Article original

Évaluation non destructive de la fermeté de la mangue par la technique acoustique impulsionnelle

Marc Valente [a*]
Jean Théophile Banzouzi[b]
Eric Pietri[c]
Manuel Dornier[b]

[a] Cirad-Amis Programme agro-alimentaire, TA 40/16, 73, rue Jean-François-Breton, 34398 Montpellier cedex 5, France

[b] Ensia-Siarc, 1101, avenue Agropolis, BP 5098, 34033 Montpellier cedex 1, France

[c] Inra, Laboratoire de méthodes physiques d'étude, site Agroparc, 84914 Avignon cedex 9, France

* Correspondance et tirés à part

Reçu le 17 janvier 2000
Accepté le 25 avril 2000

Fruits, 2000, vol. 55, p. 333–345
© 2000 Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS
All rights reserved

RESUMEN ESPAÑOL, p. 344

Non-destructive evaluation of mango firmness by the impulse acoustic technique.

Abstract — Introduction. Firmness is recognised as one of the main indicators of fruit maturity for harvesting and fruit quality during ripening and storage. Non-destructive evaluation of mango firmness is increasingly necessary for a better homogeneity of fruit batches to facilitate their management and trading. **Materials and methods**. A non-destructive acoustic method has been used to estimate overall firmness of mango and compared to widely used mechanical methods, such as the penetrometer. The effects of fruit peel, texture heterogeneity as well as setting parameters on accuracy have been studied for each proposed method. **Results and discussion**. Firmness evaluation of whole fruit has been successfully carried out by mechanical and acoustic methods for mangoes (var. Keitt) stored for 4 weeks at 13 °C and 90 % RH. The relative decrease in penetrometer firmness, observed during mango storage, was found to be very close to the one recorded for acoustic measurements. Texture heterogeneity of mango fruit is the major limiting factor affecting experimental measurement accuracy for penetrometry. In the same way, accurate determination of resonant frequency is the key point for mango firmness evaluation by the acoustic method. This latter method seems to be well adapted to sort individual fruit according to their actual maturity, and to control ripening and softening processes during the early stage of fruit maturation. **Conclusion**. The acoustic impulse technique is a rapid and non-destructive method to estimate overall mango firmness. Quality fruit sorting at picking time and shelf life prediction are the two potential applications of the acoustic method. © Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

***Mangifera indica* / fruits / firmness / consistency / quality / measurement / acoustic properties**

Évaluation non destructive de la fermeté de la mangue par la technique acoustique impulsionnelle.

Résumé — Introduction. La fermeté constitue l'un des principaux indicateurs de maturité des fruits à la cueillette et de leur degré de maturation en cours de conservation. L'évaluation non destructive de la fermeté de la mangue répond à un besoin croissant d'homogénéisation et de gestion des lots de fruits mis en marché. **Matériel et méthodes**. La méthode acoustique impulsionnelle a été étudiée en prenant pour référence les méthodes mécaniques classiques d'évaluation de la fermeté de la mangue, telle que celle utilisant un pénétromètre. L'influence de l'hétérogénéité du fruit, de sa peau et des principaux paramètres opératoires a été étudiée pour chacune des méthodes proposées. **Résultats et discussion**. Les méthodes pénétrométrique et acoustique ont permis de suivre indifféremment, avec la même précision, l'évolution de la fermeté globale de lots de mangue (var. Keitt) conservés 4 semaines à 13 °C et 90 % HR. L'hétérogénéité de texture des fruits limite fortement la fiabilité de la méthode pénétrométrique, alors que la détermination de la fréquence de résonance du fruit constitue le point clef de la méthode acoustique. Celle-ci semble bien adaptée au tri qualitatif des mangues après cueillette et en début de conservation, pour lesquelles l'évaluation de la fréquence de résonance est la plus fiable. **Conclusion**. La technique acoustique impulsionnelle permet d'évaluer de manière rapide, globale et non destructive la fermeté de la mangue après récolte. Cette méthode pourrait être mise à profit pour le tri qualitatif des mangues et l'évaluation de leur potentiel de conservation. © Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

***Mangifera indica* / fruits / fermeté / consistance / qualité / mesure / propriété acoustique**

1. introduction

Les propriétés viscoélastiques des fruits, dont la fermeté, sont connues de longue date pour être de bons indicateurs de la maturité des fruits à la cueillette, de leur degré de maturation en cours de conservation ou de transport, et de prédiction de leur potentiel de conservation [1].

Les techniques classiques d'évaluation des propriétés mécaniques des fruits, en relation avec leur maturité, sont le plus souvent destructives (tests pénétrométriques). Elles sont, de plus, fréquemment associées à des mesures locales dont la représentativité est influencée par l'hétérogénéité de texture, elle-même liée à la structure spécifique de chaque fruit [2]. Dans ce contexte, l'évaluation systématique, fruit par fruit, de la fermeté au niveau d'une chaîne de tri automatique n'a pas encore pu s'imposer à l'échelle commerciale.

Les techniques acoustiques et ultrasonores, couramment utilisées en contrôle non destructif des matériaux industriels non alimentaires, font de plus en plus l'objet d'études appliquées aux produits alimentaires [3] et en particulier à l'évaluation de la qualité des fruits et légumes [4]. Les propriétés acoustiques et ultrasonores (fréquence de résonance, vitesse de propagation, atténuation...) des fruits dépendent en grande partie de facteurs biologiques des tissus dans lesquels se propagent les ondes : composition et anatomie des tissus, pression osmotique cellulaire, état des parois et, enfin, degré de liaison des cellules entre elles. Or, tous ces facteurs participent à l'élaboration de la fermeté globale du fruit, telle que la perçoit le consommateur, et évoluent au cours de la maturation et de la sénescence cellulaire [1,5].

En raison de l'importance économique et des caractéristiques spécifiques de la pomme (forme quasi-sphérique, relative homogénéité de structure et de composition), ce fruit a été et demeure encore un modèle d'étude privilégié [6–13]. Les recherches ont été étendues à d'autres fruits tempérés de forme plus ou moins sphérique : kiwi [14], melon et pastèque [15, 16], pêche [17, 18] et tomate [19]. Parmi les fruits tropicaux, le potentiel d'application des techniques acoustiques et ultrasonores à l'évaluation de la maturité a été étudié sur l'ananas [20], l'avocat [21–23] et la mangue [6, 24–26].

Dans le domaine des basses fréquences, les techniques appliquées aux fruits reposent principalement sur deux méthodes d'analyse fréquentielle du signal émis par le fruit. La première méthode utilise une sollicitation forcée de type Dirac et, la seconde, une sollicitation sous forme de balayage fréquentiel.

L'objectif de l'étude présentée a été double :

– évaluer le potentiel d'application de la méthode acoustique impulsionnelle à l'estimation de la fermeté de la mangue ;

– étudier les avantages et inconvénients respectifs des méthodes de mesure de la fermeté acoustique et pénétrométrique pour, d'une part, estimer la maturité des fruits à la cueillette et, d'autre part, suivre l'évolution de leur fermeté en cours de conservation.

2. matériel et méthodes

2.1. matériel végétal

Les essais ont été réalisés sur des mangues de la variété Keitt, en provenance de Côte-d'Ivoire, expédiées par bateau. Le suivi de la fermeté en cours de conservation (13 °C, 90 % HR) a été réalisé sur quatre lots homogènes de dix fruits chacun. La constitution de ces lots de fruits – homogènes en poids, fermeté et forme (symétrie plane) – a nécessité le tri d'environ 300 fruits. La fermeté des mangues a été évaluée à partir de leur fréquence de résonance obtenue par la méthode acoustique impulsionnelle. La fréquence moyenne de résonance des lots de fruits a varié de 600 à 640 Hz, l'écart type mesuré sur un même lot étant inférieur à 10 Hz.

2.2. fermeté mécanique

Un embout cylindrique de 6,3 mm de diamètre à bout conique (angle de 60°) a été

utilisé pour déterminer la fermeté pénétrométrique de la mangue [24, 26]. La sonde pénètre le fruit non pelé à la vitesse de 3 mm·s^{-1} sur une profondeur de 8 mm. L'analyseur de texture utilisé (*figure 1a*), TA-XT2 (Stable Micro System), permet l'enregistrement de la force de pénétration en fonction du déplacement. La texture du fruit a été caractérisée par la force de rupture de la peau (Frp), les forces de pénétration à 5,5 et 8 mm de profondeur, respectivement notées F5 et F8 et exprimées en Newton.

La fermeté de la pulpe a été déterminée d'une part par pénétrométrie sur fruit entièrement ou localement pelé et, d'autre part, par compression d'un cylindre de pulpe de 20 mm de diamètre et de 22 mm de haut (*figure 1b*). Ce cylindre a été prélevé à l'aide d'un emporte-pièce dans la partie centrale et charnue de la « joue » de la mangue échantillonnée (*figure 1c*), selon l'axe apex-pédoncule. Les variables F'5 et F'8 ont représenté, respectivement, les forces de pénétration à 5,5 et 8 mm de profondeur dans la pulpe, obtenues avec l'embout cylindrique déjà décrit. La variable F% a représenté la force de compression nécessaire pour obtenir une déformation relative du cylindre de pulpe de 5 % de sa hauteur lorsque celui-ci est comprimé à une vitesse de 1 mm·s^{-1}.

Pour le suivi de la fermeté des mangues en cours de conservation, chaque fruit a fait l'objet de huit mesures pénétrométriques (quatre sur fruit épluché et quatre sur fruit non épluché) et de deux mesures de compression de cylindre. Les mesures pénétrométriques avec peau ont été réalisées, avant prélèvement du cylindre, en deux points précis notés 1 et 3 sur la *figure 1c*. La fermeté pénétrométrique de la pulpe a été déterminée sur deux autres points notés 2 et 4 sur la *figure 1c*.

2.3. fermeté acoustique

Le principe de la méthode repose sur l'identification de la fréquence de résonance du fruit lorsque ce dernier est soumis à une excitation mécanique brève et énergétique (impulsion de Dirac). La *figure 2* présente, de façon schématique, le dispositif expérimental adopté. Le choc est assuré par la chute d'une bille en acier inoxydable de 12 mm de diamètre, d'une hauteur constante de 25 cm, au centre de la joue du fruit posé sur un support. Le microphone (Electré), situé à quelques millimètres de la peau en position diamétralement opposée au point d'impact, capte la réponse acoustique consécutive au choc de la bille sur le fruit sur une durée de 25 ms, sans tenir compte du rebond éventuel.

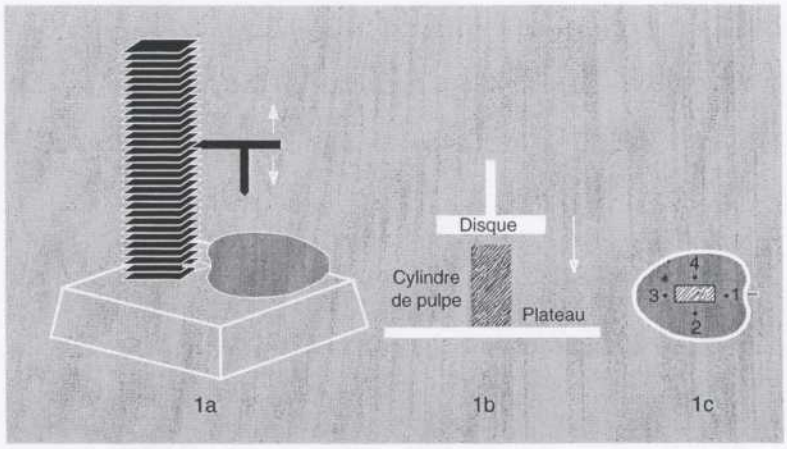

Figure 1.
Dispositif expérimental de mesure de la fermeté mécanique de la mangue mesurée au pénétromètre (1a) et par compression de cylindre (1b). Localisation des mesures pénétrométriques (points de 1 à 4) et de la zone de prélèvement du cylindre (1c).

Différentes variantes de ce dispositif expérimental de base ont été testées afin d'étudier l'influence des modes de production du choc et de maintien du fruit. Le choc a été provoqué soit par la chute d'une bille, soit à l'aide d'une baguette de bois ou d'un pendule constitué de la même bille d'acier que précédemment (diamètre de 12 mm), fixée à un fil d'acier de 25 cm de long (*figure 2*). Trois modes de maintien du fruit ont été testés : fruit reposant sur un support soit rigide (mode 1 ; *figure 2*), soit souple (mousse alvéolaire : mode 2), ou fruit suspendu par son pédoncule et en vibration libre (mode 3). Quelle que soit la variante adoptée, le fruit a toujours été frappé au centre de la joue et le signal acoustique enregistré sur la joue opposée.

L'amplification et la numérisation du signal ont été effectuées au moyen d'une carte d'acquisition AD 12 bits Axiom AX5412 HG. Le logiciel d'acquisition et de traitement des données (transformée de Fourier FFT) permet d'afficher, à l'écran, le signal sonore amorti ainsi que le spectre de fréquence. Les valeurs de la fréquence maximale et des

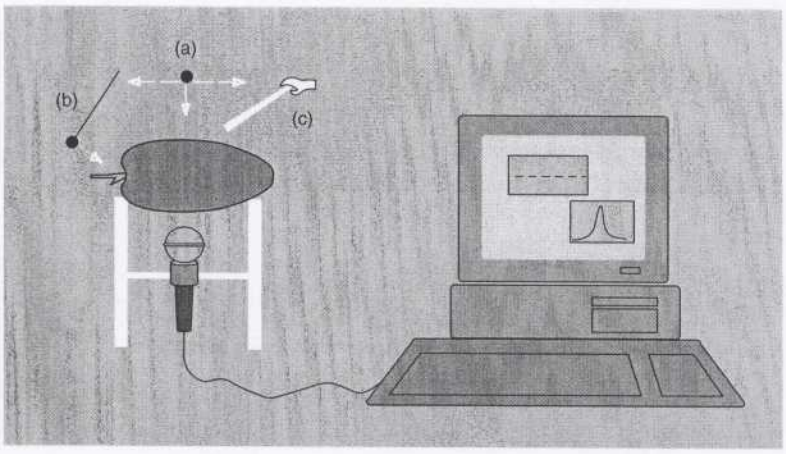

Figure 2.
Dispositif expérimental de mesure de la fermeté acoustique à partir de trois modes de sollicitation mécanique des fruits :
(a) chute de bille,
(b) pendule,
(c) : baguette.

fréquences secondaires ont été déterminées à 1 Hz près.

La fermeté du fruit a été estimée à l'aide d'un coefficient d'élasticité du fruit (E), exprimé en Pascal, calculé à partir de la fréquence de plus grande amplitude f (en Hz), du poids P (en kg) et de la masse volumique D (en $kg \cdot m^{-3}$), selon la relation :

$$E = f^2 \cdot P^{2/3} \cdot D^{1/3} \text{ [27].}$$

2.4. caractéristiques physicochimiques des fruits

Le poids, la densité et les caractéristiques pomologiques des fruits (épaisseur, grande largeur, hauteur) ont été déterminés. La composition biochimique de la pulpe de mangue a été analysée sur un échantillon de jus clair, obtenu par broyage et filtration de la totalité de la pulpe du fruit. L'acidité titrable a été déterminée par titration à l'aide d'une solution 0,1 mol de soude. L'extrait sec soluble (ESS) de la pulpe a été mesuré par réfractométrie. Les coordonnées colorimétriques L, a, b de la pulpe ont été déterminées au chromamètre CR 300 Minolta, sur la section médiane de chacun des deux cylindres de chair de mangue utilisés pour mesurer la fermeté de la pulpe par compression. Différentes caractéristiques du noyau de la mangue ont également été déterminées afin d'étudier son influence sur la réponse acoustique du fruit. En particulier, le taux volumique de remplissage de la cavité du noyau par l'amande a été estimé.

3. résultats et discussion

3.1. fermeté mécanique du fruit entier

3.1.1. variabilité en fonction du lieu de mesure sur la joue

Des mesures locales de fermeté ont été réalisées en 56 points de chacune des joues du fruit analysé. Les points de mesure ont correspondu aux nœuds d'un maillage constitué d'éléments carrés de 2 cm de côté, dessiné à la surface de chacune des joues. L'équateur du fruit et l'axe pédoncule-apex ont été pris comme bases du repère orthonormé x,y. La variabilité de la fermeté pénétrométrique a été étudiée pour deux fruits immatures et pour deux fruits tournants. L'analyse de la variabilité des forces de rupture de la peau (Frp) et de pénétration dans la pulpe (F5), observée pour les deux stades de maturité, a révélé que les valeurs moyennes de fermeté obtenues pour ces deux stades de maturité étaient très significativement différentes au seuil $p = 0{,}01$ (*tableau I*). Les valeurs de force de pénétration à 8 mm, non représentées dans le *tableau I*, ont été très fortement corrélées à F5 ($r = 0{,}984$).

Pour visualiser les gradients de texture au niveau de la joue, cinq classes de fermeté décroissante du paramètre F5 ont été constituées et représentées par des niveaux de grisé allant du plus foncé (pulpe ferme) au plus clair (pulpe amollie). Les données ont été analysées par un logiciel de traitement d'image [2] (*figure 3*) : le fruit immature présente un fort gradient de fermeté F5 allant du pédoncule vers l'apex, la partie la plus ferme étant localisée au niveau du pédoncule. À l'opposé, pour un fruit tournant, la zone la plus ferme est constituée par la partie centrale de la joue.

La forte variabilité de la fermeté F5 a conduit à s'interroger sur le nombre et l'emplacement des mesures à réaliser sur le fruit qui permettraient d'acquérir une valeur estimée de la fermeté, suffisamment représentative de la maturité globale réelle du fruit. Pour simplifier l'approche, chacune des joues du fruit testé a été délimitée en quatre quartiers déterminés par l'axe pédoncule-apex d'une part, et l'équateur du fruit

Tableau I.
Variabilité de la fermeté (en Newton) mesurée localement au pénétromètre, au niveau des joues d'une même mangue (var. Keitt) en cours de stockage, pour deux stades de maturité.

Fermeté mesurée au pénétromètre	Fruit immature		Fruit tournant	
	Frp[1] (N)	F5[2] (N)	Frp[1] (N)	F5[2] (N)
Moyenne	8,2	26,5	7,3	13,6
Maximun	10,6	35,8	10,1	19,7
Minimum	5,4	17,9	4,3	8,3
CV[3] (%)	12,1	19,0	15,9	19,3
Nombre de mesures	58	58	56	56

[1] Frp = force de rupture de la peau.
[2] F5 = force de pénétration à 5,5 mm de profondeur.
[3] CV = coefficient de variation.

d'autre part. Dans chacun de ces quartiers, 14 emplacements de mesure ont été uniformément répartis. La fermeté F5 a été déterminée expérimentalement après maillage de la joue en 56 points uniformément répartis sur ces quatre zones du fruit (14 mesures par quartier). La simulation a été réalisée par tirage au hasard de 1, 2, 3 ou 4 valeurs de fermeté parmi les 14 valeurs de fermeté obtenues pour chaque quartier. L'écart relatif entre la fermeté estimée par échantillonnage et la fermeté globale de la joue, obtenue pour l'ensemble des 56 mesures, a représenté l'erreur de l'estimation. Celle-ci a été calculée pour 500 tirages successifs pour les deux joues d'un fruit immature et pour celles d'un fruit tournant. L'analyse des courbes obtenues montre qu'une erreur d'estimation de la fermeté F5 inférieure à 5 % ne peut être obtenue que si la fermeté locale est mesurée au moins en 12 points de la joue, uniformément répartis entre le pédoncule et l'apex d'une part et les parties ventrale et dorsale d'autre part (*figure 4*).

3.1.2 variabilité de la fermeté par rapport au plan de symétrie du fruit

Selon l'exposition du fruit sur l'arbre, les joues peuvent présenter localement une différence de maturité. Ce caractère d'asymétrie de fermeté de la mangue a été testé en comparant les valeurs de fermeté mesurées sur la joue d'un fruit et celles obtenues pour les points équivalents de la joue opposée du même fruit. La comparaison des moyennes a été réalisée à l'aide d'un test *t* de Student avec appariement dans le cas d'un fruit immature (F5 = 26,8 N) et d'un fruit tournant (F5 = 11,8 N). Les forces de rupture de la peau Frp et de pénétration du fruit F5 ont été très significativement différentes ($p = 0{,}01$) d'une joue à l'autre pour

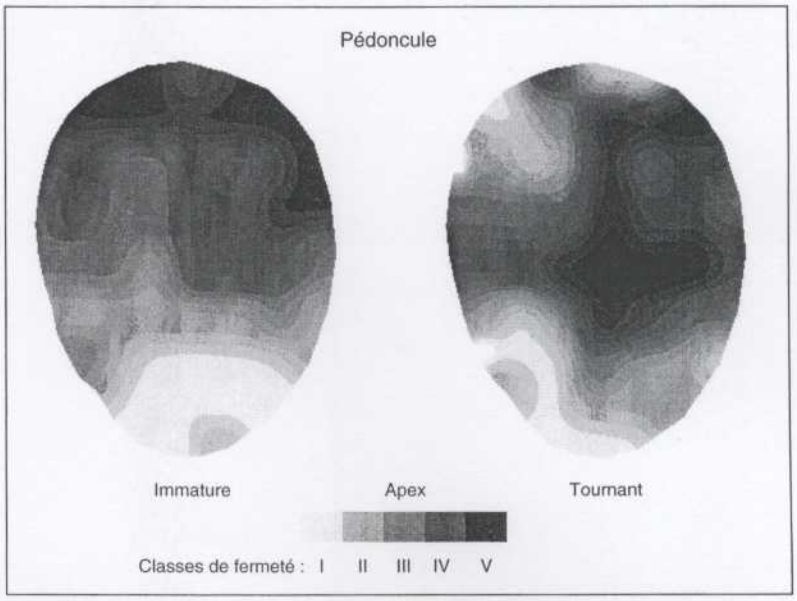

Figure 3.
Représentation des gradients de fermeté pénétrométrique F5 (force de pénétration à 5,5 mm de profondeur) au niveau de la joue d'une mangue immature ou tournante.
Les valeurs moyennes de fermeté représentatives des classes notées de I à V sont : 19,4 ; 23,2 ; 26,1 ; 29,4 ; 33,5 N pour un fruit immature et 10,4 ; 11,8 ; 13,3 ; 14,9 ; 17,4 N pour un fruit tournant.

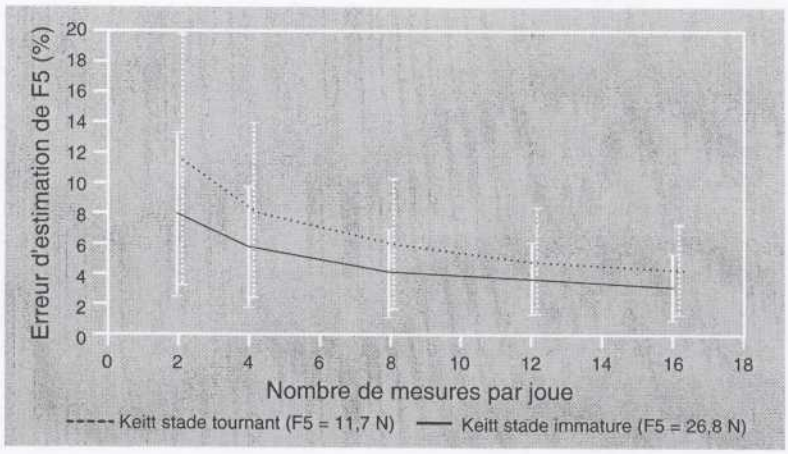

Figure 4.
Erreur d'estimation de la fermeté pénétrométrique F5 (force de pénétration à 5,5 mm de profondeur exprimée en Newton) en fonction du nombre de mesures locales réalisées sur chaque joue.

le fruit tournant et non significatives pour le fruit immature. Les fruits tournants sont le siège de modifications physiques et biochimiques importantes et rapides, qui conduiraient à une plus grande hétérogénéité de texture.

3.1.3. contribution de la peau à la fermeté pénétrométrique

Les joues d'une mangue tournante ont été maillées de manière à réaliser, aux nœuds des mailles, des mesures de fermeté avec peau et, au centre des mailles, des mesures de fermeté sans peau. Les valeurs F'5 sans peau ont été ensuite comparées aux valeurs de fermeté F5 avec peau, calculées par interpolation pour le centre de chacune des mailles. Le même protocole que celui utilisé pour l'étude de la fermeté d'une mangue tournante a été appliqué à un fruit immature et à un fruit mature (*tableau II*).

Pour les trois stades de maturité testés, la fermeté pénétrométrique mesurée sur la chair de mangue a été très significativement différentes de celle mesurée sur fruit non pelé (test *t* avec appariement pour 32 couples de mesures par joue). Les mesures de fermeté du fruit pelé ont rendu mieux compte des différences locales de fermeté de la chair des fruits tournant et mature que ne l'ont fait les mesures sur fruit entier. L'écart relatif entre la fermeté du fruit entier et celle du fruit pelé permet d'estimer, de façon simplifiée, la contribution de la peau. Cette contribution se révèle augmenter en même temps que la maturation (*tableau II*). Enfin, la variabilité des mesures a été significativement plus élevée pour les fruits pelés que pour les fruits entiers. Ce résultat pourrait être expliqué par une augmentation des caractéristiques d'élasticité de la peau qui évoluerait dans le même sens que la maturation et dont l'effet serait d'atténuer l'hétérogénéité de texture de la pulpe sous-jacente.

3.2. fermeté acoustique

3.2.1. réponse acoustique type

Les *figures 5a* et *5b* présentent respectivement la réponse acoustique type et le spectre de fréquence obtenus pour une mangue de stade de maturité « tournant ». Au cours de la maturation du fruit, l'amplitude de la réponse acoustique du fruit et la

Tableau II.
Influence de la peau sur la fermeté (en Newton) de la mangue, mesurée au pénétromètre, en fonction de trois stades de maturité des fruits.

Stade de maturité du fruit	Fruit entier		Fruit pelé		Contribution de la peau à la fermeté[2] (%)
	Fermeté (N)	CV [1] (%)	Fermeté (N)	CV [1] (%)	
Immature	43,8	9	39,4	9	10
Tournant	9,8	14	7,3	24	25
Mature	5,0	13	2,8	22	44

[1] CV = coefficients de variation obtenus pour environ 32 données par joue selon les fruits.
[2] Écart relatif entre la fermeté du fruit entier et celle du fruit pelé.

fréquence principale de résonance décroissent progressivement. Les fruits les plus mûrs ont présenté un signal acoustique fortement amorti, en relation avec leurs propriétés visco-élastiques. Les spectres correspondants ont pu, dans certains cas, présenter plusieurs pics d'amplitude sensiblement équivalente. La détermination de la fréquence de résonance à prendre en compte dans la formule de calcul du coefficient d'élasticité peut alors poser quelques problèmes.

3.2.2. reproductibilité des mesures selon les modes de sollicitation mécanique

L'analyse des valeurs moyennes de la fréquence de résonance et de la dispersion des mesures obtenues pour un fruit immature et un fruit mature testés selon trois modes de sollicitation mécanique (baguette, bille, pendule) montre que la meilleure reproductibilité est obtenue avec la sollicitation « bille » (*tableau III*). La frappe à l'aide de la baguette a conduit, à l'inverse, aux mesures les plus dispersées.

Ces résultats ont été confirmés pour une population de 130 fruits, de différents stades de maturité, testés successivement selon les trois modes de sollicitation. Les fréquences de résonance obtenues avec la baguette ont été significativement différentes (p = 0,05) de celles mesurées à l'aide de la bille ou du pendule. En revanche, ces deux derniers modes n'ont pas donné de résultats significativement différents (test t avec appariement). Selon Chen et al. [11], le temps de contact et l'énergie du choc auraient un effet sur la qualité de la réponse acoustique. Dans le cas de la frappe à la baguette, la reproductibilité et la maîtrise du choc dépendraient de l'habileté du manipulateur, ce qui n'est pas le cas pour la chute d'une bille et pour le mouvement d'un pendule qui génèreraient des chocs plus reproductibles. Par ailleurs, la répétition de sollicitations mécaniques sur un même fruit a entraîné des meurtrissures plus fréquentes dans le cas de l'utilisation d'un pendule que dans celui du recours aux deux autres modes testés, en raison d'une énergie incidente légèrement plus élevée.

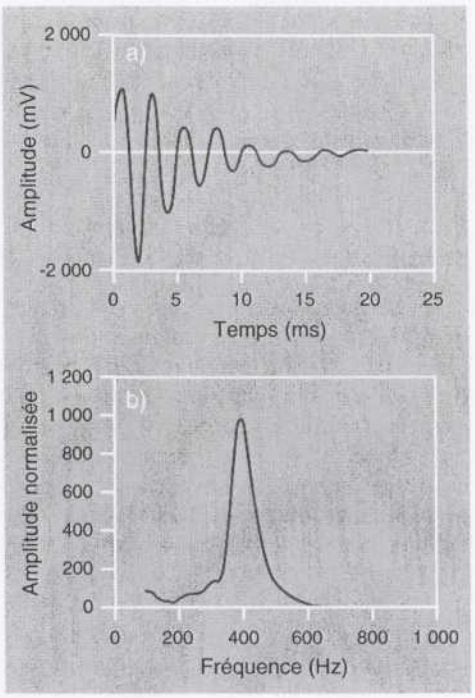

Figure 5.
Réponse acoustique type d'une mangue de stade de maturité « tournant » dans les domaines temporel (a) et fréquentiel (b).

Tableau III.
Reproductibilité des mesures de fréquences de résonance (f) obtenues à la suite de trois modes de sollicitation mécanique des fruits (choc provoqué par la chute d'une bille, par une baguette de bois ou le mouvement d'un pendule).

Stade de maturité du fruit	Bille		Baguette		Pendule	
	f (Hz)	CV[1] (%)	f (Hz)	CV[1] (%)	f (Hz)	CV[1] (%)
Immature	630	1	656	5	627	2
Mature	365	2	369	8	361	3

[1] CV = coefficients de variation obtenus pour 30 mesures consécutives.

Pour la suite des essais, nous avons choisi d'utiliser la sollicitation de type « chute de bille » qui avait donné les meilleurs résultats en termes de reproductibilité des mesures et de respect de la qualité du fruit.

3.2.3. influence du mode de maintien du fruit

Les résultats obtenus pour 30 mangues de différentes maturités, testées successivement selon trois modes de maintien du fruit (fruit sur support rigide ou souple, ou fruit suspendu par son pédoncule), ont montré qu'il n'y avait pas de différences significatives au seuil $p = 0{,}01$ % entre les fréquences de résonance obtenues. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Chen et al. [11] et Lu et Abbott [28] qui montraient que la nature du support du fruit et l'aire de contact fruit-support ne modifiaient pas les fréquences de résonance, mais affectaient l'amplitude des pics de fréquence.

3.2.4. influence de l'hétérogénéité de maturité du fruit sur sa réponse acoustique

L'écart moyen de fréquence de résonance entre la joue la plus ferme et la joue la moins ferme d'un même fruit, observé pour un lot de 75 fruits de différentes maturité, a été de 5 Hz. La fréquence moyenne pour le lot ayant été de 388 Hz, l'écart moyen observé (1,3 %) est du même ordre de grandeur que la précision de la méthode de mesure de la fréquence (*tableau III*). La différence de fermeté entre les deux joues d'un même fruit ne peut donc être détectée par la méthode acoustique. L'évaluation de la fermeté par la technique acoustique repose sur une mesure globale intégrant les différentes caractéristiques d'hétérogénéité du fruit.

3.2.5. effet de la peau sur la réponse acoustique

Dix mesures consécutives de fermeté acoustique ont été réalisées sur chacune des joues d'un fruit au stade tournant avant et après pelage. Les coefficients d'élasticité du fruit, avant et après pelage, ont été significativement différents ($p = 0{,}02$). L'épluchage de la mangue a conduit à une augmentation de sa fréquence de résonance de 5 Hz (371 et 366 Hz, respectivement, pour le fruit épluché ou non). Cette augmentation de la fréquence de résonance du fruit pelé pourrait résulter de la diminution de la taille du fruit consécutive à la suppression de la peau.

Des différences notables ont été observées parmi les spectres de fréquence après pelage. La valeur de la fréquence de résonance secondaire a différé selon que le fruit était pelé (293 Hz) ou non (503 Hz). L'épluchage semble également accroître considérablement la fréquence d'apparition du phénomène de modification d'amplitude des principaux pics du spectre. En effet, dans un cas sur deux, l'amplitude du pic à 293 Hz a été supérieure à celle du pic de fréquence de résonance primaire (371 Hz). Ces résultats sont à rapprocher de ceux rapportés par Lu et Abbott [28] selon lesquels la présence de la peau ne modifierait pas sensiblement les fréquences de résonance de la pomme, mais affecterait l'amplitude des pics. La peau, ayant une élasticité différente de celle de la chair, pourrait jouer un rôle de filtre fréquentiel et laisserait passer d'autant plus facilement les fréquences qu'elles seraient proches de sa fréquence de résonance propre.

3.3. évolution des paramètres de fermeté de la mangue en cours de conservation

L'analyse de quelques caractéristiques physicochimiques de la mangue, dont la fermeté, mesurées sur des lots de fruits conservés à 13 °C et 90 % HR pendant 5, 12, 19 ou 26 d, a montré que la maturation des fruits consécutive à leur conservation s'accompagne d'une décroissance de 87 % de la fermeté de la pulpe (F% et F'5) et de 75 % de la fermeté mesurée sur fruit non pelé (E et F5) (*tableau IV*). La chute de la fermeté spécifique de la peau (Frp) est moins importante (38 %). Parallèlement, des modifications biochimiques interviennent dans les fruits stockés, qui conduisent à une augmentation de l'extrait sec soluble (22 %), une diminution de l'acidité titrable (57 %) et à une modification de la couleur

Tableau IV.
Évolution des paramètres de fermeté du fruit (en Newton) et de quelques caractéristiques physicochimiques de la mangue (var. Keitt) en cours de conservation à 13 °C et 90 % HR.

Durée de conservation (d)	Masse (g)	Fermeté du fruit			Fermeté pulpe		Extrait sec soluble	Acidité titrable	Coordonnées colorimétriques		
		Frp[1] (N)	F5[2] (N)	E[3] (MPa)	F'5[2] (N)	F%[4] (N)	(g·100 g^{-1} ms)	(g·100 g^{-1} a.c.)	L	a	b
5	551	8,72	33,59	1,98	17,97	9,33	12,2	0,75	82,4	−5,3	43,5
12	501	8,10	20,81	1,28	7,84	4,42	13,8	0,73	79,5	−4,4	44,5
19	487	7,14	11,98	0,82	2,43	1,67	14,5	0,46	71,3	−3,4	47,6
26	80	5,43	8,20	0,51	2,08	1,27	14,9	0,32	71,5	−2,3	45,8

ms : matière sèche ; a.c. : acide citrique.
[1] Frp = force de rupture de la peau.
[2] F5 = force de pénétration à 5,5 mm de profondeur.
[3] E = coefficient d'élasticité du fruit.
[4] F% = force de compression nécessaire pour obtenir une déformation relative du cylindre de pulpe de 5 % de sa hauteur lorsque celui-ci est comprimé à une vitesse de 1 mm·s^{-1}.

de la pulpe (coordonnées L, a, b). L'évolution de la composition biochimique de la pulpe résulte des processus physiologiques connus de la maturation, d'hydrolyse de l'amidon en particulier, et de la déshydratation partielle des fruits liée aux conditions de stockage.

Les deux méthodes de mesures de la fermeté de la pulpe (F'5, F%) se sont révélées sensiblement équivalentes pour suivre les phénomènes d'amollissement de la pulpe de mangue en cours de maturation (*figure 6*). La méthode de compression de cylindre de pulpe est cependant plus longue et délicate à mettre en œuvre en raison des difficultés matérielles rencontrées pour réaliser une découpe des cylindres dont les faces opposées soient parfaitement parallèles. Ce critère conditionne presque exclusivement la précision de la mesure puisque la déformation finale du cylindre n'est que de 1 mm environ.

Les méthodes de mesure de la fermeté acoustique (E) et pénétrométrique (F5) sur fruits non pelés ont également été quasi équivalentes pour traduire l'évolution combinée de la fermeté de la pulpe et de la peau du fruit. Une augmentation du nombre de mesures de pénétrométrie par fruit devrait réduire la variabilité moyenne intralot (coefficient de variation = 28 %) de manière à ce qu'elle soit comparable à celle observée pour la méthode acoustique (coefficient de variation = 18 %).

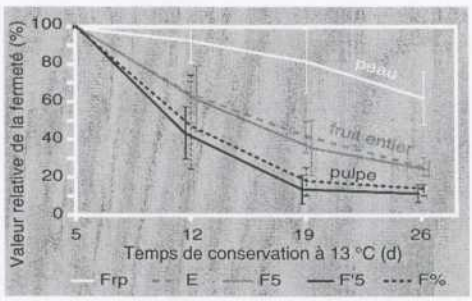

Figure 6.
Évolution comparée de la fermeté de la pulpe (F'5, F%), de la peau (Frp) et du fruit entier (F5, E) au cours de la conservation de mangues (var. Keitt) à 13 °C et 90 % HR, en prenant pour référence les valeurs relatives de fruits conservés 5 d. (F'5 : force de pénétration à 5,5 mm de profondeur dans la pulpe ; F% = force de compression nécessaire pour obtenir une déformation relative du cylindre de pulpe de 5 % de sa hauteur lorsque celui-ci est comprimé à une vitesse de 1 mm·s^{-1}.
Frp = force de rupture de la peau ; F5 = force de pénétration à 5,5 mm de profondeur ; E = coefficient d'élasticité du fruit).

La courbe de la *figure 7* montre, à titre d'exemple, l'évolution de la fréquence moyenne de résonance des lots de mangue conservés respectivement 5, 12, 19 et 26 d à 13 °C et 90 % HR.

3.4. relations entre paramètres de fermeté et caractéristiques physicochimiques du fruit

L'analyse des corrélations obtenues pour une population de 80 fruits à différents stades de maturité montrent que les variables relatives à la fermeté de la pulpe (F'5 et F%) sont bien corrélées entre elles (r = 0,91), à l'instar des variables de fermeté

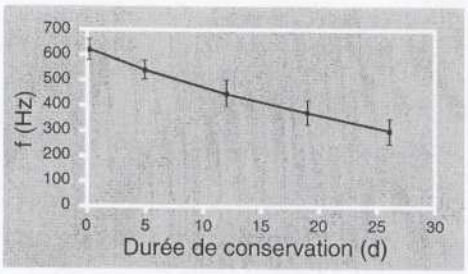

Figure 7.
Évolution de la fréquence moyenne de résonance (f) de lots de mangue (var. Keitt) conservés à 13 °C et 90 % HR.

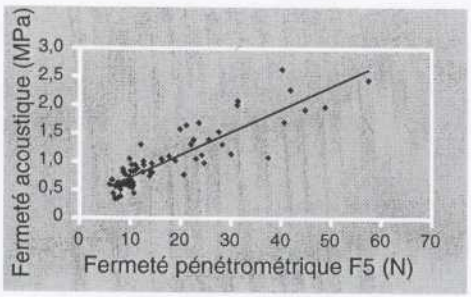

Figure 8.
Relation entre les paramètres de fermeté mesurés sur fruit entier au pénétromètre ou par la méthode acoustique.

du fruit non pelé F5 et E (*figure 8*) également étroitement corrélées (r = 0,88). La force de rupture de la peau Frp est modérément corrélée avec la fermeté pénétrométrique F5 (r = 0,72) et le coefficient d'élasticité E (r = 0,66).

À l'exemple de nombreux autres fruits, aucune relation étroite entre les paramètres de fermeté et les caractéristiques physicochimiques n'a pu être mise en évidence pour la mangue. La meilleure corrélation a été obtenue entre la composante rouge (a) de la pulpe et la fermeté pénétrométrique F5 ou la fréquence de résonance f (r = –0,70). Le coefficient d'élasticité et la fréquence de résonance sont les deux paramètres les mieux corrélés à l'extrait sec soluble (r = –0,63). Les résultats obtenus sur une population de 40 fruits ont montré que l'acidité titrable varie dans le même sens que la fréquence de résonance et la fermeté pénétrométrique F5.

L'erreur type d'estimation de la fermeté acoustique à l'aide du modèle de prédiction de l'élasticité en fonction de la fermeté pénétrométrique a été de 0,23 MPa. La dispersion des points par rapport au modèle pourrait résulter d'une évaluation imprécise de la fermeté pénétrométrique globale du fruit en raison d'un nombre insuffisant de mesures locales par fruits (voir §3.1.1.). Elle pourrait également résulter d'une mauvaise estimation de la fréquence de résonance dans trois cas principaux :

– en présence du phénomène de modification d'amplitude des pics de fréquence (voir §3.2.5.),

– en présence de fortes variations locales du rayon de courbure au point d'impact de la bille sur le fruit [6, 26],

– dans le cas de fruits possédant des caractéristiques spécifiques qu'il serait souhaitable d'identifier.

Cependant, sur ce dernier point, l'analyse des résidus du modèle n'a pas permis de mettre en évidence un lien étroit entre la dispersion par rapport au modèle et l'une des caractéristiques des fruits analysés suivantes : morphologiques (ratio [épaisseur / hauteur] et [épaisseur / largeur]), physicochimiques (poids, densité, ESS,) ou relatives au noyau (fraction pondérale [noyau / fruit], taux de remplissage de la cavité du noyau par l'amande). En revanche, l'écart relatif entre la valeur de l'élasticité prédite et celle réellement mesurée semble augmenter au cours de la maturation. La méthode acoustique d'évaluation de la fermeté semble donc mieux adaptée à la caractérisation de l'état de maturité des fruits au stade de la cueillette qu'à celui de fin de chaîne de commercialisation.

4. conclusions

Les travaux présentés ont permis de mettre en évidence le potentiel d'application de la technique acoustique impulsionnelle pour évaluer de manière rapide, globale et non destructive la fermeté des mangues après récolte. La fermeté, mesurée par la méthode acoustique, est également bien corrélée à la mesure pénétrométrique qui constitue la méthode de référence communément adoptée. Les deux méthodes semblent a priori équivalentes pour estimer la fermeté de la mangue et en suivre l'évolution en cours de conservation. L'étude a également permis de définir les conditions optimales de mesure de la fermeté pour chacune des deux méthodes. En particulier, la précision de l'estimation de la fermeté

pénétrométrique globale d'une mangue dépend beaucoup du nombre de mesures locales réalisées sur chaque joue. À l'opposé, l'hétérogénéité de texture de la mangue intervient peu dans la précision de l'estimation de la fermeté acoustique qui semble davantage liée à la précision avec laquelle est déterminée la fréquence de résonance du fruit.

D'un point de vue pratique, la méthode acoustique de mesure de la fermeté peut être mise à profit pour constituer, dès la récolte, des lots homogènes en maturité. La gestion de ces lots peut ensuite être facilitée en contrôlant, en temps réel et de façon automatisée, l'évolution de la maturation de quelques fruits témoins constituant les lots. Enfin, il peut être envisagé de gérer le processus de maturation des fruits afin de répondre à la demande fluctuante du marché. Cette gestion du processus de maturation nécessite, en préalable, l'élaboration de modèles mathématiques décrivant l'évolution de la fréquence de résonance et/ou de la fermeté acoustique de la mangue, en fonction de la température de conservation et du niveau de maturation déjà atteint, pour chacune des principales variétés de mangue commercialisées.

Des recherches complémentaires sont toutefois nécessaires afin d'accroître la précision, la reproductibilité et la justesse de la méthode acoustique de mesure de la fermeté. Ces recherches devront porter principalement sur l'amélioration de la compréhension des mécanismes de propagation des vibrations dans le fruit, ainsi que sur l'étude de l'influence de certains paramètres (rayon de courbure du fruit au point d'impact, angle d'attaque du fruit par le projectile, durée du choc...) sur la réponse acoustique du fruit. En particulier, il semble nécessaire de mieux appréhender le phénomène de variation de l'amplitude des pics de fréquence afin d'en réduire la fréquence d'apparition.

Pour parvenir à de tels résultats, les techniques numériques de modélisation devront être associées à l'étude expérimentale du comportement acoustique de modèles physiques de fruits, constitués de matériaux homogènes et connus.

remerciements

Les auteurs remercient M.N. Ducamp (Cirad-Flhor, Montpellier) pour leur avoir facilité l'approvisionnement en fruits.

références

[1] Pitt R.E., Viscoelastic properties of fruits and vegetables, in: Viscoelastic properties of foods, Rao M.A., Steffe J.F. (Eds.), Elsevier Applied Science, London and New York, 1992, pp. 49–76.

[2] Duprat F., Roudot F., Grotte-Nicolas M., Roudot A.C., De l'hétérogénéité des fruits, Sci. Aliment. 11 (1991) 609–622.

[3] McClements D.J., Advances in the application of ultrasound in food analysis and processing, Trends Food Sci. Tech. 6 (9) (1995) 293–299.

[4] Young J.H., Yong Jin Cho, Rial W.S., Lambert W.E., Nondestructive techniques for quality inspection of fruits and vegetables, J. Food Sci. Nutr. 2 (3) (1980) 269–79.

[5] Sakurai N., Nevins D.J., Relationship between fruit softening and wall polysaccharides in avocado (*Persea americana* Mill.) mesocarp tissues, Plant Cell Physiol. 38 (5) (1997) 603–610.

[6] Shmulevich I., Galili N., Rosenfeld D., Detection of fruit firmness by frequency analysis, Trans. ASAE 39 (3) (1996) 1047–1055.

[7] De Belie N., Schotte S., Coucke P., De Baerdemaeker J., Development of an automated monitoring device to quantify changes in firmness of apples during storage, Postharvest Biol. Tec. 18 (2000) 1–8.

[8] Yamamoto H., Iwamoto M., Haginumas S., Acoustic impulse response method for measuring natural frequency of intact fruits and preliminary applications to internal quality evaluation of apples and watermelons, J. Texture Stud. 11 (1980) 117–136.

[9] Armstrong P.R., Brown G.K., Apple firmness sorting using a nondestructive acoustic technique, ASAE paper No. 91–6044, 1991, pp. 1–10.

[10] Abbott J.A., Massie D.R., Upchurch B.L., Hruschka W.R., Nondestructive sonic firmness measurement of apples, Trans. ASAE 38 (5) (1995) 1461–1466.

[11] Chen P., Sun Z., Huang L., Factors affecting acoustic responses of apples, Trans. ASAE 36 (6) (1992) 1915–1920.

[12] Chen H., Duprat F., Grotte M., Loonis D., Pietri E., Influence of the apple defect on the frequency response spectra during nondestructive acoustic sensing of fruit firmness, Int. Agrophys. 9 (1995) 143–151.

[13] Duprat F., Grotte M., Pietri E., Loonis D., The acoustic impulse response method for measuring the overall firmness of fruit, J. Agr. Eng. Res. 66 (1997) 251–259.

[14] Muramatsu N., Sakurai N., Yamamoto R., Nevins D.J., Takahara T., Ogata T., Comparison of a non-destructive acoustic method with an intrusive method for firmness measurement of kiwifruit, Postharvest Biol. Tec. 12 (3) (1997) 221–228.

[15] Farabee M.L., Stone M.L., Determination of watermelon maturity with sonic impulse testing, ASAE paper No. 91–3013, 1991, pp. 3–13.

16] Hayashi S., Sugiyama J., Otobe K., Kikuchi Y., Usui S., Nondestructive measurement for maturity of muskmelons by analysis of acoustic signals, J. Jpn. Soc. Food Sci. Tec. 39 (6) (1992) 465–470.

[17] Armstrong P.R., Stone M.L., Bruzewitz G.H., Peach firmness determination using two different nondestructive vibrational sensing instruments, Trans. ASAE 40 (3) (1997) 699–703.

[18] Stone M.L., Armstrong P.R., Chen D.D., Brusewitz G.H., Maness N.O., Peach firmness prediction by multiple location impulse testing, Trans. ASAE 41 (1) (1998) 115–119.

[19] Schotte S., De Belie N., De Baerdemaeker J., Acoustic impulse-response technique for evaluation and modelling of firmness of tomato fruit, Postharvest Biol. Tec. 17 (1999) 105–115.

[20] Chen H., De Baerdemaeker J., Modal analysis of the dynamic behavior of pineapples and its relation to fruit firmness, Trans. ASAE 36 (5) (1993) 1439–1443.

[21] Peleg K., Ben-Hanan U., Hinga S., Classification of avocado by firmness and maturity, J. Texture Stud. 21 (2) (1990) 123–139.

[22] Mizrach A., Galili N., Ganmor S., Flitsanov U., Prigozin I., Models of ultrasonic parameters to assess avocado properties and shelf life, J. Agr. Eng. Res. 65 (1996) 261–267.

[23] Galili N., Shmulevich I., Benichou N., Acoustic testing of avocado for fruit ripeness evaluation, Trans. ASAE 41 (2) (1998) 399–407.

[24] Mizrach A., Flitsanov U., Fuchs Y., An ultrasonic nondestructive method for measuring maturity of mango fruit, Trans. ASAE 40 (4) (1997) 1107–1111.

[25] Mizrach A., Flitsanov U., Schmilovitch Z., Fuchs Y., Determination of mango physiological indices by mechanical wave analysis, Postharvest Biol. Tec. 16 (1999) 179–186.

[26] Shmulevich I., Galili N., Benichou N., Development of a nondestructive method for measuring the shelf-life of mango fruit, in: Proc. FPAC IV, St. Joseph, Michigan, USA, 1995, pp. 275–287.

[27] Cooke J.R., An interpretation of the resonant behavior of intact fruits and vegetables, Trans. ASAE 15 (1972) 1075–1080.

[28] Lu R., Abbott J.A., Finite element modeling of transient responses of apples to impulse excitation, Trans. ASAE 40 (5) (1997) 1395–1406.

Evaluación no destructiva de la firmeza del mango por la técnica acústica impulsiva.

Resumen — Introducción. La dureza constituye uno de los principales indicadores de madurez de los frutos, a la recolección, y de su grado de maduración, durante la conservación. La evaluación no destructiva de la firmeza del mango responde a una necesidad creciente de homogeneización y de manejo de lotes de frutos puestos al mercado, según su madurez real. **Material y métodos**. El método acústico impulsivo es estudiado tomando por referencia los métodos mecánicos clásicos de evaluación de la firmeza del mango como la penetrometría. La influencia de la heterogeneidad del fruto, de su piel y de los principales parámetros operatorios es estudiada para cada uno de los métodos propuestos. **Resultados y discusión**. Los métodos penetrométricos y acústicos permiten indiferentemente de seguir, con la misma precisión, la evolución de la dureza global de lotes de mango (var. Keitt) conservados por 4 sema-

nas a 13 °C y 90 % HR. La heterogenidad de textura de los frutos limita grandemente la precisión del método penetrométrico, mientras que la determinación de la frecuencia de resonancia del fruto constituye el punto clave del método acústico. Este parece estar bien adaptado para la clasificación según la calidad de los frutos luego de la cosecha y al principio de la conservación para los cuales la evaluación de la frecuencia de resonancia es la más débil. **Conclusión**. La técnica acústica impulsiva permite evaluar de manera rápida, global y sin destrucción la firmeza del mango después de la cosecha. Este método podrá estar a beneficio para la clasificación según la calidad de mangos y la evaluación de su potencial de conservación. © Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

***Mangifera indica* / frutas / firmeza / consistencia / calidad / medición / propiedades acústicas**