond consécutives au traitement HWT 55.0 °C/50 min vont être considérablement réduites de 30 à 50 %, si les mangues sont récoltées entre 20 h et 1 h du matin alors que les températures internes sont inférieures à 30 °C (**chapitre 2**) et que le rayonnement est absent. Cette réponse est donc indépendante du stade de maturité et de la coloration des fruits pour lesquels, une variation significative au cours de 24 h est fort improbable. Ce comportement physiologique pourrait cependant être lié à l'exposition compte tenu du fait que la thermotolérance acquise sur les mangues exposées au soleil déjà observée sur le cv. Reynal est maintenue pendant la plupart des heures de récolte, et plus particulièrement entre 20 h et 1 h du matin. Ces phénomènes confirment que d'autres mécanismes de protection physiologiques et biochimiques pourraient exister indépendamment de la pigmentation et de la maturité.

Cette hypothèse est suggérée par de nombreux auteurs et concerne plusieurs mécanismes tels que la synthèse d' HSPs (Lurie et *al.*, 1993 sur tomate ; Ferguson et *al.*, 1998 sur pomme ; Woolf et *al.*, 1999b sur avocat; Woolf et Ferguson, 2000,) et/ou d'antioxydants

(Prior et Cao, 2000 ; Reay et Lancaster, 2001 ; Merzlyak et *al.*, 2002 ; Solovchenko et Schmitz-Eiberger, 2003 sur pomme). Certains de ces mécanismes pourraient être mis en œuvre pendant l'exposition au soleil et persisteraient pendant les heures plus fraîches de la nuit. Cette hypothèse est en accord avec les travaux de Ferguson et *al.*, (1998) sur pomme et Woolf et *al.* (1999b) sur avocat qui observent, sur les fruits exposés au soleil, des niveaux de transcription des ARNm codant pour les HSP17 pendant les températures fraîches de la nuit (DeRocher et *al.* 1991 sur pois). Par ailleurs, en l'absence de radiations et de fortes températures, les antioxydants (polyphénols, anthocyanes et caroténoïdes) qui sont des substrats pour le piégeage des ROS dans les mécanismes de protection contre les stress oxydatifs (Bravo, 1998) pourraient avoir été accumulés pendant la journée et être moins sollicités durant la nuit. La capacité antioxydante des mangues exposées au soleil serait ainsi plus importante voire plus efficace aux heures de la nuit. Cette hypothèse est soutenue par les résultats de Jeong et *al.* (2004) qui notent qu'à partir de 50 °C, l'activité antioxydante des extraits de la peau des agrumes est altérée.

La forte thermotolérance observée seulement sur la tache colorée entre 11 h et 15 h, mais qui disparaît ensuite sur l'indice général de dégâts externes, suggère une réaction très localisée sur la peau des fruits soumise directement à l'ensoleillement aux heures les plus chaudes de la journée. Cependant cette réaction disparaît pendant la nuit. Elle pourrait être directement liée dans à un intervalle de températures optimal qui favoriserait l'endurcissement (entre 38 et 42 °C selon Lurie en 1998) et à l'activité antioxydante des composés du métabolisme secondaire pouvant avoir été induits par l'ensoleillement. Par contre l'heure de récolte n'a aucune influence sur les dégâts internes sur le cv. Reynal.

Ainsi l'hypothèse de persistance de la thermotolérance est posée. La tolérance au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min du cv. Keitt est améliorée, seulement sur la tache colorée, pendant un délai d'au moins 42 h entre la récolte et le traitement et ce quelle que soit la température à laquelle la mangue est conservée (5, 12 ou 20 °C). Woolf et *al.* (2004) observent, sur avocat, qu'un délai de 1 à 4 jours à 15 ou 20 °C, sans prétraitement préalable à 38 °C et après un traitement HWT 50.0 °C/ 10 min, induit l'aggravation de dégâts physiologiques. Mais ils démontrent que les fruits qui ont été endurcis au préalable pendant 5 et 20 min à 38 °C ont une tolérance après le traitement HWT qui croît avec la durée du délai. Ces résultats

confirment que les mécanismes de protection à la chaleur mis en œuvre sur ce tissu sont persistants et pourraient même être actifs quelques heures après la levée du stress permettant ainsi une adaptation du tissu en prévention à d'éventuels stress (De Rocher et *al.*, 1991 sur pois; Ferguson et *al.*, 1998 sur pomme; Woolf et *al.* 1999a sur avocat).

Mais cette tolérance peut décroître si le délai se prolonge jusqu'à 167 h pour toutes les températures excepté celle de 20 °C. En effet, si les mangues exposées au soleil sont conservées pendant 167 h à 20 °C (température optimale du mûrissement du fruit) la thermotolérance observée sera maintenue voire améliorée. Jacobi et *al.* (2001b) remarquent sur le cv. Kensington que la thermotolérance acquise par un prétraitement à 40 °C est perdue avec des délais de durées croissantes (0 à 16 h) à 22 °C entre ce dernier et un traitement HWT 47.0 °C/ 15 min. Mais elle constate aussi qu'à partir de 16 h, les niveaux de dégâts diminuent du fait de l'induction du mûrissement. En effet, il est fort probable que si la mangue est maintenue pendant 167 h à 20 °C, le pic climactérique ait été initié (Bernades Silva, 2007) entraînant les phénomènes physiologiques et biochimiques qui aboutissent à son mûrissement dont la coloration fait partie. Le fruit serait alors à un stade de développement plus avancé avec un niveau de coloration plus intense et la présence de sucres solubles en quantité plus importante (Pech et *al.*, 2008 sur melon). Joshi et Shiralkar (1977) remarquent que les niveaux de PPO sont plus faibles dans la peau des mangues mûres. Ce phénomène pourrait ainsi limiter l'incidence de dégâts. Par ailleurs, Ding et *al.* (2001) observent également la transcription de ARNm codant pour les HSP17.4 et les HSP17.6 dans la tomate pendant le mûrissement. Ainsi, ces observations confirment que certains mécanismes de protection sont également liés à un stade de développement des organes des plantes (Hernandez et Vierling, 1993).

Les mangues sont sensibles au froid. Des dégâts physiologiques dus au froid ont été observés sur la peau des mangues quand les fruits sont placés à des températures inférieures à 10°C (Lizada et *al.*, 1984) et même à 13 °C sur le cv. Kensington (Hubbert et Ledger, 1988) ou à 15 °C sur le cv. Alphonso (Thomas et Joshi, 1988). La tache colorée des mangues exposées au soleil du cv. Reynal ont une thermotolérance qui se maintient pendant un délai de 42 h à 5 et 12 °C avant le traitement HWT. Au delà de 42 h, cette thermotolérance va décroître. Ces résultats concordent avec ceux de Woolf et *al.* (2004) qui observent, à la suite d'un prétraitement de 5 et 20 min à 38 °C, un maintien de cette tolérance pendant 24 h quand les avocats sont placés à 15 et 20 °C au préalable du traitement HWT.

Ces phénomènes de maintien de la tolérance au traitement HWT 55 °C/ 50 min avec un délai n'ont pas été observés sur le fond ou dans la pulpe des mangues de façon significative et ce quelle que soit l'exposition du fruit. Ces résultats suggèrent le maintien de la thermotolérance acquise seulement sur les taches au soleil pendant 42 h, quelle que soit la température, et jusqu'à 167 h à 20 °C pendant son mûrissement. Ce phénomène est cependant très localisé sur la tache et ainsi pourrait être fortement influencé par l'ensoleillement direct sur ces tissus (radiations au soleil et température) en pré récolte. Ces éléments provoqueraient la synthèse de pigments ou d'autres polyphénols non colorés qui pourraient, en partie, intervenir dans le phénomène de thermotolérance (Merzlyak et *al.*, 2002 sur pomme). Par ailleurs, même si les résultats n'ont pas pu le démontrer de façon significative, il semblerait que plus la température est basse (5 °C) et la durée du délai est longue (167 h), moins les surfaces de dégâts sur la tache et sur le fond sont importantes. Mais elles restent néanmoins supérieures à celles des témoins. Ainsi un stress thermique aux basses températures permettrait une protection des fruits par l'expression de HSPs comme l'a observé Montero et *al.* (1995) sur cherimole. Mais cette expression pourrait être plus lente à se mettre en place et, au terme de 167 h à 5 °C, ne serait pas suffisante pour avoir une influence sur la réponse physiologique des fruits au traitement HWT 55 °C/ 50 min indépendamment de l'exposition.

Au final, même si nos résultats n'ont pu démontrer de façon formelle qu'une thermotolérance effective, acquise en pré récolte, existe dans les tissus des mangues de la majorité des cultivars, ils suggèrent néanmoins qu'elle doit exister. Mais cette thermotolérance résulte d'une part, d'un équilibre subtil entre des conditions environnementales, d'ensoleillement et de températures particulières et, d'autre part, des réponses spécifiques des cultivars. Dans ces conditions nous constatons que sa mise en place, sa persistance et son efficacité face aux traitements HWT 55.0 °C/ 50 min ne sont pas toujours assurées.

Néanmoins de nombreuses hypothèses de protection ont été formulées dans cette discussion et c'est pourquoi dans le **chapitre 5** sur les mécanismes biochimiques de thermotolérance, la mise en place et les rôles éventuels des HSP 17.4 et des composés antioxydants non enzymatiques, toujours en relation avec l'ensoleillement, dans ces mécanismes de protection dans les mangues sont analysés de façon plus précise.

CHAPITRE 5

LES MECANISMES BIOCHIMIQUES DE THERMOTOLERANCE

5.1. Les protéines de choc thermique HSPs et smHSPs.....	148
5.1.1. <i>Effet du type de tissu.....</i>	148
5.1.2. <i>Effet de la profondeur du tissu</i>	149
5.1.3. <i>Effet de l'exposition, d'un filtre anti UV-A et UV-B et du traitement HWT.....</i>	149
5.1.4. <i>Effet de l'heure de récolte et du traitement HWT</i>	150
5.1.5. <i>Effet de la température de conservation à 5, 20 et 12 °C et du traitement HWT</i>	151
5.1.6. <i>Effet du type de traitement à la chaleur</i>	152
5.1.7. <i>Discussion</i>	153
5.2. Antioxydants.....	162
5.2.1. <i>Effet du type de tissu et du cultivar</i>	162
5.2.2. <i>Effet de l'ensoleillement et du filtre anti UV-A et UV-B.....</i>	163
5.2.3. <i>Effet des traitements à la chaleur.....</i>	164
5.2.4. <i>Effet de l'heure de récolte</i>	165
5.2.5. <i>Effet de durée de conservation à 12 °C.....</i>	166
5.2.6. <i>Discussion</i>	167

CHAPITRE 5

LES MECANISMES BIOCHIMIQUES DE THERMOTOLERANCE

Les résultats du chapitre précédent laissent à penser que certains mécanismes biochimiques particuliers pourraient réguler les réponses physiologiques, souvent divergentes, des mangues soumises aux traitements à la chaleur. De surcroît, les travaux menés, sur pomme et sur avocat, par les Dr. Woolf et Ferguson et leurs équipes du Plant and Food Research Institute en Nouvelle-Zélande, suggèrent que les conditions d'ensoleillement et de température en pré récolte (**chapitre 2**) des mangues en Nouvelle-Calédonie pourraient permettre l'acquisition d'une thermotolérance par des mécanismes d'expression et d'accumulation de protéines de choc thermique (HSPs et plus particulièrement la HSP17.4). C'est pourquoi en premier lieu, la vérification, dans différentes conditions d'expérimentation, de la présence ou de l'absence de cette smHSP au sein des tissus des mangues est nécessaire. En deuxième lieu, la réponse particulière des tissus de la tache de couleur de certains cultivars au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min (**chapitre 4**) suggère clairement que certaines modifications biochimiques et physiologiques pourraient être liées à la présence de pigments colorés voire à des métabolites secondaires de façon très localisée. Ainsi, l'approche de la présence d'antioxydants non enzymatiques dans les tissus de ces mêmes mangues apparaît complémentaire.

Les mangues au soleil des cv. Cogs Hall, Keitt et Reynal développent sur leur peau une tache de coloration dont la taille et la fréquence varient selon les cultivars. Les résultats concernant la réponse physiologique des mangues au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min montrent que la peau et la pulpe sous-jacente de cette tache colorée ne réagissent pas de la même façon que les tissus du reste du fruit pour certains cultivars. Ainsi sans être exhaustives mais afin apporter une contribution à la compréhension de certains mécanismes biochimiques de thermotolérance, deux approches comparées entre les tissus de la tache de couleur (peau et pulpe sous jacente) des mangues les plus exposées et ceux des parties les moins exposées à la lumière des mangues à l'ombre ont été menées. Il faut cependant garder à l'esprit que ce choix nous place dans des cas extrêmes. Ainsi, les phénomènes biochimiques de thermotolérance sur mangue entière, en fonction de la localisation des fruits sur l'arbre, de

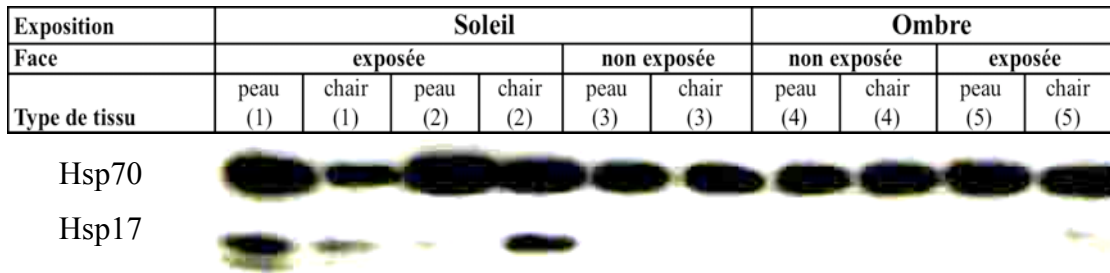
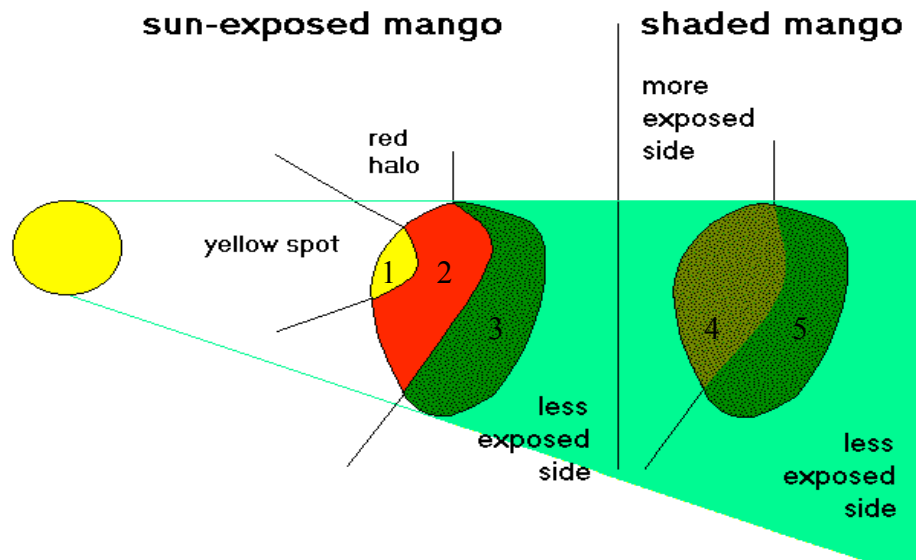


Figure 55. Western blots des HSP70 et HSP17 de la peau et de la chair des mangues exposées au soleil ou à l'ombre du cv. Keitt. Récolte de 15 h.

leur taille ainsi que de la fréquence et de l'étendue de leur tache de couleur (si présente) résulteront de situations particulières pour chacun des cultivars. Dans ce chapitre, les tissus de la mangue au soleil correspondent uniquement à ceux de la tache de couleur et les tissus de la mangue à l'ombre correspondent à ceux les moins exposés à la lumière.

5.1 Les protéines de choc thermique HSPs et smHSPs

5.1.1 Effet du type de tissu

Les résultats obtenus en 2006 sur les mangues du cv. Keitt récoltées à 15 h (**figure 55**) ont permis de mettre en évidence que les HSP70 étaient présentes de façon constitutive dans la peau ou dans la chair du fruit indifféremment de son exposition. Cependant, la quantité des HSPs visible après électrophorèse SDS-PAGE s'est révélée plus importante dans la peau et d'une façon générale dans les tissus exposés au soleil. Les smHSPs de masse moléculaire de 17 kDa n'ont été détectées que dans les tissus de peau et de chair de la face exposée du fruit au soleil. Dans la zone 1 représentée sur la **figure 55** et correspondant à la tache centrale jaune de la tache de couleur (zone la plus exposée à un ensoleillement direct), les quantités de HSP17.4 sont beaucoup plus importantes dans la peau que dans la chair. A l'inverse, dans la zone 2 correspondant à la périphérie rouge de la tache de couleur, les quantités de HSP17.4 sont plus importantes dans la chair que dans la peau ou seulement une faible présence est détectée. Dans la chair de la zone 2, les quantités de HSP17.4 sont même plus importantes que dans la chair de la zone 1.

Nous ne présenterons dans les sous chapitres suivants que les résultats obtenus à partir d'échantillons de pulpe. La détection des HSP17.4 dans la peau s'est, en effet, révélée très difficile à exploiter compte tenu de la variabilité des échantillons. Cependant, des résultats préliminaires en 2006 avaient pu mettre en évidence des HSP17.4 dans la peau des mangues au soleil mais également à l'ombre (avec de plus faibles intensités de bandes) sur cv. Haden dont la tache colorée est importante et bien prononcée de rouge.

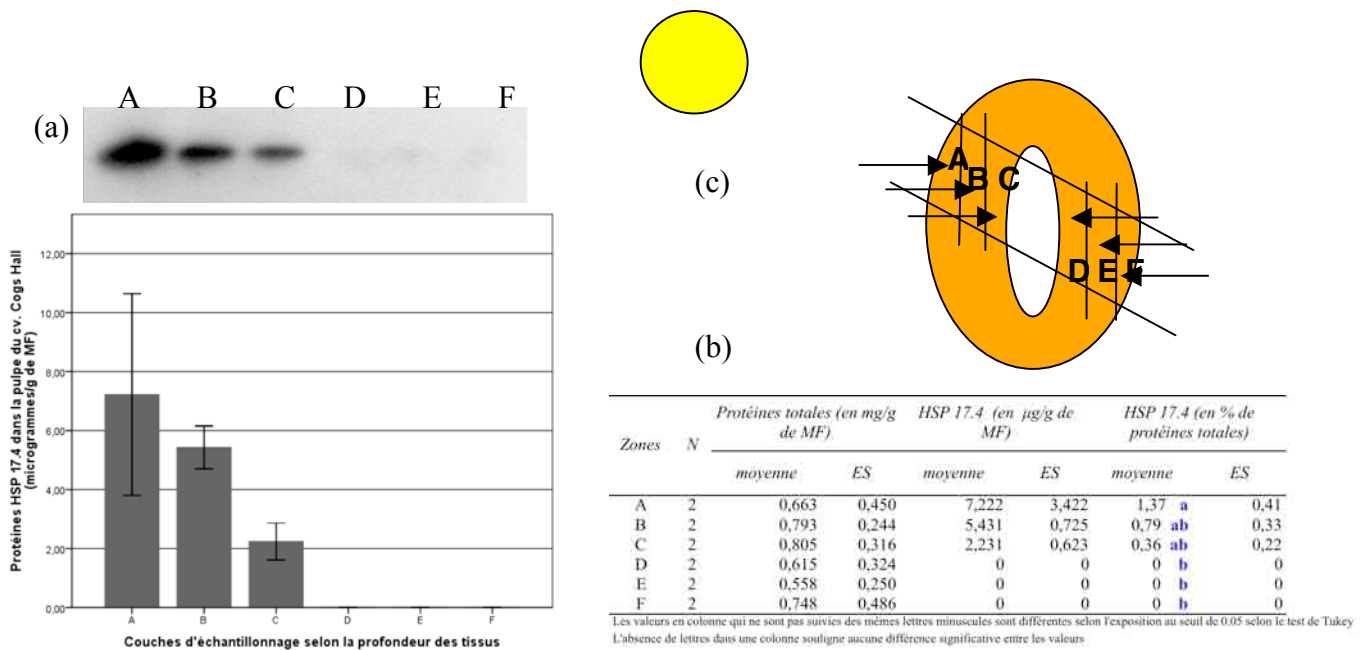


Figure 56. Western blots (a) et quantification – graphe et tableau (b) des HSP17.4 dans les tissus des mangues du cv. Cogs Hall selon la profondeur des tissus (c). Les barres d’erreur représentent l’erreur standard à la moyenne ± 1 .

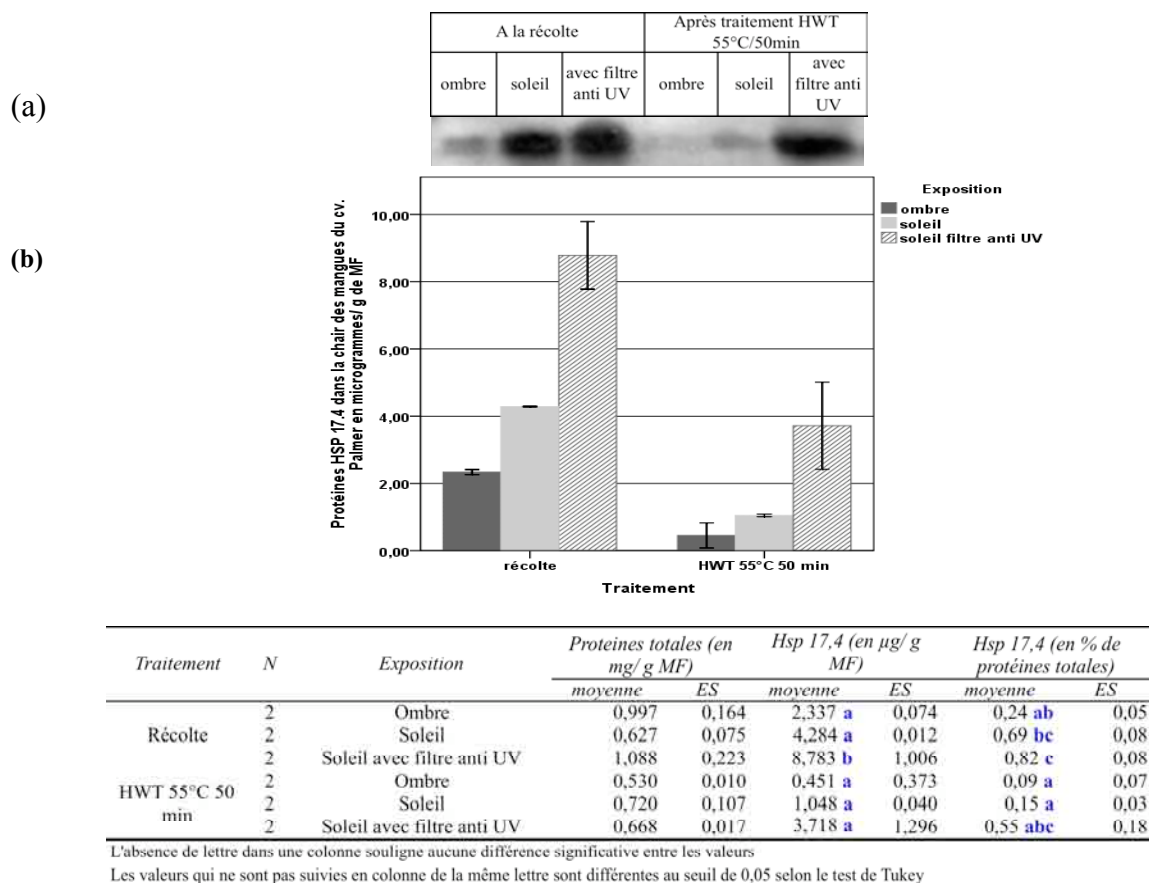


Figure 57. Western blots (a) et quantification - graphe et tableau (b) - des HSP17.4 dans la chair des mangues du cv. Palmer. Effet de l’exposition (ombre, soleil ou soleil avec filtre anti UV) et du traitement HWT 55.0 °C/ 50 min. Les barres d’erreur représentent l’erreur standard à la moyenne ± 1 .

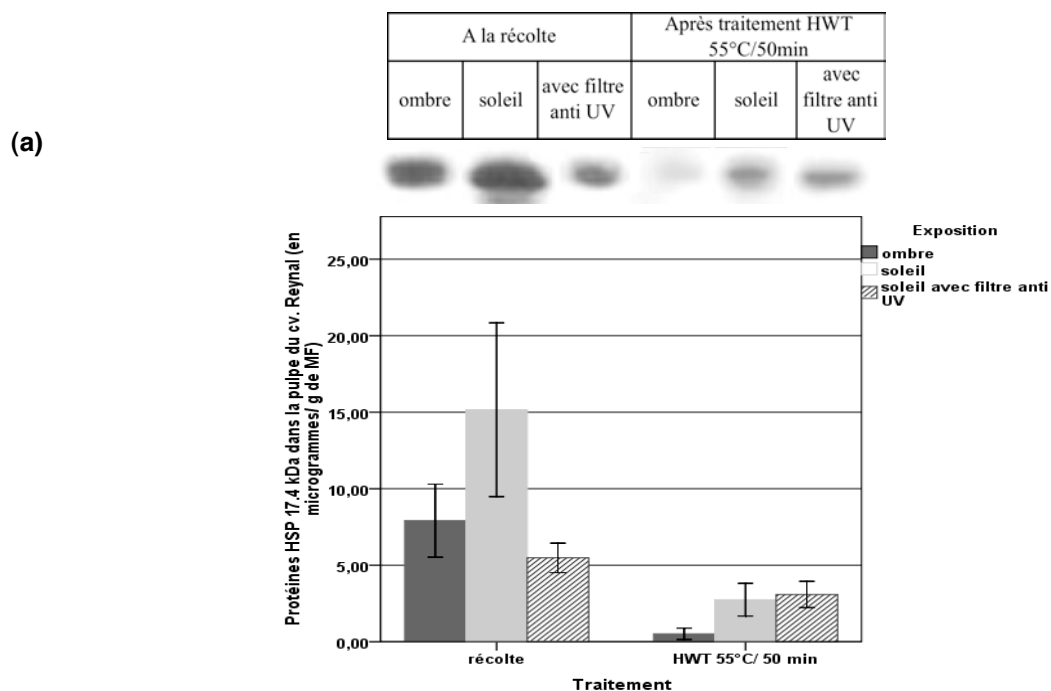
5.1.2 Effet de la profondeur du tissu

Sur le cv. Cogs Hall, les six zones de profondeur des tissus (A, B, C, D, E et F) ont un taux de protéines totales qui varie de 0.6 à 0.8 mg/ g de MF et ne se distinguent pas les unes des autres. La **figure 56** montre que, seule, la face directement exposée des fruits au soleil du cv. Cogs Hall présente dans sa chair des HSP17.4 détectables. La face non exposée en est dépourvue. Ce sont les couches les plus externes (entre 1 et 3 cm de profondeur) de la face directement au soleil qui présentent les quantités de HSP17.4 les plus importantes (7.22 μg pour la zone A et 5.43 $\mu\text{g}/\text{g}$ de MF pour la zone B). Les erreurs standard à la moyenne sont élevées et signalent une importante variabilité qui ne permet pas une distinction significative entre les couches. Cependant une décroissance est observée avec la profondeur des tissus jusqu'au noyau du fruit (2.23 $\mu\text{g}/\text{g}$ de MF pour la zone C). Ainsi, sur la face des mangues, directement exposée au soleil, le taux de protéines HSP17.4 est environ, de 0.4 % à 1.4 % des protéines totales.

5.1.3 Effet de l'exposition, d'un filtre anti UV-A et UV-B et du traitement HWT

Le cultivar Palmer

La **figure 57** montre que la quantité de protéines totales n'est pas significativement différente entre les expositions et entre les traitements. La quantité de protéines HSP17.4 est environ deux fois moins importante dans la pulpe des mangues à l'ombre (2.34 $\mu\text{g}/\text{g}$ de MF) que dans celle des fruits exposés au soleil (4.28 $\mu\text{g}/\text{g}$ de MF) sans que la différence soit significative. La présence d'un filtre anti UV-A et UV-B sur les fruits au soleil permet de constater un doublement significatif de la quantité de HSP17.4 (8.78 $\mu\text{g}/\text{g}$ de MF) dans la chair des mangues au soleil. D'une façon générale, le traitement HWT 55.0 °C/ 50 min tend à réduire les HSP17.4 dans la pulpe des fruits. La réduction est de 80 % pour les mangues à l'ombre, de 75 % pour les mangues au soleil et seulement de 50 % pour les mangues munies d'un filtre anti UV-A et UV-B. L'effet du traitement sur les HSP17.4 pourrait être dépendant du niveau de protéines HSP17.4 présent dans la chair de la mangue.



(b)

Traitement	N	Exposition	Proteines totales (en mg/ g MF)		Hsp 17,4 (en µg/ g MF)		Hsp 17,4 (en % de protéines totales)	
			moyenne	ES	moyenne	ES	moyenne	ES
Récolte	2	Ombre	1,733 ab	0,054	7,914	2,387	0,45 ab	0,13
	2	Soleil	1,933 b	0,067	15,163	5,680	0,78 b	0,27
	2	Soleil avec filtre anti UV	1,906 b	0,158	5,485	0,965	0,29 ab	0,03
HWT 55°C 50 min	2	Ombre	1,394 ab	0,191	0,520	0,372	0,03 a	0,02
	2	Soleil	1,327 a	0,050	2,747	1,069	0,2 ab	0,07
	2	Soleil avec filtre anti UV	1,317 a	0,085	3,089	0,862	0,23 ab	0,05

L'absence de lettre dans une colonne souligne aucune différence significative entre les valeurs
 Les valeurs qui ne sont pas suivies en colonne de la même lettre sont différentes au seuil de 0,05 selon le test de Tukey

Figure 58. Western blots (a) et quantification - graphe et tableau (b) des HSP17.4 dans la chair des mangues du cv. Reynal. Effet de l'exposition (ombre, soleil ou soleil avec filtre anti UV) et du traitement HWT 55.0 °C/ 50 min. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard à la moyenne ±1.

Face du fruit	face extérieure								face intérieure					
	soleil				ombre				soleil		ombre			
Date de récolte	7/4		8/4		7/4		8/4		7/4	8/4	7/4	8/4		
Heure de récolte	8	12	15	7	20	8	12	15	7	20	15	20	15	20



Figure 59. Western blots des HSP17 de la peau des mangues du cv. Keitt selon leur face, leur exposition, la date et l'heure de récolte.

Le cultivar Reynal

La **figure 58** montre que les quantités de protéines totales ne sont pas différentes selon l'exposition et que le traitement HWT diminue cette valeur de façon significative seulement pour les mangues exposées au soleil. Les quantités de HSP17.4 tendent à être plus importantes dans la chair des mangues du cv. Reynal exposées au soleil même si une grande variabilité des données existe. Par contre, à l'inverse de cv. Palmer, le filtre anti UV n'a pas permis une présence plus importante de HSP17.4 dans la chair des mangues. Par ailleurs le traitement HWT 55 °C/ 50 min semble réduire la quantité de HSP17.4 de façon plus importante dans les tissus des mangues à l'ombre où seulement un faible niveau persiste (0.52 µg/ g de MF). La réduction des quantités de HSP17.4 pour la chair des mangues au soleil après le traitement HWT est environ de 80 % et celle des mangues munies d'un filtre anti UV-A et UV-B est seulement d'environ 44 % malgré une faible teneur à la récolte. Ces résultats ne sont cependant pas démontrés statistiquement.

5.1.4 Effet de l'heure de récolte et du traitement HWT

Nos résultats sur le cv. Keitt (**figure 59**) ont mis en évidence que la quantité de HSP17.4 est plus importante dans la peau des faces exposées des fruits au soleil aux heures les plus chaudes de la journée et que leur niveau décline en fin de journée et en soirée avec la baisse des températures et de l'ensoleillement. Par contre 20 heures après et dès 7 h le lendemain matin, de fortes quantités sont à nouveau présentes. Aucune détection n'a pu être faite sur les faces ou fruits non exposés.

En 2007, les analyses ont été réalisées sur la chair du cv. Reynal (**figure 60 et tableau 28**). La quantité de protéines totales ne varie pas de façon significative entre les différentes dates et heures de récolte. Quelle que soit l'exposition du fruit et si le fruit a été traité ou pas, elle varie de 1.3 à 2 mg/ g de MF. Par contre, les quantités de protéines HSP17.4 varient d'un jour à l'autre mais également en fonction des heures de récolte, de l'exposition et du traitement HWT 55.0 °C/ 50 min bien que les différences ne soient pas significatives. Seulement 0.17 % en moyenne des protéines totales sont des HSP17.4 pour les mangues à l'ombre du cv. Reynal alors qu'elles constituent 0.53 % en moyenne des protéines totales des mangues exposées au soleil soit près de quatre fois plus. Même si aucune différence significative n'a pu être constatée entre les différentes heures de récolte pour chacune des expositions, c'est à partir de 1 h du matin pour la chair des mangues exposées au soleil et à de 6 h du matin pour la chair

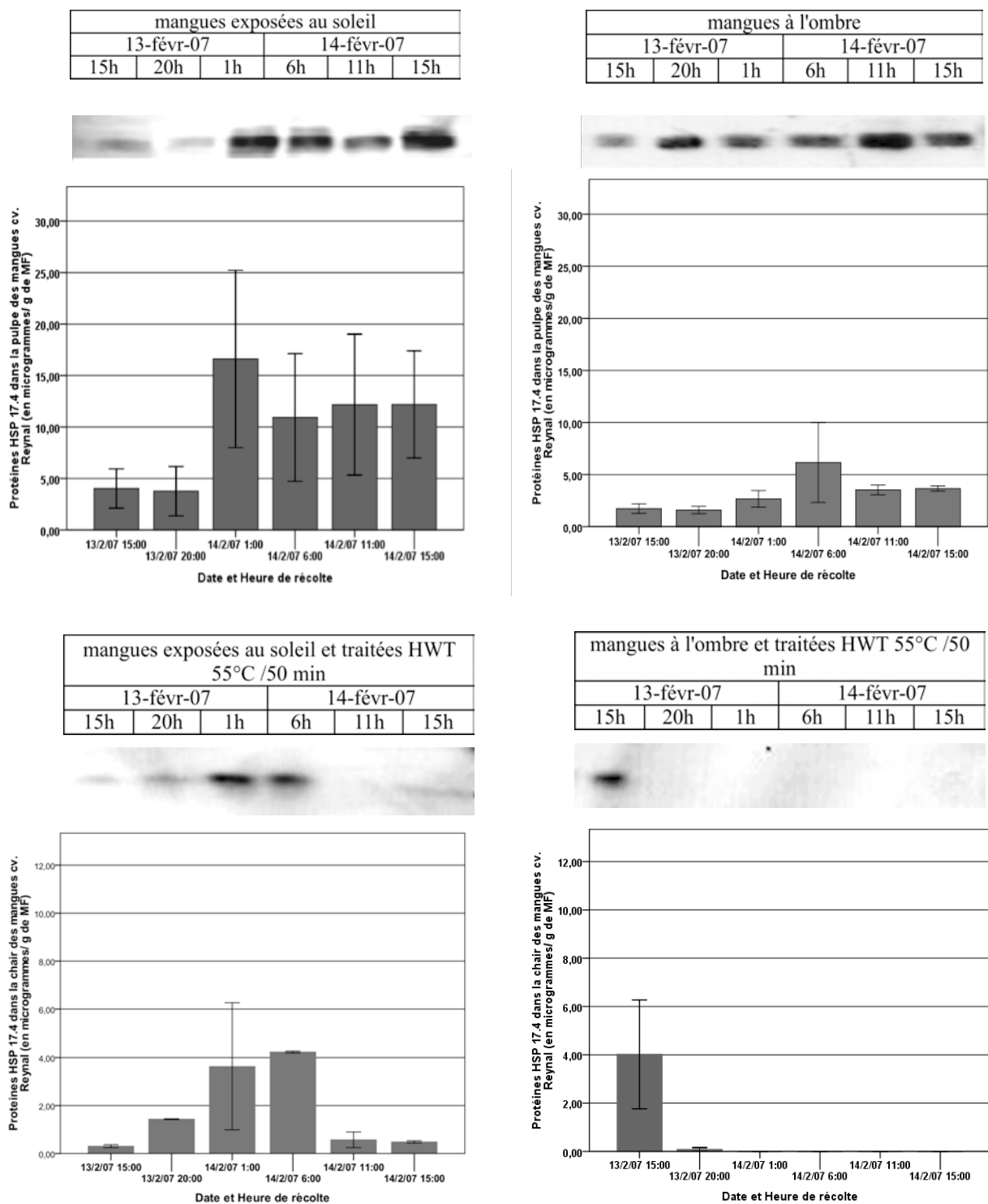


Figure 60. Western blots, profils et quantification des HSP17.4 dans les tissus des mangues cv. Reynal récoltées à différentes heures de la journée pour les mangues au soleil (en haut à gauche), les mangues à l'ombre (à haut à droite), les mangues au soleil traitées HWT 55 °C/ 50 min (en bas à gauche) et les mangues à l'ombre traitées HWT 55 °C/ 50 min. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard à la moyenne ± 1 .

des mangues à l'ombre que le taux de HSP17.4 augmente brusquement pour atteindre son maximum de respectivement, 16.6 µg/ g de MF et 6.1 µg/ g de MF). Ces taux restent relativement élevés jusqu'à 15 h le lendemain comparativement au niveau de HSP17.4 du jour d'avant à la même heure et pour une même exposition. Le traitement à la chaleur, s'il ne réduit pas la quantité de protéines totales, semble diminuer la teneur en HSP17.4 et notamment pour les mangues à l'ombre dont la teneur en HSP17.4 est *quasi* nulle (sauf pour le 13 février où les valeurs restent inchangées). Pour les mangues au soleil traitées, les HSPs persistent avec des valeurs qui sont cependant légèrement plus faibles. Mais ce sont aussi aux heures de la nuit, 1 h et 6 h du matin, qu'elles sont, d'une façon relative, les plus élevées. Cependant aucune différence significative n'a été observée.

5.1.5 Effet de la température de conservation à 5, 20 et 12 °C et du traitement HWT

Les résultats sur le cv Keitt en 2006, ont mis en évidence la présence de HSP17.4 dans la pulpe des mangues exposées au soleil, conservées après la récolte à 5 °C et 20 °C (**figure 61**). En conservation à 5 °C, plus la durée de conservation est longue (jusqu'à 167 h) plus la présence de HSP17.4 est importante. Ainsi une température de 5 °C pourrait également induire un stress et ainsi provoquer une réponse de la mangue par l'expression de HSP17.4. En conservation à 20 °C, la présence de ces protéines est observée par pics à 24 et 48 h, probablement dus à l'initiation du mûrissement du fruit.

Ainsi en 2007, toujours sur le cv. Keitt, différentes durées de conservation à 12 °C, température de conservation de la mangue pour laquelle le métabolisme est normalement fortement ralenti, ont été expérimentées (**figure 62 et tableau 29**).

A la récolte, la teneur en protéines totales (1.0 à 1.4 mg/ g de MF) est similaire entre les mangues à l'ombre et au soleil et ne varie pas de façon significative pendant la durée de conservation à 12 °C, bien qu'une légère tendance à l'augmentation soit observée. Dans cette expérimentation, contrairement aux résultats de 2005, des HSP17.4 ont pu être détectées dans la pulpe des mangues à l'ombre du cv. Keitt mais avec une teneur très faible (0.88 µg/ g de MF). Elle est près de quatorze fois inférieure à celle mesurée dans la pulpe des mangues exposées au soleil (12.84 µg / g de MF). Ainsi les teneurs en HSP17.4 représentent respectivement, 0.1 à 1.2 % des protéines totales. Des phénomènes différents sont constatés pour les mangues exposées au soleil et pour les mangues à l'ombre pendant la conservation à

Tableau 28. Protéines totales, HSP17.4 dans les tissus des mangues du cv. Reynal récoltées à différentes heures sur 24 h, à l'ombre ou exposées au soleil, traitées ou non traitées HWT 55.0 °C/ 50 min.

Traitement	Exposition	N	Date et Heure de récolte	Protéines totales (en mg/ g MF)		Hsp 17,4 (en µg/ g MF)		Hsp 17,4 (en % de protéines totales)	
				moyenne	ES	moyenne	ES	moyenne	ES
Récolte	Ombre	2	13/02 15h	1,734	0,144	1,732	0,464	0,10 a	0,02
		2	13/02 20h	1,972	0,166	1,599	0,351	0,08 a	0,03
		2	14/02 1h	1,589	0,113	2,668	0,805	0,17 ab	0,04
		2	14/02 6h	1,764	0,578	6,160	3,838	0,34 ab	0,21
		2	14/02 11h	2,070	0,203	3,525	0,464	0,17 ab	0,02
		2	14/02 15h	1,896	0,124	3,662	0,260	0,19 ab	0,03
	Soleil	2	13/02 15h	1,497	0,294	4,018	1,906	0,25 ab	0,08
		2	13/02 20h	1,771	0,294	3,763	2,398	0,19 ab	0,10
		2	14/02 1h	1,728	0,221	16,601	8,616	0,91 b	0,38
		2	14/02 6h	1,795	0,318	10,920	6,197	0,56 ab	0,24
		2	14/02 11h	1,875	0,326	12,172	6,851	0,60 ab	0,26
		2	14/02 15h	1,765	0,215	12,193	5,211	0,66 ab	0,21
HWT 55°C 50 min	Ombre	2	13/02 15h	1,562	0,358	4,020	2,253	0,24 ab	0,09
		2	13/02 20h	1,330	0,146	0,089	0,072	0,01 a	0,00
		2	14/02 1h	1,513	0,006	0,000	0,000	0,00 a	0,00
		2	14/02 6h	1,466	0,011	0,000	0,000	0,00 a	0,00
		2	14/02 11h	1,395	0,155	0,000	0,000	0,00 a	0,00
		2	14/02 15h	1,568	0,018	0,000	0,000	0,00 a	0,00
	Soleil	2	13/02 15h	1,503	0,066	0,305	0,061	0,02 a	0,00
		2	13/02 20h	1,468	0,139	1,432	0,017	0,10 a	0,01
		2	14/02 1h	1,804	0,027	3,624	2,638	0,20 ab	0,14
		2	14/02 6h	1,694	0,116	4,228	0,040	0,25ab	0,02
		2	14/02 11h	1,584	0,011	0,570	0,325	0,04 a	0,02
		2	14/02 15h	1,555	0,178	0,482	0,050	0,03a	0,01

Les valeurs en colonne qui ne sont pas suivies des mêmes lettres minuscules sont différentes selon l'exposition au seuil de 0.05 selon le test de Tukey
L'absence de lettres dans une colonne souligne aucune différence significative entre les valeurs

Figure 61. Western blots des HSP17.4 dans la chair face exposée des mangues au soleil du cv. Keitt en fonction de la durée de leur conservation à 5 et 20 °C.

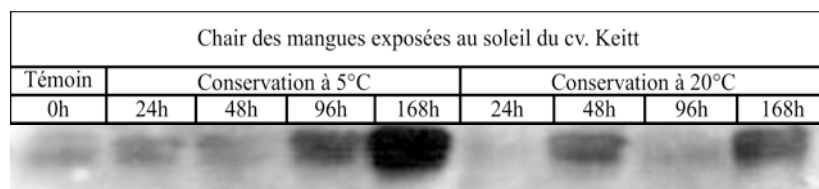


Tableau 29. Protéines totales, HSP17.4 dans la pulpe des mangues du cv. Keitt conservées à 12 °C pendant 0, 42, 114 et 167 h en fonction de leur exposition et de l'application d'un traitement HWT 55 °C/ 50 min ou non.

Traitement	N	Exposition	Durée de conservation à 12°C	Protéines totales (en mg/ g MF)		Hsp 17,4 (en µg/ g MF)		Hsp 17,4 (en % de protéines totales)	
				moyenne	ES	moyenne	ES	moyenne	ES
Récolte	2	Ombre	0 h	0,996	0,054	0,879	0,114	0,09	0,02
	2		42 h	1,173 A	0,005	2,741	1,978	0,23	0,17
	2		114 h	1,195	0,107	1,710	1,575	0,14	0,08
	2		167 h	1,307	0,113	3,313	3,097	0,27	0,19
	2	Soleil	0 h	1,173	0,327	12,844	2,614	1,19	0,46
	2		42 h	1,313	0,210	5,131	4,566	0,37	0,20
2	114 h		1,296 A	0,090	4,469	3,160	0,35	0,27	
HWT 55°C 50 min	2	Ombre	167 h	1,453 A	0,011	3,944	2,462	0,29	0,18
	2		0 h	1,009	0,995	0,000	0,000	0,00	0,00
	2		42 h	0,978 B	0,015	0,000	0,000	0,00	0,00
	2		114 h	0,989	0,101	0,000	0,000	0,00	0,00
	2	Soleil	167 h	0,800	0,131	0,000	0,000	0,00	0,00
	2		0 h	0,858	0,176	0,155	0,038	0,02	0,00
2	42 h		0,992	0,104	9,942	1,175	1,00	0,01	
2	Soleil	114 h	0,816 B	0,015	8,103	0,793	0,99	0,08	
2		167 h	0,890 B	0,015	11,048	6,760	1,24	0,76	

L'absence de lettres dans une colonne souligne aucune différence significative entre les valeurs

12 °C. En effet, dans la pulpe des mangues au soleil, la concentration de protéines HSP17.4 diminue jusqu'à environ 69 % pendant la conservation à 12 °C sans pour autant que les différences soient significatives. A l'inverse, la concentration de HSP17.4 dans la pulpe des mangues à l'ombre ne varie pas de façon significative et les niveaux restent inférieurs à ceux des mangues au soleil pour une même durée de conservation.

Le traitement à la chaleur HWT 55.0 °C/ 50 min semble avoir une incidence sur le taux de protéines totales dans la pulpe des mangues à l'ombre (réduction moyenne de 35 %) et, dans une moindre mesure, dans la pulpe des mangues exposées au soleil (réduction moyenne de 25 %) sans relation avec la durée de conservation, bien qu'aucune différence significative n'ait été mise en évidence. Les HSP17.4, après traitement, vont quant à elles, *quasi* disparaître mais seulement dans la pulpe des mangues au soleil non conservées et dans la pulpe des mangues à l'ombre conservées à 12 °C ou non. Ainsi la conservation à 12 °C au préalable du traitement HWT pourrait contribuer un maintien des HSP17.4 dans leur pulpe dans mangues au soleil traitées. Il ne faut cependant pas négliger une éventuelle cross réaction des anticorps utilisés avec d'autres smHSPs qui appuierait l'hypothèse que les smHSPs induites par la conservation à 12 °C et celles induites par le traitement HWT 55 °C/ 50 min pourraient être différentes. Mais dans cette éventualité, la quantité de smHSPs induites par une conservation à 12 °C seraient différentes selon si les mangues aient été exposées ou non au soleil.

5.1.6 Effet du type de traitement à la chaleur

Les résultats ci dessus montrent que le traitement à la chaleur HWT 55 °C/ 50 min induit une forte réduction des HSP17.4 dans les tissus des mangues. Par ailleurs, les résultats du **chapitre 3** ont démontré que les traitements HWT occasionnaient plus de dégâts externes que les traitements HA. Ainsi l'effet des différents traitements à la chaleur sur les systèmes biochimiques éventuellement mis en place dans le cadre d'une thermotolérance acquise en pré récolte est intéressant pour approcher les conditions de maintien de ce phénomène d'endurcissement.

Sur le cv. Keitt (**figure 63** et **tableau 30**), il n'y a pas de différence significative entre la quantité de protéines totales en fonction de l'exposition ou du traitement. Les HSP17.4 sont presque six fois plus importantes en quantité dans la pulpe des mangues au soleil (26.35 µg/ g de MF) comparativement à celle des mangues à l'ombre (4.73 µg/ g de MF). Les HSP17.4 ne

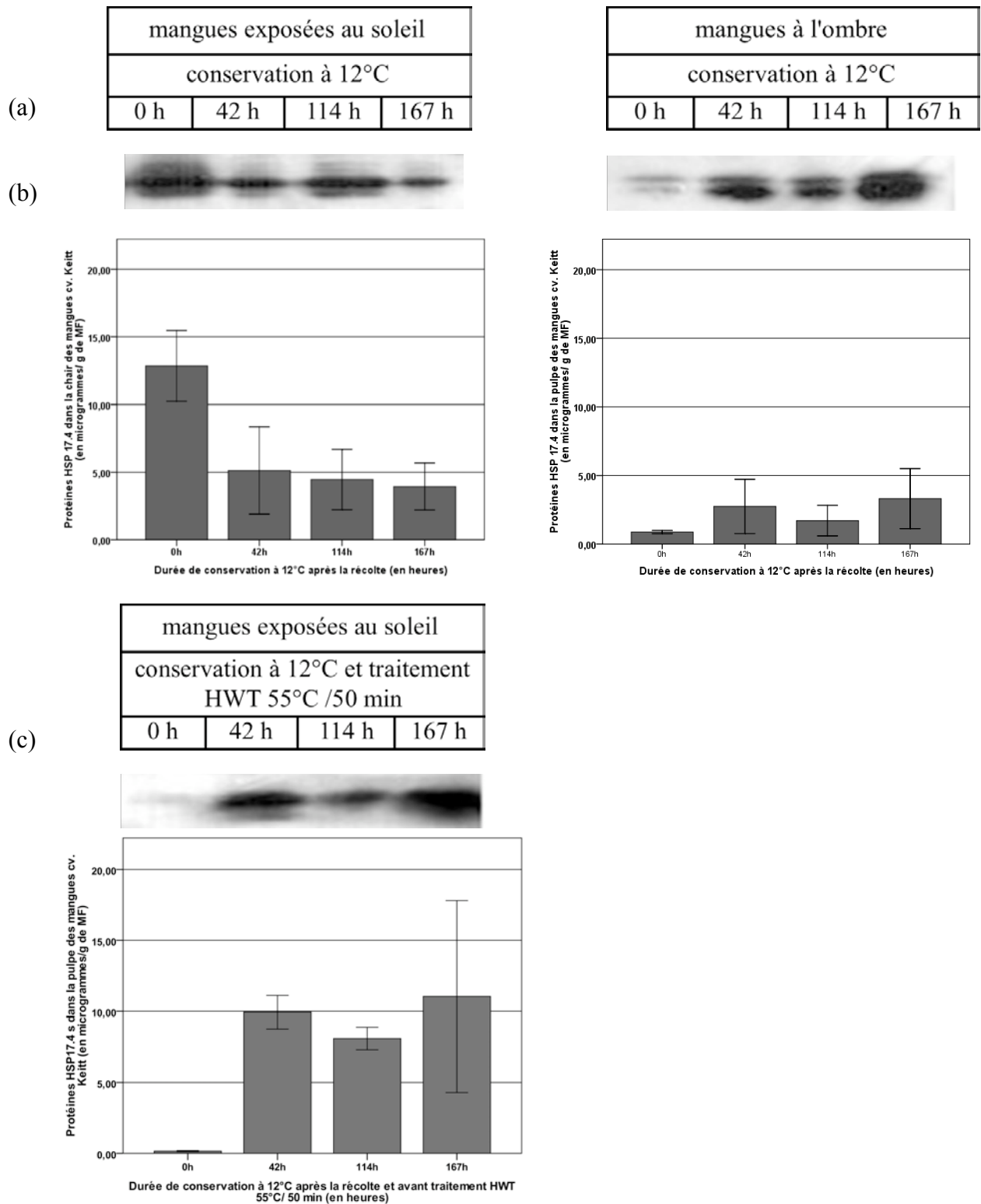


Figure 62. Western blots, profils et quantifications des HSP17.4 de la pulpe des mangues du cv. Keitt récoltées et conservées à 0, 42, 114 et 167 h à 12 °C. Contrôle fruits exposé au soleil (a), contrôle fruit à l'ombre (b) et fruit au soleil HWT 55.0 °C/ 50 min (c). Les barres d'erreur représentent l'erreur standard à la moyenne ± 1 .

persistent pas après les traitements à la chaleur dans la pulpe des fruits à l'ombre. Cependant, si le traitement HWT 55.0°C/ 50 min réduit de façon significative de 80 % les teneurs en HSP17.4 dans la pulpe des fruits exposés au soleil, les traitements HA sont moins néfastes. Le traitement HA 49.0 °C/ 90 min va diminuer le taux de HSP17.4 de 25 % et le traitement HA 47.0 °C/ 20 min pourrait permettre de le maintenir, bien qu'aucune différence significative ne n'ait été observée.

5.1.7 Discussion

Les teneurs en protéines totales et en HSP17.4 dans les tissus des mangues en pré récolte

Les teneurs en protéines totales diffèrent selon les conditions d'expérimentation et les cultivars. Elles varient de 0.7 mg/ g de MF pour les fruits de cv. Cogs Hall à 1.9 mg/ g de MF pour ceux du cv. Reynal récoltés à 15 h. Ces résultats sont en accord avec ceux de Hulme (1971) qui précise que le taux de protéines est variable en fonction des cultivars et est compris entre 0.5 et 5 % de la MF mais qu'il peut être fluctuant en fonction du stade phénologique des mangues. Cependant, les fruits étudiés dans ces essais ont été tous récoltés à un stade vert mature sans qu'il soit possible de déterminer précisément leur stade de maturité.

Les fortes températures réduisent la synthèse de protéines cellulaires pour activer celle de HSPs (Lurie et Klein, 1991 ; Ferguson et *al.*, 1994). Cependant les résultats montrent que malgré des températures internes de fruit qui diffèrent, la teneur en protéines totales n'est pas variable, ni en fonction de l'ensoleillement, ni selon la profondeur des tissus de la face exposée des mangues du cv. Cogs Hall au soleil. La teneur en protéines totales reste en équilibre en fonction des activités métaboliques dans le fruit (Ferguson et *al.*, 1994). Dans nos analyses, les protéines HSP17.4 représentent jusqu'à 2.2 % de la quantité de protéines totales selon les cultivars, l'exposition, les traitements thermiques appliqués. La proportion des ces smHSPs cytoplasmiques mesurée dans les tissus stressés de mangues est en accord avec les quantités de smHSPs (1 % des protéines totales) dans les feuilles obtenues à partir de plantes stressées par DeRocher et *al.* (1991).

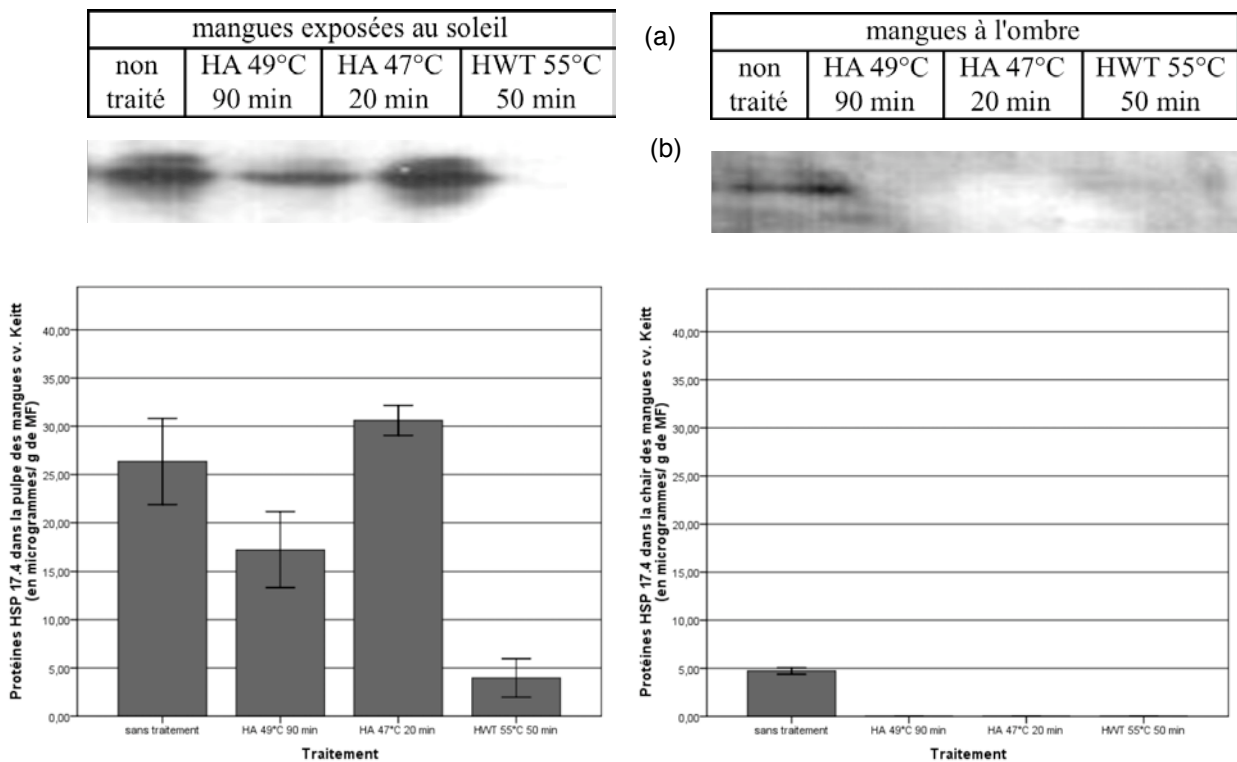


Figure 63. Western blots, profils et quantifications des HSP17.4 dans la pulpe des mangues exposées au soleil (a) et des mangues à l'ombre (b) du cv. Keitt non traitées et traitées (HA 49.0 °C/ 90 min, HA 47.0 °C/ 20 min et HWT 55.0 °C/ 50 min). Les barres d'erreur représentent l'erreur standard à la moyenne ± 1 .

Tableau 30. Protéines totales, HSP17.4 des mangues exposées au soleil et des mangues à l'ombre du cv. Keitt (non traité, HA 49.0 °C/ 90 min, HA 47.0 °C/ 20 min et HWT 55.0 °C/ 50 min).

Traitement	Exposition	Protéines totales (en mg/ g MF)		Hsp 17,4 (en µg/ g MF)		Hsp 17,4 (en % de protéines totales)	
		moyenne	ES	moyenne	ES	moyenne	ES
non traité	Ombre	0,996	0,054	4,731 ab	0,351	0,48 a	0,06
	Soleil	1,307	0,097	26,352 cd	4,466	2,00 bc	0,19
HA 49°C 90 min	Ombre	1,132	0,263	0,000 a	0,000	0,00 a	0,00
	Soleil	1,262	0,091	0,172 bc	39,088	1,35 b	0,21
HA 47°C 20 min	Ombre	1,049	1,213	0,000 a	0,000	0,00 a	0,00
	Soleil	1,399	1,101	30,607 d	15,573	2,21 c	0,29
HWT 55°C 50 min	Ombre	0,996	0,861	0,000 a	0,000	0,00 a	0,00
	Soleil	0,859	1,755	3,964 a	19,991	0,43 a	0,14

Les valeurs en colonne qui ne sont pas suivies des mêmes lettres minuscules sont différentes selon l'exposition au seuil de 0.05 selon le test de Tukey. L'absence de lettres dans une colonne souligne aucune différence significative entre les valeurs

Effet de l'ensoleillement sur la présence et la localisation des HSP17.4 dans les mangues

L'ensoleillement direct semble jouer un rôle dans la présence HSP17.4 au sein des tissus des mangues (les cv Cogs Hall, Palmer, Reynal, Keitt et Haden) de la même façon que la transcription ARNm codant pour les HSP17.4 dans la chair des pommes (Ferguson et *al.*, 1998) et celles des avocats (Woolf et *al.*, 1999b, 2000). Cependant, à l'inverse de Woolf et *al.* (1999b) sur avocats, les niveaux de HSPs de masse moléculaire 17 kDa ne sont pas les mêmes entre la peau et la chair de mangues du cv. Keitt.

La peau du centre de la tache de couleur est le point le plus exposé à l'ensoleillement direct aux heures chaudes de la journée. Une partie des HSP17.4 détectées pourrait être alors en partie due aux rayonnements UV (Nedunchezian et *al.*, 1992) et à une élévation de température stimulée par les rayonnements infrarouges (Hopp, 1947 ; Lipton et O'Grady, 1980). Cependant le point central de la tache de couleur sur la peau des mangues du cv. Keitt, de par sa couleur jaune, accumulerait moins de chaleur dans tissus et notamment dans la chair sous jacente qui présente moins d'HSP17.4, contrairement à sa zone périphérique rouge. En effet, la pigmentation rouge favorise la production de chaleur dans le fruit par une meilleure absorbance des radiations infrarouges (Retig et Kedar, 1967 ; Barber et Sharpe, 1970).

La chair des faces exposées au soleil des mangues du cv. Cogs Hall a une température interne décroissante de la zone la plus externe vers le centre du mésocarpe. Ce gradient de températures internes au sein de la face exposée confirme que les radiations de l'ensoleillement sont la principale source de chaleur (Woolf et *al.*, 1999a ; 1999b). Ainsi la diffusion de la chaleur dans le fruit se fait par conduction. La mangue, par sa large drupe, agit comme un réservoir qui accumule de la chaleur (Ferguson et *al.*, 1998). La quantité de HSP17.4 dans les tissus des fruits est d'autant plus importante que la température interne du fruit est élevée mais un seuil existe. Pour des températures de la chair inférieures à 36 °C, observées dans les couches de tissus de la face non exposée, aucune présence de HSP17.4 n'a été détectée. Cependant, Ferguson et *al.* (1998) mentionnent sur pommes, la transcription d'ARNm codant pour les HSP17.4 à des températures égales ou inférieures à 30 °C sur pommes à l'ombre. Si leurs travaux permettent de mettre en évidence la réception d'un signal de stress par l'activation de la transcription des ARNm, ils ne permettent pas de confirmer la synthèse de HSP17.4.

Nos résultats montrent que dans la face non exposée des mangues, un même gradient de températures internes décroissant de l'extérieur vers le centre du mésocarpe existe également. Ces observations suggèrent que l'accumulation de la chaleur peut se faire sans ensoleillement direct, simplement par convection à partir de l'air environnant ou des radiations réfléchies des nuages ou du sol (Merritt et *al.*, 1961 ; Thorpe, 1974 ; Bergh, 1980 ; Thompson, 1996 ; Ferguson et *al.*, 1998). Par ailleurs, nos résultats laissent à penser que le noyau de la mangue pourrait également jouer un rôle d'isolant thermique et limiter la diffusion de la chaleur dans le fruit entier.

Mais pour d'autres cultivars dont les fruits ont été produits sous avec un historique climatique propre (rayonnement global, durée d'insolation, localisation sur l'arbre), la présence de HSP17.4 a pu être observée dans la peau (du cv. Haden) et la chair des tissus non exposés (des cv. Reynal, cv. Palmer, cv Haden) à des températures comprises entre 32 et 36 °C. Elle est alors en quantité de deux jusqu'à quatorze fois inférieure à celle mesurée dans la chair des faces directement exposées au soleil. Il n'est donc pas exclu de pouvoir détecter des HSP17.4 dans ces tissus à des températures plus basses comme le suggèrent Ferguson et *al.* (1998), Woolf et *al.* (1999a ; 1999b ; 2000) dans leurs travaux sur les ARNm.

L'ensoleillement et ses facteurs d'expression de HSP17.4

Nedunchezian et *al.* (1992) mentionnent que les radiations UV favorisent la synthèse de HSPs et qu'il pourrait y avoir un effet cumulatif des HSPs produites par l'ensoleillement et ceux induites par les UV. Mais dans le cadre de nos expérimentations sur cv. Palmer, l'élimination des radiations UV par la présence d'un filtre sur la mangue au soleil a, au contraire, favorisé le niveau de HSP17.4 dans la chair. Il est cependant possible que la ventilation sous le cône du filtre expérimental ait été insuffisante et ait contribué à élever et à maintenir de 3 à 5 °C la température de l'air sous le filtre (**sous chapitre 2.1.3**). Ainsi, même quand la température interne du fruit sous le filtre n'est pas significativement différente de celle d'un fruit sans filtre, elle est maintenue plus longtemps à des températures élevées pendant les heures chaudes de la journée. Une conduction plus rapide de la chaleur à travers la pulpe de la mangue sous le filtre a été également observée minimisant ainsi le différentiel de température entre les deux faces. Ainsi la présence d'HSP17.4 dans les mangues du cv. Palmer protégées

par un filtre anti UV pourrait également être due à une température plus élevée et plus durable.

Toutefois, les réponses sont variables selon les cultivars. A l'inverse, la présence du filtre anti UV-A et anti UV-B diminue de façon significative la quantité de HSP17.4 dans la pulpe des mangues au soleil du cv. Reynal. Ces comportements opposés pourraient s'expliquer par la différence de pigmentation de la peau des deux cultivars. La pigmentation rouge de la couleur du fond des mangues du cv. Palmer (rouge mauve) pourrait modifier le niveau de température interne comme cela a été observé sur tomate (Retig et Kedar, 1967) et sur pomme (Thorpe, 1974). A l'inverse, le cv. Reynal présente à un stade vert mature une coloration de fond à dominante verte. Ainsi, l'historique climatique, la taille du fruit et sa coloration sont des éléments explicatifs à approfondir dont l'étude mérite d'être poursuivie.

Les résultats préliminaires dans la peau du cv. Keitt au soleil montrent que les niveaux des HSP17.4 sont plus importants aux heures les plus chaudes de la journée et déclinent en fin d'après midi et en soirée. Par contre dès le lendemain matin, elles sont encore présentes. Ces résultats diffèrent toutefois de ceux observés dans la chair des mangues du cv. Reynal.

En effet, l'expression de HSP17.4 dans la chair des mangues exposées au soleil du cv. Reynal suit aussi un cycle diurne. Cependant la synthèse pourrait avoir lieu pendant la journée avec un pic maximal pendant les heures de la nuit alors que les températures internes des fruits et de l'air chutent et que le rayonnement est inexistant. Ces niveaux se maintiennent jusqu'au lendemain matin et après une légère baisse, un cycle nouveau reprend. Ce cycle est similaire à celui des ARNm codant pour HSP17.4 décrit par Ferguson *et al.* (1998) sur pomme et Woolf *et al.* (1999b) sur avocat. Ces auteurs observent un pic maximal de la transcription de l'ARNm codant pour HSP17.4 pendant les heures de la journée, 1 à 2 h après les températures maximales de l'après midi et, ils décrivent le même phénomène de maintien pendant la nuit.

Cependant de nombreux travaux de recherche (DeRocher et Vierling, 1994 ; Lurie *et al.*, 1996) mettent en évidence que le cycle de la transcription des ARNm codant pour les smHSPs est différent de celui de la synthèse des smHSPs. Les premiers apparaissent aux heures les plus chaudes de la journée mais disparaissent très rapidement malgré de fortes températures alors que les smHSPs persistent. L'expression des messages ARNm codant pour les smHSPs est très rapide. Schoffl et Key (1982) mentionnent seulement quelques minutes à

partir du moment que le stress est établi. Ainsi l'expression des gènes smHSPs est transitoire et un traitement à la chaleur prolongé n'est pas suivi d'une réponse continue (Howarth et Ougham, 1993).

Nos résultats suggèrent alors qu'il pourrait y avoir des cycles spécifiques d'expression des smHSPs selon les cultivars, mais également selon le type de tissu. La peau, l'épaisseur et la pigmentation pourraient jouer un rôle non négligeable. En effet, sur le cv. Keitt nous avons observé des différences de niveaux de HSP17.4 selon les zones de coloration sur la tache de couleur de la peau. Cette dernière pourrait avoir une expression plus rapide de smHSPs qui serait liée à une directe exposition aux UV et IR ainsi qu'à une élévation de température favorisée par une pigmentation rouge de la tache de couleur ou du fond. Par contre, elle serait soumise à un refroidissement plus rapide (par convection) dès que les températures de l'air chutent et induire la diminution des HSP17.4. Mais à l'inverse, elle aurait aussi la capacité à se réchauffer très rapidement dès le lendemain matin et ce phénomène pourrait expliquer la forte présence de HSP17.4 dès 7 ou 8 h.

D'un autre côté, la chair des fruits est moins exposée aux radiations UV et IR. La chaleur, issue de ces radiations, se diffuse et s'accumule par conduction à travers ses tissus. Ainsi l'élévation de température dans la chair se fera progressivement. De la même façon, la restitution de la chaleur, dès que les températures de l'air chutent ou en absence de radiations, sera elle aussi plus lente. C'est pourquoi la chaleur stockée dans les tissus de la chair pourrait permettre un temps d'expression de HSP17.4 plus long. Des observations similaires ont été faites sur avocats (Woolf et *al.*, 2000).

Par ailleurs, comme la pigmentation de la pulpe est très faible au stade vert mature de la récolte, elle n'aura donc aucun rôle sur son réchauffement interne. L'expression de smHSPs dans les mangues, à travers l'ensoleillement est liée aux radiations UV et à l'élévation de la température interne des tissus des fruits. Ainsi la part de chacun de ces facteurs pourrait être différente sur la peau et dans la chair des fruits.

Les conditions de persistance des HSP17.4 dans la mangue

La persistance de HSP17.4 a été observée dans la chair des mangues du cv. Reynal pendant les heures de la nuit durant laquelle les minima de température ont été compris entre 19 et 20 °C. Ces minima correspondent à ceux observés par Ferguson et *al.* sur pomme en 1998 qui suggèrent alors que les températures de la nuit en Nouvelle-Zélande seraient suffisantes pour le maintien des smHSPs produites la journée. Sabehat et *al.* (1996) précisent que ce maintien à basse température pourrait être simplement dû à une décroissance du métabolisme et une rétention sélective de HSPs. Par ailleurs les smHSPs pourraient persister pendant plusieurs jours afin de réparer les dégâts dans la cellule dus au choc thermique ou pour accroître par anticipation la tolérance des cellules par une thermotolérance adaptative (De Rocher et *al.*, 1991). Une régulation par les HSP70 ou une auto-régulation de ses smHSPs pourrait aussi exister (DeRocher et Vierling, 1994). Elles arrêteraient leur propre transcription de gènes une fois qu'elles sont en quantité suffisante pour remplir leurs fonctions. Ainsi dans les plants de soja, les smHSPs pourraient alors avoir une faculté très importante d'activation et d'inactivation pour limiter les effets néfastes pour la transcription des gènes normaux de la cellule (Kimpel et Key, 1985). Enfin cette persistance de smHSPs en l'absence de stress sévère pourrait s'expliquer par la grande stabilité des smHSPs, avec des demi vies des smHSPs cytoplasmiques du pois de $37,7 \pm 8$ h (De Rocher et *al.*, 1991) et pour la HSP21 chloroplastique de $52\text{h} \pm 12$ h (Chen et *al.*, 1990).

Effet du stade de développement sur les niveaux de HSP17.4

Dans ce présent travail, la conservation des fruits à 20 °C a mis en évidence des pics de niveaux des HSP17.4 dans la chair des mangues au soleil cv. Keitt à 24 et 48 h. Ces augmentations brutales du niveau des HSP17.4 pourraient être expliquées par l'initiation du mûrissement des fruits et le déclenchement de pics climactériques (respiration et synthèse d'éthylène). En effet un certain nombre de travaux ont montré que les smHSPs, dont des HSP17.4, peuvent être synthétisées à des stades de développement tels que la mi maturation des graines (Hernandez et Vierling, 1993), le développement d'embryon de graines (Wehmeyer et Vierling, 2000) ou encore la subérisation des tiges de *Quercus ilex* L.

(Verdaguer et al., 2003). Cependant sur cherimole, Montero et al. (1995) n'observent aucune synthèse *de novo* des HSP21, 23 et 31 kDa à 20 °C, température de mûrissement. A l'inverse, Ding et al., en 2001 signalent la transcription de gènes codant pour les HSP17.4 et HSP17.6 chez la tomate pendant leur mûrissement. Ainsi en plus des signaux environnementaux, des signaux endogènes pourraient contribuer à une régulation des smHSPs (Verdaguer et al., 2003). Mais les travaux de Wehmeyer et Vierling (2000) et Puigderrajols et al. (2002) suggèrent que les protéines spécifiques smHSPs induites soit, par un stade de développement, soit par un stress, pourraient avoir des régulations distinctes. Par ailleurs, Verdaguer et al. (2003), grâce à l'utilisation d'une électrophorèse bidimensionnelle suivie d'une immunodétection, observent que les anticorps utilisés anti-QsHsp17.4-C1 ont reconnu chez *Quercus ilex* deux types d'immunobandes dans les régions de 17 et 10 kDa. Les smHSPs de la région de 10 kDa pourraient être plutôt induites par un stress oxydatif, pouvant être lié à un stade de développement, alors que les HSP17.4 seraient plutôt produites par un stress thermique (Puigderrajols et al. 2002 ; Jofré et al., 2003).

Effet de la conservation à basse température des mangues sur les niveaux de HSP17.4

La conservation des fruits à 5 °C a permis de mettre en évidence une augmentation de la quantité d'HSP17.4 dans la chair des mangues au soleil du cv. Keitt. Elle est proportionnelle à la durée de conservation (jusqu'à 167 h à 5 °C). Ainsi les basses températures pourraient, non seulement maintenir les smHSPs dans les cellules, mais également permettre d'en synthétiser sous l'effet d'un stress thermique mais également oxydatif. Ces résultats sont en accord avec ceux de Montero et al. (1995), Woolf et Ferguson (2000), et Ding et al. (2001). Nous n'avons pas de résultats sur les niveaux de smHSPs dans la peau des mangues à cette température. Cependant de nombreux travaux ont démontré qu'une température de 5 °C (Chaplin, 1991 ; Gonzalez-Aguilar, 2000) et en général les températures inférieures à 10 °C (Lizada et al., 1984), entraînent des dégâts physiologiques dans la peau et la chair des mangues. Quel serait alors le rôle de ces smHSPs nouvellement synthétisées ?

Selon les cultivars, les températures optimales de conservation de la mangue varient de 10 à 13 °C. A ces températures, les métabolismes physiologiques et physico-chimiques sont ralentis (Saucedo Veloz, 1977). Nos résultats montrent que la conservation des fruits à 12 °C implique dans le cas de la pulpe des mangues exposées au soleil du cv. Keitt, une réduction de

la concentration en HSP17.4 bien que celles-ci ne disparaissent pas complètement. Mais à l'inverse, dans la pulpe des mangues à l'ombre, ces températures pourraient maintenir la teneur en HSP17.4, à un niveau qui reste cependant inférieur à celui des mangues au soleil. La quantité HSP17.4 dans les mangues à l'ombre conservées ne varie pas de façon significative avec la durée de conservation. Ainsi à 12 °C, il peut y avoir des réactions de mise en place de mécanismes de protection contre les stress. Cependant ces HSP17.4 qui pourraient avoir été synthétisées de *novo* pendant la conservation à 12 °C, dans la pulpe des mangues à l'ombre ne persisteront pas après le traitement à la chaleur. A l'inverse, dans la pulpe des mangues au soleil, le traitement augmente les quantités d'HSP17.4 mais seulement dans les mangues qui ont subi une conservation à 12 °C et ce quelque soit la durée de l'exposition à cette température. Cependant la spécificité des anticorps utilisés doit être vérifiée. D'autres smHSPs pourraient être détectées par le même anticorps (Verdaguer et *al.*, 2003). Quoi qu'il en soit, ces phénomènes rejoignent l'hypothèse d'un mécanisme de régulation de la synthèse de HSP17.4 ou autres smHSPs par rapport à un niveau préexistant dans la cellule, permettant ainsi aux fruits de maintenir une protection face à différents stress (Kimpel et Key, 1985 ; DeRocher et Vierling, 1994). Ces régulations pourraient s'effectuer en fonction de la sensibilité intrinsèque des fruits, mais aussi de facteurs pouvant l'influencer comme le stade de maturité (Lizada, 1991 ; Jacobi, 1999) et également, en fonction des mécanismes de protection déjà en place.

Effet des traitements à la chaleur sur les quantités de HSP17.4

Le traitement HWT 55.0 °C/ 50 min réduit de façon considérable les quantités HSP17.4 dans la chair des tissus des mangues exposées au soleil (les cv. Palmer, cv. Reynal et cv. Keitt). Lors du traitement HWT 55.0 °C/ 50 min, la température interne va augmenter très vite de 30 à 40 °C et plus lentement entre 40 et 55 °C. Un seuil de température existe au delà duquel les HSP17.4, et certainement d'autres protéines, ne sont plus synthétisées. Ferguson et *al.* (1994) sur des cultures cellulaires de poires remarquent que les ARNm codant pour HSP17 ne sont pas maintenues à des températures de 42 à 45 °C. De même une diminution du message ARNm codant pour les HSP17.4 et de protéines est observée dans les avocats sur l'arbre après les fortes températures de l'ensoleillement (Woolf et *al.*, 1999b ; Woolf et Ferguson 2000). Cependant la réduction de la quantité de protéines totales pendant le traitement n'est pas significative et il est certain que d'autres mécanismes physiologiques sont mis en œuvre pendant ce stress.

Les traitements HA sont beaucoup moins néfastes pour les HSP17.4 dans la pulpe des mangues exposées au soleil du cv. Keitt que le traitement HWT. A des températures de 49.0 °C/ 90 min, la réduction des HSP17.4 est faible et à 47.0 °C/ 20 min, un maintien est suggéré. A l'inverse, les HSP17.4 des mangues à l'ombre ne résistent à aucun traitement sauf si elles ont été conservées à 12 °C au préalable. Mais encore une fois, la spécificité de l'anticorps pour la seule détection des HSP 17.4 est remise en cause. Mais les limites de températures et de durée des traitements sur les quantités de HSP17.4 sont directement influencées par le type de traitement (vitesse de montée en température, humidité relative).

L'expression de HSP17.4 dans les tissus des mangues est variable selon le cultivar, l'exposition en pré récolte que les fruits subissent, ainsi que leur stade développement, leur stade de maturité, les traitements ou la combinaison de traitements post récolte auxquels ils sont confrontés. Les résultats de ces travaux suggèrent que l'expression et l'accumulation de HSP17.4 pourraient être différentes selon le type de tissu et la durée du stress auxquels ils sont soumis tels que l'ensoleillement direct, mais sans que n'interviennent nécessairement les rayonnements UV. La présence d'HSP17.4 pourrait également être dépendante du cultivar et de sa capacité à absorber de la chaleur par la pigmentation des tissus du fruit.

Tous ces paramètres, ainsi que les conditions environnementales de pré récolte, vont donc influencer l'expression et l'accumulation, mais également la persistance, des HSP17.4 sur 24 h. De plus, les HSPs 17.4 sont aussi associées à des stades de développement tels que le mûrissement des mangues à 20 °C. Par ailleurs, les expérimentations sur la conservation à 5 et 12 °C ont également permis de mettre en évidence que ces HSP17.4 ou autres smHSPs (cross réaction) sont présentes à basse température même si le métabolisme du fruit est très ralenti. Certaines interrogations persistent toutefois quant à leur rôle de protection à 5 °C. A 12 °C, les smHSPs pourraient être synthétisées dans les tissus des fruits à l'ombre qui en contenaient peu au moment de leur mise en conservation. Les traitements HWT provoquent la disparition des smHSPs dans la chair de ces fruits mais seule une réduction est observée dans celle des mangues au soleil. Dans ces dernières, une synthèse de smHSPs est même probable si elles ont été au préalable conservées à 12 °C. Tous ces résultats suggèrent une régulation des smHSPs en fonction des différents stress auxquels les fruits sont soumis, mais il est clair que les quantités préexistantes de ces molécules, ainsi que les mécanismes de protection déjà en place ont également une certaine importance.

5.2 Antioxydants

Selon Leshem et *al.* (1998), l'expression de HSPs ainsi que la mise en place d'un système de défense antioxydant constituent deux éléments majeurs du GAS syndrome. Par ailleurs, la réponse particulière de la tache colorée des mangues de plusieurs cultivars au traitement HWT a fortement suggéré des mécanismes biochimiques particuliers sur cette zone. Ainsi dans le cadre de ce travail de thèse, la présence d'antioxydants non enzymatiques dans les tissus des mangues a été étudiée.

5.2.1 Effet du type de tissu et du cultivar

La **figure 64** et l'**annexe 16** montre que la capacité antioxydante de la peau (en moyenne 6100 mg TEAC/ 100 g de MF) du cv. Reynal est plus de quatre vingt fois plus importante que celle de sa chair (en moyenne 75 mg TEAC/ 100 g de MF). De la même façon la teneur en polyphénols totaux de la peau (en moyenne 1025 mg GAE/ 100 g de MF) est treize fois plus importante que celle de sa chair (en moyenne 80 mg GAE/ 100 g de MF). La teneur en anthocyanes totaux peut atteindre 0.4 mg/ 100 g de MF dans la peau alors qu'elle est *quasi* nulle dans la chair. La teneur en caroténoïdes totaux est quant à elle plus de trois fois supérieure dans la peau (en moyenne 4.4 mg/ 100 g de MF) que dans la chair (en moyenne 1.2 mg/ 100 g de MF). Ces derniers résultats sont normaux si l'on considère que les mangues sont récoltées à un stade vert mature et que leur pulpe n'a pas encore développé sa coloration.

Les données de l'**annexe 17**, qui montrent les résultats de l'effet de l'heure de récolte, confirment pour les fruits récoltés à 15 h ces teneurs et leurs proportions entre la peau et la chair.

Le tableau en **annexe 18**, qui présente les résultats sur le cv. Keitt permet de constater que la capacité antioxydante de la peau et de la chair, respectivement, en moyenne 9200 mg et 100 mg TEAC/ 100 g de MF sont plus importantes que sur le cv. Reynal. Par contre les teneurs en polyphénols totaux de la peau sont similaires pour les deux cultivars. La teneur en polyphénols totaux de la chair du cv. Keitt est sensiblement plus élevée (en moyenne 100 mg GAE/ 100 g de MF). Les taux d'anthocyanes sont identiques dans la peau et

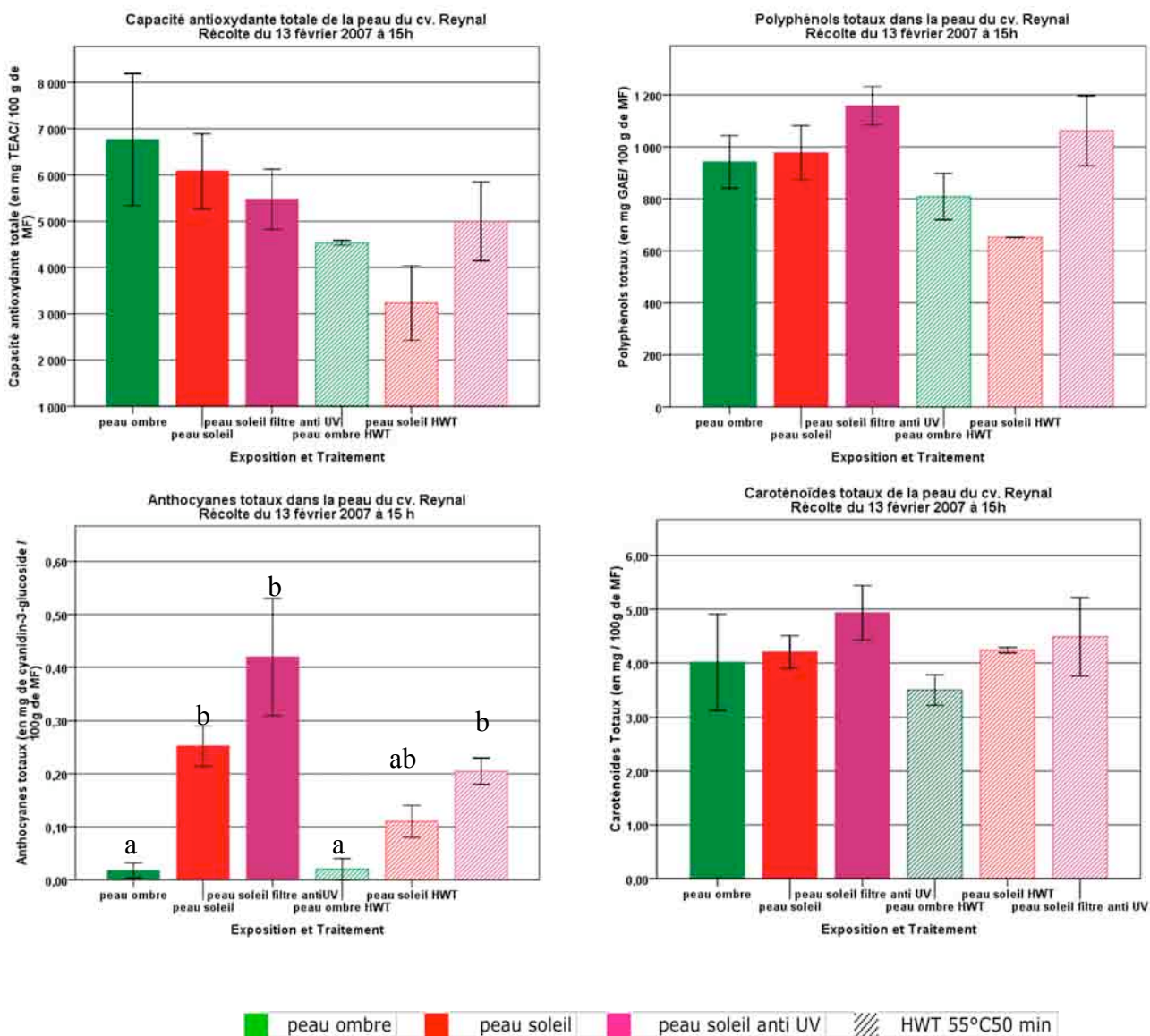


Figure 64. Capacité antioxydante, polyphénols, anthocyanes, caroténoïdes totaux de la peau du cv. Reynal selon l'exposition (ombre, soleil, soleil avec filtre anti UV-A et UV-B) et le traitement HWT 55.0 °C/ 50 min. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard à la moyenne ± 1 . Les lettres issues du test de Tukey au seuil de 0.05 montrent les valeurs qui sont significativement différentes les unes des autres.

Par contre, à la récolte, le cv Keitt a une teneur en caroténoïdes deux fois moins importante que le cv. Reynal.

Ainsi la capacité antioxydante totale et la teneur en certains antioxydants varient selon les cultivars, mais les résultats démontrent également que les ratios restent relativement constants. La peau a donc une capacité antioxydante en moyenne quatre vingt fois et une teneur en polyphénols dix fois plus importantes que la chair. Les niveaux d'anthocyanes ne sont pas détectables dans la chair, par contre ils sont variables dans la peau, tout comme les caroténoïdes le sont dans la peau et dans la chair en fonction des cultivars.

5.2.2 Effet de l'ensoleillement et du filtre anti UV-A et UV-B

La **figure 64** et le tableau en **annexe 16** montrent qu'il n'y a pas de différence significative pour la capacité antioxydante totale, la teneur en polyphénols et des caroténoïdes totaux de la peau des mangues du cv. Reynal selon qu'elles sont exposées à l'ombre ou au soleil. Des résultats similaires ont été observés dans la chair des fruits (**figure 65** et le tableau en **annexe 16**). Par contre dans la peau des mangues, le taux d'anthocyanes totaux est de 0.25 mg/ 100 g de MF pour les mangues au soleil et de dix fois moins pour les mangues à l'ombre. Les anthocyanes sont absentes de la chair quelle que soit l'exposition. Cependant le tableau en **annexe 17** dans lequel les résultats sont présentés en fonction des heures de récolte, permet de mettre en évidence des différences significatives pour les anthocyanes de la peau entre les mangues exposées à l'ombre ou au soleil. Toutefois, même si elles sont significatives, ces différences apparaissent à seulement certaines dates et heures de récolte. Cependant, une même tendance est observée : les mangues au soleil ont des teneurs en polyphénols et en caroténoïdes totaux toujours supérieures. Pour les anthocyanes totaux, les résultats sont similaires, les mangues à l'ombre en sont dépourvus et seulement une faible concentration est observée pour le cv. Reynal. Par contre, les teneurs des anthocyanes totaux des mangues au soleil peuvent atteindre jusqu'à 0.5 mg/ 100 g de MF dans la peau des mangues au soleil. Par ailleurs, le tableau en **annexe 18** démontre que la peau et la chair du cv. Keitt répondent plus favorablement à l'ensoleillement par des valeurs plus élevées en polyphénols, anthocyanes et

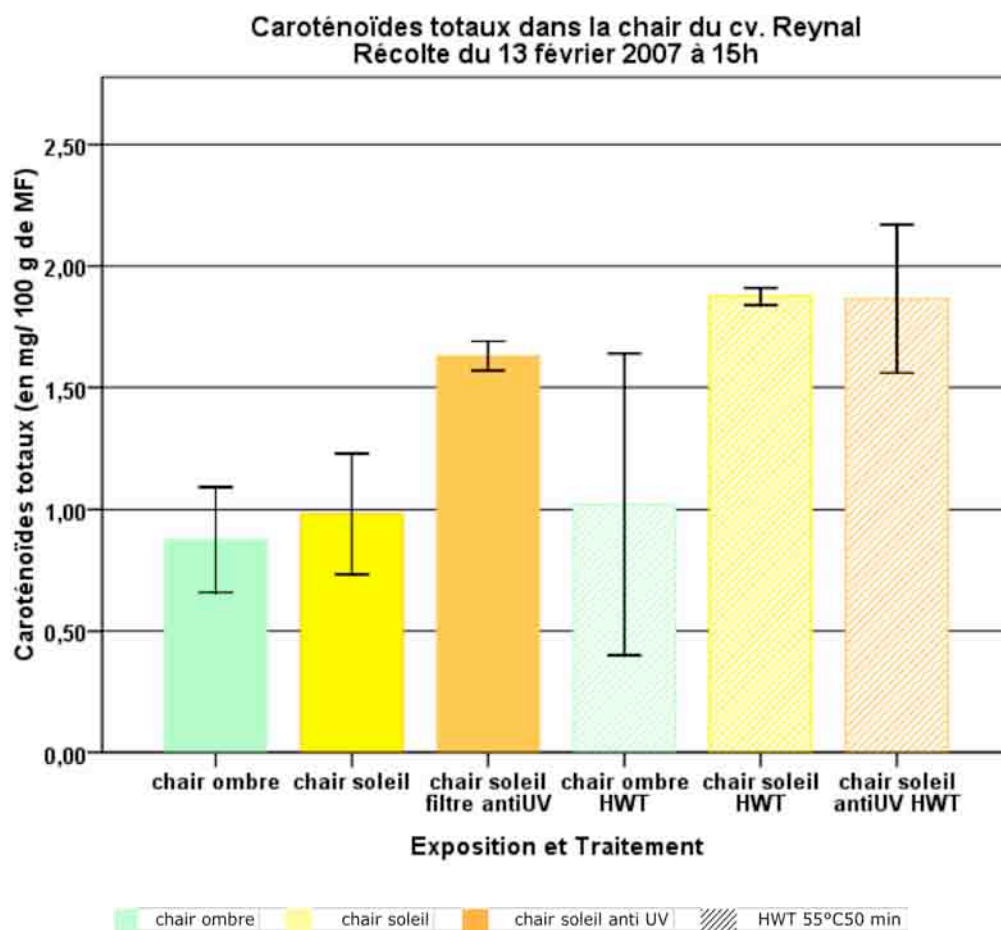


Figure 65. Teneur en caroténoïdes totaux de la chair du cv. Reynal selon l'exposition (ombre, soleil, soleil avec filtre anti UV-A et UV-B) et le traitement HWT 55.0 °C/ 50 min. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard à la moyenne ± 1 .

caroténoïdes totaux et en capacité antioxydante totale même si les différences ne sont pas significatives du fait de la variabilité des données.

La présence d'un filtre anti UV-A et UV-B sur les mangues exposées au soleil du cv. Reynal n'améliore pas de façon significative la capacité antioxydante totale de la peau ou de la chair. Du fait d'une grande variabilité des données, les différences des teneurs en polyphénols et en caroténoïdes de la peau et de la chair entre les mangues au soleil avec ou sans filtre ne sont pas significatives (tableau en **annexe 16**). Cependant des tendances apparaissent et le filtre pourrait sensiblement augmenter la teneur en polyphénols totaux de 20 % pour seulement la peau et les teneurs en caroténoïdes de 20 % pour la peau et de 6 5% pour la chair (**figure 64** et **figure 65**) des mangues au soleil protégées des radiations UV. Mais le filtre a surtout un effet sur les teneurs en anthocyanes de la peau puisqu'il induit une augmentation significative de 70 %.

Ces résultats suggèrent que les taux de composés antioxydants non enzymatiques dans la peau ou la chair des mangues peuvent varier en fonction des conditions climatiques et certainement du stade de maturité du fruit. Ainsi un fort ensoleillement permettrait d'augmenter légèrement les polyphénols, anthocyanes et caroténoïdes totaux de la peau et de la chair des mangues sans pour autant faire varier la capacité antioxydante totale de façon significative. L'élimination des rayonnements UV-A et UV-B aura donc eu une incidence notable que sur les anthocyanes. L'ensoleillement et l'élimination des rayonnements UV-A et UV-B n'ont pas d'influence majeure sur la capacité antioxydante totale des mangues du cv. Reynal.

5.2.3 Effet des traitements à la chaleur

La **figure 64** et le tableau en **annexe 16** suggèrent que le traitement à la chaleur HWT 55.0°C / 50 min a un effet négatif sur la capacité antioxydante totale, les polyphénols, anthocyanes totaux de la peau des mangues cv. Reynal et plus particulièrement celles qui ont été exposées au soleil même si les différences ne sont pas significatives. Il induit une réduction de 33 % et 47 % de la capacité antioxydante totale, de 14 % et de 33 % des polyphénols totaux dans la peau des mangues, respectivement à l'ombre et au soleil. Il va réduire aussi de 56 % les anthocyanes totaux de la peau des fruits exposés. Par contre il n'a pas d'effet majeur sur les

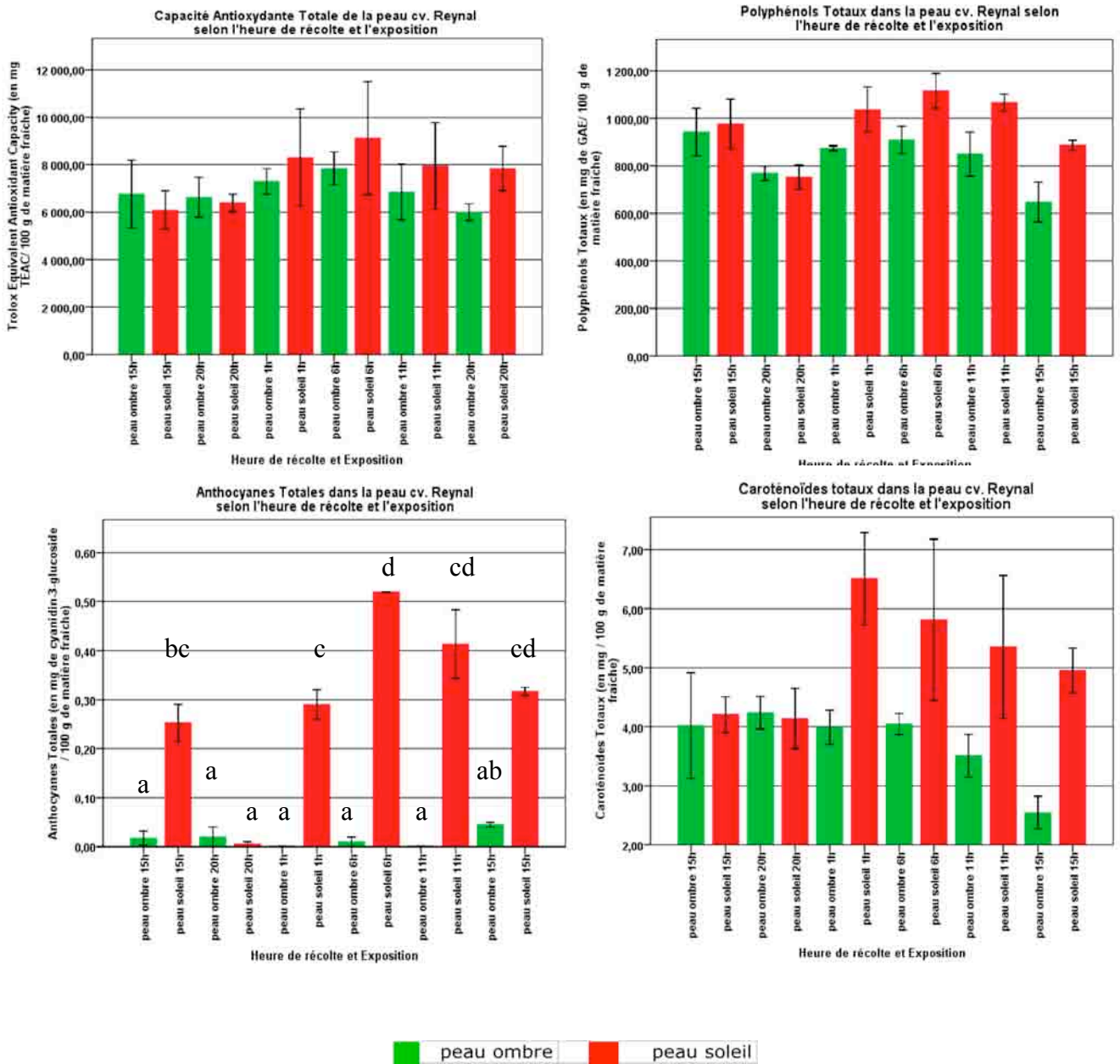


Figure 66. Capacité antioxydante, polyphénols, anthocyanes, caroténoïdes totaux de la peau du cv. Reynal selon l'exposition (ombre, soleil) et sur 24 h. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard à la moyenne ± 1 . Les lettres issues du test de Tukey au seuil de 0.05 montrent les valeurs qui sont significativement différentes les unes des autres.

teneurs en caroténoïdes sur la peau, ni sur la capacité antioxydante totale et les polyphénols totaux de la peau des mangues au soleil protégées par un filtre anti UV-A et UV-B.

Dans la chair des mangues, il n'aura un impact que sur les caroténoïdes pour lesquels il pourrait permettre une augmentation de 91 % quand les mangues ont été exposées au soleil (**figure 65**).

Il est important de constater que l'effet de ce traitement à la chaleur induit une réponse physiologique (élévation ou diminution des teneurs en antioxydants) qui diffère dans la peau et la chair des mangues.

Dans une série d'essais (que nous n'avons pas présentée car seule une répétition a été réalisée) sur l'effet des traitements HA 47.0 °C/ 20 min et 49.0 °C/ 90 min, les mêmes phénomènes ont été observés. Cependant il semble que le traitement à l'air chaud puisse maintenir davantage les niveaux de polyphénols totaux dans la peau et la chair et des anthocyanes totaux dans la peau des mangues exposées au soleil que le traitement par immersion dans de l'eau chaude. Ces résultats méritent cependant d'être confirmés, mais quoiqu'il en soit il est clair que la capacité antioxydante totale de tous les tissus (peau et chair) est réduite après tous les types de traitements à la chaleur expérimentés.

5.2.4 Effet de l'heure de récolte

L'heure de récolte et l'exposition des fruits n'ont pas d'incidence significative sur la capacité antioxydante totale (6000 à 9100 mg TEAC/ 100 g de MF) et la teneur en polyphénols totaux (650 à 1100 mg GAE/ 100 g de MF) sur la peau des mangues du cv. Reynal, bien qu'une tendance montre des niveaux de la capacité antioxydante totale légèrement plus élevés pendant les premières heures du matin (1 h et 6 h quelle que soit l'exposition) et ce pour les mangues exposées au soleil (tableau en **annexe 17** et **figure 66**). Comme démontré précédemment, la teneur en anthocyanes totaux est *quasi* nulle dans la peau des mangues à l'ombre. La teneur en anthocyanes totales de la peau des mangues exposées au soleil est significativement plus élevée à partir de 6 h du matin (0.52 mg de cyanidin-3-glucoside/ 100g de MF). Après une légère décroissance, elle va se maintenir en moyenne à 0.35 mg de cyanidin-3-glucoside/ 100 g de MF) pendant toute la journée qui suit. Les teneurs en

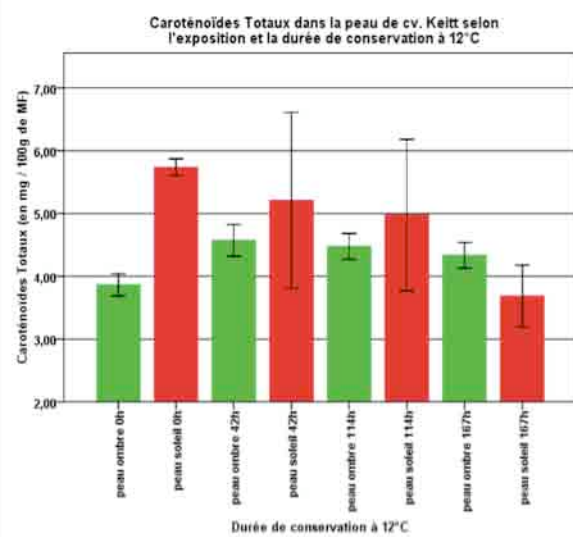
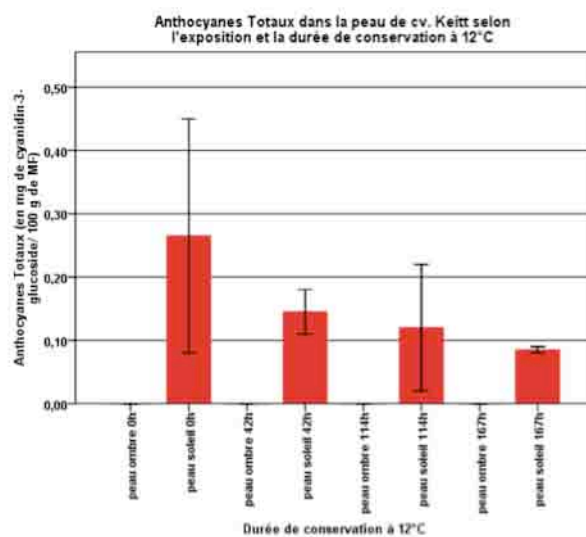
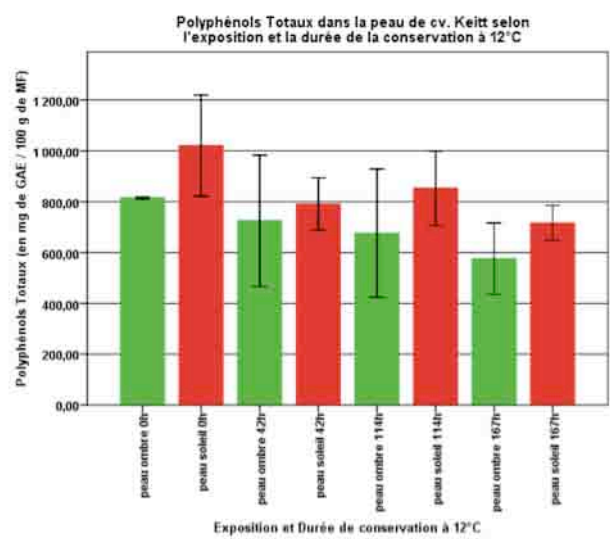
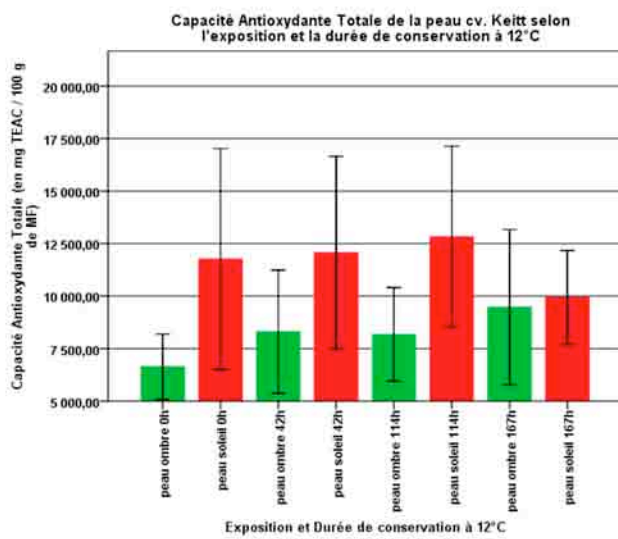
caroténoïdes de la peau des mangues cv. Reynal varient considérablement d'une journée à l'autre (de 4 à 6.5 mg/ 100 g de MF). Elles peuvent être beaucoup plus importantes (plus de 50 %) dans la peau des mangues au soleil pendant la nuit (1 h du matin) et décroître légèrement dans la journée. De même la teneur en caroténoïdes dans la peau des mangues au soleil tend à être sensiblement plus élevée.

Le bilan qui découle de toutes ces analyses de la peau des mangues du cv. Reynal et que la teneur en antioxydants est légèrement plus élevée si les fruits sont exposés au soleil. L'heure de récolte ne semble pas avoir un effet majeur, mais cependant des valeurs légèrement supérieures sont observées pendant la nuit, en l'absence de rayonnement et par des températures plus fraîches.

Le tableau en **annexe 17** montre que la capacité antioxydante dans la chair des mangues est nettement moins élevée que dans la peau et va varier de 70 à 120 mg TEAC/ 100g de MF, soit en moyenne quatre vingt fois moins. La teneur en polyphénols totaux est également relativement faible, douze fois inférieure à celle mesurée dans la peau (65 à 100 mg GAE / 100 g de MF). La teneur de anthocyanes totaux est *quasi* nulle, et les caroténoïdes sont peu présents (0.6 à 1 mg/ 100 g de MF). Aucune différence significative n'est observée dans la teneur en ces différents composés entre deux expositions, à l'ombre ou au soleil. A l'inverse des résultats obtenus sur la peau, à l'exception de la capacité antioxydante totale qui est légèrement plus élevée pendant la nuit, aucun cycle diurne n'a pu être observé pour les autres paramètres.

5.2.5 Effet de durée de conservation à 12 °C

Le tableau en **annexe 18** et les **figures 67** et **68** montrent que la conservation à 12 °C n'a pas d'incidence significative sur la capacité antioxydante et les teneurs en polyphénols, anthocyanes et caroténoïdes totaux que ce soit dans la chair ou dans la peau des mangues du cv. Keitt exposées ou non au soleil. Toutefois, plus la durée de conservation est longue, plus une légère décroissance de ces paramètres est observée, plus particulièrement pour les mangues au soleil, sans pour autant que les valeurs ne soient significativement différentes entre elles.



■ peau ombre ■ peau soleil

Figure 67. Capacité antioxydante, polyphénols, anthocyanes, caroténoïdes totaux de la peau du cv. Keitt selon la durée de conservation à 12 °C (0, 42, 114 et 167 h). Les barres d'erreur représentent l'erreur standard à la moyenne ± 1 .

5.2.6 Discussion

Effet du cultivar

La capacité antioxydante totale et la teneur en polyphénols totaux varient d'un cultivar à un autre (Berardini *et al.*, 2005). La capacité antioxydante de la peau du cv. Keitt est de 25 % supérieure et celle de la chair de 30 % supérieure à celles mesurées pour le cv. Reynal. Mais le ratio reste pratiquement le même, à savoir que la capacité antioxydante de la peau pour ces deux cultivars (respectivement 6500 à 9200 mg TEAC/ 100 g de MF) est soixante quinze à quatre vingt fois supérieure à celle de la chair (respectivement 80 à 120 mg TEAC/ 100g de MF). Kim *et al.* (2007) mesurent une capacité antioxydante de la pulpe du cv. Tommy Atkins vert mature de 135.9 mg TEAC/ 100 g de MF. Nos résultats sont plus faibles mais il faut tenir compte de la méthode utilisée pour les quantifications (Lako *et al.*, 2008) et des différences liées au cultivar (Prior et Cao, 2000). Les récents travaux de recherche ont été plus orientés sur la qualité nutritionnelle et les propriétés antioxydantes de la pulpe afin de prévenir les maladies dégénératives (Lako *et al.*, 2007). C'est pourquoi peu d'informations sont disponibles dans la littérature sur les antioxydants de la peau, portion non comestible pour permettre une comparaison dans des conditions d'expérimentations similaires.

Les résultats obtenus sur les polyphénols totaux dans la chair des mangues des cv. Reynal et Keitt respectivement, 80 et 120 mg GAE/ 100 g de MF, sont en accord avec ceux qui sont présentés dans les références bibliographiques. Ces dernières citent des teneurs entre 50 et 150 mg GAE/ 100g de MF pour les cultivars du même groupe floridien mais à un stade mature (Machado Rocha Ribeiro *et al.* 2007). Des teneurs en polyphénols totaux jusqu'à 450 mg GAE/ 100 g de MF ont été mesurées dans la pulpe de variétés indiennes vertes matures (Thanaraj *et al.*, 2009). Ainsi la chair des mangues verte mature serait plus riche en polyphénols que celle des mangues mûres. En effet, les TPP accroissent pendant le développement du fruit et diminuent d'environ 26 % pendant le mûrissement (Kim *et al.*, 2007). Dans la peau des cultivars indiens les polyphénols totaux varient de 800 à 1600 mg GAE/ 100 g de MF selon Thanaraj *et al.* (2009). Nos résultats sur cultivars floridiens (950 mg GAE/ 100g de MF) se situent bien dans cet intervalle. La peau contient dix à douze fois plus de polyphénols totaux que la chair des cultivars étudiés. Ces valeurs dans la pulpe sont moyennes comparativement à d'autres fruits comme le raisin ou la pomme (Bravo, 1998). Par

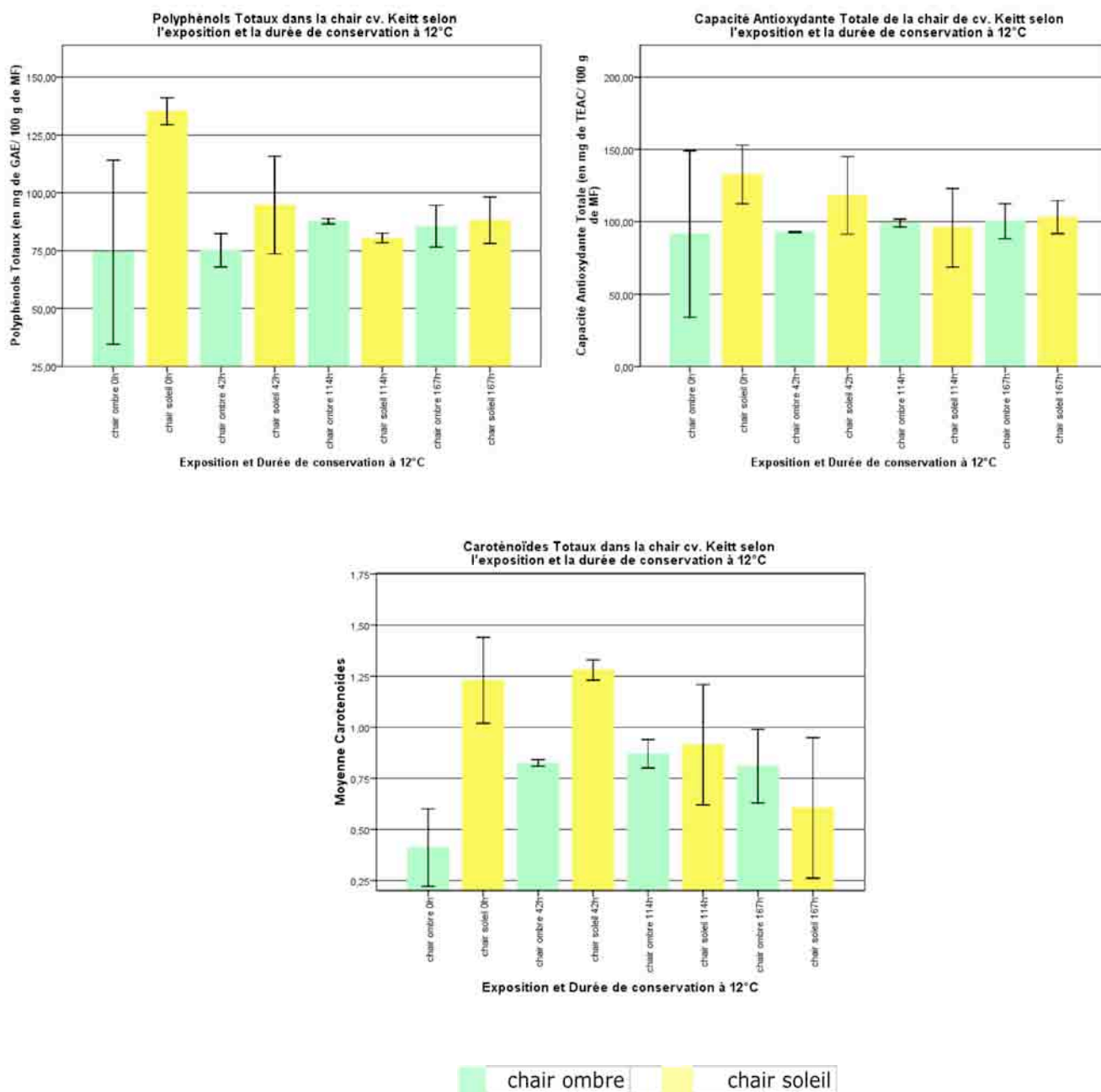


Figure 68. Capacité antioxydante, polyphénols, caroténoïdes totaux de la chair du cv. Keitt selon la durée de conservation à 12 °C (0, 42, 114 et 167 h). Les barres d'erreur représentent l'erreur standard à la moyenne ± 1 .

contre les teneurs de la peau sont considérées comme importantes. En effet, même avec des valeurs mesurées plus faibles (par HPLC) de xanthones et de flavonols (100 à 500 mg/ 100 g de MF) dans la peau de différents cultivars de mangues, Berardini *et al.* (2005) considèrent que la peau des mangues est une source riche en polyphénols.

Malgré des valeurs similaires de polyphénols totaux dans les tissus des cv. Keitt et Reynal, leurs capacités antioxydantes diffèrent et suggèrent alors que d'autres métabolites pourraient co-agir de façon spécifique pour chacun des cultivars. Mais les fortes corrélations entre le TPP et le TEAC ($r = 0.864$ pour le cv. Reynal et $r = 0.874$ pour le cv Keitt) démontrent que les polyphénols totaux y contribueraient de façon importante. Ces résultats confortent ceux de Kim *et al.* (2007).

Des caroténoïdes sont également présents dans la peau des mangues et contribuent à la coloration jaune/orange. Mais certains caroténoïdes et plus particulièrement la rhodoxanthine a une coloration rouge. Cependant aucune référence n'a été trouvée quant à leur présence dans la peau des mangues. Ainsi, la coloration rouge de la peau des mangues et plus particulièrement celle de la peau des fruits qui sont exposées à la lumière est essentiellement due aux anthocyanes (Whiley et Schaffer, 1997). Nos analyses n'ont pas pu détecter d'anthocyanes dans la chair des mangues mais seulement dans la peau où elles peuvent atteindre 0.4 mg cyanidin-O-glucoside/ 100 g de MF pour les deux cultivars. Ces teneurs sont en accord avec les valeurs mesurées par HPLC par Berardini *et al.* (2005) : elles varient de 0.02 à 0.37 mg/ 100 g de MS dans la peau des mangues floridiennes colorées. Ils en concluent que la mangue est une pauvre source d'anthocyanes comparativement à d'autres fruits. Les corrélations des anthocyanes totaux avec la capacité antioxydante totale sont significatives ($r=0.568$ pour le cv. Reynal et $r=0.471$ pour le cv. Keitt) mais leurs faibles teneurs pourraient indiquer que leur participation dans la capacité antioxydante totale est relative (Simonetti *et al.*, 1997 ; Woodall et Stewart, 1998 ; Pelligrini *et al.*, 2000). Par ailleurs Marrs *et al.* (1995) soulignent le fait que les anthocyanes sont contenus dans les vacuoles du cytoplasme des cellules, qu'ils ne sont pas en contact direct avec les ROS et que d'autres antioxydants du cytosol ou attachés à des organites cellulaires pourraient être plus efficaces. Cependant d'autres travaux cités dans la synthèse bibliographique de Tripoli *et al.* (2007) sur *Citrus sp.* démontrent que dans le jus d'oranges sanguines, la capacité antioxydante totale est fortement influencée par la teneur en polyphénols et plus particulièrement les anthocyanes qui, en forte quantité, pigmentent la pulpe en rouge. En effet, Verdaguer *et al.* (2003) suggèrent que les

antioxydants hydrophiliques agissent directement en réduisant les ROS. Ces composés doivent alors être produits en grande quantité pour être efficaces. Ainsi leur contribution relative à la capacité antioxydante pourrait varier en fonction du génotype, de leur localisation dans les tissus et de leur teneur. Mais la contribution des caroténoïdes dans la capacité oxydante totale, de par leur habilité à dissiper l'énergie lumineuse et à piéger les ROS (Frank *et al.*, 1999) ne doit pas être négligée. Mais aucune variation significative de ces caroténoïdes n'a été observée entre la peau des mangues au soleil et celle des mangues à l'ombre bien qu'une tendance de valeurs légèrement plus fortes existe pour la peau des mangues au soleil.

A l'inverse de la peau, la coloration de la pulpe des mangues est essentiellement due à une synthèse de caroténoïdes qui intervient à la fin de la maturation et pendant le mûrissement (Kader, 2002 ; Machado Rocha Ribeiro *et al.*, 2007). Il est probable, qu'à notre stade de récolte, vert mature, les teneurs en caroténoïdes soient très faibles dans la pulpe. Cependant nos résultats qui s'échelonnent entre 0.7 et 1.2 mg/ 100 g de MF sont en accord avec ceux Hymavathi et Khadher (2005) qui observent des teneurs de 0.8 à 13 mg/ 100g de MF en fonction des cultivars mais sur des mangues mûres. Bhaskarachary *et al.* (1995) mentionnent des teneurs de 2.1 mg/ 100g de MF sur mangues mûres et concluent que la mangue est riche en caroténoïdes et plus particulièrement en β -carotène. Mais la teneur en β -carotène diffère selon les variétés (Talcott *et al.*, 2005) : la teneur en caroténoïdes de la peau (4.2 mg/ 100 g de MF) est de trois à six fois supérieure à celle de la chair pour, respectivement, les cv. Reynal et Keitt et est donc importante. Présents dans l'épicarpe, ces composés pourraient jouer un rôle de dissipation de l'énergie en surplus des photosystèmes, empêcher la formation des ROS (Verdaguer *et al.*, 2003) et ainsi contribuer à l'activité antioxydante totale davantage que celle de la pulpe. En effet, les corrélations de la teneur en caroténoïdes avec la capacité antioxydante sont significatives ($r=0.794$ pour le cv. Reynal et $r=0.839$ pour le cv. Keitt).

Effet de l'ensoleillement

De nombreuses études démontrent que la synthèse et l'accumulation des antioxydants (plus particulièrement des flavonoïdes), contribuant à une forte capacité antioxydante totale, sont influencées par le stade de maturité et par d'autres facteurs environnementaux tel que l'ensoleillement (Wang *et al.*, 2000 ; Reay et Lancaster, 2001 ; Merzlyak *et al.*, 2002). Face aux stress oxydatif et thermique induits par ce dernier, les antioxydants participeraient aux

mécanismes de protection des cellules (Flint et *al.*, 1985). Mais, dans nos expérimentations, l'exposition au soleil n'a pas modifié de façon significative la capacité antioxydante totale, les polyphénols ni la teneur en caroténoïdes de la peau et de la chair des deux cultivars étudiés. Cependant les résultats montrent une tendance à l'élévation des polyphénols, des caroténoïdes et de la capacité antioxydante dans la peau et la chair du cv. Keitt. Ainsi, les cultivars ne répondent pas de façon identique à l'ensoleillement, par contre ils montrent de façon similaire et significative une présence d'anthocyanes dans la peau des mangues au soleil alors que dans celle des mangues à l'ombre, elles sont *quasi* absentes.

Cette grande variabilité dans les données est certainement due aux historiques climatiques qui ne sont pas les mêmes, aux stades de maturité et à la pigmentation des fruits qui varient pour un même ou entre cultivars. Ces différences vont conditionner leur adaptation à un fort ensoleillement. En effet, Solovchenko et Schmitz-Eiberger (2003) observent sur les faces exposées des pommes du cv. Braeburn à fort taux d'anthocyanes, une accumulation massive de flavonoïdes comparativement aux faces non exposées. Par ailleurs ils notent également que le cultivar cv. Granny Smith à peau verte dépourvue d'anthocyanes n'a pas le même mécanisme d'adaptation à un fort ensoleillement ; sa teneur en chlorophylle et en caroténoïdes diminuent ce qui a pour conséquence de limiter l'énergie lumineuse dans les tissus. Pourtant dans le cadre de notre étude, les quantités d'anthocyanes dans la peau des fruits au soleil sont similaires pour les cv. Reynal et Keitt mais elles n'induisent pas d'accumulation de polyphénols, ni de caroténoïdes ou de modification de la capacité antioxydante totale. Ces observations suggèrent que l'équilibre entre ces différents composés phytochimiques serait davantage complexe et qu'effectivement l'étude de la composition des pigments spécifiques à chaque cultivar (Berardini et *al.*, 2005) pourrait être intéressante pour trouver des éléments d'explications quant au rôle de photo inhibition et photo protection de chacun.

Effet des radiations UV

La filtration des rayonnements UV-A et UV-B permet de favoriser les polyphénols totaux de 18 % et les anthocyanes totaux de 68 % dans la peau des mangues du cv. Reynal exposées au soleil sans pour autant faire varier la capacité antioxydante totale.

Ainsi une forte synthèse d'anthocyanes peut se faire sans radiation UV et relativise les observations de Brandt et *al.* (1995) selon lesquels la production d'anthocyanes et de phénols simples, ainsi que celle des flavonoïdes (Li et *al.*, 1993 ; Stapleton et Walbot, 1994 ; Landry et *al.*, 1995) seraient fortement influencées par les radiations UV. Par ailleurs, Mendez et *al.* (1999) confirment par l'apport d'une source supplémentaire artificielle d'UV-B que les tissus de la plante carnivore *Pinguicula vulgaris* pouvaient avoir des teneurs deux fois plus importantes d'anthocyanes. En effet, les anthocyanes absorbent dans le spectre visible mais également entre 270 et 290 nm dans le spectre des UV (Mendez et *al.* 1999).

Cependant Woodall et Stewart (1998) estiment que compte tenu que le spectre d'absorption des UV-B se situe entre 290 et 315 nm, à moins d'être acylées avec des acides organiques aromatiques, l'absorbance des anthocyanes serait très relative dans le spectre des UV où d'autres phénols sont plus efficaces, comme les quercetin-glycosides (Solovchenko et Schmitz-Eiberger, 2003). Ainsi leurs rôles de photo inhibition et de photo protection pourraient concerner davantage la forte intensité de la lumière. L'induction des anthocyanes pourrait être régulée par le stress oxydatif d'une forte lumière dans le bleu vert du spectre du visible.

Par ailleurs d'autres travaux ont démontré que les anthocyanes pouvaient être synthétisés à certains stades de développement physiologiques tels que la maturation (Tripoli et *al.*, 2007 sur *Citrus* sp.) ou le mûrissement (synthèse bibliographique de Steyn et *al.*, 2002) ou encore la fertilisation en P et N (Gershenson, 1983).

Dans notre étude, le filtre anti UV a permis de favoriser la teneur en caroténoïdes dans la chair. Cependant une élévation de température interne et un maintien de cette dernière ont été constatés dans les mangues protégées par un filtre anti UV. Ce gain de chaleur, probablement dû à une moindre aération et au transfert de cette chaleur par conduction à travers les tissus de la chair pourrait être suffisant pour induire une synthèse *de novo* des caroténoïdes dans la chair.

Ainsi les mangues exposées au soleil avec ou sans filtre anti UV n'auront pas une capacité antioxydante plus élevée que celles à l'ombre malgré des teneurs en anthocyanes, et dans une moindre mesure des teneurs en polyphénols dans la peau et caroténoïdes dans la peau et dans la chair, plus élevées. Ces résultats rejoignent les hypothèses selon lesquelles ces deux

antioxydants auraient un rôle relatif dans la capacité antioxydante totale (Kim *et al.*, 2007). Par ailleurs, Steyn *et al.* (2002) suggèrent que l'accumulation d'anthocyanes pourrait être alors un système de défense des plantes à court terme face à des changements dans leur développement ou leur environnement avant de laisser la place à des stratégies de défense plus efficaces et plus durables : la synthèse de d'autres flavonoïdes incolores ou d'autres mécanismes favorisant leur acclimatation.

Effet des traitements à la chaleur

Le traitement HWT est néfaste pour la capacité antioxydante totale, les polyphénols et anthocyanes totaux de la peau des mangues du cv. Reynal et plus particulièrement celles qui ont été exposées au soleil. Par contre il n'aura pas effet majeur sur la capacité antioxydante totale et les polyphénols de la chair. L'absence de références bibliographiques sur les effets du traitement HWT sur les antioxydants de la peau des mangues ne permet pas de comparaison.

Ainsi le traitement HWT 55.0 °C/ 50 min va induire des réponses différentes selon le type de tissu. Il est fort probable que le transfert convectif (par un contact direct de l'eau chaude sur la peau des fruits) et le transfert conductif (de la chaleur à travers les tissus de la chair) peuvent contribuer à expliquer cette différence dans la réponse des tissus. Par ailleurs sur la peau des mangues, l'ensoleillement induit des dégâts au niveau de la cuticule et des cellules de l'épiderme. Ces dégâts pourraient être exacerbés par les traitements HWT. Jacobi et Gowanlock (1995) ainsi que Ponce de Léon *et al.* (1997) observent une expansion de la cuticule, l'apparition de microfissures et une désorganisation des cellules sous jacentes de l'épiderme de la peau de mangues qui ont subi le traitement HWT. Hetherington (1997) précise également que si les anthocyanes réduisent la photo inhibition des mangues à la coloration mauve, ces fruits sont également plus sujets au brûlures par rapport aux fruits de cultivars à la peau verte, certainement du fait de leur potentiel à absorber davantage la chaleur. Ces altérations tissulaires et cellulaires pourraient être le support à des hypothèses susceptibles d'expliquer la réduction de la teneur en polyphénols et anthocyanes et la capacité antioxydante totale des mangues traitées et, plus particulièrement, de celles exposées au soleil. Ainsi les teneurs en polyphénols et anthocyanes totaux et la capacité antioxydante

totale des mangues protégées des rayonnements UV seront moins affectées sur la peau par le traitement HWT.

Les caroténoïdes n'ont pas été affectés par le traitement HWT. Leur teneur est plus élevée non seulement dans l'épiderme mais également dans le mésocarpe et semble avoir été favorisée par le traitement à la chaleur. En effet Jacobi *et al.* (2001c) observent la même augmentation de la production de ces composés dans la pulpe de mangues traitées à la chaleur. Mais leur distribution dans les tissus des fruits et leur localisation dans les cellules et plus particulièrement dans les chloroplastes suggéreraient cette différence de comportement.

Par ailleurs, nos résultats préliminaires laissent à penser que les traitements HA 47.0 °C/ 20 min et HA 49.0 °C/ 90 min ne diminueraient pas autant que le traitement HWT 55.0 °C/ 50 min, les teneurs en polyphénols et anthocyanes totaux de la peau des mangues. Berardini *et al.* (2005) mesurent dans celle des mangues du cv. Tommy Atkins, soumises à un séchage à l'air de 50.0° C/ 270 min et 70 °C/ 180 min, des différences avec le contrôle non traité, de respectivement, seulement 1 % et 6 % mais que la composition des composés phénoliques individuels changent. Les quantités de mangiférin, quercetin-O-glycosides ont diminué alors que les teneurs des autres xanthones dérivés ont augmenté significativement. Ces auteurs précisent que le stress oxydatif est nécessaire pour la formation de xanthones ce qui a été le cas pendant les traitements à la chaleur. Donc en fonction du contenu phénolique et du régime température-durée du traitement, les polyphénols totaux vont varier dans un sens ou un autre mais il est clair que ces composés réagissent au traitement à la chaleur. Ces observations confortent l'hypothèse qu'une meilleure connaissance de la composition du contenu phénolique et du rôle de chacun des phénols pourraient apporter des éléments explicatifs à ces variations (Berardini *et al.* 2005).

Malgré un traitement HWT 50.0 °C/ 50 min plus sévère, nos résultats concernant la pulpe des fruits sont en accord avec ceux de Kim *et al.* (2007) et ceux de Talcott *et al.* (2005) qui ne constatent aucun changement de la capacité antioxydante totale. Cependant plus récemment, Kim *et al.* (2009) ont observé une décroissance de l'acide gallique et des tannins hydrolysables, ainsi que de la teneur en polyphénols solubles, sur le même cultivar, dans les mêmes conditions mais avec des durées de traitements croissantes. Ils suggèrent alors que c'est la réduction de l'activité enzymatique, l'inhibition de l'amylase, responsable de la dégradation de l'amidon en sucres solubles (Katrodia *et al.*, 1989), ainsi que l'oxydation de la vitamine C (Lee et Kader, 2000) dus au traitement qui pourraient induire cette décroissance

des polyphénols totaux dans la pulpe. Cependant ces différences ne sont pas encore une fois pas suffisantes pour changer la capacité antioxydante totale (Talcott et *al.*, 2005). Pourtant Prior et Cao (2000) constatent que sur certains fruits et légumes, la cuisson peut réduire la capacité antioxydante de 15 % mais des exceptions et des effets inverses ont également été constatés en fonction du type et de la quantité des composés phytochimiques. Ainsi, l'augmentation par la cuisson ou la chaleur de la teneur en α et β carotène des carottes cuites à la vapeur permet d'accroître la capacité antioxydante totale. Toutefois, Castenmiller et *al.* (1999) estiment, par contre, que les traitements à l'eau pourraient provoquer un lessivage des composés antioxydants dans l'eau comparativement à une cuisson par la vapeur et donc réduire la capacité antioxydante. Mais pour les caroténoïdes, la synthèse *de novo* observée suite au traitement HWT a déjà été rapportée par (Jacobi et *al.*, 2001c).

Les conditions de maintien du système de défense antioxydant

L'heure de récolte ne paraît pas avoir d'incidence mais il semble qu'un cycle diurne existe avec des variations sensibles et des valeurs maxima pendant les premières heures de la matinée pour les polyphénols et la capacité antioxydante totaux de la peau et ce aussi bien pour les mangues à l'ombre que pour les mangues au soleil. La capacité antioxydante totale pourrait être plus élevée en l'absence de rayonnement et elle pourrait être maintenue par des températures plus fraîches si celles-ci ne durent pas, comme laissent à penser les résultats de la durée de conservation jusqu'à 167 h. La teneur en anthocyanes totaux pourrait être favorisée par les températures plus fraîches de la nuit suivies de températures moyennes (25 °C) du matin et les fortes températures de la journée suffiraient à la diminuer (synthèse bibliographique de Steyn et *al.*, 2002). Par ailleurs, Merzlyak et *al.* (2002) démontrent que les flavonoïdes accumulés pendant le développement du fruit en pré récolte sont très stables et persistent très longtemps même à l'obscurité pendant la conservation. On peut imaginer qu'en l'absence de stress, les polyphénols ainsi que les anthocyanes totaux sont moins sollicités pour la neutralisation et l'élimination des ROS et les caroténoïdes pour la dissipation de l'excès d'énergie. Dès l'apparition du stress, ces métabolites reprennent leur rôle et leurs niveaux diminuent. Ces variations ne sont observées que dans la peau qui est directement soumise aux stress oxydatifs et thermiques induits par l'ensoleillement comparativement à la chair soumise à une seule augmentation graduelle de température. Il est alors permis de

penser que les mécanismes de protection de chacun des tissus sont spécifiques et que la chair ne répondrait qu'à un stress thermique.

La conservation à 12 °C n'a pas d'incidence significative sur la capacité antioxydante totale, les polyphénols, anthocyanes et caroténoïdes totaux ni dans la peau, ni dans la chair des mangues du cv. Keitt mais la tendance des résultats suggère une possible décroissance de leur teneur avec la durée de la conservation jusqu'à 167 h. Selon plusieurs auteurs, les polyphénols totaux de la pulpe des mangues entières ne sont pas affectés par la conservation à 5 °C pendant 12 jours (Gil *et al.*, 2006) de même la capacité antioxydante des mangues n'a pas été affectée après 20 jours de conservation à 5 °C (Shivashankara *et al.*, 2004).

Nos travaux ont montré que la peau a une capacité antioxydante bien supérieure à celle de la pulpe des mangues et les polyphénols et anthocyanes totaux pourraient y contribuer sans que nous ayons pu toutefois démontrer leur participation effective. L'ensoleillement pourrait légèrement augmenter les polyphénols, et de façon plus importante les anthocyanes, dans la peau et les caroténoïdes dans la chair des mangues, mais cela n'affecte pas de façon significative la capacité antioxydante totale. L'importance d'un cycle diurne se dessine, ce qui se traduit par le fait que pendant l'absence de rayonnement et de fortes températures, ces composés sont moins sollicités. Les anthocyanes sont synthétisés en masse par rapport à un fort rayonnement, même sans UV, ce qui laisse à penser que leur action se situerait plus dans l'absorbance de la lumière vert bleu du spectre du visible et moins dans les UV. Les traitements à la chaleur sont néfastes pour la capacité antioxydante totale, les polyphénols et anthocyanes totaux et bénéfiques pour la synthèse de caroténoïdes dans la peau et dans la chair. La peau des mangues au soleil non protégée par un filtre anti UV pourrait être plus sensible du fait de dégâts physiques sur la peau probablement dus aux rayonnements. Enfin une température de 12 °C n'a pas d'impact sur les antioxydants de la peau et de la chair des mangues dont les niveaux se maintiennent mais ceux-ci peuvent toutefois décroître si la durée de conservation se prolonge.

Ainsi nos résultats tendent à démontrer que la peau pigmentée des mangues aurait des mécanismes de protection plus performants que la chair, en revanche, ce qui pourrait être relié au fait qu'elle subit plus directement les stress oxydatifs et thermiques liés à l'ensoleillement.

CHAPITRE 6

DISCUSSION GENERALE ET PERSPECTIVES

CHAPITRE 6

DISCUSSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'ensoleillement fait partie des stress environnementaux que les fruits, comme les mangues, peuvent subir lorsqu'elles sont encore sur l'arbre, c'est à dire en conditions de pré récolte. En effet, les radiations reçues du soleil engendrent à la fois un stress oxydatif et un stress thermique (Nedunchezian *et al.*, 1992).

Au niveau du fruit, les températures de la peau et de la chair résultent de la combinaison de plusieurs facteurs abiotiques, tels que la température et l'humidité relative de l'air, les radiations émises par le soleil et la vitesse du vent (Schrader *et al.*, 2003). Les températures au niveau du fruit sont également dépendantes du cultivar et de ses caractéristiques (couleur, épaisseur et structure, composition de la peau et de la chair, stade phénologique) mais aussi des conditions de cultures (Ferguson *et al.*, 1998). Dans ce contexte, et en fonction de leurs caractéristiques intrinsèques, les mangues (*Mangifera indica* L.) vont s'adapter à ces conditions défavorables en développant des mécanismes physiologiques de défense vis-à-vis de ces stress en mettant notamment en place un système de défense antioxydant associé à une expression de protéines de choc thermique.

Les recherches qui ont été menées dans le cadre de ces travaux de thèse ont eu pour but de vérifier si ces systèmes de protection mis en place par les tissus des mangues, soumises à l'ensoleillement, pourraient contribuer à une meilleure tolérance des fruits aux traitements à la chaleur post récolte.

L'ensoleillement en Nouvelle-Calédonie peut-il permettre l'acquisition d'une thermotolérance des mangues ?

L'étude menée dans les conditions de culture de la mangue en Nouvelle-Calédonie a permis de démontrer que les températures moyennes journalières internes des mangues exposées au

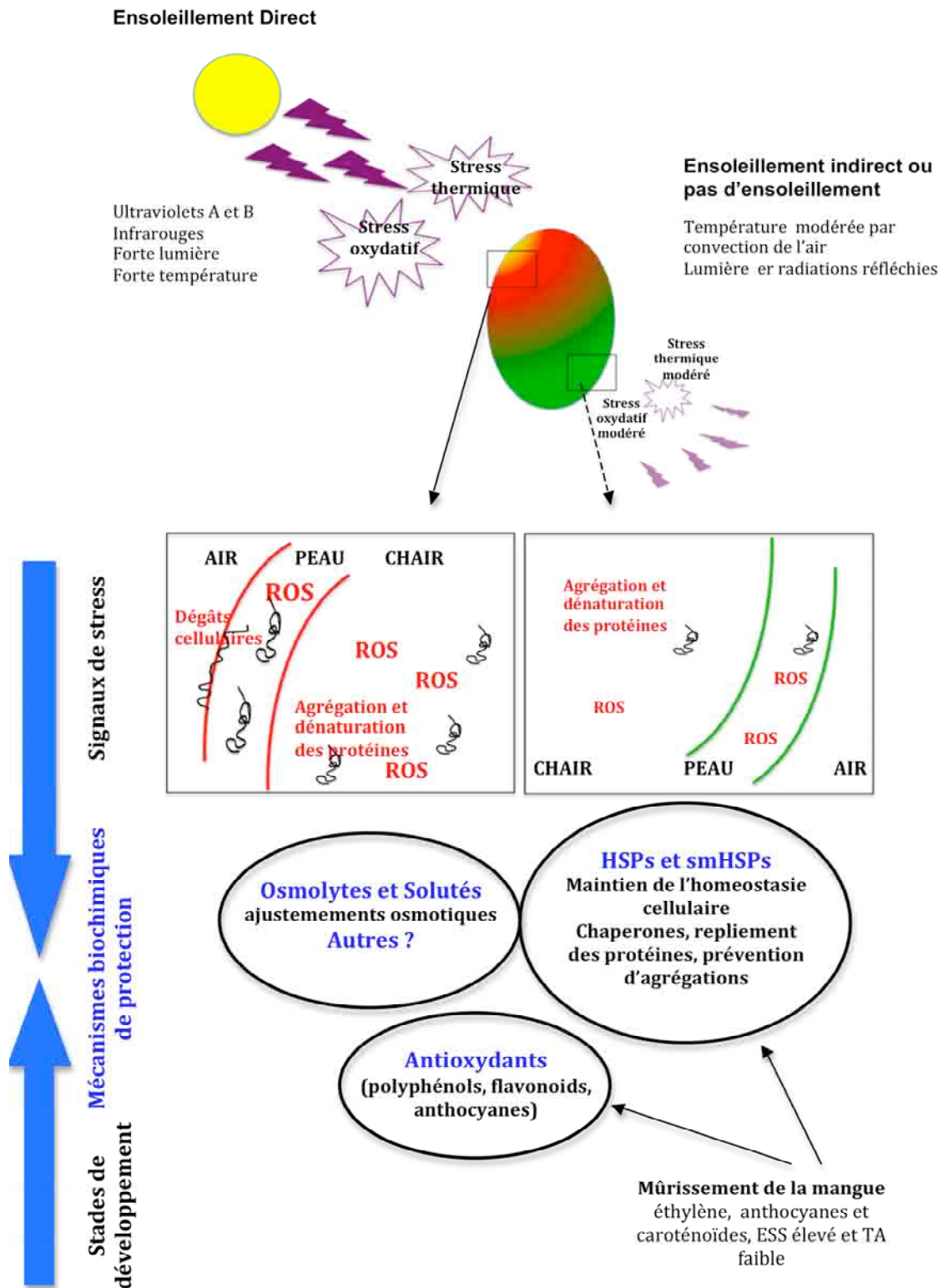


Figure 69. Schéma général et récapitulatif de l'acquisition d'une thermotolérance des mangues au champ.

soleil peuvent atteindre des températures de 38 à 42 °C. Cette gamme de températures correspond aux valeurs utilisées pour effectuer l'endurcissement des fruits, c'est à dire pour leur conférer une thermotolérance, en vue de traitements en après récolte (Jacobi et *al.*, 2001a). Ces températures, qui correspondent à un stress modéré, sont comparables à celles qui ont permis l'acquisition d'une thermotolérance en situation de pré récolte (Woolf et Ferguson, 2000).

Lors de la mesure des températures internes des fruits (**chapitre 2**), nous avons démontré que par fort ensoleillement et selon la position des fruits sur l'arbre, les températures maximales mesurées à l'intérieur du fruit, comme sur la peau, pouvaient être nettement plus élevées lors d'une exposition directe au soleil. Ces températures mesurées ont atteint jusqu'à 47 °C pour la chair, voire 52 °C sur la peau. Ces résultats sont comparables à ceux obtenus sur la pomme (Ferguson et *al.*, 1998) ou encore l'avocat (Woolf et *al.*, 1999b), avec des maxima de températures internes de 45 °C.

Nos conditions d'ensoleillement en climat subtropical, présentent, cependant, des températures de l'air plus élevées, des amplitudes thermiques moins importantes ainsi que des fréquences et durées d'insolation journalières différentes d'un climat tempéré. Il n'est donc pas exclu d'admettre que la thermotolérance, à travers les mécanismes biochimiques mis en place (**chapitre 5**), en soit affectée et ainsi qu'elle puisse induire des réponses physiologiques différentes pour chaque cultivar, face au traitement HWT 55.0 °C/ 50 min, décrites dans le **chapitre 4**.

Des mécanismes de protection sont ils mis en place au niveau des mangues soumises à l'ensoleillement ? Si oui, sont ils différents selon les niveaux des stress perçus par les tissus des différents cultivars à un stade vert mature ?

Les mécanismes de protection qui ont pu être mis en évidence sont différents selon les niveaux d'ensoleillement, mais également selon le cultivar et le tissu considéré (peau ou chair). En effet, les HSP17.4 ont été détectées en quantité beaucoup plus élevée et la capacité antioxydante totale, à travers les TPP, TAT et caroténoïdes, est plus importante dans la peau que dans la chair sous jacente et, plus particulièrement dans la peau et la chair de la face exposée au soleil des mangues. Ces observations sont en accord avec Berardini et *al.* (2005),

Machado Rocha Ribeiro et *al.* (2007) et Thanaraj et *al.* (2009) pour le système de défense antioxydant et avec ceux de Ferguson et *al.* (1998), Chen et *al.* (2009) sur pomme, Woolf et *al.* (1999a, 2000) sur avocats pour les HSPs.

C'est donc sur la peau de la face exposée au soleil des mangues que les mécanismes de protection semblent être les plus actifs et notamment sur la tache colorée du fruit, qui est la plus directement soumise aux radiations du soleil, sous l'action concomitante d'un stress dû aux fortes radiations et d'un stress thermique (Nedunchezian et *al.*, 1992). A l'inverse, la chair des mangues, protégée par la peau, n'est pas directement soumise aux radiations du soleil. Comme Ferguson et *al.* (1998), nous avons observé que la chair des mangues semble davantage exposée à un stress thermique induit à la fois, par le cycle diurne des températures de l'air, par l'ensoleillement ainsi que par la capacité du fruit à absorber la chaleur. La décroissance des taux d'HSP17.4, dans la pulpe de la face exposée au soleil du cv. Cogs Hall, au fur et à mesure de la diminution de températures internes conforte cette hypothèse. Ces températures internes des fruits pourront être, cependant, influencées par la pigmentation rouge de la peau comme le suggère la différence des niveaux d'HSP17.4 dans la chair sous jacente de la zone centrale de couleur jaune et celle de la zone périphérique rouge de la tache colorée du cv. Keitt. En effet, la meilleure absorbance des IR, par les anthocyanes, peut induire dans les tissus des fruits, une élévation de température (Retig et Kedar, 1967 ; Hopp, 1947 ; Barber et Sharpe, 1970 ; Lipton et O'Grady, 1980). Ainsi, compte tenu de ces éléments, il n'est pas surprenant de constater que la chair des mangues a une capacité antioxydante totale beaucoup plus faible que celle de la peau des mangues, cette dernière étant potentiellement soumise à de forts stress abiotiques, même si le stress thermique engendre également un stress oxydatif (Larkindale et Knight, 2002).

Quels que soient les cultivars que nous avons étudiés, les paramètres TPP, les TAT (présents seulement dans la peau), les caroténoïdes totaux et la capacité antioxydante totale des fruits se sont révélés être légèrement plus élevés dans les mangues au soleil que dans celles à l'ombre. Les différences observées ne sont cependant pas toujours significatives. De la même façon, Chen et *al.* (2008) observent une quantité d'antioxydants plus importante dans la peau des pommes du cv. Fuji exposées au soleil. Cependant chez la mangue, c'est surtout une plus forte expression d' HSP17.4 qui distingue les tissus des fruits qui sont exposés au soleil.

Dans les fruits à l'ombre, ces HSP17.4 sont pratiquement absentes dans la peau du cv. Keitt ainsi que dans la chair des cv. Keitt et Cogs Hall alors qu'elles ont été détectées dans la peau du cv. Haden et dans la chair des cv. Reynal et Palmer. Le niveau d'HSPs dans les tissus des fruits à l'ombre de ces cultivars est cependant plus faible que dans ceux des fruits exposés au soleil. Des comportements similaires ont été observés en climat tempéré à la fois sur pomme par Ferguson *et al.* (1998) et sur avocat par Woolf *et al.* (1999a ; 2000). Par faible ensoleillement et à des niveaux de températures internes de fruits entre 32 °C et 36 °C, la détection des HSP17.4 (absence ou faible présence), dans les tissus des mangues va ainsi varier selon les cultivars. Ces résultats suggèrent que la perception du stress est intrinsèque au cultivar (Wahid *et al.*, 2007). Les tissus qui ne sont pas exposés au soleil sont épargnés de l'influence directe des fortes radiations mais peuvent être sensibles à la lumière indirecte. Certains cultivars tels que les cv. Keitt et Cogs Hall, pourraient ne pas être en condition de stress à des températures internes de 36 °C, alors que d'autres, les cv. Haden, Reynal et Palmer, le seraient. Ce stress serait plus modéré que celui des fruits exposés au soleil, qui subissent de plus fortes températures, mais il serait cependant suffisant pour induire une production HSP17.4. Ainsi à la différence d'un climat tempéré, un climat subtropical caractérisé à la fois par des températures de l'air et des fruits plus élevées, et par une plus faible amplitude journalière pourrait relativiser l'expression de cette thermotolérance (Woolf et Ferguson, 2000 ; Woolf *et al.*, 2000). Ces différences climatiques peuvent avoir pour résultat une adaptation progressive de certaines espèces ou, dans le cas de nos cultivars, elles se traduiraient par une moindre réponse des fruits exposés au soleil par rapport à ceux situés à l'ombre.

Ces observations confirment la capacité qu'ont les fruits, au champ, à mettre en place des mécanismes biochimiques de protection lorsqu'ils sont soumis aux stress thermique et oxydatif induits par l'ensoleillement. Toutefois, compte tenu de la sensibilité intrinsèque de chaque cultivar vis-à-vis des stress abiotiques, il est difficile de définir des seuils ou des intervalles de températures applicables à tous pour assurer la mise en place de mécanismes de protection (Wahid *et al.*, 2007).

Quoiqu'il en soit, nos résultats démontrent, que de façon complémentaire à l'expression de HSPs, un système de défense antioxydant existe dans les tissus des mangues et qu'il est différent selon les cultivars.

La capacité antioxydante totale et la teneur en TPP du cv. Keitt sont plus élevées que celles de cv. Reynal même si les différences ne sont pas significatives. Il est donc possible que d'autres antioxydants, tels que des flavonoïdes non colorés, puissent être présents dans les tissus du cv. Keitt, lui conférant ainsi une meilleure tolérance (Solovchenko et Schmitz-Eiberger, 2003). Dans les tissus non exposés des cv. Keitt et Cogs Hall pour lesquels aucune voire une très faible quantité HSPs a été détectées, la capacité antioxydante totale, de la peau et de la chair, serait suffisante pour protéger les cellules de la lumière et de la chaleur qu'ils reçoivent des radiations solaires. Ainsi, contrairement aux cv. Haden, cv. Palmer et cv. Reynal, une expression significative de HSP17.4 ne serait pas nécessaire pour ces cultivars.

Ces différences de comportement pourraient être liées à la pigmentation de la peau. En effet, une faible concentration d'anthocyanes a été détectée dans la peau non exposée des fruits du cv. Reynal, alors que dans celle du cv. Keitt, elles sont *quasi* absentes. Le niveau des pigmentations des cv. Haden et Palmer n'a pas été mesuré ; mais comme le cv. Reynal, ces cultivars sont caractérisés par une large tache de pigmentation rouge sur la peau exposée des fruits au soleil. Cette dernière recouvre jusqu'à 50 % de la surface totale des fruits exposés au soleil. Par ailleurs, le cv. Palmer se reconnaît au changement de coloration (vert au rouge/mauve) de son fond pendant la maturation et le mûrissement. Il faut noter que la surface et l'intensité de la coloration des fruits varient d'une saison de production à l'autre. Ceci confirme bien qu'ils répondent aux conditions de pré récolte et que ces changements ne sont pas seulement inhérents au cultivar.

En effet, pour certains cultivars, même si le fruit n'est pas directement exposé au soleil, sa coloration pourra être induite par les températures et la lumière indirecte reçue. Ainsi, une légère teinte mauve peut affecter le fond des mangues de ces cultivars sous la canopée. Toutefois, même si les concentrations en anthocyanes sont faibles dans la peau des mangues (Berardini et al., 2005) il est également important de prendre en compte la localisation et la distribution (surface de coloration rouge) des anthocyanes. En effet la synthèse d'anthocyanes est une réponse particulière et autonome à un niveau cellulaire individuel (Nick et al., 1993). Elle induit une pigmentation rouge dans les tissus directement ou partiellement exposés aux

radiations du soleil tels que l'épicarpe et à certains stades de développement du fruit (Whiley et Schaffer, 1997 ; Steyn *et al.*, 2002).

Les résultats obtenus sur le cv. Reynal montrent que la quantité d'anthocyanes pourrait augmenter en l'absence *quasi* totale des UV, seulement avec la lumière bleu vert du visible et les IR. Ces données sont en accord avec celles citées par Chalker-Scott (1999) qui mentionne que sous de fortes radiations solaires, les UV-B peuvent inhiber la synthèse d'anthocyanes en produisant des dégâts dans les cellules. Par leur pigmentation rouge, ces anthocyanes favoriseraient également l'élévation de température interne dans la chair sous jacente par une meilleure absorbance des IR, ce qui a pu être mis en évidence dans nos résultats sur la mangue du cv. Sensation, et qui a précédemment été indiqué par de nombreux auteurs sur d'autres fruits (Retig et Kedar, 1967 ; Hopp, 1947 ; Barber et Sharpe, 1970 ; Lipton et O'Grady, 1980).

Steyn *et al.* (2002) suggèrent que, de par leur rôle de photo protection dans les tissus végétatifs des plantes, les anthocyanes peuvent dissiper l'excès d'énergie lumineuse arrivant à la surface du fruit et éliminer les ROS par piégeage. Ainsi, la formation des anthocyanes pourrait être la première stratégie mise en œuvre par le fruit en situation de stress pour la protection des tissus. Le développement d'anthocyanes sur la peau pendant le développement et la maturation du fruit au champ est une caractéristique intrinsèque de certains cultivars. Cependant, l'induction d'anthocyanes pourrait également constituer un bon indicateur de la réponse des fruits à un stress oxydatif lié à l'ensoleillement et donc de la sensibilité intrinsèque de chacun des cultivars en conditions de pré récolte. C'est ce qui a été observé de façon similaire, mais dans les tissus végétatifs, par Chalker-Scott *et al.* (1999) et par Steyn *et al.* (2002). Ainsi ces composés ne seraient induits, de façon localisée dans les tissus de chaque cultivar, que lorsqu'ils sont nécessaires (Steyn *et al.*, 2002 ; Solovchenko et Schmitz-Eiberger, 2003). Toutefois ce mécanisme de protection ne serait que transitoire et il pourrait arriver vite à ses limites, du fait de leur relativement faible tolérance aux fortes températures (Chalker-Scott *et al.*, 1999) et aux fortes radiations du soleil.

Steyn *et al.* (2002), estiment que ce mécanisme pourrait déjà constituer la réponse à court terme face à un stress et que d'autres stratégies pourraient se mettre en place à plus long terme telles que la synthèse de polyphénols et plus particulièrement celle d'autres flavonoïdes plus efficaces. C'est ce que démontrent Solovchenko et Schmitz-Eiberger (2003) sur pomme. Une autre réponse pourrait être l'expression de HSP17.4 comme le notent Puigderrajols *et al.*

(2002) sur embryons de chêne liégeux. Nos résultats vont tout à fait dans ce sens. De larges portions de peau rouges sur la mangue au soleil et la présence d'anthocyanes dans la peau des mangues à l'ombre pourraient signaler une sensibilité intrinsèque des cultivars au stress oxydatif lié aux conditions d'ensoleillement. Ainsi, la plus grande surface colorée de la peau des cv. Reynal et Palmer, pourrait témoigner d'une plus grande sensibilité de ces cultivars au stress oxydatif, comparativement aux cv. Keitt et Cogs Hall.

Cependant, pour le cv. Keitt, une teneur en TPP et une capacité antioxydante totale, plus élevée, a été observée par rapport aux différents cultivars. Ceci pourrait suggérer que différents mécanismes dépendant de la coloration de la peau peuvent se mettre en place. Ainsi, pour les parties plus vertes de pomme, Solovchenko et Schmitz-Eiberger (2003) notent une réduction de la chlorophylle et des caroténoïdes. Ils suggèrent, qu'elle permettrait de limiter la quantité d'énergie pouvant être absorbée par la peau des fruits. Dans le cadre de cette étude, la peau des mangues cv. Keitt a en effet une teneur en caroténoïdes significativement plus faible que les mangues au soleil. Si les teneurs en TPP et la capacité antioxydante totale ne sont pas significativement différentes entre cultivars et entre expositions, cela pourrait être dû à un équilibre fragile entre les différentes synthèses et inhibitions des antioxydants face aux situations de stress (Foyer et *al.*, 1997). L'identification plus précise des polyphénols et leurs variations dans les tissus pendant le stress pourraient être très informatives mais elles sont probablement spécifiques à chaque cultivar.

Ainsi des mécanismes biochimiques mis en place dans les tissus des mangues en pré récolte permettent une meilleure tolérance aux conditions climatiques extrêmes auxquels elles peuvent être soumises et confortent la théorie du GAS syndrome décrite par Leshem et *al.* (1998).

Persistance de ces mécanismes biochimiques de protection en pré et après récolte

Sur une période de 24 h, il est probable que la couleur, la chimie et la maturité ne varient pas de façon significative. Pourtant nos résultats démontrent qu'au champ l'expression de ces mécanismes de protection et, plus particulièrement, la production de HSP17.4 et, dans une moindre mesure, la capacité antioxydante totale comme les antioxydants, varient selon le

cycle diurne. Cette expression est plus importante pendant les heures de la nuit quand les stress de température et de la lumière ont disparu, mais également dans les tissus exposés à l'ensoleillement comparée à ceux non exposés. Ceci a été démontré pour la chair et suggéré pour la peau des mangues mais les cycles semblent légèrement décalés dans le temps. Des observations similaires ont été faites par Ferguson et *al.* (1998) et Woolf et *al.* (1999b) pour la transcription d'ARNm, mais à l'inverse de nos travaux, ils n'ont pas cherché la présence effective des protéines HSP17.4 au final. Cependant Woolf et *al.* (1999b) démontrent une synthèse *de novo* de HSP17.4, par marquage radioactif avec de la méthionine S³⁵, dans la chair d'avocats pendant la nuit. Ces auteurs suggèrent alors que la transcription d'ARNm est initiée avec les températures chaudes de la journée et pourrait se dérouler jusqu'à 3 h après l'application du stress. La traduction de ces ARNm en HSP17.4 serait favorisée pendant les températures plus fraîches de la nuit. Nos résultats confirment la haute stabilité des HSPs notée par De Rocher et Vierling, (1994) et Chen et *al.* (1990). Cependant, la forte quantité d'HSP17.4, probablement dûe à une synthèse *de novo* pendant la nuit, suggère également l'existence d'un mécanisme de régulation. En effet, les HSP17,4 pourraient être produites en fonction de la nécessité, ou non, de réparer dans la cellule les dégâts dus aux stress, mais également à anticiper une adaptation à la thermotolérance en prévention des stress potentiels, comme cela a été mentionné par De Rocher et *al.* (1991) pour des smHSPs de la même famille (Sarkar et *al.*, 2009). Les HSPs seraient capables d'arrêter leur propre transcription de gènes une fois qu'elles sont en quantité suffisante pour remplir leur fonction (De Rocher et *al.*, 1991 ; Kimpel et Key, 1985). La capacité antioxydante totale pourrait quant à elle, être plus importante du fait de la haute stabilité des flavonoïdes, même à l'obscurité (Merzlyak et *al.*, 2002). Dans ces conditions, ces antioxydants pourraient alors être moins sollicités pour la neutralisation et l'élimination des ROS. Cette persistance est confirmée après la récolte par le taux d'HSP17.4, d'antioxydants et par la capacité antioxydante totale qui sont maintenus pendant 42 h après la récolte, mais à des niveaux cependant inférieurs à ceux de la récolte.

Ces observations suggèrent que ces mécanismes sont encore actifs au moment du traitement à la chaleur.

Quel est le rôle de cette thermotolérance acquise sur la réponse physiologique des mangues au traitement à la chaleur ?

Ferguson *et al.* (1998) et Woolf *et al.* (1999a ; 2000) ont suggéré que les pommes et avocats, soumis à l'ensoleillement manifestaient, consécutivement aux traitements à la chaleur, une réduction des dégâts physiologiques sur la peau. A l'inverse nos résultats ont montré que ces mécanismes n'ont pas été toujours efficaces pour améliorer la réponse physiologique externe et interne des mangues face au traitement expérimental HWT 55.0 °C/ 50 min ni pour différencier le comportement des fruits au soleil de ceux situés à l'ombre.

Malgré des teneurs plus importantes en chlorophylle et caroténoïdes dans la peau des pommes exposées au soleil que dans celle des fruits à l'ombre, Chen *et al.* (2009) n'observent aucune différence, dans la réponse de fruits consécutivement aux traitements HWT 46.0-48.0 °C. Ainsi ils suggèrent que le rôle de ces antioxydants pourrait être limité dans le cas d'un stress thermique. Nos résultats démontrent également que la capacité antioxydante totale, les TPP et les anthocyanes diminuent fortement après le traitement HWT 55.0 °C/ 50 min. D'autres auteurs, Jeong *et al.* (2004) remarquent également qu'à partir de 50 °C, la capacité antioxydante des extraits de peau d'agrumes est altérée.

Cependant, nos travaux démontrent que la zone centrale de la tache de couleur est épargnée des dégâts physiologiques dus au traitement : ceux-ci sont localisés essentiellement sur la périphérie. Ces résultats laissent à penser que les mécanismes ont été actifs à l'endroit où les stress oxydatif et thermique ont été les plus importants.

Il convient toutefois de rappeler que, dans le cadre de ce présent travail, le choix du traitement expérimental HWT 55.0 °C/ 50 min constitue une situation sévère voire extrême, destiné, d'une part, à bien différencier les réponses des cultivars et, d'autre part, à anticiper les possibilités d'applications pratiques. Ainsi, la relative tolérance du cv. Keitt et la forte sensibilité du cv. Reynal aux stress oxydatif et thermique, suggérées dans la présente discussion, se confirment à l'issue du traitement HWT 55.0 °C/ 50 min.

Par contre, ce n'est pas le cas du cv. Palmer qui s'est avéré le plus tolérant des cultivars face à ce traitement sévère. Par ailleurs, l'élimination des radiations UV a permis une expression de HSP17.4 dans la chair du cv. Palmer et au contraire, une diminution dans la chair du cv.

Reynal. Ces éléments nous amènent à réfléchir sur la sensibilité intrinsèque des cultivars qui pourraient être différente selon les stress appliqués. Par exemple, l'élévation de la température provoquée par le filtre anti UV suggère que le cv. Palmer pourrait davantage réagir à un stress thermique qu'à un stress oxydatif à l'inverse du cv. Reynal. Ces différences de sensibilité, selon Purvis (1980 ; 1984) seraient dues à la structure et à la composition de la cire mais également celles de l'épiderme et notamment de sa teneur en différents antioxydants. D'autres facteurs qui restent à élucider, peuvent également intervenir.

Nos résultats ont mis en évidence que les traitements HWT sont particulièrement néfastes pour les mangues comparativement au traitement HA. Ils ont entraîné des dégâts cellulaires importants qui ont pu contribuer à limiter l'expression de thermotolérance. Cependant la réponse au traitement à la chaleur, à travers l'expression de dégâts relevés seulement sur la peau du cv. Reynal, évolue de façon logique avec le cycle diurne des HSP17.4, dans la pulpe et, dans une moindre mesure, celui de la capacité antioxydante totale et des antioxydants de la peau. Ainsi les dégâts physiologiques, dus au traitement HWT, ont été minimisés dans les tissus des mangues aux heures où les mécanismes sont les plus présents. Mais les différences ne sont cependant pas toujours significatives.

Ces observations laissent à penser qu'indépendamment de la forte sensibilité intrinsèque de ce cultivar au traitement à la chaleur, la réponse physiologique de la peau est liée à ces mécanismes de protection mis en place pendant l'ensoleillement et plus particulièrement la présence de HSP17.4 dans les tissus des mangues. Par ailleurs, le traitement expérimental HWT a été particulièrement sévère et il est permis de croire que des traitements plus modérés auraient pu mettre davantage en évidence l'expression d'une thermotolérance acquise en conditions de pré récolte et ce, pour la plupart des cultivars.

Interactions des différents mécanismes biochimiques de protection

Le présent travail sur l'étude de l'acquisition d'une thermotolérance des mangues en condition de pré récolte suggère que la dissociation des effets du stress dû aux fortes radiations et celui dû au stress thermique n'est pas aisée, bien que tous les deux entraînent un stress oxydatif (Foyer *et al.*, 1994 ; Shigeoka *et al.*, 2002).

Par ailleurs, ces stress, particulièrement les radiations UV du soleil, peuvent également en induire d'autres comme des lésions cellulaires sur la peau des fruits (Blanke et Lenz, 1989 ; Glenn et *al.*, 2002). Cependant, nos résultats montrent que les niveaux de tolérance à ces différents stress sont variables selon les cultivars (Wahid et *al.*, 2007) et selon les tissus (Cooper et *al.*, 1984). Ils suggèrent, également, que les mécanismes de protection pourraient s'autoréguler en fonction du type et du niveau de stress reçu, et se superposer ou se compléter si nécessaire.

En effet, Jenkins et *al.* (1997) démontrent qu'un mutant *Arabidopsis thaliana* sensible aux UV-B souffre également d'un stress thermique par rapport au type sauvage. Dans le mécanisme de défense de ce mutant, la formation de HSP21 est empêchée jusqu'à un certain seuil de température et ainsi ils suggèrent que les mécanismes de protection aux UV régulent aussi le mécanisme de synthèse des HSPs. Ces travaux ainsi que d'autres (Van Bogelen et *al.*, 1987 ; Kitagawa et *al.*, 2000 ; Preville et *al.*, 1999) montrent que les défenses des plantes contre ces stress sont similaires ou partagées. Par ailleurs Foyer et *al.* (1997) ainsi que Suzuki et Mittler (2006) démontrent que les ROS sont des molécules signalétiques de stress efficaces et Pnueli et *al.* (2003) précisent qu'ils sont liés étroitement au HSF et aux HSPs.

Nos travaux suggèrent fortement que la formation de HSP17.4 n'est pas seulement une réponse à un stress thermique. En effet, ces protéines pourraient jouer un rôle contre le stress dû aux radiations du soleil, et d'une façon générale, contre un stress oxydatif pouvant affecter la peau des mangues au soleil en conditions de pré récolte (Waters et Vierling, 1996). Cependant, à titre d'exemple sur bactérie sur *Escherichia coli*, Jofré et *al.* (2003) démontrent (en utilisant un anticorps antiHSP17.4 CI de Pla et *al.*, 1998) que les bandes de la région de 17 kDa ne sont exprimées que suite à un stress de température et qu'une autre HSP10 CI révélée par le même anticorps est induite par un stress oxydatif. Les mécanismes biochimiques de protection des bactéries sont certainement différents de ceux des plantes. Cependant, l'anticorps monoclonal que nous avons utilisé pourrait reconnaître, de façon similaire, un épitope partagé par plusieurs protéines de la même famille.

D'autres auteurs observent que des HSP17.4 sont aussi produites à des stades de développement particulier des tissus des plantes (Puigderrajols et *al.*, 2002 ; Wehmeyer et Vierling, 2000) et ne seraient donc pas induites que par un stress. De même chez la mangue, nos résultats montrent que ces HSP17.4 sont induites pendant le mûrissement suggérant ainsi

qu'elles pourraient contribuer à une meilleure protection du stress thermique, voire oxydatif, à des stades mûrs comme le remarquent Jacobi et *al.* (2001c). Certains auteurs démontrent également une implication des HSPs dans la réponse des végétaux à des blessures qui, bien souvent sont liées à un stress thermique et oxydatif (Wang et *al.*, 2004).

Perspectives

Ainsi, les conditions de travail au champ, pourtant nécessaires à la réalisation de nos objectifs pratiques, sont difficiles pour aborder de façon fine les mécanismes physiologiques caractérisant les mangues en pré récolte. Nous avons pourtant pu, dans cette étude confirmer certains mécanismes et formuler de nouvelles hypothèses.

Une meilleure compréhension de ces phénomènes par une dissociation des stress pourraient être envisagée en conditions contrôlées, en reproduisant d'une part, les conditions de stress thermique et d'autre part, des conditions de stress oxydatif et plus particulièrement des UV en pré récolte. Des études comparatives, dans ces conditions, des cultivars de pigmentations de peau et de stades de maturité différents permettraient de nous éclairer sur les implications de leurs caractéristiques propres dans leur réponse physiologique aux stress. Ces études nécessiteraient au préalable de définir, plus précisément, la composition en antioxydants et, plus particulièrement, en flavonoïdes incolores présents sur la peau des mangues qui jouent un rôle de photoprotecteurs face aux radiations UV (Chalker-Scott et *al.*, 1999). Ces analyses pourraient être réalisées sur un plus grand nombre d'échantillon et par HPLC afin d'être plus précises et plus fiables que par spectrométrie.

Par ailleurs, dans le cadre de notre étude, seule l'HSP17.4 a été étudiée. Il est évident que d'autres smHSPs appartenant à cette même famille sont impliquées dans un rôle de défense oxydatif et/ou thermique ou autre stress. Elles peuvent également co-agir entre elles ou en association avec d'autres mécanismes de défense (Vierling, 1991 ; Wang et *al.*, 2004). Ainsi l'étude d'autres smHSPs en relation avec l'ensoleillement permettrait de compléter cette analyse et de préciser les niveaux d'interaction entre elles. Par ailleurs, nous avons pu mettre en évidence que les HSP17.4 étaient encore présentes après un traitement HWT sévère, voire éventuellement synthétisées *de novo* après un traitement HA. Le rôle possible de ces HSP17.4 dans la faculté de récupération des tissus stressés des mangues après le traitement pourrait être

envisagé (Lurie, communication personnelle). Le suivi de la persistance des HSP17.4 et du comportement des mangues ayant été exposées au soleil ou à l'ombre, après le traitement de désinsectisation pourrait compléter l'analyse sur leur rôle dans les cellules stressées des fruits.

D'une façon générale, les stress, biotiques ou abiotiques, perturbent le métabolisme des cellules des plantes. En effet, l'activité glycolytique est nécessaire pour compenser les déficits en ATP occasionnés pendant les stress. Ainsi dans les plantes, des stratégies moléculaires complexes sont utilisées afin de coordonner une provision d'enzymes et de chaînes carbonées nécessaires pour les mécanismes de défense contre les stress (Foyer et *al.* 1997). En amont de l'expression d'HSPs ou d'antioxydants en réponse au stress, plusieurs perspectives de recherche sont possibles : l'étude de l'expression des gènes codant pour différentes HSPs permettrait de définir les niveaux de perception de différents stress et les délais entre l'application de ces stress et le signal de transcription pour différents cultivars. La quantification de l'ARNm par Q-PCR pourrait être alors un indicateur de réponse à une perturbation conditionnelle (ensoleillement, traitement conservation) spécifique à chacun des cultivars. Ainsi cette approche dynamique apparaît complémentaire à la détection de HSPs dans les tissus. De même, la connaissance du métabolisme des acides aminés et des sucres en conditions de stress permettrait d'évaluer les niveaux des précurseurs de ces protéines ainsi que de ces antioxydants (Kaplan et *al.*, 2004 ; Rosales et *al.*, 2007).

Selon Shulaev et *al.*, 2008, trois types de composés sont importants dans les éléments favorisant l'acclimatation tels que les antioxydants ou les osmoprotectants, les produits issus de la rupture de l'homéostasie cellulaire et les molécules induites pour l'adaptation des plantes au stress. Des approches globales transcriptomique, protéomique et métabolomique pourraient être ainsi envisagées. En effet, l'analyse des flux des voies métaboliques dans un système biologique complexe, comme la réponse des différents tissus de mangues, face au stress de l'ensoleillement, des traitements thermiques (chaud ou froid pendant la conservation) permettrait de bien mettre en évidence le rôle et les interactions des différentes protéines et métabolites à différents stades de développement. Ces approches permettent, grâce à des outils technologiques, électrophorèses 2D, GC/UPLC/HPLC couplés avec un spectromètre de masse, de caractériser de façon dynamique, l'ensemble des composés (précurseurs, intermédiaires et produits finis) impliqués dans un stress et d'obtenir très rapidement une grande quantité d'informations sur les mécanismes de régulation des systèmes biochimiques de protection (Moco et *al.*, 2006 ; Shulaev et *al.*, 2008). Ainsi, par une approche métabolomique, Kaplan et *al.*, (2004), sur *Arabidopsis thaliana* met en évidence que la

composition en acides aminés et le métabolisme carboné sont affectés par un stress thermique. Des accumulations de isoleucine, leucine et valine dérivés du pyruvate et asparagine, thréonine dérivés de l'acétate oxalate sont observées dans les feuilles en réponse à un stress à 40 °C de façon concomitante avec le fumarate et le malate, précurseurs de l'acétate oxalate ainsi qu'un petit groupe de métabolites avec une fonction amine dont l'acide 4-aminobutyrique (GABA) et l'acide salicylique (SA). La majorité de ces métabolites est connue pour accroître en réponse à des stress environnementaux. Les auteurs démontrent un également une augmentation de sucres tels que le sucrose, le maltose et le raffinose qui outre leur fonction de molécules signalétiques, pourraient également avoir un rôle d'osmoprotectant (Kaplan et *al.*, 2004). Ainsi le profilage des sucres et des acides aminés pourrait permettre de détecter des marqueurs potentiels de la thermotolérance et/ou de réponse à d'autres stress. En effet, Rosales et *al.* (2007) démontrent un accroissement de l'activité sucrolytique et la formation d'hexoses des tomates cerises en condition de fort ensoleillement et de forte température.

De nombreuses perspectives de recherche dans les domaines de la physiologie et de la biochimie sont ouvertes et devraient permettre d'affiner la connaissance des mécanismes de protection des mangues en pré récolte et d'envisager, à terme, la mise en œuvre des moyens les mieux adaptés à leur conservation.

CONCLUSIONS GENERALES ET IMPLICATIONS PRATIQUES

CONCLUSIONS GENERALES ET IMPLICATIONS PRATIQUES

Sous le climat calédonien, les mangues subissent, pendant leur période de développement en pré récolte, des stress thermique et oxydatif dus à l'enseulement. Ces stress se répètent quotidiennement et, pour s'en prémunir, la plante va élaborer des stratégies adaptatives. La température de l'air et des fruits de même que l'intensité des radiations varient avec le cycle diurne régulant ainsi les niveaux des stress. Cependant, aux heures les plus chaudes de la journée et par temps de fort ensoleillement, les niveaux de ces stress peuvent être sévères voire critiques sur une courte durée pour quelques cultivars. Ainsi, dans certaines conditions, les facteurs environnementaux peuvent limiter la capacité des mangues à gérer les stress. **D'une façon plus globale, l'exposition au soleil permet l'acquisition d'une thermotolérance des mangues dans les conditions de pré récolte de Nouvelle-Calédonie.**

L'importance et la diversité des zones de cultures du manguier dans le monde soulignent la forte capacité d'acclimatation de ce fruit tropical sous différents climats à travers les années. Cependant, certains cultivars se sont mieux adaptés que d'autres à certaines zones climatiques. Ces différences d'adéquation climat/cultivar vont, bien sûr, influencer sur le niveau de 'perception' des stress abiotiques. La sensibilité des mangues à un même stress est cependant différente d'un cultivar à un autre et va ainsi moduler les stratégies et mécanismes d'adaptation pour chacun d'entre eux. Il est toutefois très difficile de dissocier en conditions de pré récolte le stress thermique, le stress oxydatif ou le stress des UV de l'enseulement. Ainsi certains cultivars sont plus sensibles à un type et à un niveau de stress particulier et moins à d'autres alors que d'autres cultivars réagissent différemment. **La mise en place de mécanismes d'adaptation en conditions de pré récolte va dépendre de la perception de chacun des cultivars de mangue en fonction du type et du niveau de stress reçu.**

Dès la 'perception' d'un type de stress, la mangue va réagir par une stratégie de défense mais bien souvent, les mécanismes biochimiques et moléculaires induits pour un stress sont similaires ou partagés avec ceux d'un autre stress. Un système de défense antioxydant par la production de polyphénols totaux et d'anthocyanes totaux ainsi qu'une induction d' HSP17.4 sont deux mécanismes d'adaptation et de protection que la mangue soumise à l'enseulement

met en place, de façon très localisée, dans ses tissus. **L'induction de HSP17.4 semble répondre aussi bien au stress oxydatif qu'au stress thermique comme cela a été observé sur la peau et dans la chair des mangues, alors que le développement de polyphénols et, plus particulièrement, des anthocyanes semblent répondre davantage à un stress oxydatif sur la peau.**

Ces événements peuvent s'autoréguler, en se superposant, se complétant ou se substituant l'un à l'autre si nécessaire. Il est probable que le développement d'anthocyanes corresponde pour certains cultivars à la première réponse au stress de l'ensoleillement et que d'autres mécanismes biochimiques et moléculaires plus efficaces et plus durables tels que l'induction d'HSPs et de polyphénols incolores, puissent ensuite être induits. Des expérimentations ultérieures devront le confirmer.

Ces mécanismes de protection sont persistants en conditions de pré récolte, même pendant la nuit en l'absence de stress, ou même jusqu'à deux jours après la récolte. Ils pourraient, par autorégulation, se maintenir pour réparer les dégâts des cellules ou prévenir l'éventualité de stress à venir. Les résultats obtenus suggèrent qu'ils pourraient avoir une influence sur la réponse physiologique des mangues de certains cultivars aux traitements après récolte. **En effet, ces mécanismes de protection sont plus actifs là où les niveaux des différents stress sont les plus importants, en l'occurrence sur la peau et dans la chair des mangues exposées au soleil. Ils contribuent à une réduction des dégâts physiologiques dus au traitement HWT, observée plus particulièrement, pour certains cultivars, sur la zone centrale de la tache colorée directement soumise aux radiations du soleil.**

Cependant, dans le cadre de nos expérimentations et, malgré la sévérité du traitement expérimental HWT 55.5 °C/ 50 min appliqué, nous n'avons pu mettre en évidence de façon significative cette thermotolérance acquise en pré récolte même si elle est très probable. Il n'est pas impossible qu'en utilisant les traitements à l'air chaud et des protocoles moins drastiques, cette thermotolérance acquise en pré récolte puisse davantage s'exprimer. **Mais cette expression pourrait être modulée par les caractéristiques propres au cultivar à savoir sa sensibilité intrinsèque, sa coloration et son stade de maturité.**

Conclusions générales et implications pratiques

D'ores et déjà, et en dépit des questions qui n'ont pas pu être totalement résolues, **des implications pratiques dans l'itinéraire de récolte jusqu'à la désinsectisation des mangues** peuvent être suggérées à partir de notre travail.

La réponse aux stress est variable selon la sensibilité intrinsèque de chacun des cultivars. Ainsi le choix de ce dernier sera essentiel pour la garantie d'une bonne qualité des fruits après désinsectisation. **Le classement de sensibilité que nous avons établi constitue une bonne référence pour le choix du cultivar à l'export.** A titre d'exemple, le cv. Palmer présente un bon potentiel export pour la Nouvelle-Calédonie à l'inverse du cv. Reynal trop sensible au traitement. Mais cependant ces sensibilités pourront probablement être moins exacerbées par le traitement à l'air chaud, une application différente de la chaleur qui n'induit pas les mêmes stress. Des expérimentations complémentaires seront toutefois nécessaires pour étayer cette hypothèse.

Distinguer la limite entre l'effet bénéfique et l'effet néfaste de l'ensoleillement n'est pas chose aisée. En effet, si ce dernier permet l'acquisition d'une thermotolérance en conditions de pré récolte, il peut également induire des dégâts cellulaires au delà de certains seuils de fortes radiations et certainement de fortes températures, sans que nous ayons pu vraiment les définir. **Ainsi dans l'itinéraire cultural que nous préconisons, la conduite de taille devra être contrôlée de façon à favoriser l'entrée de lumière et de chaleur sur les quartiers d'arbre les moins exposés au soleil. Par contre sur le haut de la canopée et sur les quartiers d'arbres exposés, la taille sera raisonnée de façon à limiter les radiations directes sur les fruits.** L'utilisation de kaolin, en pulvérisation sur les fruits pourra réduire l'incidence de ses dégâts sur la peau, mais des essais préliminaires devront le confirmer.

Dans l'après midi, la pression de la sève dans la mangue est moins importante et ainsi les risques de dégâts sur la peau par contact des composés toxiques qu'elle contient, sont minimisés à la récolte. De plus, les mécanismes d'adaptation et de protection ont pu se mettre en place pendant les heures les plus chaudes de la journée et persister pendant la soirée et la nuit. Actuellement, et d'une façon générale, la récolte est effectuée le matin, aux heures les moins chaudes de la journée. **Mais la qualité des mangues destinées à être désinsectisées sera optimisée si la récolte des fruits a lieu, à un stade de maturité optimal, après un ou deux jours d'ensoleillement, à partir du milieu d'après midi jusqu'au soir.**

L'expression de la thermotolérance pourra être d'autant plus efficace après désinsectisation si le délai entre la récolte et le traitement à la chaleur est réduit à un maximum de deux jours. En effet, si l'expression de HSP17.4 est maintenue pendant deux jours dans les tissus des mangues après la récolte à 5, 12 et 20 °C, elle n'est cependant pas au niveau qu'elle avait au moment de la cueillette des fruits. Par contre la persistance des HSP17.4, après traitement HWT, pourra être maintenue, voire améliorée par une conservation à 12 °C. **Ainsi la conservation à 12 °C des mangues après le traitement peut être bénéfique pour le maintien voire l'amélioration des systèmes de protection dans la pulpe des fruits pendant au moins 167 h.**

Toutes ces préconisations devront, cependant, être nécessairement testées en fonction des réactions de chacun des cultivars. Il sera également nécessaire d'affiner la définition du stade de maturité optimal des diverses variétés qui, comme nous l'avons vu dans l'étude bibliographique, n'est pas aisée.

De plus, un développement de la couleur (anthocyanes et caroténoïdes), sans le stress oxydatif des UV-B, est également possible en après récolte par l'induction d'un mûrissement artificiel par l'application d'éthylène exogène. Le développement de la couleur est alors préalable au ramollissement du fruit et peut être envisagé pour des marchés d'exportation de proximité limités à quelques heures d'avion de la Nouvelle-Calédonie. Il n'est pas inconcevable de considérer que le développement d'antioxydants sur la peau des mangues de certains cultivars puisse améliorer la réponse au traitement à la chaleur. Comme l'influence d'une application d'éthylène exogène ou d'autres facteurs cultureux sur la teneur et la composition des pigments ou polyphénols non colorés n'a pas été encore étudiée, de nouvelles pistes de recherches allant dans ce sens pourraient constituer une suite logique à ce travail sur la réponse physiologique des mangues aux traitements de désinsectisation.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Acosta, R.M., Neito, A.D., Mena, N.G., Teliz, O.D., Vaquera, H.H. et Neito, A.R.** (2000). Effect of postharvest temperatures on the development of internal darkening in mango fruits (*Mangifera indica* L.) cv. Haden and their quality. *Acta Horticulturae* **509**: 401-412.
- Adegoroye, A.S. et Jolliffe, P.A.** (1983). Initiation and control of sunscald injury of tomato fruit. *Journal of The American Society for Horticultural Science* **108**,(1): 23-28.
- Ali, Z.M., Armugan, S. et Lazan, H.** (1995). Beta-galactosidase and its significance in ripening mango fruit. *Phytochemistry* **38**,(5): 1101-1114.
- An, J.F. et Paull, R.E.** (1990). Storage temperature and ethylene influence on ripening of papaya fruit. *Journal of The American Society for Horticultural Science* **115**: 949-953.
- Armstrong, J.W.** (1996). Tropical fruit, international trade and quarantine : a research perspective. *Proceedings of the International Conference on Tropical Fruits*. (Vijaysegaran, S.,Pauziah, M.,Mohamed, M. S. et Ahmad Tarmizi, S.) MARDI, Kuala Lumpur, Malaysia: 23-26.
- Arts, M.J.T.J., Sebastiaan Dallinga, J., Voss, H-P., Haenen, G.R.M.M. et Bast, A.** (2004). A new approach to assess the total antioxidant capacity using the TEAC assay. *Food Chemistry* **88**: 567-570.
- Bally, I.S.E.** (1999). Changes in the cuticular surface during the development of mango (*Mangifera indica* L.) cv. Kensington Pride. *Scientia Horticulturae* **79**: 13-22.
- Barber, H.N. et Sharpe, P.J.H.** (1970). Genetics and physiology of sunscald of fruits. *Agricultural Meteorology* **8**: 175-192.
- Barden, C.L. et Bramlage, W.J.** (1994). Separating the effects of low temperature, ripening, and light on loss of scald susceptibility in apples before harvest. *Journal of The American Society for Horticultural Science* **119**,(1): 54-58.
- Barmore, C.P., Spalding, D.H. et McMillan, R.T.** (1974). Anthocyanin development in mango fruit in response to a preharvest antitranspirant spray. *Horticultural Science* **9**: 114-115.
- Beggs, C. et Wellman, E.** (1985). Analysis of light controlled anthocyanins formation in coleoptile of *Zea mays* L.: the role of UV-B, blue, red and far-red light. *Photochemistry and Photobiology* **41**: 481-486.
- Berardini, N., Carle, R. et Schieber, A.** (2004). Characterization of gallotannins and benzophenone derivatives from mango (*Mangifera indica* L. cv Tommy Atkins) peels, pulp and kernels by high-performance liquid chromatography/electrospray ionization mass spectrometry. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* **18**: 2208-2216.
- Berardini, N., Fezer, R., Conrad, J., Beifuss, U., Carle, R. et Schieber, A.** (2005). Screening of mango (*Mangifera indica* L.) cultivars for their contents of flavono O- and xanthone C-glycosides, anthocyanins and pectin. *Journal of Agricultural Food Chemistry* **53**: 1563-1570.
- Bergh, O., Franken, J., Van Zyl, E.J., Kloppers, F. et Dempers, A.** (1980). Sunburn on apples - Preliminary results on an investigation conducted during the 1978/79 season. *The Deciduous Fruit Grower*: 8-21.

- Bernades Silva, A.P.F.** (2007). Starch mobilization and sucrose accumulation in the pulp of 'Keitt' mangoes during postharvest ripening. *Journal of Food Biochemistry* **32**: 384-395.
- Beverly, R.B., Latimer, J.G. et Smittle, D.A.** (1993). Preharvest physiological and cultural effects on postharvest quality. *Postharvest Handling : A System Approach*. (Shewfelt, R. L. et Prussia, S. E.) San Diego, Academic Press: 74-98.
- Bezuidenhout, J.J.** (1988). Indices to determine the maturity of mangoes for picking. *S.A. Mango Growers' Association Yearbook* **8**: 14-16.
- Bhaskarachary, K., Sankar Rao, D.S., Deosthale, Y.G. et Reddy, V.** (1995). Carotene content of some common and less familiar foods of plant origin. *Food Chemistry* **54**: 189-193.
- Biggs, M.S., Woodson, W.R. et Handa, A.K.** (1988). Biochemical basis of high temperature inhibition of ethylene biosynthesis in ripening tomato. *Physiology of Plant* **72**: 572-578.
- Bissardon, F.** (1999). Physiologie post-récolte et conservation en froid de la mangue. Korhogo, CNRA: 55p.
- Björkman, O., Badger, M.R. et Armond, P.A.** (1980). Response and adaptation of photosynthesis to high temperature. *Adaptation of plants to water and high temperature stress*. (Turner, N. C. et Kramer, P. J.) New York, Wiley: 233-249.
- Blanke, M.M. et Lenz, D.H.** (1989). Fruit photosynthesis. *Plant Cell and Environment* **12**: 31-36.
- Boston, R.S.E.A.** (1996). Molecular chaperones and protein folding in plants. *Plant Molecular Biology* **32**: 191-222.
- Bouvier, F., Backhaus, R.A. et Camara, B.** (1998). Inductive and control of chromoplast-specific carotenoid genes by oxidative stress. *The Journal of Biological Chemistry* **273**,(46): 30651-30659.
- Bowen, J.H.** (2000). Thermotolerance and the heat shock response response in an apple cell culture. Plant Science. Auckland, University of Auckland. PhD 138p.
- Bowen, J., Lay-Lee, M., Plummer, K. et Ferguson, I.** (2002). The heat shock response is involved in thermotolerance in suspension-cultured apple fruit cells. *Journal of Plant Physiology* **159**: 599-606.
- Bradford, M.M.** (1976). A rapid and sensitive method for the quantification of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Annals of Biochemistry* **72**: 248-254.
- Bravo, L.** (1998). Polyphénols : Chemistry, dietary sources, metabolism and nutritional significance. *Nutrition Reviews* **56**,(11): 317-353.
- Brandt, K., Giannini, A. et Lercari, B.** (1995). Photomorphogenic responses to UV radiation III : a comparative study of UV-B effects on anthocyanin and flavonoid accumulation in wild type and aurea mutant of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Photochemistry and Photobiology* **62**: 1081-1087.
- Brooks, C. et Fisher, D.F.** (1926). Some high-temperature effects in apples : contrasts in the two sides of an apple. *Journal of Agricultural Research* **32**,(1): 1-16.
- Brou, B.** (1982). Lieux historiques de La Conception, St-Louis, Yahoué, Publications de la Société d'Etudes Historiques de Nouvelle-Calédonie.
- Brown, B.I., Scott, K.J. et Chaplin, G.R.** (1981). Spongy stem-end in mango. *Queensland. Fruit and Vegetables News* **52**: 479.

- Brown, B.I., Wells, I.A. et Murray, C.F.** (1986). Factors affecting the incidence and severity of mango sapburn and its control. *ASEAN Food Journal* **2**: 127-132.
- Bukovac, M.J., Rasmussen, H.P. et Shull, V.E.** (1981). The cuticle : surface, structure and function. *Scanning Electron Microscopy* **3**: 213-223.
- Burg, S.P. et Burg, E.A.** (1961). Role of ethylene in fruit ripening. *Plant Physiology*: 180-189.
- Caldwell, M.M. et Flint, S.D.** (1997). Uses of biological spectral weighting functions and the need of scaling for the ozone reduction problem. *Plant Ecology* **128**: 67-76.
- Campos, J.P. et Yahia, E.** (1991). Hot water quarantine treatment effect on the ripening and senescence of mango. *HortScience* **26**: 696.
- Cano, M.P. et De Ancos, B.** (1994). Carotenoid and carotenoid ester composition in mango fruit as influenced by processing method. *Journal of Agricultural Food Chemistry* **42**: 2737-2742.
- Castenmiller, J.J.M., West, C.E., Linseen, J.P.H., Hof, K.H. et Voragen, A.G.J.** (1999). The food matrix of spinach is a limiting factor in determining the bioavailability of beta carotene and to a lesser extent of lutein in humans. *Journal of Nutrition* **129**: 349-355.
- Castrillo, M., Kruger N. J. et Whatley, F.R.** (1992). Sucrose metabolism in mango fruit during ripening. *Plant Science* **84**: 45-51.
- Chacko, E.K., Reddy, Y.T.N. et Anathanaryanan, T.V.** (1982). Studies on the relationship between leaf number and area and fruit development in mango (*Mangifera indica* L.). *Journal of Horticultural Science* **57**,(4): 483-492.
- Chaimanee, P.** (1992). Changes in cell wall hydrolase polygalacturonase during ripening in mango fruit. *Acta Horticulturae* **321**: 804-810.
- Chalker-Scott, L.** (1999). Environmental significance of anthocyanins in plant stress responses. *Photochemistry and Photobiology* **70**: 1-9.
- Chaplin, G.R., Scott, K.J. et Brown, B.I.** (1982). Effect of storing mangoes in polyethylene bags at ambient temperature. *Singapore Journal of Primary Industries* **10**,(2): 84-88.
- Chaplin, G.R., Nuevo, P.A., Graham, D. et Cole, S.P.** (1986). Chilling responses of 'Kensington' mango fruit stored under variable low temperature regimes. *ASEAN Food Journal* **2**: 133-137.
- Chaplin, G.R., Buckley, M.J. et Lai, S.C.** (1990). Differential softening and physico-chemical changes in the mesocarp of ripening mango fruit. *Acta Horticulturae* **269**: 233-239.
- Chaplin, G.R.** (1991). Chilling injury and storage of mango (*Mangifera indica* L.) fruit held under low temperatures. *Acta Horticulturae* **291**: 461-466.
- Chattpar, H.S., Mattoo, A.K. et Modi, V.V.** (1971). Biochemical studies on chilling injury in mango. *Phytochemistry* **10**: 1007-1009.
- Chauhan, P.S. et Pandey, R.M.** (1984). Relative $^{14}\text{CO}_2$ fixation by leave and fruit and translocation of ^{14}C -sucrose in mango. *Scientia Horticulturae* **22**: 121-128.
- Chen, C. C. et Paull, R. E.** (2001). Fruit temperature and crown removal on the occurrence of pineapple fruit translucency. *Scientia Horticulturae* **88**: 85-95.

- Chen, J.Y., He, L.H., Jiang, Y.M., Kuang, J.F., Lu, C.B., Joyce, D., Macnish, A., He, Y.X. et Lu, W.J.** (2008). Expression of PAL and HSPs in fresh-cut banana fruit. *Environmental and Experimental Botany*.
- Chen, L.S., Li, P. et Cheng, L.** (2009). Comparison of thermotolerance of sun exposed peel and shade peel of "Fuji" apple. *Environmental and Experimental Botany* **66**: 110-116.
- Chen, Q., Lauzon, L.M., Derocher, A.E. et Vierling, E.** (1990). Accumulation, stability and localization of a major chloroplast heat-shock protein. *The Journal of Cell Biology* **110**: 1873-1883.
- Cooke, A.W. et Johnson, G.I.** (1994). Mango postharvest disease control : effect of rain at harvest, fungicide treatments and fruit brushing on fruit appearance. *Postharvest handling of tropical fruits*. (Champ, B. H., Highley, E. et Johnson, G. I.) Canberra, ACIAR Proceedings **50**: 448-449.
- Cooper, P., Ho, T.H.D. et Hauptmann, R.M.** (1984). Tissue specificity of the heat shock response in maize. *Plant Physiology* **75**: 431-441.
- Couey, H.M.** (1989). Heat treatment for control of postharvest diseases and insect pests of fruits. *HortScience* **24**,(2): 198-202.
- Crisoto, C.H.** (1994). Stone fruit maturity indices : a descriptive review. *Postharvest News and Information*, CAB International **5**,(6): 65-68.
- Cua, A.U. et Lizada, M.C.** (1990). Ethylene production in the 'Carabao' mango (*Mangifera indica* L.) fruit during maturation and ripening. *Acta Horticulturae* **269**: 169-179.
- Curtis, O.F.** (1937). Vapor pressure gradients, water distribution in fruit, and so-called infra-red injury. *American Journal of Botany* **47**: 705-710.
- Davenport, T.L. et Nunez-Elisea, R.** (1997). Reproductive physiology. *The mango : botany, production and uses*. (Litz, R. E.) Homestead: 69-146.
- Day, D.T.A., Howells, B.W. et Rice, W.J.** (1994). Ultraviolet absorption and epidermal-transmittance spectra in foliage. *Physiologia Plantarum* **92**: 207-218.
- De Almeida, F.** (2005). Implication des protéines de choc thermique dans l'acquisition de la thermotolérance des mangues au champ., Université de Rennes 1. Master Sciences et Productions Végétales. Phytochimie et Qualité des Productions Végétales: 31p.
- De Laroussilhe, F.** (1980). *Le manguier*, Maisonneuse et Larose. 312p.
- DeLucia, E.H., Day, T.A. et Vogelmann, T.C.** (1992). Ultraviolet-B and visible light penetration into needles of two species of subalpine conifers during foliar development. *Plant Cell and Environment* **15**: 921-929.
- Derocher, A.E., Helm, K.W., Lauzon, L.M. et Vierling, E.** (1991). Expression of a conserved family of cytoplasmic low molecular weight heat shock proteins during heat stress and recovery. *Plant Physiology* **96**: 1038-1047.
- DeRocher, A.E. et Vierling, E.** (1994). Developmental control of small heat shock protein expression during pea seed maturation. *The Plant Journal* **5**,(1): 93-102.
- Dever, M.C., Cliff, M.A. et Hall, J.W.** (1995). Analysis of variation and multivariate relationship among analytical and sensory characteristics in whole apple evaluation. *Journal of Science Food Agricultural* **69**: 329-338.

- Dewanto, V., Wu, X., Adom, K. et Liu, R.** (2002). Thermal processing enhances the nutritional value of tomatoes by increasing total antioxidant activity. *Journal of Agricultural Food Chemistry* **50**: 3010-3014.
- Diamant, S., Eliahu, N., Rosenthal, D. et Goloubinoff, P.** (2001). Chemical chaperones regulate molecular chaperones *in vitro* and in cells under combined salt and heat stresses. *The Journal of Biological Chemistry* **276**,(43): 39586-39591.
- Ding, C.K., Wang, C.Y., Gross, K.C. et Smith, D.L.** (2001). Reduction of chilling injury and transcript accumulation of heat shock proteins in tomato fruit by methyl jasmonate and methyl salicylate. *Plant Science* **161**: 1153-1161.
- Ducamp Collin, M.N., Arnaud, C., Kagy, V. et Didier, C.** (2007). Fruit flies : disinfestation, techniques used, possible application to mango. *Fruits* **62**,(4): 223-235.
- Duval, M.F., Bunel, J., Sitbon, C. et Risterucci, A.M.** (2005). Development of microsatellite markers for mango (*Mangifera indica* L.). *Molecular Ecology Notes* **5**,(4): 824-826.
- Duval, M.F., Bunel, J., Sitbon, C., Risterucci, A.M., Calabre, C. et Le Bellec, F.** (2006). Genetic diversity of Caribbean mangoes (*Mangifera indica* L.) using microsatellite markers. 8th International Mango Symposium. Sun City, South Africa, ISHS.
- Eaks, I.L.** (1978). Ripening, respiration and ethylene production of 'Hass' avocado fruits at 20 to 40 °C. *Journal of The American Society for Horticultural Science* **103**: 576-578.
- Eggert, R.** (1946). The construction and installation of thermocouples for biological research. *Journal of Agricultural Research* **72**,(11): 341-355.
- Ehrnsperger, M., Graber, S., Gaestel, M. et Buchner, J.** (1997). Binding of non-native protein to HSP25 during heat shock creates a reservoir of folding intermediates for reactivation. *European Molecular Biology Organization Journal* **16**,(2): 221-229.
- El Ansari, M.A., Reddy, K.K., Sastry, K.N.S. et Nayadamma, Y.** (1971). Polyphenols of *Mangifera indica* L. *Phytochemistry* **10**: 2239-2241.
- Ellen, A.A.E.A.** (2002). Chaperoning signaling pathways : molecular chaperones as stress-sensing heat shock protein. *Journal of Cell Science* **115**: 2809-2816.
- Emongor, V.E., Murr, D.P. et Lougheed, E.C.** (1994). Preharvest factors that predispose apples to superficial scald. *Postharvest Biology and Technology* **4**: 289-300.
- Esguerra, E.B. et Lizada, M.C.** (1990). The postharvest behaviour and quality of 'Carabao' mangoes subjected to vapor heat treatments. *ASEAN Food Journal* **6**: 6-12.
- Esguerra, E.B., Brena, S.R., Reyes, M.U. et Lizada, M.C.** (1990). Physiological breakdown in vapor heat treated 'Carabao' mango. *Acta Horticulturae* **269**: 425-434.
- Fallik, E.** (2004). Prestorage hot water treatments (immersion, rinsing and brushing). *Postharvest Biology and Technology* **32**: 125-134.
- Faust, M., Shear, C.B. et Williams, M.W.** (1969). Disorders of carbohydrate metabolism of apples. *Botanical Review* **35**: 169-194.
- Favier, A.** (2003). Le stress oxydant. *L'actualité chimique* (novembre-décembre): 108-115.

- Feder, M.E. et Hofmann, G.E.** (1999). Heat-shock proteins, molecular chaperones, and the stress response: evolutionary and ecology physiology. *Annual Review of Physiology* **61**: 243-282.
- Ferguson, I.B., Lurie, S. et Bowen, J.H.** (1994). Protein synthesis and breakdown during heat shock of cultured pear (*Pyrus communis* L.) cells. *Plant Physiology* **104**: 1429-1437.
- Ferguson, I.B., Snelgar, W.P., Lay Yee, M., Watkins, C.B. et Bowen, J.H.** (1998). Expression of heat shock protein genes in apple fruit in the field. *Australian Journal of Plant Physiology* **25**: 155-163.
- Ferguson, I., Richard, V. et Woolf, A.** (1999). Preharvest factors affecting physiological disorders of fruit. *Postharvest Biology and Technology* **15**: 255-262.
- Field, R.J.** (1984). The effect of temperature on ethylene production by plant tissue. *Ethylene and plant development*. (Roberts, J. A. et Tucker, G. A.) London, Butterworths: 47-69.
- Fisher, D.F.** (1941). Mealiness and quality in 'Delicious' apples as affected by certain orchard conditions and storage techniques. *Journal of Iowa Agricultural Experiment Station* **J962**: 128-132.
- Flint, S.D., Jordan, J.W. et Caldwell, M.M.** (1985). Plant protective response to enhanced UV-B radiations under field conditions : leaf optical properties and photosynthesis. *Photochemistry and Photobiology* **41**,(1): 95-99.
- Florissen, P., Ekman, J.S., Blumenthal, C., Mcglasson, W.B., Conroy, J. et Holford, P.** (1996). The effects of short heat-treatments on the induction of chilling injury in avocado fruit (*Persea americana* Mill.). *Postharvest Biology and Technology* **8**: 129-141.
- Foyer, C.H., Descourvières, P. et Kunert, K.J.** (1994). *Plant Cell and Environment* **17**: 507-523.
- Foyer, C.H., Lopez-Delgado, H., Fat, J.F. et Scott, I.M.** (1997). Hydrogen peroxide and glutathione associated mechanisms of acclimatory stress tolerance and signalling. *Physiologia plantarum* **100**: 241-254.
- Frank, H.A., Young, A.J., Britton, G. et Cogdell, R.J.** (1999). Advances in photosynthesis. *The photochemistry of carotenoids*. (Govind, J. E. E) Dordrecht : Kluwer. **8**.
- Galan Saucó, V.** (1999). *El cultivo del mango*. Eds Madrid, Mundi Pressa.298p.
- Gerbaud, P.** (2008). La mangue. *Les dossiers de Fruitrop* **153**: 11-35.
- Gershenzon, I.** (1983). Changes in levels of plant secondary metabolites under water and nutrient stress. *Recent Advances in Phytochemistry* **18**: 273-320.
- Gething, M. et Sambrook, J.** (1992). Protein folding in the cell. *Nature* **355**: 33-45.
- Gil, M.I., Aguayo, E. et Kader, A.A.** (2006). Quality changes and nutrient retention in fresh cut versus whole fruit during storage. *Journal of agricultural food chemistry* **54**: 4284-4296
- Gindaba, J. et Wand, S.J.E.** (2005). Comparative effects of evaporative cooling, kaolin particle film and shade net on the control of sunburn and fruit quality on apple. *HortScience* **40**: 592-596.
- Glenn, D.M., Prado, E., Erez, A., Mcferson, J. et Puterka, G.J.** (2002). A reflective, processed-kaolin particle film affects fruit temperature, radiation reflection, and solar injury in apple. *Journal of The American Society for Horticultural Science* **127**,(2): 188-193.

- Godoy, H., T. et Rodriguez-Amaya, D.B.** (1987). Changes in individual carotenoids on processing and storage of mango (*Mangifera indica*) slices and purée. *International Journal of Food Science and Technology* **22**: 451-460.
- Godoy, H.R. et Rodriguez-Amaya, D.B.** (1989). Carotenoid composition of commercial mangoes from Brazil. *Lebensm. Wiss u-Technol.* **22**: 100-103.
- Godoy, H.R. et Rodriguez-Amaya, D.B.** (1994). Occurrence of cis-isomers of provitamin A in brazilian fruits. *Journal of Agricultural Food Chemistry* **42**: 1306-1313.
- Gomez-Lim, M.A.** (1997). Postharvest Physiology. *The mango : botany, production and uses.* (Litz, R. E.) Homestead, CAB International: 425-445.
- Gonzalez-Aguilar G.A., Buta, J.G. et Wang, C.Y.** (2001). Methyl jasmonate reduces chilling injury symptoms and enhances colour development of 'Kent' mangoes. *Journal of the Science of Food and Agriculture* **81**: 1244-1249.
- Green, A.E.S.** (1983). The penetration of ultraviolet to the ground. *Physiology of Plant* **58**: 351-359.
- Hale, M.G. et Orcutt, D.M.** (1987). *The physiology of plant under stress.* (Sons, W. A.) New York 71-92.
- Hallman, G.J. et Armstrong, J.W.** (1994). Heated air treatments. *Quarantine treatments for pests of food plants.* (Sharp, J. L. H., G.J. Denver), Westview Press: 149-163.
- Hamilton, E.W. et Heckathorn, S.A.** (2001). Mitochondrial adaptations to NaCl. Complex I is protected by antioxidants and small heat shock proteins, whereas complex II is protected by proline and betaïne. *Plant Physiology* **126**: 1266-1274.
- Harvey, R.B.** (1924). Sunscald tomatoes. *Minnesota Studies in Plant Science*: 229-234.
- Harvey, T.C.J.** (1993). Strategies for overcoming tissue damage caused by quarantine heat and cold treatment. Australasian Postharvest Conference.
- Hasegawa, S., Maier, V.P., Kaszycki, H.P. et Crawford, J.K.** (1969). Polygalacturonase content of dates and its relation to maturity and softness. *Journal of Food Science*(34): 527-529.
- Heather, N.W., Corcoran, R.J. et Kopittke, R.A.** (1997). Hot air disinfestation of Australian 'Kensington' mangoes against two fruit flies (Diptera : Tephritidae). *Postharvest Biology and Technology* **10**: 99-105.
- Heckathorn, S.A., Downs, C.A., Sharkey, T.D. et Coleman, J.S.** (1998). The small, methionine-rich chloroplast heat shock protein protects photosystem II electron transport during heat stress. *Plant Physiology* **116**: 439-444.
- Hernandez, L.D. et Vierling, E.** (1993). Expression of low molecular weight heat-shock proteins under field conditions. *Plant Physiology* **101**: 1209-1216.
- Hetherington.** (1997). Profiling photosynthetic competence in mango fruit. *Journal of Horticultural Science* **72**: 755-763.
- Hofman, P.J., Stubbings, B.A., Adkins, M.F., Meiburg, G.F. et Woolf, A.B.** (2002). Hot water treatments improve 'Hass' avocado fruit quality after cold disinfestation. *Postharvest Biology and Technology* **24**: 183-192.

- Honda, C., Kotoda, N., Wada, S., Kabayashi, S., Soejima, J., Zhang, J., Tsuda, T. et Moriguschi, T.** (2002). Anthocyanin biosynthetic genes are coordinately expressed during red coloration in apple skin. *Plant Physiology and Biochemistry* **40**: 955-962.
- Hopp, R.** (1947). Internal temperatures of plants. *Proceedings of American Society of Horticultural Science* **60**: 103-108,
- Howarth, C.J. et Ougham, H.J.** (1993). Gene expression under temperature stress. *New Phytologist* **125**: 1-26.
- Hubbard, N. L., Mason Pharr D. et Huber, S.C.** (1991). Sucrose phosphate synthase and other sucrose metabolizing enzymes in fruits of various species. *Physiologia plantarum* **82**: 191-196.
- Hubbert, C.A. et Ledger, S.N.** (1988). Mangoes : Postharvest handling systems. QDPI FarmNote, QDPI: 4 p.
- Hulme, A.C.** (1971). The mango. *The biochemistry of fruits and their products*. (A. Norwich, Academic Press). **2**: 233-254.
- Hymavathi, T.V. et Kadher, V.** (2005). Carotene, ascorbic acid and sugar content of vacuum dehydrated ripe mango powders stored in flexible packaging material. *Journal of Food Composition and Analysis* **18**: 181-192.
- IBPGR.** (1989). *Descriptors for mango (Mangifera indica L.)*. Rome, International Board for Plant Genetic Resources. 22p.
- Inaba, M. et Crandall, P.G.** (1988). Electrolyte leakage as an indicator of high temperature injury to harvest mature green tomatoes. *Journal of The American Society for Horticultural Science* **113**,(1): 96-99.
- Jackson, J.E., Sharples, R.O. et Palmer, J.W.** (1971). The influence of shade and within tree position on apple fruit size, colour and storage quality. *Journal of Horticultural Science* **52**: 277-287.
- Jacobi, K.K. et Wong, L.S.** (1992). Quality of 'Kensington' mango (*Mangifera indica* Linn) following hot water and vapour-heat treatments. *Postharvest Biology and Technology* **1**: 349-359.
- Jacobi, K.K. et Wong, L.S.** (1993). The effect of simulated air freight conditions on the quality of high humidity hot air treated 'Kensington' mango (*Mangifera indica* Linn). Australasian Postharvest Conference, University of Queensland, Gatton, Qld.,
- Jacobi, K.K. et Gowanlock, D.** (1995). Ultrastructural studies of 'Kensington' mango (*Mangifera indica* Linn) heat injuries. *HortScience* **30**,(1): 102-103.
- Jacobi, K.K., Wong, L.S. et Giles, J.E.** (1995). Effect of fruit maturity on quality and physiology of high humidity hot air-treated 'Kensington' mango (*Mangifera indica* Linn). *Postharvest Biology and Technology* **5**: 149-159.
- Jacobi, K.K., Wong, L.S. et Giles, J.E.** (1996). Conditioning with hot air reduces heat damage caused to 'Kensington' mango (*Mangifera indica* Linn.) by hot water disinfection treatment. *Australian Journal of Experimental Agriculture* **36**: 507-12.
- Jacobi, K.K. et Giles, J.E.** (1997). Quality of 'Kensington' mango (*Mangifera indica* Linn.) fruit following combined vapour heat disinfection and hot water disease control treatments. *Postharvest Biology and Technology* **12**: 285-292.

- Jacobi, K.K.** (1999). The postharvest physiology of heat-treated 'Kensington' mango (*Mangifera indica* Linn.) fruit. School of Land and Food. Brisbane, University of Queensland. PhD 293p.
- Jacobi, K.K., MacRae, E.A. et Hetherington, S.E.** (2000). Effects of hot air conditioning of 'Kensington' mango fruit on the response to hot water treatment. *Postharvest Biology and Technology* **21**: 39-49.
- Jacobi, K.K., MacRae, E.A. et Hetherington, S.E.** (2001a). Postharvest heat disinfestation treatments of mango fruit - Review -. *Scientia Horticulturae* **89**: 171-193.
- Jacobi, K.K., MacRae, E.A. et Hetherington, S.E.** (2001b). Loss of heat tolerance in 'Kensington' mango fruit following heat treatments. *Postharvest Biology and Technology* **21**: 321-330.
- Jacobi, K.K., MacRae, E.A. et Hetherington, S.E.** (2001c). Effect of fruit maturity on the response of 'Kensington' mango fruit to heat treatment. *Australian Journal of Experimental Agriculture* **41**: 793-803.
- Jedele, S.** (2003). An analysis of the world market for mangoes and its importance for developing countries. Conference on international agriculture research for the development. Gottingen. 8-22 october 2003.
- Jenkins, M.E., Suzuki, T.C. et Mount, D.W.** (1997). Evidence that heat and ultraviolet radiation activate a common stress-response program in plants that is altered in the *uvh6* mutant of *Arabidopsis thaliana*. *Plant Physiology* **115**: 1351-1358.
- Jeong, S.M., Kim, S.Y., Kim, D.R., Jo, S.C., Nam, K.C., Ahn, D.U. et Lee, S.C.** (2004). Effect of heat treatment on the antioxidant activity of extracts from citrus peels. *Journal of Agricultural Food Chemistry* **52**: 3389-3393.
- Jha, S.N., Kingsly, A.R.P. et Chopra, S.** (2006). Physical and mechanical properties of mango during growth and storage for determination of maturity. *Journal of Food Engineering* **72**: 73-76.
- Jha, S.N., Chopra, S. et Kingsly, A.P.R.** (2007). Modeling of color values for non destructive evaluation of maturity of mango. *Journal of Food Engineering* **78**: 22-26.
- Jimenez, A., Creissen, G., Kular, B., Firmin, J., Robinson, S., Verhoeyen, M. et Mullineaux, P.** (2002). Changes in oxidative processes and components of the antioxidant system during tomato fruit ripening. *Planta* **214**: 751-758.
- Joel, D.M.** (1980). Resin ducts in the mango fruit : a defense system. *Journal of Experimental Botany* **31**: 1707-1718.
- Jofré, A., Molinas, M. et Pla, M.** (2003). A 10-kDa class-C1 sHsp protects *E. Coli* from oxidative and high temperature stress. *Planta* **217**: 813-819.
- Johansen, D.A.** (1940). *Plant microtechniques*. New York Mc Graw-Hill Book Co.523.
- Johnson, G.I., Wells, I.A. et Cooke, A.W.** (1992). Effect of brushing on mango quality. Horticulture Postharvest Group Biennial Review. Publication, Qld. **1992**: 31.
- Jordan, R.A.** (1993). The disinfestation heat treatment process. Plant quarantine in Asia and the Pacific. A report of an Asian Productivity Organization Study Meeting, Taipei, Taiwan. *Asian Productivity Organization, Tokyo*: 53-68.
- Joshi, P.R. et Shiralkar, N.D.** (1977). Polyphenolases of a local variety of mango. *Journal of Food Science and Technology* **14**: 77-79.

- Joyce, D.C., Hockings, P.D., Mazucco, R.A., Shorter, A.J. et Brereton, I.M.** (1993). Heat treatment injury of mango fruit revealed by non destructive magnetic resonance imaging. *Postharvest Biology and Technology* **3**: 305-311.
- Joyce, D. et Shorter, A.J.** (1994). High-temperature conditioning reduces hot water treatment injury of Kensington Pride Mango fruit. *HortScience* **29**,(9): 1047-1051.
- Kader, A.A.** (2002). Fruits in the global market. *Fruit quality and its biological basis*. (Knee, M.) Columbus, Sheffield Academic Press: 1-16.
- Kamath, P., Correa, G.V. et Pattabiraman, N.** (1987). Changes in the levels of protease and amylase inhibitory activities in mango fruit during growth. *Biochemical Archives* **3**: 179-188.
- Kane, O. et Marcellin, P.** (1978). Incidence of ripening and chilling injury on the oxidative activities and fatty acid compositions of the mitochondria from mango fruits. *Plant Physiology* **61**: 634-638.
- Kaplan, F., Kopka, J., Haskell, D.W., Zhao, W., Schiller, K.C., Gatzke, N., Sung, D.Y. et Guy, C.L.** (2004). Exploring the temperature-stress metabolome of *Arabidopsis* sp.. *Plant Physiology* **136**: 4159-4168.
- Katrodia, J.S.** (1988). Spongy tissue in mango - causes and control measures. *Acta Horticulturae* **231**: 814-827.
- Katrodia, J.S. et Kane, D.A.** (1988). Pattern of distribution of spongy tissue in the affected 'Alphonso' fruits at different locations. *Acta Horticulturae* **231**,: 873-877.
- Katrodia, J.S., Kane, D.A. et Salunkhe, D.K.** (1989). Biochemical nature of spongy tissue in 'Alphonso' fruits. *Acta Horticulturae* **231**,: 835-839.
- Katrodia, J.S. et Sheth, I.K.** (1988). Spongy tissue development in mango fruit of cultivar 'Alphonso' in relation to temperature and its control. *Acta Horticulturae* **231**,: 827-834.
- Ketsa, S., Chidtragool, S., Klein, J.D. et Lurie, S.** (1999). Ethylene synthesis in mango fruit following heat treatment. *Postharvest Biology and Technology* **15**: 65-72.
- Ketsa, S., Chidtragool, S. et Lurie, S.** (2000). Prestorage heat treatment and poststorage quality of mango fruit *HortScience* **35**: 247-249.
- Khachik, F., Beecher, G.R. et Goli, M.B.** (1991). Separation, identification and quantification of carotenoids in fruits, vegetables and human plasma by high performance liquid chromatography. *Pure and Applied Chemistry* **63**,(1): 71-80.
- Kim, Y., Brecht, J.K. et Talcott, S.T.** (2007). Antioxidant phytochemical and fruit quality changes in mango (*Mangifera indica* L.) following hot water immersion and controlled atmosphere storage. *Food Chemistry* **105**: 1327-1334.
- Kim, Y., Lounds-Singleton, A.J. et Talcott, S.T.** (2009). Antioxydant phytochemical and quality changes associated with hot water immersion treatment of mangoes. *Food Chemistry* **115**: 989-993.
- Kimpel, J.A. et Key, J.L.** (1985). Presence of heat shock mRNAs in field grown soybeans. *Plant Physiology* **79**: 672-678
- Kitagawa, M., Matsumura, Y. et Tsuchido, T.** (2000). Small heat shock proteins, IbpA and IbpB are involved in resistances to heat and superoxide stresses in *Escherichia coli*. *FEMS Microbiology Letters* **184**: 165-171.

- Klein, J.D. et Lurie, S.** (1990). Prestorage heat treatment as a means of improving poststorage quality of apples. *Journal of American Horticultural Society* **115**,(2): 265-269.
- Klein, J.D. et Lurie, S.** (1992). Heat treatments for improved postharvest quality of horticultural crops. *HortTechnology* **2**: 316-320.
- Klein, J.D., Abbott, J.A., Basker, D., Conway, W.S., Fallik, E. et Lurie, S.** (1997). Sensory evaluation of heated and calcium treated fruits. PH'96 International Postharvest Science Conference. Taupo, New Zealand.
- Kliewer, W.M. et Lider, L.A.** (1968). Influence of cluster exposure to sun on the composition of Thompson seedless fruit. *American Journal of Enology and Viticulture* **19**: 175-184.
- Kliewer, W.M. et Lider, L.A.** (1970). Effect of day temperature and light intensity on coloration of *Vitis vinifera* L. grapes. *Journal of American Society of Horticultural Science* **95**,(6): 693-697.
- Kliewer, W.M.** (1973). Berry composition of *Vitis vinifera* cultivars as influenced by photo and nycto temperatures during maturation. *Journal of The American Society for Horticultural Science* **98**,(2): 153-159.
- Kliewer, W.M.** (1977). Influence of temperature, solar radiation and nitrogen on coloration and composition of 'Emperor' grapes. *American Journal of Enology and Viticulture* **28**,(2): 96-103.
- Kosiyachinda, S. et Mendoza, D.B., Jr.** (1984). Harvesting of mango. *Mango: Fruit development, postharvest physiology and marketing in ASEAN*. (Mendoza, D. B. J., et Wills, R. B. H. E.) Kuala Lumpur, ASEAN Food Handling Bureau: 33-38.
- Kosiyachinda, S., Lee, S. et Poernomo.** (1984). Maturity indices for harvesting of mango. *Fruit development, postharvest physiology and marketing in ASEAN*. (Mendoza, D.B.J. et Wills, R.B.H.E..) Kuala Lumpur, ASEAN Food Handling Bureau: 33-34.
- Kotzé, W.A.G., Carreira, J.A., Beukes, O. et Redelinghuys, A.U.** (1988). Effect of evaporative cooling on the growth, yield and fruit quality of apples. *Deciduous fruit growers* **38**,(1): 20-24.
- Lako, J., Trenerry, G., Wahlqvist, M., Wattanapenpaiboon, N., Sotheeswaran, S. et Premier, R.** (2007). Phytochemicals flavonols, carotenoids and the antioxidant properties of a wide selection of Fijian fruit, vegetables and other readily available foods. *Food Chemistry* **101**: 1727-1741.
- Lako, J., Trenerry, V.C. et Rochfort, S.** (2008). Routine analytical methods for use in the South Pacific regional laboratories for determining naturally occurring antioxidants in food. *International Food Research Journal* **15**,(3).
- Lakshminarayana, S., Subhadra, N.V. et Subramanyam, H.** (1970). Some aspects of developmental physiology of the mango fruit. *Journal of Horticultural Science* **45**: 133-142.
- Lakshminarayana, S.** (1973). Respiration and ripening patterns in the life of the cycle of mango fruit. *Journal of Horticultural Science* **48**: 227-233.
- Landry, I.G., Chapple, C.C. et Last, R.L.** (1995). *Arabidopsis* mutants lacking phenolic sunscreens inhibit enhanced ultraviolet-B injury and oxidative damage. *Plant Physiology* **109**: 1159-1166.
- Larkindale, J. et Knight, M.R.** (2002). Protection against heat stress-induced oxidative damage in *Arabidopsis* involves calcium, abscisic acid, ethylene and salicylic acid. *Plant Physiology* **128**: 682-695.

- Lay-Yee, M. et Rose, K.J.** (1994). Quality of 'Fantasia' nectarines following forced-air heat treatments for insect disinfestation. *HortScience* **29**: 663-666.
- Lazan, H., Ali, Z.M., Lee, K.W., Voon, J. et Chaplin, G.R.** (1986). The potential role of polygalacturonase in pectin degradation and softening of mango fruit. *ASEAN Food Journal* **2**,(3, 4): 92-98.
- Léchaudel, M.** (2004). Croissance et qualité organoleptique de la mangue (*Mangifera indica* L.) : analyse expérimentale et modélisation de l'effet de la disponibilité hydrique et carbonée. Agronomie. Paris, Institut National Agronomique Paris-Grignon. PhD: 146p.
- Lederman, I.E., Zauberman, G., Weksler, A., Rot, I. et Fuchs, Y.** (1997). Ethylene-forming capacity during cold storage and chilling injury development in 'Keitt' mango fruit. *Postharvest Biology and Technology* **10**: 107-112.
- Lee, G.J. et Vierling, E.** (2000). A small heat shock protein cooperates with heat shock protein70 systems to reactivate a heat denaturated protein. *Plant Physiology* **122**: 189-197.
- Lee, S.K. et Kader, A.A.** (2000). Preharvest and postharvest factors influencing vitamin C content of horticultural crops. *Postharvest Biology and Technology* **20**: 207-220.
- Leley, V.K., Narayana, N. et Daji, J.A.** (1943). Biochemical studies in the growth and ripening of 'Alphonso' Mango. *Indian Journal of Agricultural Science* **13**,(HS): 291-299.
- Leshem, Y.Y., Kuiper, P.J.C., Erdei, L., Lurie, S. et Perl-Treves, R.** (1998). Gas concept and co stress responses exist in plant response ? *Annals of the New York Academy of Sciences* **851**: 181-208.
- Li, J., Ou-Lee, T.M., Raba, R., Amundson R.G. et Last, R.L.** (1993). *Arabidopsis* flavonoids mutants are hypersensitive to UV-B irradiation. *Plant Cell* **5**: 171-179.
- Lindquist, S.** (1986). The heat-shock response. *Annual Review of Biochemistry* **55**: 1151-1191.
- Lindquist, S. et Craig, E.A.** (1988). The heat-shock proteins. *Annual Review of Genetics* **22**: 631-677.
- Lipton, W.J. et Aharoni, Y.** (1979). Chilling injury and ripening of honey dew muskmelons stored at 2.5 °C or 5 °C after ethylene treatment at 20 °C. *Journal of American Horticultural Society* **104**,(3): 327-330.
- Lipton, W.J. et O'Grady, J.J.** (1980). Solar injury of 'Crenshaw' muskmelons : the influence of ultraviolet radiation and of high tissue temperatures. *Agricultural Meteorology* **22**: 235-247.
- Liu, F.W.** (1978). Modification of apple quality by high temperature. *Journal of American Horticultural Society* **103**,(6): 730-732.
- Lizada, M.C.C., Kosiyachinda, S. et Mendoza, D.B.** (1984). Physiological disorders of mango. ASEAN Food handling bureau, Kuala Lumpur: 68-71.
- Lizada, M.C.C., Agravante, J.U. et Brown, E.O.** (1986). Factors affecting postharvest disease control in 'Carabao' mango subjected to hot water treatment. *Philippine Journal of Crop Science* **11**: 153-161.
- Lizada, M.C.** (1991). Postharvest physiology of the mango. *Acta Horticulturae* **291**: 437-543.
- Lizada, M.C.C.** (1993). Mango. *Biochemistry of Fruit Ripening*. (Seymour, G. B., Taylor, J. E. et Tucker, G. A.) London, Chapman and Hall: 255-271.

- Lodh, S. et Pentastico, E.B.** (1975). Physicochemical changes during growth of storage organs. *Postharvest physiology, handling and utilization of tropical and subtropical fruits and vegetables*. (Pantastico E.B.) Wesport, Avi Publishing 1-40.
- Loeillet, D.** (1998). Dossier spécial : Marché de la mangue. *Fruitrop* **44**: 6-15.
- Lopez-Gomes, R. et Gomez-Lim, M.A.** (1992). Changes in mRNA and protein synthesis during ripening in mango fruit. *Journal of plant physiology* **141**: 82-87.
- Lurie, S. et Klein, J.D.** (1990). Heat treatment of ripening apples : differential effects on physiology and biochemistry. *Physiologia plantarum* **78**: 181-186.
- Lurie, S. et Klein, J.D.** (1991). Acquisition of low-temperature tolerance in tomatoes by exposure to high stress temperature. *Journal of American Society of Horticultural Science* **116**,(6): 1007-1012.
- Lurie, S. et Klein, J.D.** (1992). Ripening characteristics of tomatoes stored at 12 °C and 2 °C following a prestorage heat treatment. *Scientia Horticulturae* **51**: 55-64.
- Lurie, S., Klein, J.D., Watkins, C.B., Ross, G.S., Boss, P.K. et Ferguson, I.E.** (1993). Prestorage heat treatments of tomatoes prevent chilling injury and reversibly inhibit ripening. *Acta Horticulturae* **343**: 283-285.
- Lurie, S., Handros, A., Fallik, E. et Shapira, R.** (1996). Reversible inhibition of tomato fruit gene expression at high temperature. *Plant Physiology* **110**: 1207-1214.
- Lurie, S., Laamim, M., Lapsker, Z. et Fallik, E.** (1997). Heat treatments to decrease chilling injury in tomato fruit. Effects on lipids, pericarp lesions and fungal growth. *Physiologia Plantarum* **100**: 297-302.
- Lurie, S. et Sabehat, A.** (1997). Prestorage temperature manipulations to reduce chilling injury in tomatoes. *Postharvest Biology and Technology* **11**: 57-62.
- Lurie, S.** (1998). Postharvest heat treatments. *Postharvest biology and technology* **14**: 257-269.
- Machado Rocha Ribeiro, S., Humberto De Queiros, J., Lopes Ribeiro De Queiros, M.E., Milagres Campos, F. et Pinheiro Sant'ana, H.M.** (2007). Antioxydant in mango (*Mangifera indica* L.) pulp. *Plant Foods for Human Nutrition* **62**: 12-17.
- Mackee, H.S.** (1985). *Les plantes introduites et cultivées de Nouvelle- Calédonie. Flore de la Nouvelle-Calédonie et Dépendances*. Naturelle, M. N. D. H. Paris: 159p.
- Marin, M.A., Cano, M.P. et Fuster, C.** (1992). Freezing preservation of four spanish mango cultivars (*Mangifera indica* L.) : chemical and biochemical aspects. *Z Lebensm Unters Forsh* **194**: 566-569.
- Markham, K.R.** (1982). *Techniques of flavonoids identification*. London, Academic Press. 144p
- Marrs, K.A., Alfenito, R.R., Lloyd, A.M. et Walbot, V.** (1995). A glutathione S transferase involved in vacuolar transfer encoded by the maize gene Bronze 2. *Nature* **375**: 397-400.
- Mattoo, A.K. et Modi, V.V.** (1969). Biochemical aspects of ripening and chilling injury in mango fruit. Proceedings of the international conference on tropical and subtropical fruits. London, Tropical Products Institute: 111-115
- Mattoo, A.K. et Modi, V.V.** (1970). Partial purification and properties of enzyme inhibitors from unripe mangoes. *Enzymologia* **39**: 237-247.

- Mattoo, A.K., Murata, T., Pantastico, E.B., Chachin, K., Ogata, K. et Phan, C.T.** (1975). Chemical changes during ripening and senescence. *Postharvest physiology, handling and utilization of tropical and subtropical fruits and vegetables*. (Pantastico, E. B.) Wesport AVI Publishing: 103-127.
- Mazza, C.A., Bocalandro, H.E., Giordano, C.V., Battista, D., Scopel, A.L. et Ballaré, C.L.** (2000). Functional significance and induction by solar radiation of ultraviolet-absorbing sunscreens in field-grown soybean crops. *Plant Physiology* **122**: 117-125.
- McCollum, T.G., D'aquino, S. et Mc Donald, R.E.** (1993). Heat treatment inhibits mango chilling injury. *HortScience* **28**,(3): 197-198.
- McDonald, R.E. et Miller, W.R.** (1994). Quality and condition maintenance. *Quarantine treatments for pests and food plants*. (Sharp, J. L. et Hallman, G. F.), Westview Press, Boulder, VO: 249-277.
- Medlicott, A.P. et Thompson, A.K.** (1985). Analysis of sugars and organic acids in ripening mango fruits (*Mangifera indica* L. var Keitt) by high performance liquid chromatography. *Journal of Science Food Agricultural* **36**: 561-566.
- Medlicott, A.P., Bhogal, M. et Reynolds, S.B.** (1986a). Changes in peel pigmentation during ripening of mango fruit (*Mangifera indica* var. Tommy Atkins). *Annals of Applied Biology* **109**: 651-656.
- Medlicott, A.P., Reynolds, S.B. et Thompson, A.K.** (1986b). Effects of temperature on the ripening of mango fruit (*Mangifera indica* L. var Tommy Atkins). *Journal of Science of Food and Agriculture* **37**: 469-474.
- Medlicott, A.P., Reynolds, S.B., New, S.W. et Thompson, A.K.** (1988). Harvest maturity effects on mango fruit ripening. *Tropical Agriculture* **65**: 153-157.
- Mendez, M., Gwynn Jones, D. et Manetas, Y.** (1999). Enhanced UV-B radiation under field conditions increases anthocyanins and reduces the risk of photoinhibition but does not affect growth in the carnivorous plant *Pinguicula vulgaris*. *New Phytologist*, **144**: 275-282.
- Mercadante, A., Rodriguez-Amaya, D.B. et Britton, G.** (1997). HPLC and mass spectrometric analysis of carotenoids from mango. *Journal of Agricultural Food Chemistry* **45**: 120-123.
- Merrit, R.H., Stiles, W.C., Havens, A.V. et Mitterling, L.A.** (1961). Effect of preharvest air temperatures on storage scald of 'Stayman' apples. *Proceedings of American Society of Horticultural Science* **78**: 24-34.
- Merzlyak, M.N. et Chivkunova, O.** (2000). Light stress induced pigment changes and evidence for anthocyanin photoprotection in apples. *Journal of Photochemistry and Physiology* **55**: 155-163.
- Merzlyak, M.N., Solovchenko, A. et Chivkunova, O.** (2002). Patterns of pigment changes in apple fruits during adaptation to high sunlight and sunscald development. *Plant Physiology and Biochemistry* **40**: 679-684.
- Miller, W.R. et McDonald, R.E.** (1991a). Quality changes during storage and ripening of 'Tommy atkins' mangos treated with heated forced air. *HortScience* **26**,(4): 395-397.
- Miller, W.R. et McDonald, R.E.** (1991b). Quality of stored 'Marsh' and 'Ruby Red' grapefruit after high-temperature, forced-air treatment. *HortScience* **26**,(9): 1188-1191.
- Miller, W.R. et McDonald, R.E.** (1992). Postharvest quality of early season grapefruit after forced air vapor heat treatment. *HortScience* **27**: 422-424.

- Miller, N.J., Rice-Evans, C.A., Davies, M.J., Gopinathan, V. et Milner, A.** (1993). A novel method for measuring antioxidant capacity and its application to monitoring the antioxidant status in premature neonates. *Clinical Science* **84**: 407-412.
- Miller, N.J., Sampson, J., Candeias, L.P., Bramley, P.M. et Rice-Evans, C.A.** (1996). Antioxidant activities of carotenes and xanthophylls. *FEBS Letters* **384**: 240-242.
- Mitcham, E.J. et McDonald, R.E.** (1992). Effect of high temperature on cell wall modifications associated with tomato fruit ripening. *Postharvest Biology and Technology* **1**: 257-264.
- Mitcham, E.J. et McDonald, R.E.** (1993). Respiration rate, internal atmosphere and ethanol and acetaldehyde accumulation in heat treated mango fruit. *Postharvest Biology and Technology* **3**: 77-86.
- Mitcham, E.J. et McDonald, R.E.** (1997). Effects of postharvest heat treatments on inner and outer tissue of the mango fruit. *Tropical Science* **37**: 193-205.
- Mitra, S.K. et Baldwin, E.A.** (1997). Mango. *Postharvest physiology and storage of tropical and subtropical fruit*. (Mitra, S. K.) Wallingford, CAB International: 85-122.
- Mittler, R.** (2002). Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Science* **7**: 405-410.
- Mizrach, A., Flitsanov, U., Schmilovitch, Z. et Fuchs, Y.** (1999). Determination of mango physiological indices by mechanical wave analysis. *Postharvest Biology and Technology* **16**: 179-186.
- Mizrach, A.** (2000). Determination of avocado and mango fruit properties by ultrasonic technique. *Ultrasonics* **38**: 717-722.
- Moco, S., Bino, R.J., Vorst, O., Verhoeven, H.A., De Groot, J., Van Beek, T.A., Vervoort, J. et De Vos, C.H.R.** (2006). A liquid chromatography-mass spectrometry-based metabolome database for tomato. *Plant Physiology* **141**: 1205-1218.
- Mogk, A., Schlieker, C., Friedrichl, L., Schonfeld, H.J., Vierling, E. et Bukay, B.** (2003). Refolding of substrates bound to small Hsps relies on a disaggregation reaction mediated most efficiently by ClpB/DnaK. *The Journal of Biological Chemistry* **278**,(33): 31033-31042.
- Monselesse, S.P. et Goren, R.** (1987). Preharvest growing conditions and postharvest behaviour of subtropical and temperature zone fruits. *HortScience* **22**,(6): 1185-1189.
- Montero, L.M., Escribano, M.I. et De La Plaza, J.L.** (1995). Chilling temperature storage induces changes in protein patterns and protease activity in cherimoya fruit. *Postharvest Biology and Technology* **5**: 251-260.
- Morimoto, R.I., Jolly, C., Satyal, S., Mathew, A., Shi, Y. et Kitagawa, K.** (1999). Molecular chaperones and the heat shock response. *British Journal of Cancer* **80**: S18.
- Mukherjee, S.K.** (1997). Introduction : Botany and Importance. *The mango : botany, production and uses*. (Litz, R. E.) Homestead, CAB International: 1-19.
- Nakasone, H. et Paull, E.** (1998). Mango. *Tropical Fruit Insects*. Cab International: 208-238.
- Nedunchezian, N., Annamalainathan, K. et Kulandaivelu, G.** (1992). Induction of heat shock proteins in *Vigna sinensis* seedlings growing under ultraviolet-B (280-320 nm) enhanced radiation. *Physiology of Plant* **85**: 503-506.

- Neuvo, P.A., Cua, A.U. et Lizada, M.C.C.** (1984). Internal breakdown in 'Carabao' mango subjected to modified atmosphere. III. Starch in the spongy tissue. *Postharvest Research Notes* **1**: 34-35.
- Nick, P., Ehmann, B., Furuya, M. et Schäfer, E.** (1993). Cell communication, stochastic cell responses, and anthocyanin pattern in mustard cotyledons. *Plant Cell and Environment* **5**: 541-552.
- Niyogi, K.K.** (1999). Photo protection revised : genetic and molecular approaches. *Annual review of plant physiology and plant molecular biology* **50**: 333-359.
- Obenland, D.M. et Aung, L.H.** (1997). Sodium chloride reduces damage to nectarines caused by hot water treatments. *Postharvest Biology and Technology* **12**: 15-19.
- Palmer, J.W.** (1989). Canopy manipulation for optimum utilization of light. *Manipulating of fruiting*. Bonnington, Sutton. **1**: 245-262.
- Panhwar, F.** (2005). Post harvest technology of mango fruits, its development physiology, pathology and marketing in Pakistan, Digitalverlag GmbH Germany.
- Parchomchuk, P. et Meheriuk, M.** (1996). Orchard cooling with pulsed overtree irrigation to prevent solar injury and improve fruit quality of 'Jonagold' apples. *HortScience* **31**,(5): 802-804.
- Parsell, D.A. et Lindquist, S.** (1993). The function of heat-shock proteins in stress tolerance : degradation and reactivation of damaged proteins. *Annual Review of Genetics* **27**: 437-496.
- Parsell, D.A. et Lindquist, S.** (1994). Heat shock proteins and stress tolerance. *The biology of heat shock proteins and molecular chaperones*. (Morimoto, R. I., Tissieres, A. et Georgopoulos, C.) New York, Cold Spring Harbor Laboratory Press: 457-494.
- Paull, R.E. et Chen, N.J.** (1990). Heat shock response in field-grown, ripening papaya fruit. *Journal of American Society of Horticultural Science* **115**,(4): 623-631.
- Paull, R.E.** (1994). *Insect pests and fresh horticultural products. Treatments and Responses*. (Paull, R. E. et Armstrong, J. W.) Wallingford, CAB International: 360p.
- Paull, R.E. et McDonald, R.E.** (1994). Heat and cold treatments. *Insect pests and fresh horticultural products. Treatments and Responses*. (Paull, R. E. et Armstrong, J. W.) Wallingford, CAB International: 1-33.
- Paull, R.E.** (1995). Preharvest factors and the heat sensitivity of field-grown ripening papaya fruit. *Postharvest Biology and Technology* **6**: 167-175.
- Paull, R.E. et Reyes, M.E.Q.** (1996). Preharvest weather conditions and pineapple fruit translucency. *Scientia Horticulturae* **66**: 59-67.
- Paull, R.E. et Chen, N.J.** (2000). Heat treatment and fruit ripening. *Postharvest Biology and Technology* **21**: 21-37.
- Peacock, B.C., Murray, C., Kosiyachinda, S., Kosittrakul, M. et Tansiriyakul, S.** (1986). Influence of harvest maturity of mangoes on storage potential and ripe fruit quality. *ASEAN Food Journal* **2**,(3-4): 99-103.
- Pech, J.C., Bouzayen, M. et Latché, A.** (2008). Climacteric fruit ripening : Ethylene-dependent and independent regulation of ripening pathways in melon fruit. *Plant Science* **75**: 114-120.

- Pelligrini, N., Simonetti, P., Gardana, C., Brenna, O., Brighenti, F. et Pieta, P.** (2000). Polyphenol content and total antioxidant activity of *Vini noveli* (young red vines). *Journal of Agricultural Food Chemistry* **48**,(3): 732-735.
- Pennock, W. et Maldonado, G.** (1962). Hot water treatment of mango fruits to reduce anthracnose decay. *Journal of Agriculture of University of Puerto Rico* **46**: 272-283.
- Pesis, E., Fuchs, Y. et Zauberman, G.** (1978). Cellulase activity and fruit softening in avocado. *Plant Physiology* **61**: 416-419.
- Pesis, E., Faure, M. et Marinansky-Ben Arie, R.** (1997). Induction of chilling tolerance in mango by temperature conditioning , heat , low O₂ and ethanol vapours. *Acta Horticulturae* (**455**): 629-634.
- Pesis, E., Aharoni, D., Aharon, Z., Ben-Ari, R., Aharoni, N. et Fuchs, Y.** (2000). Modified atmosphere and modified humidity packaging alleviates chilling injury symptoms in mango fruit. *Post Harvest Biology and Technology* **19**: 93-101.
- Pla, M., Huguet, G., Verdaguer, D., Puigderrajols, P., Llompert, B., Nadal, A. et Molinas, M.** (1998). Stress proteins co-expressed in suberized and lignified cells and in apical meristems. *Plant Science* **139**: 49-57.
- Pnueli, L., Liang, H., Rozenberg, M. et Mittler, R.** (2003). Growth suppression, altered stomatal responses and augmented induction of heat shock proteins in cytosolic ascorbate peroxidase (APX1)-deficient *Arabidopsis* plants. *The Plant Journal* **34**: 187-203.
- Polle, A. et Renneberg, H.** (1994). Photooxidative stress in trees. *Photooxidative stresses in plants : causes and amelioration*. (Foyer, C. H. et Mullineaux, P.) Boca Raton, Florida, USA, CRC Press. 936-940
- Ponce De León, L., Munoz, C., Peres, L., Diaz De Leon, F., Kerbel, C., Perez Flores, L., Esparza, S., Bosquez, E. et Trinidad, M.** (1997). Hot water quarantine treatment and water cooling of 'Haden' mangoes. *Acta Horticulturae* (**455**): 786-796.
- Porritt, S.W. et Lidster, P.D.** (1978). The effect of prestorage heating on ripening and senescence of apples during cold storage. *Journal of American Horticultural Society* **103**,(5): 584-587.
- Prabha, T.N. et Patwardhan, M.V.** (1986). Endogenously oxidizable polyphenols of mango, sapota and banana. *Acta Alimentaria* **15**,(123-128).
- Prasanna, V., Prabha, T.N. et Tharanathan, R.N.** (2006). Multiple forms of polygalacturonase from mango (*Mangifera indica* L.) cv. Alphonso fruit. *Food Chemistry*.
- Preville, X., Salvemini, F., Giraud, S., Chaufour, S., Paul, C., Stepien, G., Ursini, M.V. et Arrigo, A.P.** (1999). Mammalian small stress proteins protect against oxidative stress through their ability to increase glucose-6-phosphate dehydrogenase activity and by maintaining optimal cellular detoxifying machinery. *Experimental Cell Research* **247**: 61-78.
- Prior, R.L. et Cao, G.** (2000). Antioxidant phytochemicals in fruits and vegetables : diet and health applications. *Horticultural Science* **34**,(4): 588-592.
- Prior, R.L., Cao, G., Martin, A., Sofic, E., Mcewen, J., O'brien, C., Lischner, N., Ehlenfeldt, M., Kalt, W., Krewer, G. et Mainland, C.M.** (1998). Antioxidant capacity as influenced by total phenolic and anthocyanin content, maturity, and variety of *Vaccinium* Species. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **46**: 2686-2693.

- Puigderrajols, P., Jofré, A., Mir, G., Pla, M., Verdaguer, D., Huguet, G. et Molinas, M.** (2002). Developmentally and stress-induced small heat shock proteins in cork oak somatic embryos. *Journal of Experimental Botany* **53**,(372): 1445-1452.
- Purvis, A.C.** (1980). Influence of canopy depth on susceptibility of 'Marsh' grapefruit to chilling injury. *HortScience* **15**,(6): 731-733.
- Purvis, A.C.** (1984). Importance of water loss in the chilling injury of grapefruit stored at low temperature. *Scientia Horticulturae* **23**: 261-267.
- Quimio, A.J. et Quimio, T.H.** (1973). Postharvest control of Philippine mango anthracnose by hot water treatment. *Philippine Agriculture* **58**: 138-146.
- Quinn, P.J.** (1988). Effects of temperature on cell membranes. *Plant membranes : structure, assembly and function.* (Long, S. P. et Woodward, F. I.) London, The Biochemistry Society: 97-112.
- Rabinowitch, H.D., Kedar, N. et Dudowski, P.** (1974). Induction of sunscald damage in tomatoes under natural and controlled conditions. *Scientia Horticulturae* **2**: 265-272.
- Rabinowitch, H.D., Ben-David, B. et Friedmann, M.** (1986). Light is essential for sunscald induction in cucumber and pepper fruits, whereas heat conditioning provides protection. *Scientia Horticulturae* **29**: 21-29.
- Rainwater, D.T., Gossett, D.R., Millhollon, E.P., Hanna, H.Y., Banks, S.W. et Lucas, M.C.** (1996). The relationship between yield and the antioxidant defense system in tomatoes grown under heat stress. *Free Radical Research* **25**: 421-435.
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M. et Rice-Evans, C.A.** (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology & Medicine* **26**: 1231-1237.
- Reay, P.F. et Lancaster, J.E.** (2001). Accumulation of anthocyanins and quercetin glycosides in 'Gala' and 'Royal Gala' apple fruit skin with UV-B-visible irradiation : modifying effects of fruit maturity, fruit side and temperature. *Scientia Horticulturae* **90**: 57-68.
- Retig, N. et Kedar, N.** (1967). The effect of stage of maturity on heat absorption and sunscald of detached tomato fruits. *Israel Journal of Agricultural Research* **17**,(2): 77-83.
- Reyes, L.F. et Cisneros-Zevallos, L.** (2007). Electron-beam ionizing radiation stress effects on mango fruit (*Mangifera indica* L.) antioxidant constituents before and during postharvest storage. *Journal of Agricultural Food Chemistry* **55**: 6132-6139.
- Roe, B. et Bruemmer, J.H.** (1981). Changes in pectic substances and enzymes during ripening and storage of 'Keitt' mangos. *Journal of Food Science* **46**: 186-189.
- Rosales, M.A., Rubio-Wilhelmi, M.M., Castellano, R., Castilla, N., Ruiz, J.M. et Romero, L.** (2007). Sucrolytic activities in cherry tomato fruits in relation to temperature and solar radiation *Scientia Horticulturae* **113**: 244-249.
- Sabehat, A., Weiss, D. et Lurie, S.** (1996). The correlation between heat-shock protein accumulation and persistence and chilling tolerance in tomato fruit. *Plant Physiology* **110**: 531-537.
- Sabehat, A., Lurie, S. et Weiss, D.** (1998). Expression of small heat-shock proteins at low temperature. *Plant Physiology* **117**: 651-658.

- Sala, J.M. et Lafuente, M.T.** (2000). Catalase enzyme activity is related to tolerance of mandarin fruits to chilling. *Postharvest Biology and Technology* **20**: 81-89.
- Salveit, M.E.J.** (1991). Prior temperature exposure affects subsequent chilling sensitivity. *Physiologia Plantarum* **82**: 529-536.
- Sankat, C.K., Bissoon, K., Maharaj, R. et Lauckner, B.** (1994). Ripening quality of 'Julie' mangoes stored at low temperatures. *Acta Horticulturae* **368**: 712-722.
- Santoro, M.G.** (2000). Heat shock factors and the control of stress response. *Biochemical Pharmacology* **59**: 55-63.
- Sarkar, N.K., Kim, Y.K. et Grover, A.** (2009). Rice sHsp genes: genomic organization and expression profiling under stress and development. *BMC Genomics* **10**.
- Saucedo Veloz, C., Esparza Torre, F. et Lakshminaryana, S.** (1977). Effect of refrigerated temperatures on the incidence of chilling injury and ripening quality of mango fruit. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*. **90**: 205-210.
- Saure, M.C.** (1990). External control of anthocyan formation in apple. *Scientia Horticulturae* **42**: 181-218.
- Scandalios, J.G.** (1993). Oxygen stress and superoxide dismutases. *Plant Physiology* **101**: 7-12.
- Schägger, H. et Von Jagow, G.** (1987). Tricine-sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis for the separation of proteins in the range from 1 to 100 kDa. *Analytical Biochemistry* **166**: 368-379.
- Schieber, A., Ullrich, W. et Carle, R.** (2000). Characterization of polyphenols in mango puree concentrate by HPLC with diode array and mass spectrometric detection. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* **1**: 161-166.
- Schieber, A., Berardini, N. et Carle, R.** (2003). Identification of flavonol and xanthone glycosides from mango (*Mangifera indica* L. cv. Tommy Atkins) peels by HPLC-Electrospray ionization mass spectrometry. *Journal of Agricultural Food Chemistry* **51**: 5006-5011.
- Schmilovitch, Z., Mizrach, A., Hoffman, A., Egozi et Fuchs, Y.** (2000). Determination of mango physiological indices by near-infrared spectrometry. *Postharvest Biology and Technology* **19**: 245-252.
- Schmitzer, V., Osterc, G., Veberic, R. et Stampar, F.** (2009). Correlation between chromaticity values and major anthocyanins in seven *Acer palmatum* Thunb. cultivars. *Scientia Horticulturae* **119**: 442-446.
- Schöffl, F. et Key, J.L.** (1982). An analysis of mRNAs for a group of heat shock proteins of soybean using cloned cDNAs. *Journal of Molecular Applied Genetics* **1**,(4): 301-314.
- Schrader, L., Zhang, J. et Sun, J.** (2003). Environmental stresses that cause sunburn of apple. *Acta Horticulturae* **618**: 397-405.
- Schroeder, C.A.** (1965). Temperature relationships in fruit tissue under extreme conditions. *Proceedings of American Society of Horticultural Science* **87**: 199-203.
- Schroeder, C.A. et Kay, E.** (1961). Temperature conditions and tolerance of avocado fruit tissue. *Californian Avocado Society Yearbook*: 87-92.

- Segarra-Carmona, A.E., Franqui, R.A., Ramirez-Ramos, L.V., Santiago, L.R. et C.N., T.-R.** (1990). Hot water dip treatments to destroy *Anastrepha obliqua* larvae in mangoes from Puerto Rico. *Journal of Agriculture University of Puerto Rico* **74**,(4): 441-447.
- Sellappan, S. et Akoh, C.C.** (2002). Flavonoids and antioxidant capacity of Georgia-grown Vidalia onions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **50**: 5338-5342.
- Sellappan, S., Akoh, C.C. et Krewer, G.** (2002). Phenolic compounds and antioxidant capacity of Georgia-Grown blueberries and blackberries. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **50**: 2432-2438.
- Selvaraj, Y. et Kumar, R.** (1998). Studies on fruit softening enzymes and polyphenol oxidase activity in ripening mango (*Mangifera indica* L.). *Journal of Food Science and Technology* **26**,(4): 218-222.
- Seymour, G.B., John, P. et Thompson, A.K.** (1987). Inhibition of degreening in the peel of bananas ripened at tropical temperature. *Annals of Applied Biology* **110**: 153-161.
- Sharp, J.L.** (1986). Hot water treatment for control of *Anastrepha suspense* (Diptera:Tephritidae) in mangoes. *Journal of Economy and Entomology* **79**: 706-708.
- Sharp, J.L.** (1994). Hot water immersion. *Quarantine treatments for Pest and Food Plants*. (Sharp, J. L. et Hallman, G. J.) Boulder, CO, Westview Press: 133-147.
- Sharp, J.L., Ouye, M.T., Hart, W., Ingle, S., Hallman, G.J., Gould, W. et Chew, V.** (1989). Immersion of Florida mangos in hot water as a quarantine treatment for Caribbean fruit fly. *Journal of Economics Entomology* **82**: 186-188.
- Shellie, K.C. et Mangan, E.L.** (1994). Disinfestation : effect of non chemical treatments on market quality of fruit. Postharvest Handling of Tropical Fruits, ACIAR.
- Shewfelt, R.L. et Del Rosario, B.A.** (2000). The role of lipid peroxidation in storage disorders of fresh fruits and vegetables. *HortScience* **35**,(4): 575-579.
- Shigeoka, S., Ishikawa, T., Tamoi, M., Miyagawa, Y., Takeda, T., Yabuta, Y. et Yoshimura, K.** (2002). Regulation and function of ascorbate peroxidase isozymes. *Journal of Experimental Botany* **53**,(372): 1305-1319.
- Shivashankara, K.S., Isobe, S., Imran Al-Haq, M., Takenaka, M. et Shiina, T.** (2004). Fruit antioxidant activity, ascorbic acid, total phenol, quercetin, carotene of 'Irwin' mango fruits stored at low temperature after high electric field pre treatment. *Journal of Agricultural Food Chemistry* **52**: 1281-1286.
- Shulaev, V., Cortes, D., Miller, G. et Mittler, R.** (2008). Metabolomics for plant stress response. *Physiologia Plantarum* **132**: 199-208.
- Simmons, S.L., Hofman, P.J., Whiley, A.W. et Hetherington, S.E.** (1998). Effects of leaf: fruit ratios on fruit growth, mineral concentration and quality of mango (*Mangifera indica* L. cv. 'Kensington Pride'). *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* **73**,(3): 367-374.
- Simonetti, P., Piergiorgio, P. et Testolin, G.** (1997). Polyphenol content and total antioxidant potential of selected italian vines. *Journal of Agricultural Food Chemistry* **45**,(4): 1152-1155.
- Singer, M.A. et Lindquist, S.** (1998). Multiple effects of trehalose on protein olding *in vitro* and *in vivo*. *Molecular Cell* **1**: 639-648.

- Smart, R.E. et Sinclair, T.R.** (1976). Solar heating of grape berries and other spherical fruits. *Agricultural Meteorology* **17**: 241-259.
- Smirnoff, N.** (1998). Plant resistance to environmental stress. *Current Opinion in Biotechnology* **9**: 214-219.
- Smith, E.S.C. et Chin, D.** (1989). Hot water dipping as a disinfestation treatment against the fruit fly *Dacus aquilonis* in mangoes. *Acta Horticulturae* **291**: 389-403.
- Smoot, J.J. et Segall, R.H.** (1963). Hot water dipping as a disinfestation treatment against the fruit fly *Dacus aquiloni* (May) (Dipterae : Tephritidae) in mangoes. *Plant Disease Report* **47**: 739-742.
- Solovchenko, A. et Schmitz-Eiberger, M.** (2003). Significance of skin flavonoids for UV-B protection in apple fruit. *Journal of Experimental Botany* **54**,(389): 1977-1984.
- Sorensen, J.G., Kristensen, T.N. et Loeschcke, V.** (2003). The evolutionary and ecological role of heat shock proteins. *Ecology Letters* **6**: 1025-1037.
- Sozzi, G., Cascone, G. et Frascina, A.A.** (1996). Effect of high temperature stress on endo-beta-mannanase and alpha et beta-galactosidase activities during tomato fruit ripening. *Postharvest Biology and Technology* **9**: 49-63.
- Spalding, D.H., King, J.R. et Sharp, J.L.** (1988). Quality and decay of mangoes treated with hot water for quarantine control of fruit fly. *Tropical Science* **28**: 95-101.
- Stapleton, A.E. et Walbot, V.** (1994). Flavonoids can protect maize DNA from the induction of ultraviolet radiation damage. *Plant Physiology* **105**: 881-889.
- Stewart Jr, W.E., Becker, B.R., Greer, M.E. et Stickler, L.A.** (1990). An experimental method of approximating effective heat transfer coefficients for food products. *ASHRAE Trans* **96**: 142-147.
- Steyn, W.P., Wand, S.J.E., Holcroft, D.M. et Jacobs, G.** (2002). Anthocyanins in vegetative tissue : a proposed unified function in photoprotection. *New Phytologist* **155**: 349-361.
- Strack, D. et Wray, V.** (1989). Anthocyanins. *Biochemistry* **1**: 325-356.
- Studer, S. et Narberhaus, F.** (2000). Chaperone activity and homo and hetero-oligomer formation of bacterial small heat shock proteins. *The Journal of Biological Chemistry* **275**,(47): 37212-37218.
- Subedi, P.P., Walsh, K.B. et Owens, G.** (2007). Prediction of mango eating quality at harvest using short-wave near infrared spectrometry. *Postharvest Biology and Technology* **43**: 326-334.
- Sun, B.H. et Francis, F.J.** (1967). Apple anthocyanins : identification of cyanidin-7-arabinoside. *Journal of Food Science* **32**: 647-649.
- Sun, W., Van Montagu, M. et Verbruggen, N.** (2002). Small heat shock proteins and stress tolerance in plants. *Biochimica et Biophysica Acta* **1577**: 1-9.
- Suzuki, N. et Mittler, R.** (2006). Reactive oxygen species and temperature stresses : a delicate balance between signaling and destruction. *Physiologia plantarum* **126**: 45-51.
- Talcott, S.T., Moore, J.P., Lounds-Singleton, A.J. et Percival, S.S.** (2005). Ripening associated phytochemical changes in mangos (*Mangifera indica* L.) following thermal quarantine and low temperature storage. *Journal of Food Science* **70**,(5).

- Thanaraj, T., Terry, L.A. et Bessant, C.** (2009). Chemometric profiling of pre climacteric Sri Lankan mango. *Food Chemistry* **112**: 786-794.
- Thomas, P. et Joshi, M.R.** (1988). Reduction in chilling injury in ripe 'Alphonso' mango fruit in cold storage by temperature conditioning. *International Journal of Food Science and Technology*. **23**: 447-455.
- Thompson, A.K.** (1996). *Postharvest technology of fruit and vegetables*. Blackwell Science, 410p.
- Thorpe, M.R.** (1974). Radiant heating of apples. *The Journal of Applied Ecology* **11**: 755-760.
- Tourjee, E.R., Barrett, D.M., Romero, M.V. et Gradziel, T.M.** (1998). Measuring flesh color variability among processing Clingstone peach genotypes differing in carotenoid composition *Journal of the American Society for Horticultural Science* **123**,(3): 433-437.
- Towbin, H., Staehelin, T. et Gordon, J.** (1979). Electrophoretic transfer of proteins from polyacrylamide gels to nitrocellulose sheets: procedure and some applications. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **76**,(9): 4350-4354.
- Tripoli, E., La Guardia, M., Giammanco, S., Di Majo, D. et Giammanco, M.** (2007). Citrus flavonoids : Molecular structure, biological activity and nutritional properties : A review. *Food Chemistry* **104** (2):466-479.
- Underhill, S., Ledger, S.N. et Dahler, J.** (1996). Mango skin browning - Identification guide. Queensland Department of Primary Industries Publication: 4p.
- Vanbogelen, R.A., Kelley, P.M. et Neidhardt, F.C.** (1987). Differential induction of heat shock, SOS, and oxidation stress regulons and accumulation of nucleotides in *Escherichia coli*. *Journal of Bacteriology* **169**,(1): 26-32.
- Veinger, L., Diamant, S., Buchner, J. et Goloubinoff, P.** (1998). The small heat-shock protein IbpB from *Escherichia coli* stabilizes stress denatured proteins for subsequent refolding by a multichaperone network. *The Journal of Biological Chemistry* **279** (18): 11092-11037.
- Vera De Rosso, V. et Mercadante, A.Z.** (2007). Evaluation of colour and stability of anthocyanins from tropical fruits in an isotonic soft drink system. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* **8**: 347-352.
- Verdaguer, D., Aranda, X., Jofré, A., El Omari, B., Molinas, M. et Fleck, I.** (2003). Expression of low molecular weight heat-shock proteins and total antioxidant activity in the Mediterranean tree *Quercus ilex* L. in relation to seasonal and diurnal changes in physiological parameters. *Plant, Cell and Environment* **26**: 1407-1417.
- Vicente, A.R., Costa, M.L., Martinez, G.A., Chaves, A.R. et Civello, P.M.** (2005). Effect of heat treatments on cell wall degradation and softening in strawberry fruit. *Postharvest Biology and Technology* **38**: 213-222.
- Vierling, E.** (1991). The roles of heat shock proteins in plants. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* **42**: 579-620.
- Viner, R.I. et Clegg, J.S.** (2001). Influence of trehalose on the molecular chaperone activity of p26, a small heat shock/alpha crystallin protein. *Cell Stress Chaperones* **6**: 126-135.
- Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M. et Foolad, M.R.** (2007). Heat tolerance in plants : an overview. *Environmental and experimental botany* **61**,(3): 199-223.

- Wang, B., Wang, J., Liang, H., Yi, J., Zhang, J., Lin, L., Wu, Y., Feng, X., Cao, J. et Jiang, W.** (2008). Reduced chilling injury in mango fruit by 2,4-dichlorophenoxyacetic acid and the antioxidant response. *Postharvest Biology and Technology* **48**: 172-181.
- Wang, D. et Luthe, D.S.** (2003). Heat sensitivity in a bentgrass variant. Failure to accumulate a chloroplast heat shock protein isoform implicated in heat tolerance. *Plant physiology* **133**: 319-327.
- Wang, H., Arakawa, O. et Motomura, Y.** (2000). Influence of maturity and bagging on the relationship between anthocyanin accumulation and phenylalanine ammonia-lyase (PAL) activity in Jonathan apples. *Postharvest Biology and Technology* **19**: 123-128.
- Wang, W., Vinocur, B., Shoseyov, O. et Altman, A.** (2004). Role of plant heat-shock proteins and molecular chaperones in the abiotic stress response. *Trends in Plant Science* **9**,(5): 244-252.
- Waters, E.R., Lee, G.J. et Vierling, E.** (1996). Evolution, structure and function of the small heat shock proteins in plants. *Journal of Experimental Botany* **47**: 325-338.
- Wehmeyer, N. et Vierling, E.** (2000). The expression of small heat shock proteins in seeds responds to discrete developmental signals and suggests a general protective role in desiccation tolerance. *Plant Physiology* **122**: 1099-1108.
- Whiley, A.W. et Schaffer, B.** (1997). Stress physiology. *The mango: botany, production and uses.* (Litz, R. E.) Florida, CAB International: 147-173.
- Williamson, M. et Winkelman, P.** (1994). Heat Treatments Facilities. *Insect pests and fresh horticultural products : treatment and responses.* (Paull, R. E. et Armstrong, J. W.) Wallingford, U.K., CAB International: 249-271.
- Wills, R., Mc Glasson, B., Graham, D. et Joyce, D.** (2007). *Postharvest. An introduction to the physiology and handling of fruit, vegetables and ornamentals.* Sydney, University of New South Wales. 227 p.
- Wirth, D., Gustin, P., Drion, P.V., Dessy-Doize, C. et Christians, E.S.** (2002). Les protéines de choc thermique (heat shock proteins). 1. Classification, structure, fonctions et implications dans les processus pathologiques. *Annales médicales vétérinaires* **14**: 201-216.
- Woodall, G.S. et Stewart, G.R.** (1998). Do anthocyanins play a role in UV protection of the red juvenile leaves of *Syzygium* sp.. *Journal of Experimental Botany* **49**,(325): 1447-1450.
- Woolf, A.B., Watkins, C.B., Bowe, J.H., Lay Yee, M., Maindonald, J.H. et Ferguson, I.B.** (1995). Reducing external chilling injury in stored 'Hass' avocados with dry heat treatments. *Journal of The American Society for Horticultural Science.* **120**,(6): 1050-1056.
- Woolf, A.B. et Laing, W.A.** (1996). Avocado fruit skin fluorescence following hot water treatments and pretreatments. *Journal of American Society of Horticultural Science* **121**: 141-151.
- Woolf, A.B.** (1997). Reduction of chilling injury in stored hass avocado fruit by 38 °C water treatments. *HortScience* **32**,(7): 247-251.
- Woolf, A.B. et Lay-Yee, M.** (1997). Pretreatments at 38 °C of 'Hass' avocado confer thermotolerance to 50 °C hot water treatments. *HortScience* **32**,(4): 705-708.
- Woolf, A.B., Ball, S., Spooner, K.J., Lay Lee, M., Ferguson, I.B., Watkins, C.B., Gunson, A. et Forbes, S.K.** (1997a). Reduction of chilling injury in the sweet persimmon 'Fuyu' during storage by dry air heat treatments. *Postharvest Biology and Technology* **11**: 155-164.

- Woolf, A.B., E.A., M., Spooner, K.J. et Redgwell, R.J.** (1997b). Changes to physical properties of the cell wall and polyuronides in respond to heat treatment of 'Fuyu' persimmon that alleviate chilling injury. *Journal of The American Society for Horticultural Science* **122**: 698-702.
- Woolf, A.B., Bowen, J.H. et Ferguson, I.B.** (1999a). Preharvest exposure to the sun influences postharvest responses on 'Hass' avocado fruit. *Postharvest Biology and Technology* **15**: 143-153.
- Woolf, A.B., Ferguson, I.B., Requejo-Tapia, L.C., Boyd, L., Laing, W.A. et White, A.** (1999b). Impact of sun exposure on harvest quality of 'Hass' avocado fruit. *Proceedings IV World Avocado Congress*. Uruapan, Mexico. *Revista Chaingo Serie Horticulture* **5** : 352-358
- Woolf, A.B. et Ferguson, I.B.** (2000). Postharvest responses to high fruit temperatures in the field. *Postharvest Biology and Technology* **21**,(1): 7-20.
- Woolf, A.B., Wexler, A., Prusky, D., Kobiler, I. et Lurie, S.** (2000). Direct sunlight influences postharvest temperature responses and ripening of five avocado cultivars. *Journal of The American Society for Horticultural Science* **25**,(3): 1-7.
- Woolf, A.B., Bowen, J.H., Ball, S., Durand, S., Laidlaw, W.G. et Ferguson, I.B.** (2004). A delay between a 38 °C pretreatment and damaging high and low temperature treatments influences pretreatment efficacy in 'Hass' avocados. *Postharvest Biology and Technology* **34**: 143-153.
- Wu, X., Beecher, G.R., Holden, J.M., Haytowitz, D.B., Gebhardt, S.E. et Prior, R.L.** (2004). Lipophilic and hydrophilic antioxydant capacities of common foods in the United States. *Journal of Agricultural Food Chemistry* **52**: 4026-4037.
- Yahia, E.M. et Ortega-Zaleta, D.** (2000). Mortality of eggs and third instar larvae of *Anastrepha ludens* and *A. obliqua* with insecticidal controlled atmospheres at high temperatures. *Postharvest Biology and Technology* **20**: 295-302.
- Yahia, E.M., Soto-Zamora, G., Brecht, J.K. et Gardea, A.** (2007). Postharvest hot air treatments effects on the antioxidant system in store mature green tomatos. *Postharvest Biology and Technology* **44**: 107-115.
- Yamada, H.** (1999). Relationship between watercore and maturity or sorbitol in apples affected by preharvest fruit temperature. *Scientia Horticulturae* **80**: 189-202.
- Yang, R.F., Cheng, T.S. et Shewfelt, R.L.** (1990). The effect of high temperature and ethylene treatment on the ripening of tomatoes. *Journal of Plant Physiology* **136**: 368-372.
- Young, L.S., Yeh, C.H., Chen, Y.M. et Lin, C.Y.** (1999). Molecular characterization of *Oryza sativa* 16.9 kDa heat shock protein. *Biochemical Journal*. **344**: 31-38.
- Yu, Y.B., Adams, D.O. et Yang, S.F.** (1980). Inhibition of ethylene production by 2-4-dinitrophenol and high temperature *Plant Physiology* **66**: 286-290.

ANNEXES

PS: Dans toutes les analyses statistiques des annexes, l'indice général de dégâts externes correspond à 'intensité et surface des dégâts sur mangue entière'

ANNEXE 1 : Tableau de corrélations des différents paramètres mesurés à la récolte 2006 pour l'ensemble des cultivars

Corrélations

			% de la tache sur la mangue	% fond	BRIX	Acidité	l fond	a fond	b fond	l tache	a tache	b tache	l pulpe	a pulpe	b pulpe	exp		
Rho de Spearman	% de la tache sur la mangue	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	1,000 297															
	% fond	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	-1,000** 297	1,000 840														
	BRIX	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	,109 ,072 273	-,249** ,000 792	1,000 792													
	Acidité	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	-,111 ,068 273	,331** ,000 792	-,053 ,135 792	1,000 792												
	l fond	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	-,103 ,078 295	,012 ,733 838	,150** ,000 792	,465** ,000 792	1,000 838											
	a fond	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	,131* ,024 295	-,128** ,000 838	-,068 ,054 792	-,561** ,000 792	-,681** ,000 838	1,000 838										
	b fond	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	-,108 ,064 295	,053 ,128 838	,142** ,000 792	,316** ,000 792	,801** ,000 838	-,754** ,000 838	1,000 838									
	l tache	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	-,145* ,018 269	-,007 ,902 298	-,251** ,000 276	,598** ,000 276	,458** ,000 298	-,351** ,000 298	,051 ,385 298	1,000 298								
	a tache	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	-,020 ,749 269	-,062 ,287 295	,160** ,008 273	,065 ,288 295	,306** ,000 295	-,153** ,008 295	,186** ,001 295	,323** ,000 295	1,000 295							
	b tache	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	-,239** ,000 269	,117* ,043 298	-,068 ,257 276	,392** ,000 276	,292** ,000 298	-,433** ,000 298	,293** ,000 298	,683** ,000 298	,191** ,001 295	1,000 298						
	l pulpe	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	,076 ,214 271	,198** ,000 689	,069 ,079 641	,316** ,000 641	,335** ,000 687	-,337** ,000 687	,293** ,000 687	-,144* ,016 275	-,098 ,108 272	-,126* ,037 275	1,000 689					
	a pulpe	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	,044 ,467 271	,008 ,832 689	-,302** ,000 641	-,322** ,000 641	-,338** ,000 687	,177** ,000 687	-,080* ,036 687	-,360** ,000 275	-,100 ,100 272	-,100 ,097 275	-,526** ,000 689	1,000 689				
	b pulpe	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	,036 ,553 271	-,179** ,000 689	,019 ,628 641	-,500** ,000 641	-,411** ,000 687	,355** ,000 687	-,202** ,000 687	-,328** ,000 275	-,041 ,501 272	-,100 ,097 275	-,691** ,000 689	,760** ,000 689	1,000 689			
	exp	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N		-,714** ,000 297	,157** ,000 840	-,171** ,000 792	,061 ,078 838	,048 ,168 838	,046 ,182 838	,216** ,000 298	,169** ,004 295	,155** ,007 298	-,056 ,143 689	,025 ,519 689	,074 ,052 689	1,000 840		

** . La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral).

* . La corrélation est significative au niveau 0,05 (bilatéral).

Tableau de corrélations des différents paramètres mesurés à la récolte 2007 pour l'ensemble des cultivars

Corrélations

			% de la tache sur la mangue	% fond	BRIX	Acidité	l fond	a fond	b fond	l tache	a tache	b tache	l pulpe	a pulpe	b pulpe	exp	
Rho de Spearman	% de la tache sur la mangue	Coefficient de corrélation	1,000														
		Sig. (bilatérale)	.														
		N	187														
	% fond	Coefficient de corrélation	-.1000**	1,000													
		Sig. (bilatérale)	.														
		N	187	377													
	BRIX	Coefficient de corrélation	,013	-.234**	1,000												
		Sig. (bilatérale)	,865	,000	.												
		N	187	377	378												
	Acidité	Coefficient de corrélation	-.276**	,413**	,575**	1,000											
		Sig. (bilatérale)	,000	,000	,000	.											
		N	187	377	378	378											
	l fond	Coefficient de corrélation	-.143	,217**	-.135**	-.136**	1,000										
		Sig. (bilatérale)	,054	,000	,009	,009	.										
		N	181	371	372	372	372										
	a fond	Coefficient de corrélation	,331**	-.225**	-.069	-.165**	-.646**	1,000									
		Sig. (bilatérale)	,000	,000	,186	,001	,000	.									
		N	181	371	372	372	372	372									
	b fond	Coefficient de corrélation	-.210**	,245**	-.235**	-.155**	,782**	-.798**	1,000								
		Sig. (bilatérale)	,005	,000	,000	,003	,000	,000	.								
	N	181	371	372	372	372	372	372									
l tache	Coefficient de corrélation	-.076	,076	,252**	,399**	-.134	,015	-.154*	1,000								
	Sig. (bilatérale)	,328	,328	,001	,000	,083	,848	,046	.								
	N	168	168	168	168	168	168	168	168								
a tache	Coefficient de corrélation	,047	-.047	-.493**	-.697**	,508**	-.224**	,553**	-.371**	1,000							
	Sig. (bilatérale)	,542	,542	,000	,000	,000	,004	,000	,000	.							
	N	168	168	168	168	168	168	168	168	168							
b tache	Coefficient de corrélation	-.156*	,156*	-.203**	,133	,199**	-.334**	,284**	,605**	,023	1,000						
	Sig. (bilatérale)	,043	,043	,008	,085	,010	,000	,000	,000	,768	.						
	N	168	168	168	168	168	168	168	168	168	168						
l pulpe	Coefficient de corrélation	-.176*	,425**	-.040	,185**	,359**	-.219**	,238**	-.111	-.129	-.191*	1,000					
	Sig. (bilatérale)	,025	,000	,452	,000	,000	,000	,000	,184	,123	,022	.					
	N	163	353	354	354	348	348	348	144	144	144	354					
a pulpe	Coefficient de corrélation	,268**	-.323**	-.272**	-.569**	-.072	,157**	,032	-.183*	,494**	,023	-.713**	1,000				
	Sig. (bilatérale)	,001	,000	,000	,000	,182	,003	,550	,028	,000	,784	,000	.				
	N	163	353	354	354	348	348	348	144	144	144	354	354				
b pulpe	Coefficient de corrélation	,370**	-.347**	-.361**	-.719**	-.149**	,349**	-.096	-.275**	,481**	-.151	-.641**	,820**	1,000			
	Sig. (bilatérale)	,000	,000	,000	,000	,005	,000	,075	,001	,000	,071	,000	,000	.			
	N	163	353	354	354	348	348	348	144	144	144	354	354	354			
exp	Coefficient de corrélation	.	-.839**	,276**	-.289**	-.092	,040	-.107*	.	.	-.276**	,153**	,129*	1,000			
	Sig. (bilatérale)	.	,000	,000	,000	,075	,447	,039	.	.	,000	,004	,015	.			
	N	187	377	378	378	372	372	372	372	168	168	168	354	354	354		

** . La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral).

* . La corrélation est significative au niveau 0,05 (bilatéral).

ANNEXE 2

Analyse GLM univariée pour les paramètres de chromaticité (a* et b*) et de luminosité L* du fond des mangues à la récolte 2006 en fonction du cultivar et de l'exposition.

Tests des effets inter-sujets

Variable dépendante:a fond

Source	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.
Modèle corrigé	24717,724 ^a	23	1074,684	189,837	,000
Ordonnée à l'origine	75524,215	1	75524,215	13340,974	,000
cultivars	24060,365	11	2187,306	386,377	,000
exposition	226,264	1	226,264	39,968	,000
cultivars * exposition	585,723	11	53,248	9,406	,000
Erreur	4608,113	814	5,661		
Total	234500,786	838			
Total corrigé	29325,837	837			

a. R deux = ,843 (R deux ajusté = ,838)

Tests des effets inter-sujets

Variable dépendante:b fond

Source	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.
Modèle corrigé	28782,358 ^a	23	1251,407	67,017	,000
Ordonnée à l'origine	338388,433	1	338388,433	18121,921	,000
cultivars	27833,005	11	2530,273	135,505	,000
exposition	16,980	1	16,980	,909	,341
cultivars * exposition	913,319	11	83,029	4,447	,000
Erreur	15199,723	814	18,673		
Total	690686,591	838			
Total corrigé	43982,081	837			

a. R deux = ,654 (R deux ajusté = ,645)

Tests des effets inter-sujets

Variable dépendante:l fond

Source	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.
Modèle corrigé	26082,567 ^a	23	1134,025	70,813	,000
Ordonnée à l'origine	1155236,502	1	1155236,502	72137,288	,000
cultivars	25338,240	11	2303,476	143,838	,000
exposition	61,847	1	61,847	3,862	,050
cultivars * exposition	639,344	11	58,122	3,629	,000
Erreur	13035,734	814	16,014		
Total	2306581,673	838			
Total corrigé	39118,301	837			

a. R deux = ,667 (R deux ajusté = ,657)

Analyse GLM univariée pour les paramètres de chromaticité (a* et b*) et de luminosité L* du fond des mangues à la récolte 2007 en fonction du cultivar et de l'exposition.

Tests des effets inter-sujets

Variable dépendante:a fond

Source	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.
Modèle corrigé	1665,801 ^a	11	151,436	45,372	,000
Ordonnée à l'origine	46802,067	1	46802,067	14022,316	,000
cultivars	1539,565	4	384,891	115,317	,000
exposition	10,908	3	3,636	1,089	,354
cultivars * exposition	32,825	4	8,206	2,459	,045
Erreur	1201,566	360	3,338		
Total	91251,429	372			
Total corrigé	2867,368	371			

a. R deux = ,581 (R deux ajusté = ,568)

Tests des effets inter-sujets

Variable dépendante:b fond

Source	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.
Modèle corrigé	12051,959 ^a	11	1095,633	86,915	,000
Ordonnée à l'origine	98569,883	1	98569,883	7819,441	,000
cultivars	10009,479	4	2502,370	198,510	,000
exposition	54,421	3	18,140	1,439	,231
cultivars * exposition	814,675	4	203,669	16,157	,000
Erreur	4538,068	360	12,606		
Total	227521,867	372			
Total corrigé	16590,028	371			

a. R deux = ,726 (R deux ajusté = ,718)

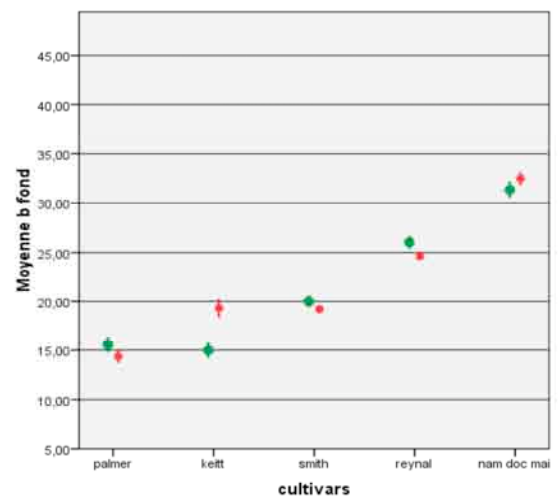
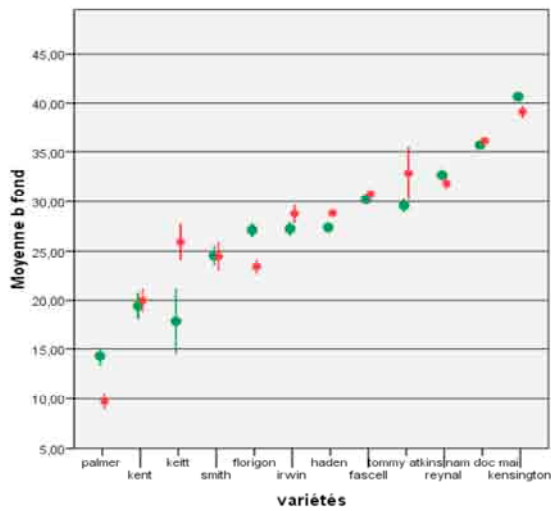
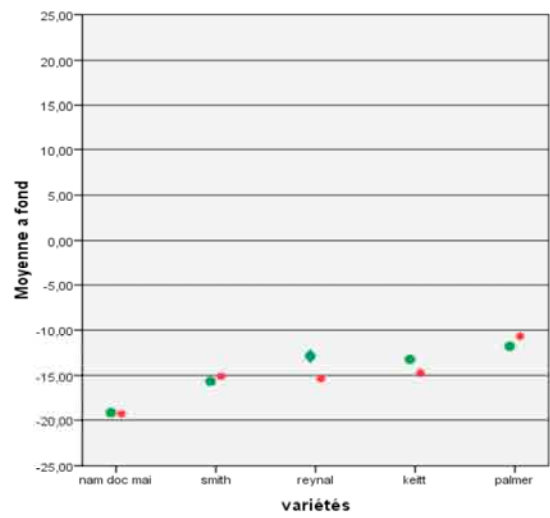
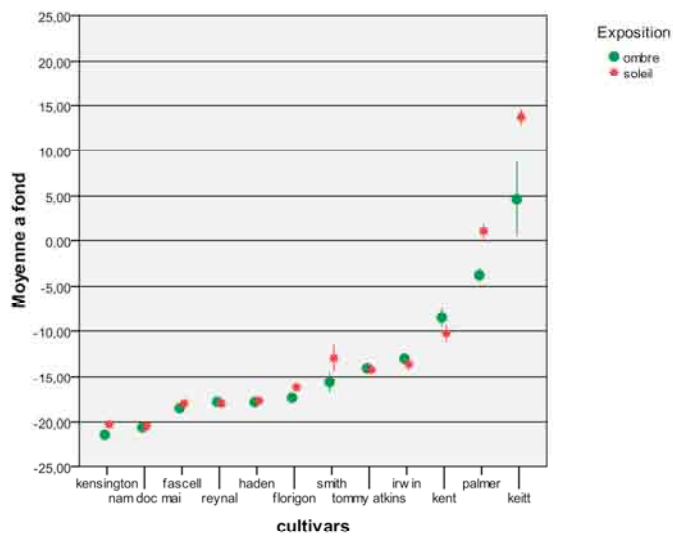
Tests des effets inter-sujets

Variable dépendante:l fond

Source	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.
Modèle corrigé	6733,111 ^a	11	612,101	70,487	,000
Ordonnée à l'origine	575954,764	1	575954,764	66324,498	,000
cultivars	5514,935	4	1378,734	158,769	,000
exposition	25,462	3	8,487	,977	,403
cultivars * exposition	23,304	4	5,826	,671	,613
Erreur	3126,201	360	8,684		
Total	1052269,095	372			
Total corrigé	9859,312	371			

a. R deux = ,683 (R deux ajusté = ,673)

ANNEXE 3 : chromaticité a* et b* de la peau du fond des mangues de différents cultivars selon l'exposition à la récolte



ANNEXE 4

Analyse GLM univariée pour les paramètres de chromaticité (a* et b*) et de luminosité L* de la pulpe des mangues à la récolte 2006 en fonction du cultivar et de l'exposition.

Tests des effets inter-sujets

Variable dépendante:a pulpe

Source	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.
Modèle corrigé	2915,376 ^a	23	126,755	21,010	,000
Ordonnée à l'origine	20221,188	1	20221,188	3351,690	,000
cultivars	2198,947	11	199,904	33,134	,000
exposition	,062	1	,062	,010	,919
cultivars * exposition	828,917	11	75,356	12,490	,000
Erreur	4012,033	665	6,033		
Total	51517,425	689			
Total corrigé	6927,409	688			

a. R deux = ,421 (R deux ajusté = ,401)

Tests des effets inter-sujets

Variable dépendante:b pulpe

Source	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.
Modèle corrigé	73633,907 ^a	23	3201,474	53,201	,000
Ordonnée à l'origine	1151101,189	1	1151101,189	19128,576	,000
cultivars	65548,356	11	5958,941	99,023	,000
exposition	17,336	1	17,336	,288	,592
cultivars * exposition	8865,293	11	805,936	13,393	,000
Erreur	40017,736	665	60,177		
Total	2050164,743	689			
Total corrigé	113651,643	688			

a. R deux = ,648 (R deux ajusté = ,636)

Tests des effets inter-sujets

Variable dépendante:l pulpe

Source	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.
Modèle corrigé	3149,146 ^a	23	136,919	12,108	,000
Ordonnée à l'origine	2510389,394	1	2510389,394	221989,283	,000
cultivars	2227,830	11	202,530	17,909	,000
exposition	41,850	1	41,850	3,701	,055
cultivars * exposition	943,854	11	85,805	7,588	,000
Erreur	7520,223	665	11,309		
Total	4421831,107	689			
Total corrigé	10669,369	688			

a. R deux = ,295 (R deux ajusté = ,271)

Analyse GLM univariée pour les paramètres de chromaticité (a* et b*) et de luminosité L* de la pulpe des mangues à la récolte 2007 en fonction du cultivar et de l'exposition.

Tests des effets inter-sujets

Variable dépendante:a pulpe

Source	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.
Modèle corrigé	2340,279 ^a	11	212,753	24,063	,000
Ordonnée à l'origine	4120,822	1	4120,822	466,082	,000
cultivars	1666,663	4	416,666	47,127	,000
exposition	269,780	3	89,927	10,171	,000
cultivars * exposition	107,697	4	26,924	3,045	,017
Erreur	3023,761	342	8,841		
Total	10196,323	354			
Total corrigé	5364,039	353			

a. R deux = ,436 (R deux ajusté = ,418)

Tests des effets inter-sujets

Variable dépendante:b pulpe

Source	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.
Modèle corrigé	73270,453 ^a	11	6660,950	149,794	,000
Ordonnée à l'origine	777438,084	1	777438,084	17483,347	,000
cultivars	65187,329	4	16296,832	366,490	,000
exposition	360,064	3	120,021	2,699	,046
cultivars * exposition	526,107	4	131,527	2,958	,020
Erreur	15207,833	342	44,467		
Total	1259863,888	354			
Total corrigé	88478,286	353			

a. R deux = ,828 (R deux ajusté = ,823)

Tests des effets inter-sujets

Variable dépendante:l pulpe

Source	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.
Modèle corrigé	1982,942 ^a	11	180,267	23,060	,000
Ordonnée à l'origine	1550187,236	1	1550187,236	198298,571	,000
cultivars	1115,172	4	278,793	35,663	,000
exposition	418,335	3	139,445	17,838	,000
cultivars* exposition	195,555	4	48,889	6,254	,000
Erreur	2673,565	342	7,817		
Total	2281805,588	354			
Total corrigé	4656,507	353			

a. R deux = ,426 (R deux ajusté = ,407)

ANNEXE 5 :

Mesure des teneurs en Acidité Titrable (TA) et des Extraits Secs Solubles (ESS) des mangues des cultivars en 2006. ES est l'erreur standard à la moyenne (± 1).

Cultivars	Acidité Titrable (en ml de NaOH)		Extraits Secs Solubles (en degré Brix)	
	moyenne	ES	moyenne	ES
Kent	13,2 a	0,1	9,3 abc	0,0
Reynal	14,0 ab	0,3	9,7 bcd	0,2
Keitt	15,3 bc	0,3	8,4 a	0,0
Tommy Atkins	17,0 cd	0,2	10,8 ef	0,0
Palmer	17,6 d	0,3	10,2 cde	0,0
Irwin	18,5 d	0,1	11,2 f	0,0
Florigon	21,6 e	0,5	10,7 ef	0,0
Haden	23,7 f	0,1	11,2 ef	0,1
Smith	26,3 g	0,5	10,4 de	0,0
Nam Doc Mai	29,7 h	0,2	10,2 cde	0,0
Kensington	30,5 h	0,4	10,9 ef	0,0
Fascell	36,2 i	0,3	8,9 ab	0,0

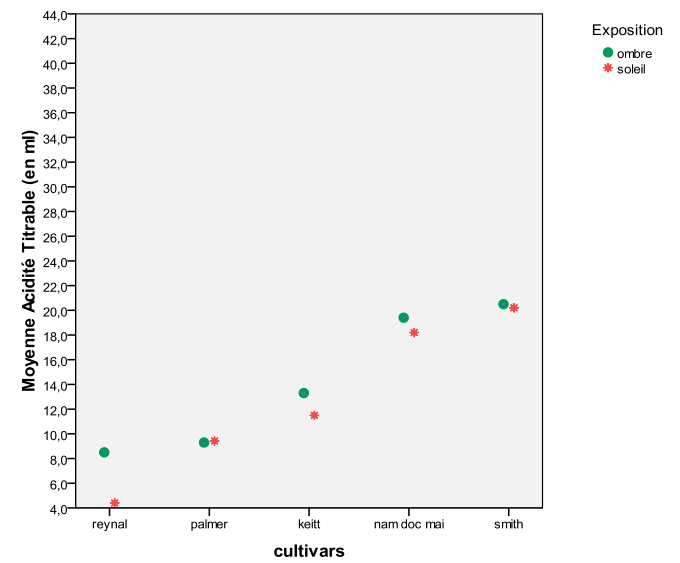
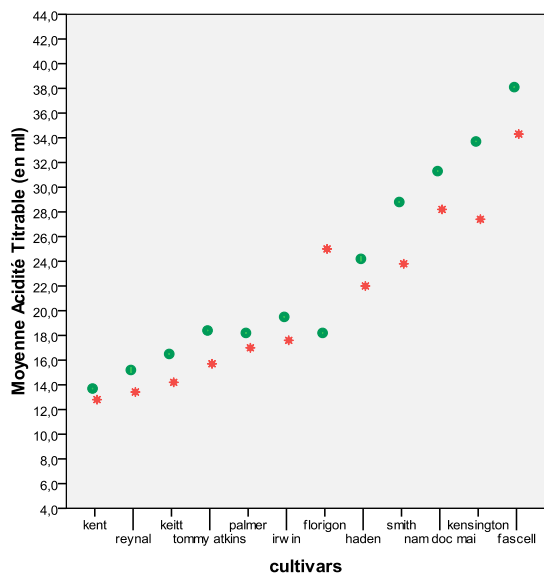
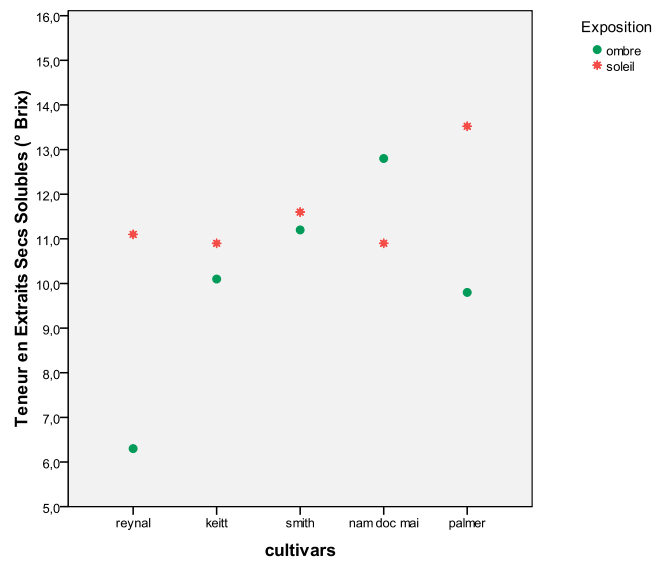
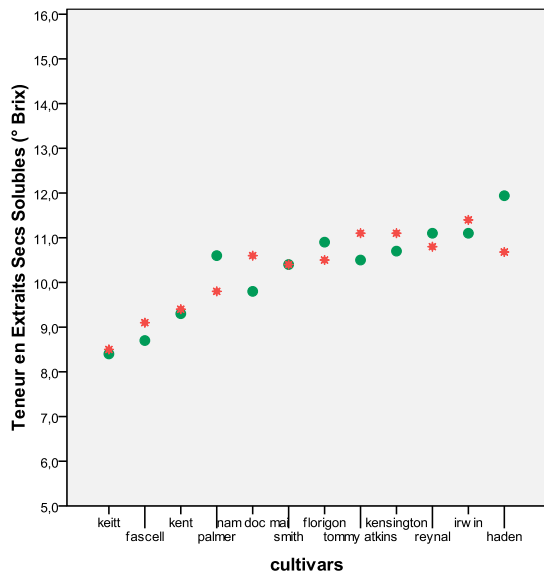
Les valeurs qui ne sont pas suivies en colonne de la même lettre minuscule sur les colonnes différent au seuil de 5% selon le test de Tukey

Mesure des teneurs en Acidité Titrable et des Extraits Secs Solubles des mangues des cultivars de 2007. ES est l'erreur standard à la moyenne (± 1).

Cultivars	Acidité Titrable (en ml de NaOH)		Extraits Secs Solubles (en degré Brix)	
	moyenne	ES	moyenne	ES
Reynal	7,3 a	0,1	8,5 a	0,1
Palmer	9,4 b	0,0	11,4 c	0,4
Keitt	12,4 c	0,1	10,5 b	0,0
Nam Doc Mai	18,8 d	0,1	11,8 c	0,1
Smith	20,3 e	0,3	11,4 c	0,0

Les valeurs qui ne sont pas suivies en colonne de la même lettre minuscule sur les colonnes différent au seuil de 5% selon le test de Tukey

ANNEXE 6 : ESS et TA en fonction de l'exposition de différents cultivars de mangues à la récolte en 2006 et 2007



ANNEXE 7

Surface et intensité des dégâts sur la tache et sur le fond des mangues traitées HWT 55.0 °C/
50 min de différents cultivars en 2006. ES est l'erreur standard à la moyenne ± 1 .

Cultivar	N	Surface de dégâts sur la tache colorée (en % de la surface totale de la tache)		Indice d'intensité de dégâts sur la tache		Surface de dégâts sur le fond (en % de la surface totale du fond)		Indice d'intensité de dégâts sur le fond	
		moyenne	ES	moyenne	ES	moyenne	ES	moyenne	ES
Fascell	48	0,0 a	0,0	0,0 a	0,0	99,2 f	0,4	3,0 e	0,0
Kensington	48	0,0 a	0,0	0,0 a	0,0	65,1 e	3,4	2,5 cde	0,1
Nam Doc Mai	48	-	-	-	-	69,5 e	4,4	2,5 cde	0,1
Smith	48	0,0 a	0,0	0,0 a	0,0	71,4 e	4,4	2,4 cd	0,1
Palmer	48	1,1 a	0,8	0,6 ab	0,3	2,4 a	0,5	0,6 a	0,1
Kent	48	6,2 ab	3,0	0,5 ab	0,2	10,7 ab	2,4	1,1 a	0,1
Florigon	48	-	-	-	-	23,6 bc	4,0	1,8 b	0,1
Keitt	48	29,4 ab	12,0	1,9 bc	0,4	30,3 cd	6,5	2,8 de	0,1
Haden	60	40,6 ab	2,5	2,1 c	0,1	30,5 cd	1,3	2,2 bc	0,0
Irwin	48	41,7 ab	6,4	2,4 c	0,1	42,8 d	4,4	2,3 bcd	0,1
Reynal	60	46,1 ab	6,6	1,6 bc	0,2	89,4 f	1,5	2,4 cd	0,0
Tommy Atkins	48	57,6 b	9,1	2,7 c	0,1	60,7 e	4,8	2,5 cde	0,1

Les valeurs qui ne sont pas suivies en colonne de la même lettre minuscule sur les colonnes différent au seuil de 5% selon le test de Tukey

Surface et intensité des dégâts sur la tache et sur le fond des mangues traitées HWT 55.0 °C/
50 min de différents cultivars en 2007. ES est l'erreur standard à la moyenne ± 1 .

Cultivar	N	Surface de dégâts sur la tache colorée (en % de la surface totale de la tache)		Indice d'intensité de dégâts sur la tache		Surface de dégâts sur le fond (en % de la surface totale du fond)		Indice d'intensité de dégâts sur le fond	
		moyenne	ES	moyenne	ES	moyenne	ES	moyenne	ES
Smith	48	2,1 a	1,3	0,5 a	0,2	14,5 a	1,9	2,1 b	0,1
Nam Doc Mai	48	9,3 a	7,6	0,6 a	0,3	9,9 a	2,1	1,6 a	0,1
Palmer	48	55,4 b	6,3	2,5 b	0,1	17,5 a	2,6	2,0 ab	0,2
Reynal	60	56,8 b	3,4	2,6 b	0,0	87,5 c	1,4	2,8 c	0,0
Keitt	48	51,4 b	6,4	2,3 b	0,1	36,3 b	4,2	2,3 b	0,1

Les valeurs qui ne sont pas suivies en colonne de la même lettre minuscule sur les colonnes différent au seuil de 5% selon le test de Tukey

Indice général de dégâts externes des mangues de différents cultivars traitées HWT 55.0 °C/
50 min en 2006 et 2007. ES représente l'erreur standard à la moyenne ± 1 .

Cultivars	N	2006		2007	
		Indice général (surface et intensité) des dégâts externes sur les mangues			
		moyenne	ES	moyenne	ES
Palmer	48	4,0 a	1,1	40,6 a	1,1
Kent	48	17,6 ab	4,3	-	4,3
Florigon	48	63,4 bc	12,2	-	12,2
Haden	60	81,8 cd	3,9	-	3,9
Keitt	48	85,5 cd	18,3	93,8 b	18,3
Irwin	48	115,2 de	12,0	-	12,0
Kensington	48	146,2 ef	10,7	-	10,7
Tommy Atkins	48	166,2 efg	15,6	-	15,6
<i>Nam Doc Mai</i>	48	187,1 fg	13,5	28,7 a	13,5
<i>Smith</i>	48	188,2 fg	15,7	30,6 a	15,7
Reynal	60	202,1 g	5,6	215,3 c	5,6
Fascell	48	290,4 h	3,0	-	3,0

Les valeurs qui ne sont pas suivies en colonne de la même lettre minuscule sur les colonnes différent au seuil de 5% selon le test de Tukey

Indice général de dégâts internes des mangues de différents cultivars traitées HWT 55.0 °C/ 50 min en 2006 et 2007. ES représente l'erreur standard à la moyenne ± 1 .

Cultivars	N	2006		2007	
		Indice de dégâts internes dans la pulpe des mangues			
		moyenne	ES	moyenne	ES
Palmer	48	1,6 a	0,2	1,7 a	0,3
Tommy Atkins	48	1,6 a	0,3	-	-
Keitt	48	1,7 a	0,4	3,0 b	0,1
Kent	48	1,7 a	0,2	-	-
Smith	48	2,2 a	0,2	2,9 b	0,2
Haden	60	2,3 a	0,1	-	-
Florigon	48	2,4 a	0,2	-	-
Fascell	48	3,7 b	0,2	-	-
Irwin	48	3,9 b	0,2	-	-
Reynal	60	4,2 b	0,2	4,1 c	0,1
Kensington	48	4,4 b	0,2	-	-
Nam Doc Mai	48	4,5 b	0,2	2,6 b	0,1

Les valeurs qui ne sont pas suivies en colonne de la même lettre minuscule sur les colonnes différent au seuil de 5% selon le test de Tukey

ANNEXE 8

Analyse GLM uni variée pour la surface et l'intensité de dégâts sur le fond et de l'indice général de dégâts externes des mangues de la récolte 2006 en fonction du cultivar et de l'exposition.

Tests des effets inter-sujets

Variable dépendante: intensité du dégât sur le fond

Source	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.
Modèle corrigé	301,997 ^a	23	13,130	29,350	,000
Ordonnée à l'origine	2406,359	1	2406,359	5378,841	,000
cultivars	252,678	11	22,971	51,346	,000
expogroupe	1,349	1	1,349	3,015	,083
cultivars * expogroupe	39,321	11	3,575	7,990	,000
Erreur	388,769	869	,447		
Total	5021,250	893			
Total corrigé	690,766	892			

a. R deux = ,437 (R deux ajusté = ,422)

Tests des effets inter-sujets

Variable dépendante: % surface de dégât sur le fond

Source	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.
Modèle corrigé	680839,959 ^a	23	29601,737	54,747	,000
Ordonnée à l'origine	1231062,596	1	1231062,596	2276,797	,000
cultivars	657525,695	11	59775,063	110,551	,000
expogroupe	1159,330	1	1159,330	2,144	,143
cultivars * expogroupe	19783,321	11	1798,484	3,326	,000
Erreur	469867,748	869	540,699		
Total	2945333,750	893			
Total corrigé	1150707,707	892			

a. R deux = ,592 (R deux ajusté = ,581)

Tests des effets inter-sujets

Variable dépendante: % surface et intensité des dégâts sur manque entière

Source	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.
Modèle corrigé	4,641E6	23	201770,841	41,164	,000
Ordonnée à l'origine	8322189,387	1	8322189,387	1697,838	,000
cultivars	4367333,927	11	397030,357	81,000	,000
expogroupe	59,168	1	59,168	,012	,913
cultivars * expogroupe	261672,305	11	23788,391	4,853	,000
Erreur	4259524,441	869	4901,639		
Total	2,081E7	893			
Total corrigé	8900253,786	892			

a. R deux = ,521 (R deux ajusté = ,509)

Analyse GLM uni variée pour la surface et l'intensité de dégâts sur le fond et de l'indice général de dégâts externes des mangues de la récolte 2007 en fonction du cultivar et de l'exposition.

Tests des effets inter-sujets

Variable dépendante: intensité du dégât sur le fond

Source	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.
Modèle corrigé	74,187*	9	8,243	15,436	,000
Ordonnée à l'origine	797,150	1	797,150	1492,805	,000
cultivars	57,086	4	14,272	26,726	,000
expogroupe	,071	1	,071	,133	,715
cultivars * expogroupe	2,572	4	,643	1,204	,309
Erreur	163,936	307	,534		
Total	1878,000	317			
Total corrigé	238,123	316			

a. R deux = ,312 (R deux ajusté = ,291)

Tests des effets inter-sujets

Variable dépendante: % surface de dégât sur le fond

Source	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.
Modèle corrigé	377419,994*	9	41935,555	133,068	,000
Ordonnée à l'origine	183022,524	1	183022,524	580,758	,000
cultivars	293172,215	4	73293,054	232,570	,000
expogroupe	247,582	1	247,582	,786	,376
cultivars * expogroupe	2084,976	4	521,244	1,654	,161
Erreur	96749,351	307	315,144		
Total	1116724,500	317			
Total corrigé	474169,345	316			

a. R deux = ,796 (R deux ajusté = ,790)

Tests des effets inter-sujets

Variable dépendante: % surface et intensité des dégâts sur mangue entière

Source	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.
Modèle corrigé	2,341E6	9	260067,061	90,588	,000
Ordonnée à l'origine	1244832,591	1	1244832,591	433,605	,000
variétés	2069719,549	4	517429,887	180,233	,000
expogroupe	154,638	1	154,638	,054	,817
variétés * expogroupe	62728,227	4	15682,057	5,462	,000
Erreur	881363,120	307	2870,890		
Total	7267923,963	317			
Total corrigé	3221966,670	316			

a. R deux = ,726 (R deux ajusté = ,718)

ANNEXE 9

Analyse GLM uni variée pour l'indice général de dégâts internes dus au traitement HWT 55°C 50 min des mangues des récoltes 2006 et de 2007 en fonction du cultivar et de l'exposition.

2006

Tests des effets inter-sujets

Variable dépendante: HI pulpe ss la peau et centre

Source	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.
Modèle corrigé	924,672 ^a	23	40,203	20,748	,000
Ordonnée à l'origine	4049,238	1	4049,238	2089,734	,000
cultivars	823,579	11	74,871	38,639	,000
expogroupe	2,937	1	2,937	1,516	,219
cultivars * expogroupe	100,890	11	9,172	4,733	,000
Erreur	1683,845	869	1,938		
Total	9451,500	893			
Total corrigé	2608,517	892			

a. R deux = ,354 (R deux ajusté = ,337)

2007

Tests des effets inter-sujets

Variable dépendante: HI pulpe ss la peau et centre

Source	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.
Modèle corrigé	202,880 ^a	9	22,542	14,885	,000
Ordonnée à l'origine	1585,978	1	1585,978	1047,219	,000
cultivars	141,277	4	35,319	23,321	,000
expogroupe	4,733	1	4,733	3,125	,078
cultivars * expogroupe	3,964	4	,991	,654	,624
Erreur	452,826	299	1,514		
Total	3882,250	309			
Total corrigé	655,706	308			

a. R deux = ,309 (R deux ajusté = ,289)

ANNEXE 9. Tableau de corrélations bilatérales de Spearman entre des différents paramètres de dégâts HWT 55 °/ 50 min et les caractéristiques biochimiques des mangues à la récolte 2006.

			Corrélations																				
			% de la tache sur la mangue	% fond	intensité du dégât sur la tache	% surface de dégât sur la tache	intensité du dégât sur le fond	% surface de dégât sur le fond	% surface et intensité des dégâts sur mangue entière	HI pulpe ss la peau et centre	BRIX	Acidité	l fond	a fond	b fond	l tache	a tache	b tache	l pulpe	a pulpe	b pulpe	exp	
Rho de Spearman	% de la tache sur la mangue	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale)	1,000																				
		N	324																				
	% fond	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale)	-1,000**	1,000																			
		N	324	893																			
	intensité du dégât sur la tache	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale)	-,133*	,133*	1,000																		
		N	323	323	323																		
	% surface de dégât sur la tache	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale)	-,096	,086	,761**	1,000																	
		N	323	323	323	323																	
	intensité du dégât sur le fond	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale)	-,086	,185**	,561**	,507**	1,000																
		N	324	893	323	323	893																
	% surface de dégât sur le fond	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale)	-,016	,089**	,324**	,410**	,633**	1,000															
		N	324	893	323	323	893	893															
	% surface et intensité des dégâts sur mangue entière	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale)	-,065	,081**	,568**	,639**	,703**	,876**	1,000														
		N	324	893	323	323	893	893	893														
	HI pulpe ss la peau et centre	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale)	,058	,106**	,160**	,220**	,212**	,382**	,379**	1,000													
		N	324	893	323	323	893	893	893	893													
	BRIX	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale)	,012	-,204**	,409**	,245**	-,045	-,079**	-,028	-,041	1,000												
		N	300	845	299	299	845	845	845	845	845												
	Acidité	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale)	-,199**	,336**	,043	-,051	,277**	,144**	,117**	,099**	,027	1,000											
		N	300	845	299	299	845	845	845	845	845	845											
	l fond	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale)	-,144**	-,019	,073	,117*	,169**	,284**	,375**	,293**	,117**	,429**	1,000										
		N	324	893	323	323	893	893	893	893	845	845	893										
	a fond	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale)	,036	-,171**	-,065	-,133*	-,118**	-,243**	-,294**	-,323**	,048	-,384**	-,539**	1,000									
		N	324	893	323	323	893	893	893	893	845	845	893	893									
	b fond	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale)	,104	,033	,156**	,149**	,137**	,403**	,428**	,393**	,039	,033	,590**	-,658**	1,000								
		N	324	893	323	323	893	893	893	893	845	845	893	893	893								
	l tache	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale)	-,124*	,124*	-,015	-,068	-,068	-,271**	-,189**	-,223**	,064	,724**	,491**	-,117*	-,550**	1,000							
		N	303	303	303	303	303	303	303	303	279	279	303	303	303	303							
	a tache	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale)	-,009	,009	,135*	,080	,013	-,077	-,014	-,240**	,540**	,059	,067	-,106	-,004	,351**	1,000						
		N	303	303	303	303	303	303	303	303	279	279	303	303	303	303	303						
	b tache	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale)	-,243**	,243**	,167**	,099	,199**	-,018	,047	-,025	,082	,428**	,112	-,331**	-,289**	,662**	,306**	1,000					
		N	303	303	303	303	303	303	303	303	279	279	303	303	303	303	303	303					
	l pulpe	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale)	-,124*	,041	-,013	,112	,153**	,116**	,150**	,163**	,086*	,335**	,303**	-,245**	,103**	-,151*	-,079	-,189**	1,000				
		N	300	749	299	299	749	749	749	749	701	701	749	749	749	749	279	279	749	749			
	a pulpe	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale)	,164**	,027	-,174**	-,115*	-,168**	,048	-,024	,140**	-,393**	-,529**	-,385**	-,074*	,195**	-,643**	-,205**	-,316**	-,500**	1,000			
		N	300	749	299	299	749	749	749	749	701	701	749	749	749	279	279	279	749	749	749		
	b pulpe	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale)	,113	-,161**	-,049	-,028	-,277**	-,163**	-,114**	-,033	-,194**	-,669**	-,480**	,120**	,056	-,547**	-,045	-,246**	-,595**	-,826**	1,000		
		N	300	749	299	299	749	749	749	749	701	701	749	749	749	279	279	279	749	749	749	749	
	exp	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale)	.	-,717**	.	.	-,111**	,035	,005	-,035	,147**	-,170**	,100**	,068*	,081*	.	.	.	,082*	-,127**	,021	1,000	
		N	324	893	323	323	893	893	893	893	845	845	893	893	893	303	303	303	749	749	749	893	

** La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral).

* La corrélation est significative au niveau 0,05 (bilatéral).

Tableau de corrélations bilatérales de Spearman entre des différents paramètres de dégâts HWT 55 °C/ 50 min et les caractéristiques biochimiques des mangues à la récolte 2007.

			Corrélations																				
			% de la tache sur la manque	% fond	intensité du dégât sur la tache	% surface de dégât sur la tache	intensité du dégât sur le fond	% surface de dégât sur le fond	% surface et intensité des dégâts sur mangue entière	HI pulpe ss la peau et centre	BRIX	Acidité	l fond	a fond	b fond	l tache	a tache	b tache	l pulpe	a pulpe	b pulpe	exp	
Rho de Spearman	% de la tache sur la mangue	Coefficient de corrélation	1,000																				
		Sig. (bilatérale)	.																				
		N	187																				
	% fond	Coefficient de corrélation	-1,000**	1,000																			
		Sig. (bilatérale)	.																				
		N	187	317																			
	intensité du dégât sur la tache	Coefficient de corrélation	,246**	-,246**	1,000																		
		Sig. (bilatérale)	,001	,001	.																		
		N	187	187	187																		
	% surface de dégât sur la tache	Coefficient de corrélation	,162*	-,162*	,610**	1,000																	
		Sig. (bilatérale)	,026	,026	,000	.																	
		N	187	187	187	187																	
	intensité du dégât sur le fond	Coefficient de corrélation	-,028	-,109	,487**	,425**	1,000																
		Sig. (bilatérale)	,702	,054	,000	,000	.																
		N	187	317	187	187	317																
	% surface de dégât sur le fond	Coefficient de corrélation	,085	-,244**	,551**	,574**	,715**	1,000															
		Sig. (bilatérale)	,246	,000	,000	,000	,000	.															
		N	187	317	187	187	317	317															
	% surface et intensité des dégâts sur mangue entière	Coefficient de corrélation	,066	-,219**	,671**	,761**	,755**	,952**	1,000														
		Sig. (bilatérale)	,367	,000	,000	,000	,000	,000	.														
		N	187	317	187	187	317	317	317														
	HI pulpe ss la peau et centre	Coefficient de corrélation	-,040	,029	,287**	,352**	,344**	,474**	,471**	1,000													
		Sig. (bilatérale)	,593	,610	,000	,000	,000	,000	,000	.													
		N	179	309	179	179	309	309	309	309													
	BRIX	Coefficient de corrélation	,013	-,002	-,376**	-,479**	-,477**	-,662**	-,674**	-,404**	1,000												
		Sig. (bilatérale)	,865	,966	,000	,000	,000	,000	,000	,000	.												
		N	187	317	187	187	317	317	317	309	317												
	Acidité	Coefficient de corrélation	-,276**	,527**	-,635**	-,474**	-,502**	-,718**	-,715**	-,344**	,573**	1,000											
		Sig. (bilatérale)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	.											
		N	187	317	187	187	317	317	317	309	317	317											
	l fond	Coefficient de corrélation	-,240**	,290**	,251**	,263**	,163**	,107	,108	,146*	-,265**	-,241**	1,000										
		Sig. (bilatérale)	,001	,000	,001	,000	,004	,056	,054	,010	,000	,000	.										
		N	187	317	187	187	317	317	317	309	317	317	317										
	a fond	Coefficient de corrélation	,432**	-,423**	,183*	,151*	,043	,161**	,209**	-,041	-,063	-,307**	-,608**	1,000									
		Sig. (bilatérale)	,000	,000	,012	,039	,442	,004	,000	,475	,265	,000	,000	.									
		N	187	317	187	187	317	317	317	309	317	317	317	317									
	b fond	Coefficient de corrélation	-,310**	,289**	,177*	,140	,171**	,097	,079	,182**	-,229**	-,131*	,889**	-,791**	1,000								
		Sig. (bilatérale)	,000	,000	,015	,057	,002	,084	,161	,001	,000	,019	,000	,000	.								
		N	187	317	187	187	317	317	317	309	317	317	317	317	317								
	l tache	Coefficient de corrélation	-,236**	,236**	-,344**	-,229**	-,154*	-,276**	-,276**	,004	,089	,392**	-,135	-,125	-,024	1,000							
		Sig. (bilatérale)	,002	,002	,000	,002	,043	,000	,000	,963	,245	,000	,076	,101	,752	.							
		N	174	174	174	174	174	174	166	174	174	174	174	174	174	174							
	a tache	Coefficient de corrélation	,012	-,012	,520**	,347**	,602**	,677**	,683**	,423**	-,569**	-,891**	,848**	-,252**	,826**	-,287**	1,000						
		Sig. (bilatérale)	,875	,875	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,001	,000	,000	.						
		N	174	174	174	174	174	174	166	174	174	174	174	174	174	174	174						
	b tache	Coefficient de corrélation	-,097	,097	-,052	,073	,024	,054	,067	,065	-,312**	,062	,154*	-,007	,222**	,768**	,000	1,000					
		Sig. (bilatérale)	,202	,202	,492	,341	,756	,475	,382	,402	,000	,419	,042	,922	,003	,000	,992	.					
		N	174	174	174	174	174	174	166	174	174	174	174	174	174	174	174	174					
	l pulpe	Coefficient de corrélation	-,293**	,465**	-,439**	-,509**	-,254**	-,420**	-,454**	-,202**	,098	,415**	,446**	-,425**	,361**	-,190*	-,418**	-,235**	1,000				
		Sig. (bilatérale)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,001	,094	,000	,000	,000	,000	,020	,000	,004	.				
		N	163	293	163	163	293	293	285	293	293	293	293	293	150	150	150	293	150	150	293		
	a pulpe	Coefficient de corrélation	,400**	-,512**	,674**	,499**	,455**	,704**	,712**	,336**	-,399**	-,785**	-,169**	,400**	-,138*	-,428**	,946**	-,119	-,773**	1,000			
		Sig. (bilatérale)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,004	,000	,018	,000	,000	,148	,000	.			
		N	163	293	163	163	293	293	285	293	293	293	293	293	150	150	150	293	293	293			
	b pulpe	Coefficient de corrélation	,408**	-,533**	,643**	,492**	,431**	,682**	,710**	,315**	-,389**	-,854**	-,157**	,546**	-,238**	-,440**	,845**	-,234**	-,732**	,945**	1,000		
		Sig. (bilatérale)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,007	,000	,000	,000	,000	,004	,000	,000	.		
		N	163	293	163	163	293	293	285	293	293	293	293	293	150	150	150	293	293	293	293		
exp		Coefficient de corrélation	-,773**	.	.	.	,133*	-,190**	-,166**	-,033	-,002	-,418**	-,108	-,172**	-,051	.	.	.	-,266**	,244**	,264**	1,000	
		Sig. (bilatérale)	,000	.	.	.	,018	,001	,003	,563	,972	,000	,055	,002	,367	.	.	.	,000	,000	,000	.	
		N	187	317	187	187	317	317	309	317	317	317	317	317	317	174	174	174	293	293	293	317	

** La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral).

* La corrélation est significative au niveau 0,05 (bilatéral).

ANNEXE 10. Tableau de corrélations bilatérales de Spearman entre des différents paramètres de dégâts HWT 55 °C/ 50 min, les caractéristiques biochimiques, l'année de récolte et l'exposition des mangues du cv. Reynal

Corrélations

			année de récolte	surface de la tache	surface du fond	intensité de dégâts sur la tache	surface de dégâts sur la tache	intensité de dégâts sur le fond	surface de dégâts sur le fond	Indice général de dégâts externes	Indice de dégâts internes	ESS	TA	l fond	a fond	b fond	l tache	a tache	b tache	l pulpe	a pulpe	b pulpe	Exposition			
Rho de Spearman	année de récolte	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	1,000 220																							
	surface de la tache	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	,043 ,624 132	1,000																						
	surface du fond	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	-,353** ,000 220	-,1000**	1,000																					
	intensité de dégâts sur la tache	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	,600** ,000 132	,030 ,736 132	-,030 ,736 132	1,000																				
	surface de dégâts sur la tache	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	,056 ,524 132	-,020 ,820 132	,020 ,820 132	,312** ,000 132	1,000																			
	intensité de dégâts sur le fond	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	,501** ,000 220	-,077 ,383 132	-,107 ,112 220	,518** ,000 132	,199** ,022 220	1,000																		
	surface de dégâts sur le fond	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	-,123 ,070 220	-,290** ,001 132	,199** ,003 220	,062 ,481 132	,258** ,003 132	,062 ,362 220	1,000																	
	Indice général de dégâts externes	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	,131 ,053 220	-,369** ,000 132	,410** ,000 220	,499** ,000 132	,668** ,000 132	,551** ,000 220	,600** ,000 220	1,000																
	Indice de dégâts internes	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	-,040 ,565 212	-,119 ,188 212	,216** ,002 212	,153 ,089 124	,229* ,010 124	,070 ,313 212	,059 ,390 212	,216** ,002 212	1,000															
	ESS	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	-,071 ,294 220	-,007 ,933 132	-,233** ,000 220	,127 ,148 132	-,341** ,000 132	-,087 ,201 220	,034 ,612 220	-,199** ,003 220	1,000															
	TA	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	-,878** ,000 220	-,049 ,574 132	,552** ,000 220	-,500** ,000 132	,075 ,395 132	-,425** ,000 220	,180** ,007 220	,053 ,435 220	,089 ,198 212	-,200** ,003 220	1,000													
	l fond	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	,094 ,166 220	-,338** ,000 132	,283** ,000 220	-,006 ,944 132	-,015 ,863 220	,096 ,157 220	-,057 ,403 220	,087 ,201 220	,123 ,074 212	-,148* ,040 220	,040 ,553 220	1,000												
	a fond	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	,809** ,000 220	,182* ,037 132	-,379** ,000 220	,482** ,000 132	,020 ,824 220	,400** ,000 220	-,215** ,001 220	,032 ,636 220	-,080 ,244 212	,033 ,622 220	-,746** ,000 220	-,069 ,312 220	1,000											
	b fond	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	-,832** ,000 220	-,263** ,002 132	,537** ,000 220	-,543** ,000 132	-,091 ,300 132	-,384** ,000 220	,131 ,052 220	-,003 ,961 220	,093 ,176 212	-,108 ,110 220	,828** ,000 220	,313** ,000 220	-,834** ,000 220	1,000										
	l tache	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	,782** ,000 132	-,066 ,453 132	,066 ,453 132	,433** ,000 132	-,086 ,329 132	,423** ,000 132	-,233** ,007 132	,080 ,364 132	,100 ,267 124	-,830** ,000 132	,241** ,005 132	,720** ,000 132	-,474** ,000 132	1,000										
	a tache	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	,697** ,000 132	-,194* ,025 132	,194* ,025 132	,343** ,000 132	-,117 ,182 132	,432** ,000 132	-,132 ,132 132	,127 ,146 124	,081 ,371 132	,337** ,000 132	-,717** ,000 132	,474** ,000 132	,447** ,000 132	-,242** ,005 132	,828** ,000 132	1,000								
	b tache	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	-,205* ,018 132	,012 ,889 132	-,012 ,889 132	-,102 ,243 132	-,003 ,977 132	-,033 ,707 132	-,122 ,164 132	-,082 ,350 132	,034 ,708 124	,084 ,340 132	,069 ,434 132	,025 ,780 132	,167 ,056 132	,167 ,056 132	,229** ,008 132	-,045 ,610 132	1,000							
	l pulpe	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	,000 1,000 196	-,082 ,397 108	-,393** ,000 196	-,557** ,000 108	-,067 ,489 108	-,008 ,910 196	-,005 ,948 196	-,177** ,013 196	-,192** ,008 188	-,304** ,000 196	-,036 ,620 196	-,177** ,013 196	-,073 ,310 196	-,039 ,590 196	-,920** ,000 108	-,836** ,000 108	,104 ,283 108	1,000						
	a pulpe	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	,879** ,000 196	,082 ,397 108	-,266** ,000 196	,557** ,000 108	-,067 ,489 108	,403** ,000 196	-,161 ,024 196	,089 ,979 196	-,002 ,239 188	,084 ,239 196	-,898** ,000 196	,040 ,578 196	,753** ,000 196	-,758** ,000 196	,920** ,000 108	,836** ,000 108	-,104 ,283 108	1,000						
	b pulpe	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	,602** ,000 196	,082 ,397 108	-,067 ,354 196	,557** ,000 108	-,067 ,489 108	,271** ,000 196	-,123 ,086 196	,065 ,364 196	,033 ,649 196	-,159* ,026 196	-,493** ,000 196	,079 ,271 196	,548** ,000 196	-,513** ,000 196	,920** ,000 108	,836** ,000 108	-,104 ,283 108	1,000						
	Exposition	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	,286** ,000 220	-,115 ,000 132	-,782** ,000 220	,197 ,113 132	-,106 ,089 220	-,337** ,000 220	-,225** ,001 220	,267** ,000 220	-,547** ,000 220	-,281** ,000 220	-,272** ,000 220	-,467** ,000 220	,624** ,000 132	,133 ,063 132	-,083 ,245 196	1,000								

** La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral).

* La corrélation est significative au niveau 0,05 (bilatéral).

ANNEXE 11. Tableau de corrélations bilatérales de Spearman entre des différents paramètres de dégâts HWT 55 °C/ 50 min, les caractéristiques biochimiques, l'année de récolte et l'exposition des mangues du cv. Keitt.

Corrélations

		année de récolte	surface de la tache	surface du fond	intensité de dégâts sur la tache	surface de dégâts sur la tache	intensité de dégâts sur le fond	surface de dégâts sur le fond	indice général de dégâts externes	indice de dégâts internes	ESS	TA	l fond	a fond	b fond	l tache	a tache	b tache	l pulpe	a pulpe	b pulpe	exposition	
Rho de Spearman	année de récolte	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	1,000 61																				
	surface de la tache	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	,366* ,039 32	1,000 32																			
	surface du fond	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	-,129 ,320 61	-1,000** 32	1,000 61																		
	intensité de dégâts sur la tache	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	-,054 ,771 32	,037 ,840 32	-,037 ,840 32	1,000 32																	
	surface de dégâts sur la tache	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	,330 ,065 32	,187 ,306 32	-,187 ,306 32	,027 ,882 32	1,000 32																
	intensité de dégâts sur le fond	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	-,497** ,000 61	-,334 ,062 32	,193 ,135 61	,112 ,543 32	-,059 ,750 32	1,000 61															
	surface de dégâts sur le fond	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	,097 ,458 61	,171 ,350 32	,053 ,683 61	,037 ,839 32	,299 ,096 32	,230 ,074 61	1,000 61														
	Indice général de dégâts externes	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	,077 ,554 61	,216 ,236 32	-,090 ,488 61	,134 ,466 32	,636** ,000 32	,304* ,017 61	,922** ,000 61	1,000 61													
	indice de dégâts internes	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	,463** ,000 61	,063 ,731 32	,167 ,199 32	-,049 ,792 32	,558** ,001 32	-,217 ,093 61	,064 ,623 61	,053 ,683 61	1,000 61												
	ESS	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	,806** ,000 61	,366* ,039 32	-,637** ,000 61	-,054 ,771 32	,330 ,065 32	-,457** ,000 61	,003 ,984 61	,080 ,541 61	,277* ,031 61	1,000 61											
	TA	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	-,806** ,000 61	-,366* ,039 32	,637** ,000 61	,054 ,771 32	-,330 ,065 32	,457** ,000 61	-,003 ,984 61	-,080 ,541 61	-,277* ,031 61	-1,000** 61	1,000 61										
	l fond	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	,768** ,000 61	,231 ,204 32	,120 ,356 61	,053 ,775 32	,266 ,141 32	-,359** ,004 61	,046 ,727 61	,324* ,011 61	,456** ,000 61	-,456** 61	1,000 61										
	a fond	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	-,768** ,000 61	-,391* ,027 32	,533** ,000 61	,155 ,397 32	-,358** ,045 32	,407** ,001 61	-,072 ,580 61	-,126 ,332 61	-,299** ,019 61	-,924** ,000 61	-,440** 61	1,000 61									
	b fond	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	-,358** ,005 61	-,391* ,027 32	-,745** ,000 61	,155 ,397 32	-,358** ,045 32	,133 ,305 61	-,143 ,270 61	,009 ,944 61	-,354** ,005 61	,202 ,118 61	-,202 ,118 61	-,361** ,004 61	-,064 ,623 61	1,000 61							
	l tache	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	,775** ,000 32	,229 ,207 32	-,229 ,903 32	-,022 ,435 32	,143 ,058 32	-,339 ,075 32	,075 ,056 32	,418* ,761 32	,775** ,017 32	-,775** ,000 32	,400* ,023 32	-,400* ,023 32	-,400* ,023 32	1,000 32							
	a tache	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	,775** ,000 32	,229 ,207 32	-,229 ,903 32	-,022 ,435 32	,143 ,058 32	-,339 ,075 32	,075 ,056 32	,418* ,761 32	,775** ,017 32	-,775** ,000 32	,400* ,023 32	-,400* ,023 32	-,400* ,023 32	1,000 32	1,000 32						
	b tache	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	,258 ,154 32	-,067 ,715 32	,067 ,715 32	-,144 ,433 32	-,088 ,631 32	-,064 ,728 32	-,166 ,364 32	-,092 ,615 32	,148 ,420 32	,258 ,154 32	-,258 ,023 32	,400* ,023 32	,400* ,023 32	,400* ,023 32	,600** ,000 32	,600** ,000 32	1,000 32				
	l pulpe	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	,806** ,000 61	,366* ,039 32	,334** ,009 61	-,054 ,771 32	,330 ,065 32	-,354** ,005 61	,151 ,244 61	,047 ,720 61	,421** ,001 61	,329** ,010 61	-,329** ,010 61	,811** ,000 61	-,285* ,026 61	-,664** ,000 61	,775** ,000 61	,775** ,000 61	,258 ,154 61	1,000 61			
	a pulpe	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	,054 ,681 61	,366* ,039 32	-,885** ,000 61	-,054 ,771 32	,330 ,065 32	-,119 ,345 61	-,123 ,799 61	,033 ,347 61	-,123 ,000 61	,632** ,054 61	-,632** ,000 61	-,248 ,000 61	-,574** ,000 61	,780** ,000 61	,775** ,000 61	,775** ,000 61	,258 ,154 61	-,515** 61	1,000 61		
	b pulpe	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	,806** ,000 61	,366* ,039 32	-,543** ,000 61	-,054 ,771 32	,330 ,065 32	-,448** ,000 61	,078 ,971 61	,325* ,552 61	,970** ,011 61	-,970** ,000 61	,427** ,001 61	-,953** ,000 61	,087 ,506 61	,775** ,000 61	,775** ,000 61	,258 ,154 61	,299* ,019 61	,602** ,000 61	1,000 61		
	Exposition	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	,029 ,822 61	-,920** ,000 32	-,029 ,000 61	-,111 ,402 32	-,109 ,392 61	-,111 ,402 61	-,031 ,814 61	-,193 ,137 61	,584** ,000 61	-,584** ,000 61	-,180 ,164 61	-,436** ,000 61	,872** ,000 61	-,410** 61	-,915** 61	,457** 61	1,000 61				

*. La corrélation est significative au niveau 0,05 (bilatéral).

** La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral).

ANNEXE 13. Tableau de corrélations bilatérales de Spearman entre des différents paramètres de dégâts HWT 55 °C/ 50 min, les caractéristiques biochimiques, l'année de récolte et l'exposition des mangues du cv. Smith.

			Corrélations																			
Rho de Spearman	année de récolte	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	1,000																			
	surface de la tache	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N		1,000																		
	surface du fond	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N			1,000																	
	intensité de dégâts sur la tache	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N				1,000																
	surface de dégâts sur la tache	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N					1,000															
	intensité de dégâts sur le fond	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N						1,000														
	surface de dégâts sur le fond	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N							1,000													
	indice général de dégâts externes	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N								1,000												
	indice de dégâts internes	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N									1,000											
	ESS	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N										1,000										
	TA	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N											1,000									
	l fond	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N												1,000								
	a fond	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N													1,000							
	b fond	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N														1,000						
	l tache	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N															1,000					
	a tache	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N																1,000				
	b tache	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N																	1,000			
	l pulpe	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N																		1,000		
	a pulpe	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N																			1,000	
	b pulpe	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N																				1,000
	exposition	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N																				1,000
			85																			
			225																			
			208																			
			33																			
			261																			
			016																			
			85																			
			198																			
			269																			
			33																			
			199																			
			268																			
			33																			
			261																			
			016																			
			85																			
			778																			
			000																			
			85																			
			222																			
			041																			
			85																			
			864																			
			000																			
			85																			
			851																			
			000																			
			85																			
			072																			
			514																			
			85																			
			072																			
			514																			
			85																			
			819																			
			000																			
			85																			
			644																			
			000																			
			33																			
			368																			
			035																			
			33																			
			644																			
			000																			
			33																			
			000																			
			1000																			
			85																			
			851																			
			000																			
			85																			
			025																			
			822																			
			85																			

*. La corrélation est significative au niveau 0,05 (bilatéral).

** La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral).

ANNEXE 14. Tableau de corrélations bilatérales de Spearman entre des différents paramètres de dégâts HWT 55 °C/ 50 min, les caractéristiques biochimiques, l'année de récolte et l'exposition des mangues du cv. Nam Doc Mai.

			Corrélations																						
			année de récolte	surface de la tache	surface du fond	intensité de dégâts sur la tache	surface de dégâts sur la tache	intensité de dégâts sur le fond	surface de dégâts sur le fond	Indice général de dégâts externes	Indice de dégâts internes	ESS	TA	l fond	a fond	b fond	l tache	a tache	b tache	l pulpe	a pulpe	b pulpe	exposition		
Rho de Spearman	année de récolte	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	1,000 108																						
	surface de la tache	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N		1,000 13																					
	surface du fond	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	-.330** .000 108	-1,000** 13	1,000 108																				
	intensité du dégât sur la tache	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N		.412 .162 13	-.412 .162 13	1,000 13																			
	surface de dégâts sur la tache	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N		.390 .188 13	-.390 .188 13	.987** .000 13	1,000 13																		
	intensité de dégâts sur le fond	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	-.399** .000 108	.229 .451 13	.213* .027 108	.179 .558 13	.179 .559 108	1,000 108																	
	surface de dégât sur le fond	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	-.773** .000 108	.287 .343 13	.335** .000 108	.419 .154 13	.441 .131 13	.747** .000 108	1,000 108																
	Indice général de dégâts externes	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	-.754** .000 108	.321 .285 13	.328** .001 108	.549 .052 13	.561* .046 13	.804** .000 108	.992** .000 108	1,000 108															
	Indice de dégâts internes	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	-.691** .000 108	-.165 .591 13	.454** .000 108	-.091 .768 13	-.103 .737 13	.295** .002 108	.564** .000 108	.549** .000 108	1,000 108														
	ESS	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	.890** .000 108		-.110 .256 13			-.385** .000 108	-.736** .000 108	-.715** .000 108	-.573** .000 108	1,000 108													
	TA	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	-.890** .000 108		.477** .000 13			.276** .004 108	.641** .000 108	.619** .000 108	.645** .000 108	-.725** .000 108	1,000 108												
	l fond	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	.384** .000 108	.328 .273 13	-.090 .356 108	.281 .352 13	.254 .403 13	-.007 .939 108	-.222** .021 108	-.194** .044 108	-.237** .000 108	.388** .001 108	-.311** .000 108	1,000 108											
	a fond	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	.864** .000 108	-.660** .014 13	-.240* .012 108	-.328 .274 13	-.354 .235 13	-.424** .000 108	-.716** .000 108	-.703** .000 108	-.587** .000 108	.821** .000 108	-.732** .000 108	.452** .000 108	1,000 108										
	b fond	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	-.864** .000 108	.328 .273 13	.148 .126 108	.281 .352 13	.254 .403 13	.483** .000 108	.765** .000 108	.756** .000 108	.617** .000 108	-.865** .000 108	.657** .000 108	-.182 .060 108	-.893** .000 108	1,000 108									
	l tache	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	a tache	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	b tache	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	l pulpe	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	.000 1,000 108		.061 .532 13			.060 .537 108	-.009 .930 108	.010 .920 108	.025 .795 108	.290** .002 108	-.199** .039 108	.136 .160 108	.174 .072 108	-.082 .401 108					1,000 108				
	a pulpe	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	.883** .000 108		-.109 .260 13			-.433** .000 108	-.727** .000 108	-.715** .000 108	-.581** .000 108	.853** .000 108	-.580** .000 108	.402** .000 108	.844** .000 108	-.898** .000 108					-.152 .115 108	1,000 108			
	b pulpe	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	.883** .000 108		-.109 .260 13			-.428** .000 108	-.733** .000 108	-.722** .000 108	-.577** .000 108	.853** .000 108	-.580** .000 108	.337** .000 108	.755** .000 108	-.849** .000 108					-.243** .011 108	.970** .000 108	1,000 108		
	exposition	Coefficient de corrélation Sig. (bilatérale) N	.000 1,000 108		-.369** .000 13			-.171 .077 13	-.059 .327 108	-.107 .269 108	-.059 .545 108	-.100 .306 108	-.453** .000 108	-.058 .548 108	-.070 .469 108	.228** .018 108					.523** .000 108	-.450** .000 108	-.450** .000 108	1,000 108	

** La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral).

* La corrélation est significative au niveau 0,05 (bilatéral).

ANNEXE 15

Tableau d'évolution des chromacités a* et b* de la tache colorée, du fond et de la pulpe des mangues des cultivars étudiés de la récolte au stade consommable

		a*			b*	
		N	récolte	mûre	récolte	mûre
tache	fascell	24	6,6848	11,489 +	22,3889	38,5762 +
	keitt	251	3,7599	4,11 +	19,5263	22,3926 +
	kent	180		13,8089		33,0897
	tommy atkins	88	9,7984	23,8134 +	12,627	26,3467 +
	reynal	419	10,7498	7,2729 -	10,63	13,6593 +
	haden	615	11,4571	20,5516 +	19,1813	32,7798 +
	palmer	74	6,1592	4,6019 -	3,8246	14,0308 +
	irwin	150	6,6955	19,7679 +	12,6674	25,4254 +
	kensington	5	-0,32	-5,6276 -	29,78	37,0876 +
	smith	111	3,5649	9,7259 +	12,4823	27,942 +

		a*			b*	
		N	récolte	mûre	récolte	mûre
fond	florigon	192	-16,8112	-14,6902 +	25,26	36,2097 +
	fascell	192	-18,2713	-13,4209 +	30,4787	43,9208 +
	nam doc mai	308	-19,63	-15,1745 +	33,1432	40,01 +
	keitt	605	-14,4629	-11,6461 +	21,9857	25,6917 +
	kent	180	-9,3875	-5,5662 +	19,6921	40,1044 +
	tommy atkins	189	-14,2519	-2,4838 +	33,1397	45,3718 +
	reynal	809	-15,6175	-9,1314 +	27,6361	24,541 -
	haden	1246	-17,8143	-8,725 +	28,243	47,4531 +
	palmer	163	-10,2644	-7,9523 +	18,9581	17,9329 -
	irwin	180	-13,3571	-2,4279 +	28,086	40,924 +
	kensington	192	-20,8292	-10,654 +	39,8742	44,6442 +
smith	269	-14,9074	-12,4241 +	21,6088	37,9965 +	

		a*			b*	
		N	récolte	mûre	récolte	mûre
pulpe	florigon	192	-7,5706	-5,71 +	56,9931	62,15 +
	fascell	192	-6,4512	-3,48 +	56,2375	63,64 +
	nam doc mai	308	-7,6798	-6,67 +	25,9011	50,07 +
	keitt	577	-4,3088	-0,13 +	62,5258	63,97 +
	kent	180	-5,7344	-1,79 +	62,3531	66,41 +
	tommy atkins	189	-8,2601	-1,63 +	58,2073	65,34 +
	reynal	665	-2,6033	-1,76 +	65,0462	65,04 +
	haden	672	-9,4148	-4,04 +	52,7238	62,96 +
	palmer	169	-4,0567	-3,07 +	65,5993	67,23 +
	irwin	171	-8,1757	-2,56 +	59,2058	64,17 +
	kensington	192	-7,9825	-4,28 +	52,38	57,26 +
	smith	297	-6,07	-3,26 +	51,0044	56,81 +

ANNEXE 16

Capacité antioxydante, polyphénols, anthocyanes, caroténoïdes totaux dans les tissus (peau et chair) du cv. Reynal en fonction de l'exposition (ombre, soleil, filtre anti UV-A et UV-B) et du traitement HWT 55.0 °C/ 50 min.

Tissu	Traitement	Exposition	N	TEAC (en mg de TEAC/100g de MF)		TPP (en mg de GAE/100 g de MF)		TAT (en mg de cyanidin-3-glucoside/100 g de MF)		Caroténoïdes (en mg/100 g de MF)	
				moyenne	ES	moyenne	ES	moyenne	ES	moyenne	ES
Peau	Récolte	Ombre	4	6766,3	1426,3	942,7	100,8	0,02 a	0,01	4,02	0,89
		Soleil	4	6084,1	807,1	977,4	103,6	0,25 b	0,04	4,20	0,30
		Soleil avec filtre anti UV	2	5473,8	651,5	1158,0	74,5	0,42 b	0,11	4,93	0,50
	HWT 55°C 50 min	Ombre	2	4533,8	54,8	808,8	88,9	0,02 a	0,02	3,50	0,28
		Soleil	2	3232,7	850,7	652,4	0,8	0,11 ab	0,03	4,24	0,05
		Soleil avec filtre anti UV	2	4995,8	4484,2	1062,3	134,4	0,20 b	0,02	4,49	0,73
Chair	Récolte	Ombre	5	79,3	3,4	78,2	6,30	0,00	0,00	0,88	0,22
		Soleil	5	77,8	5,3	80,4	9,80	0,10	0,10	0,98	0,25
		Soleil avec filtre anti UV	2	67,4	8,1	78,5	8,50	0,00	0,00	1,63	0,06
	HWT 55°C 50 min	Ombre	2	51,9	22,6	64,9	23,80	0,00	0,00	1,02	0,62
		Soleil	2	79,1	13,2	88,1	13,80	0,01	0,01	1,87	0,03
		Soleil avec filtre anti UV	2	71,4	6,1	89,6	8,30	0,00	0,00	1,86	0,30

Les valeurs qui ne sont pas suivies en colonne de la même lettre sont différentes selon l'exposition (par traitement et par tissu) au seuil de 0.05 selon le test de Tukey
L'absence de lettre soulignée aucune différence significative entre les valeurs selon les traitements et l'exposition

ANNEXE 17

Capacité antioxydante, polyphénols, anthocyanes, caroténoïdes totaux dans les tissus (peau et chair) du cv. Reynal en fonction de l'heure de récolte et l'exposition.

Traitement	Tissu	Exposition	Date et Heure de récolte	N	TEAC (en mg de TEAC/100g de MF)		TPP (en mg de GAE/100 g de MF)		TAT (en mg de cyanidin-3-)		Caroténoïdes (en mg/100 g de MF)			
					moyenne	ES	moyenne	ES	moyenne	ES	moyenne	ES		
Récolte	Peau	Ombre	13/02 15h	5	6766,31	1426,27	942,69	199,79	0,02	a	0,01	4,02	0,89	
			13/02 20h	3	6624,93	839,41	769,03	29,73	0,02	a	0,02	4,23	0,27	
			14/02 1h	3	7303,47	539,78	874,13	10,03	0,00	a	0,00	3,99	0,29	
			14/02 6h	3	7841,42	690,82	909,08	57,62	0,01	a	0,01	4,04	0,17	
			14/02 11h	2	6844,52	1171,67	849,96	72,45	0,00	a	0,00	3,48	0,26	
			14/02 15h	3	5996,22	348,71	648,01 A	83,78	0,04	ab	0,00	2,54	0,27	
		Soleil	13/02 15h	5	6084,12	807,06	977,45	103,62	0,25	bc	0,04	4,20	0,30	
			13/02 20h	3	6390,79	368,32	753,51	50,56	0,00	a	0,00	4,14	0,51	
			14/02 1h	3	8304,51	2045,21	1037,23	94,84	0,29	c	0,03	6,51	0,78	
			14/02 6h	3	9121,01	2378,93	1115,28	73,13	0,52	d	0,00	5,81	1,37	
			14/02 11h	2	7941,75	1827,38	1066,24	37,08	0,41	cd	0,07	5,35	1,21	
			14/02 15h	3	7837,78	938,16	887,10 B	20,73	0,32	cd	0,01	4,95	0,38	
	Chair	Ombre	13/02 15h	5	79,29	ab	3,38	78,23	6,30	0,00	0,00	0,88	ab	0,22
			13/02 20h	3	99,70	bc	0,52	89,90	2,69	0,00	0,00	0,59	a	0,03
			14/02 1h	3	101,66	bc	2,52	90,24	3,89	0,00	0,00	0,88	ab	0,03
			14/02 6h	3	116,13	c	5,62	100,85	10,96	0,00	0,00	0,72	a	0,11
			14/02 11h	2	83,45	ab	7,30	78,19	3,15	0,00	0,00	0,69	a	0,17
			14/02 15h	3	95,78	abc	1,14	78,58	7,41	0,00	0,00	0,60	a	0,03
Soleil	13/02 15h	5	77,77	ab	5,28	80,42	9,77	0,10	0,23	0,98	ab	0,25		
	13/02 20h	3	109,54	c	3,55	88,16	4,53	0,00	0,00	0,84	ab	0,03		
	14/02 1h	3	74,87	ab	14,30	69,77	15,49	0,00	0,00	0,66	a	0,18		
	14/02 6h	3	103,25	bc	1,06	82,57	6,49	0,00	0,00	1,01	ab	0,03		
	14/02 11h	2	72,93	ab	17,70	65,05	4,72	0,04	0,06	1,05	ab	0,11		
	14/02 15h	3	84,45	bc	2,92	72,72	4,57	0,00	0,00	0,77	a	0,08		

Les valeurs qui ne sont pas suivies en colonne de la même lettre sont différentes selon l'heure de récolte (par tissus et exposition) au seuil de 0,05 selon le test de Tukey
L'absence de lettre majuscule soulignant qu'il n'y a pas de différence significative entre les valeurs

ANNEXE 18

Capacité antioxydante, polyphénols, anthocyanes, caroténoïdes totaux dans les tissus (peau et chair) du cv. Keitt en fonction de l'exposition et de la durée de conservation à 12 °C.

Traitement	Tissu	Exposition	Durée de conservation 12°C	N	TEAC (en mg de TEAC/100g de MF)		TPP (en mg de GAE/100 g de MF)		TAT (en mg de cyanidin-3-glucoside/100 g de MF)		Caroténoïdes (en mg/100 g de MF)	
					moyenne	ES	moyenne	ES	moyenne	ES	moyenne	ES
Récolte	Peau	Ombre	0h	2	6639,30	1549,59	815,01	4,09	0,00	0,00	3,86	0,18
			42h	2	8306,10	2938,93	725,12	258,50	0,00	0,00	4,57	0,25
			114h	2	8181,10	2230,06	675,94	252,26	0,00	0,00	4,47	0,21
		167h	2	9473,89	3694,22	575,97	140,65	0,00 A	0,00	4,33	0,21	
		Soleil	0h	2	11764,86	5262,30	1020,63	198,91	0,27	0,19	5,73	0,14
			42h	2	12067,35	4583,10	790,75	103,14	0,15	0,04	5,21	1,40
	114h		2	12829,22	4300,53	853,13	146,59	0,12	0,10	4,97	1,21	
	167h	2	9937,23	2237,79	716,08	68,97	0,09 B	0,01	3,68	0,50		
	Chair	Ombre	0h	2	91,50	57,36	74,39	39,79	0,00	0,00	0,41	0,19
			42h	3	92,74	0,43	75,11	7,21	0,00	0,00	0,82	0,01
			114h	2	98,99	2,70	87,68	1,13	0,00	0,00	0,87	0,07
		167h	2	100,43	12,01	85,49	9,07	0,00	0,00	0,81	0,18	
Soleil		0h	2	132,74	20,29	135,30	5,84	0,02	0,00	1,23	0,21	
		42h	2	118,22	26,77	94,62	21,03	0,01	0,00	1,28	0,05	
	114h	2	95,91	27,05	80,42	2,06	0,00	0,00	0,91	0,30		
167h	2	103,12	11,35	88,09	10,02	0,00	0,00	0,60	0,35			

L'absence de lettre majuscule soulignent qu'il n'y a pas de différence significative entre les valeurs

AMPLIATIONS

- ADMINISTRATION.....	1
- CONSEIL SCIENTIFIQUE.....	1
- JURY.....	6
- AFFICHAGE.....	2

ECOLE DOCTORALE

ARRETE E.D. N° 22/2010
PORTANT DESIGNATION D'UN JURY DE SOUTENANCE DE THESE
LE PRESIDENT DE L'UNIVERSITE DE LA NOUVELLE-CALEDONIE

- VU La loi n° 84-52 du 26 janvier 1984 modifiée sur l'enseignement supérieur et notamment son article 17 ;
 VU la loi n° 99-209 du 19 mars 1999 organique relative à la Nouvelle-Calédonie, et notamment son article 27 ;
 VU le décret n° 99-445 du 31 mai 1999 portant création de l'université de la Polynésie française et de l'université de la Nouvelle-Calédonie, et notamment son article 6 ;
 VU l'arrêté du 7 août 2006 relatif à la formation doctorale ;
 VU le procès verbal de l'élection du Président de l'Université de la Nouvelle-Calédonie par l'ensemble des membres du Conseil d'Administration et du Conseil Scientifique réunis en assemblée plénière le 27 juillet 2007 ;

Considérant que les travaux du candidat ont été préalablement examinés par deux rapporteurs :
 - CHERVIN Christian, Professeur – ENSAT Toulouse ;
 - DELEU Carole, HDR INRA - Université de Rennes 1 ;

Considérant que les rapporteurs précités ont fait connaître leur avis par des rapports écrits communicables au jury et au candidat ;

Considérant la proposition de jury du directeur de thèse ;

ARRETE :

ARTICLE 1 : La soutenance de la thèse :

**Effet de l'ensoleillement en pré récolte sur l'acquisition d'une thermotolérance des mangues (*Mangifera indica* L.).
Impact sur leur réponse physiologique aux traitements à la chaleur en après récolte.**

Présentée par **Valérie KAGY**, née le 6 novembre 1963 à Coetquidan (056), se déroulera le **vendredi 19 février 2010 à 14h00 dans l'Amphi 400 – Site de Nouville**. Dès réception, des deux rapports et avis des rapporteurs.

ARTICLE 2 : La composition du jury est la suivante:

- | | |
|------------------------------|---|
| - AMIR Hamid | PRU, Microbiologie ; Université de la Nouvelle-Calédonie (Directeur de thèse) |
| - CHERVIN Christian | PRU, Sciences des aliments et œnologie ; ENSAT Toulouse (Rapporteur) |
| - DELEU Carole | HDR Métabolisme du stress, physiologie végétale INRA
Université de Rennes 1 (Rapporteur) |
| - WOOLF Allan | Docteur Science Leader, Post harvest physiology ; Institute Auckland (NZ) |
| - MADEMBAS-FRANÇOIS François | Docteur, Développement rural, Province Sud |
| - L'HUILLIER Laurent | Docteur Chercheur, Biologie végétale écologie ; IAC |

ARTICLE 3 : Exécution

Le secrétaire général de l'université de la Nouvelle-Calédonie, est chargé, en ce qui le concerne, de l'exécution du présent arrêté qui sera affiché sur les lieux d'examen.

Le président
de l'Université de la Nouvelle-Calédonie,


 J.M. BOYER

www.univ-nc.nc

KAGY Valérie, 2010. Effect of preharvest sun exposure on the acquisition of thermotolerance of mango (*Mangifera indica* L.). Impact on their physiological response postharvest heat treatment. Thèse de doctorat de l'Université de la Nouvelle-Calédonie, 217 p. *Institut Agronomique néo Calédonien (IAC), SRA-Pocquereux, BP 32 98880 La Foa, Nouvelle-Calédonie.*

ABSTRACT

Mango fruit has a strong economic potential on international export markets but, as a host of fruit flies, it needs to be disinfested. Application of commercial heat treatments utilize temperature and treatment duration that can lead to external and internal damage to mango fruit tissue. Moderate heat-stress can promote thermotolerance in fruit by setting up biochemical cell protection mechanisms and thus, enable the fruit to tolerate elevated temperatures. Such treatments (38-42°C) have been applied postharvest to induce thermotolerance to heat disinfesting treatments. The hypothesis examined here is that preharvest sun exposure could have similar benefits to the physiological and biochemical responses of mango, thus leading to induced thermotolerance.

To confirm this hypothesis, three areas were investigated on different mango cultivars. The first one examined whether pre harvest temperatures of mango fruit are in the range of the temperature used for postharvest conditioning pre treatments. The second assessed the physiological responses of the sun exposed and shade fruits to hot water treatment at 55°C for 50 min (a high damaging treatment), and hot air treatments (47°C, similar to commercially applied). Finally, the third area sought to confirm that two biochemical cell protection mechanisms were set up during these pre harvest conditions: HSP 17.4 heat shock proteins and an antioxidant defence system through total polyphenols, anthocyanins and carotenoids.

During these preharvest conditions, following a diurnal cycle, mango fruit have an internal temperature that can reach similar to those used for conditioning pretreatments. It was found that many factors related to the specific cultivar, such as size, spatial distribution on the tree, colour and maturity, but also exposure, type and intensity of sun radiation can modify external and internal temperature of fruit and therefore can affect the potential acquired thermotolerance. Although there was clearly acquired thermotolerance on the highly colour area of the sun exposed spot, this acquired thermotolerance was not always efficient to improve overall response of mango after hot water treatment (i.e. severe heat treatment). A heat tolerance gradient of the wide range of cultivars to was determined, and has confirmed the complexity of the 'cultivar' and 'cultivar x exposition' effects in the physiological response of mango fruit to these treatment. However, the presence and induction of HSP17.4 and antioxidants confirmed that protection mechanisms set up by preharvest sun exposure were present in the tissues of mango fruit at the time of the heat treatment. These mechanisms were more important in sun exposed and particularly on the coloured spot which were more exposed to oxidative and heat stress from direct sun radiations. HSP 17.4 levels, and to a lesser extent, those of total polyphenols, anthocyanins and carotenoids, showed diurnal patterns but were more generally higher during the night, suggesting the persistence of these mechanisms even without any stress. This could be both for repairing cell damage or to anticipate subsequent stresses.

In this complex biological system, transcriptomic, proteomic and metabolomic approaches in controlled conditions of oxidative and heat stress could be of interest for further study.

Key words: mango, *Mangifera indica* L., New Caledonia, sun exposure, stress, thermo tolerance, heat treatment, defence systems, heat shock proteins, smHSPs, antioxidants.

KAGY Valérie, 2010. Effet de l'ensoleillement en pré récolte sur l'acquisition d'une thermotolérance des mangues (*Mangifera indica* L.). Impact sur leur réponse physiologique aux traitements à la chaleur en après récolte.

Thèse de doctorat de l'Université de la Nouvelle-Calédonie, 217 p. *Institut Agronomique néo Calédonien (IAC), SRA-Pocquereux, BP 32 98880 La Foa, Nouvelle-Calédonie.*

RESUME

La mangue a un fort potentiel économique sur les marchés d'exportation internationaux. Elle est cependant un hôte des mouches des fruits et elle nécessite d'être désinsectisée auparavant. Les traitements à la chaleur appliqués commercialement pour la désinsectisation des mangues utilisent des durées de traitement et des températures qui peuvent engendrer des dégâts externes et internes dans les tissus des mangues. Dans ce contexte, l'application d'un stress modéré préliminaire constitue un conditionnement thermique permettant à la mangue d'acquérir une thermotolérance par la mise en place de mécanismes biochimiques de protection de ses cellules et ainsi d'être capable d'endurer des températures plus élevées. C'est pourquoi, afin de réduire les dégâts pouvant être occasionnés par la désinsectisation à la chaleur, des conditionnements thermiques entre 38 et 42 °C des fruits sont réalisés après la récolte. Au préalable de cette étude, l'hypothèse que les conditions d'ensoleillement en pré récolte de Nouvelle-Calédonie pendant la saison de production des mangues pourraient se substituer à ces conditionnements a été formulée. De cette façon, les mangues pourraient acquérir au champ relative une thermotolérance pour optimiser leur comportement en après récolte.

Pour vérifier cette hypothèse, trois domaines d'investigations sont développés sur plusieurs cultivars de mangues. Le premier a consisté à vérifier que les températures internes des mangues en pré récolte se situaient bien dans l'intervalle de températures des conditions thermiques réalisés en après récolte. Le second a visé à évaluer la réponse des mangues au traitement en immersion dans de l'eau chaude à 55 °C pendant 50 min, selon leur exposition au soleil. Enfin, le troisième, a eu pour but de confirmer que deux mécanismes de protections biochimiques sont mis en place pendant ces conditions de pré récolte : les protéines de choc thermiques HSP17.4 et un système de défense antioxydant par les polyphénols, anthocyanes et caroténoïdes totaux.

En conditions de pré récolte, les mangues sur l'arbre ont, selon un cycle diurne, des températures internes, qui permettent de se substituer à celles des traitements d'endurcissement des fruits mais avec toutefois des limites. En effet, de nombreux facteurs inhérents au cultivar, tels que la taille, la hauteur, la couleur ainsi que le stade de maturité mais aussi l'orientation, l'intensité et le type de radiations du soleil peuvent modifier la température des fruits et ainsi affecter leur éventuelle thermotolérance acquise. Cependant, bien qu'elle soit probable sur la tache de couleur des mangues exposées au soleil, cette thermotolérance acquise n'a pas toujours été suffisante pour améliorer la réponse des mangues soumises à des traitements à la chaleur, particulièrement sévères. Un classement de la tolérance des différents cultivars au traitement à la chaleur a pu être réalisé confirmant ainsi la prépondérance des facteurs 'cultivar' et de l'interaction 'cultivar x exposition' dans la réponse physiologique des mangues à ce type de traitement. Pourtant, la présence de HSP17.4 et d'antioxydants confirment que des mécanismes de protection sont bien mis en place par l'ensoleillement en pré récolte et sont présents dans les tissus des mangues au moment du traitement à la chaleur. Ils sont plus importants dans les tissus des mangues, et plus particulièrement sur la tache de couleur des mangues, les plus directement soumis aux stress oxydatif et thermique de l'ensoleillement. Les niveaux de HSP17.4 et dans une moindre mesure, ceux des polyphénols, anthocyanes et caroténoïdes totaux varient au cours de la journée et sont plus importants la nuit suggérant une persistance de ces mécanismes en absence de stress à la fois pour la réparation des dégâts cellulaires ou pour une anticipation de stress à venir.

Dans ce système biologique complexe, des approches globales transcriptomique, protéomique et métabolomique avec une dissociation en conditions contrôlées des stress oxydatifs et thermiques pourraient être envisagées.

Mots clés : mangue, *Mangifera indica* L., Nouvelle-Calédonie, ensoleillement, stress, thermotolérance, traitements à la chaleur, systèmes de défense, protéines de choc thermique, smHSPs, antioxydants.