

La sonométrie peut-elle caractériser la fermeté des pommes ?

Pierre VANDEWALLE, Anthony SOURICE*, Emira MEHINAGIC et Frédérique JOURJON
Ecole Supérieure d'Agriculture – Laboratoire GRAPPE – BP 30748
55, rue Rabelais, 49007 Angers Cedex 01, France

*Groupe Signal Image et Instrumentation (GSII) de l'ESEO – 4, rue Merlet de la Boulaye – BP 30926 – 49009 ANGERS cedex 01
Renseignements: Pierre Vandewalle, e-mail : p.vandewalle@groupe-esa.com, tél +33 2 41 86 67 67

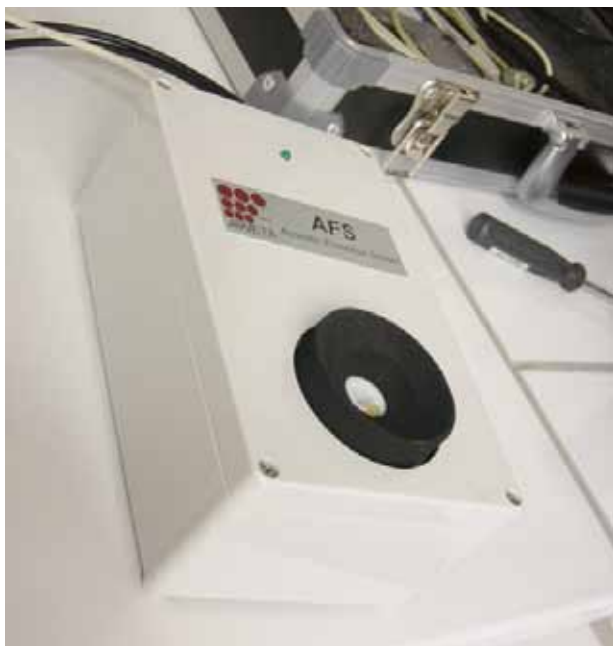


Figure 1 | L'appareil expérimental AFS.

Introduction

La fermeté est l'un des critères de qualité des pommes qui déterminent leur valeur marchande. Ce paramètre est utilisé, au même titre que la couleur, la teneur en sucres ($^{\circ}$ Brix) ou l'acidité, pour déterminer l'état physiologique des fruits (notamment le degré de maturité), leur qualité après récolte lorsqu'ils sont destinés à être consommés frais ou encore leur aptitude à la transformation.

La méthode de référence pour mesurer la fermeté des fruits est la pénétrométrie. Cette technique, très répandue dans la profession arboricole, a pour inconvénient d'être destructive et par conséquent inutilisable pour un tri en ligne, par exemple, ou au verger. C'est la raison pour laquelle des mesures non destructives, dont la sonométrie, sont actuellement favorisées et de nombreuses études ont été réalisées dans le but

de corréler les signaux transmis par ces mesures à la fermeté des fruits (De Ketelaere *et al.* 2006; Mehinagic *et al.* 2006; Shmulevich *et al.* 2003; Tu *et al.* 1996). L'un des paramètres extraits de la mesure acoustique, la première fréquence de résonance, semble donner des résultats prometteurs lorsqu'elle est couplée à la masse du fruit selon la formule suivante :

$$Fi = f_0^2 m^{2/3}$$
 (f_0 : fréquence de résonance et m : masse du fruit)

Le coefficient Fi calculé de cette manière a d'ailleurs été nommé «firmness factor» ou coefficient de fermeté.

Ce paramètre semble prometteur dans l'analyse de l'évolution de la qualité des fruits fraîchement récoltés et en post-récolte (Herppich *et al.* 2003; Shmulevich *et al.* 2003), mais moins efficace lorsqu'il est utilisé *in situ* (dans le verger) (Zude *et al.* 2006) ou pour classer certaines variétés de pommes selon leur degré de maturité (Symoneaux *et al.* 2004).

La plupart des études consacrées au test de la sonométrie comme outil de mesure de la qualité du fruit se concentrent principalement sur deux paramètres extraits du signal acoustique: la 1^{re} fréquence de résonance et l'amplitude maximale. L'objet de cette étude est d'explorer la totalité du signal acoustique afin de valider la performance du système de mesure utilisé, connaître ses limites et extraire les paramètres du signal les plus discriminants.

Matériel et méthodes

Description de l'appareil de mesure sonométrique (AFS)

Nous avons utilisé un appareil de sonométrie développé par la société AWETA (fig. 1). Il s'agit d'un périphérique commandé par un ordinateur. Le dispositif de mesure est constitué d'un godet en mousse sur lequel repose le fruit, avec un marteau au centre du godet qui vient frapper le fruit. Le son émis par ce dernier, lors de l'action du marteau, est enregistré par un microphone placé entre le godet et le marteau (fig. 2).

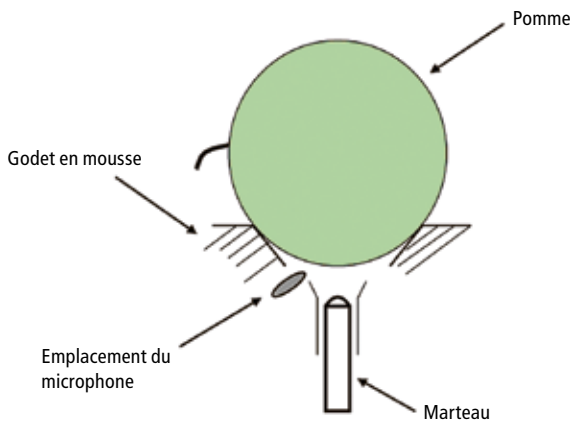


Figure 2 | Dispositif de mesure de l'appareil AFS.

Le bout du marteau est sphérique, il est très léger de sorte que l'énergie dissipée dans le fruit, lors de l'impact, soit très faible et n'altère pas le fruit. Tous les signaux véhiculés sont analogiques.

Le logiciel fourni par AWETA, permet de régler la force d'impact du marteau et de calibrer la mesure de la masse. Cette réponse sonométrique est exprimée par la courbe de réponse temporelle exprimant l'amplitude de vibration sonore en fonction du temps. A partir de cette réponse brute et par la transformée de Fourier, nous obtenons une deuxième courbe: la réponse fréquentielle (amplitude = f[fréquence]). Elle exprime la contribution de chaque fréquence à la réponse temporelle par l'amplitude qui lui est associée. Ainsi la fréquence de résonance (f_0) correspond à la fréquence pour laquelle l'amplitude de vibration sonométrique est maximale. Celle-ci, combinée avec la masse du fruit, nous permet de calculer l'indice de fermeté du fruit ($F_i = f_0^2 m^{2/3}$) qui constitue l'objectif de mesure de l'AFS. Parallèlement à ce calcul, le signal acoustique global (la courbe de réponse temporelle et fréquentielle) est exploité grâce à une interface développée expressément sous Matlab pour cet usage.

Test de répétabilité

Afin de tester la répétabilité de l'appareil, 10 variétés de pommes, achetées dans le commerce, sont analysées en essayant de couvrir une large gamme de fermeté (tabl. 1). Pour chaque variété, 10 fruits sont analysés sur 4 points distants avec 10 mesures par point (soit au total 40 mesures par fruit). Pour définir les 4 points de mesures, nous sommes partis de la zone la plus colorée en effectuant une rotation du fruit de 90° après chaque répétition de 10 mesures. Le fruit est posé sur l'appareil dans sa zone équatoriale. La présence du fruit est détectée par l'appareil par la varia-

Résumé La texture des pommes, et plus particulièrement leur fermeté, est l'un des principaux critères de qualité utilisés dans les transactions commerciales. Les méthodes employées pour la mesurer sont basées sur la pénétrométrie et donc destructives. Le développement de nouvelles technologies et de nouvelles méthodes de traitement du signal permettrait de faire appel à des méthodes non destructives, ce qui constituerait un progrès indéniable. La sonométrie, basée sur la réponse du fruit à l'impact d'un marteau, pourrait faire partie de ces méthodes. Le travail exploratoire présenté dans cet article montre une bonne répétabilité des mesures obtenues par l'appareil, en particulier au niveau des fréquences composant la réponse du fruit. Celle-ci peut-être reliée à la fermeté du fruit; les paramètres sonométriques les plus pertinents doivent cependant encore être déterminés. Cette méthode serait également capable de discriminer les faces d'un même fruit, donnant ainsi un outil de caractérisation très prometteur.

Tableau 1 | Moyenne des valeurs de la masse (g) de la fréquence de résonance (Hz) et de l'indice de fermeté (Fi) avec les coefficients de variation (CV %) respectifs, pour 10 pommes choisies (1 par variété étudiée)

Pomme	Masse (g)	CV (%)	f0 (Hz)	CV (%)	Fi	CV (%)
Antares 1-3	247,2	0,14	680	0,97	18,23	1,97
Ariane 2-1	137,8	0,24	791	0,55	16,70	1,13
Braeburn 1-1	197,3	0,18	800	2,38	21,70	4,80
Cameo 2-2	194,6	0,15	655	1,02	14,39	2,01
Elstar 1-4	121,4	0,20	816	1,33	16,33	2,67
Jubile 2-4	222,6	0,12	441	0,82	7,14	1,63
PinkLady 1-2	161,3	3,62	957	3,10	27,16	5,54
Red Delicious 2-5	185,4	0,17	734	3,84	17,55	7,56
Reinette d'Armorique 1-5	132,8	0,28	571	0,42	8,49	0,89
Tentation 2-3	176,1	0,15	692	2,88	15,07	5,75
Moyenne		0,52		1,73		3,40

tion de masse et déclenche alors la mesure. Pour répéter une autre mesure, il faut soulever légèrement le fruit (remise de la balance à zéro par l'appareil) et le reposer ensuite pour avoir une deuxième mesure. La zone d'impact du marteau sur le fruit peut ainsi légèrement varier d'une répétition à l'autre.

Résultats et discussion

Répétabilité des mesures

L'AFS est initialement conçu pour mesurer le coefficient de fermeté d'un produit, en mesurant sa masse et sa fréquence de résonance (f_0). Nous avons donc examiné en premier lieu ces deux paramètres, en choisissant d'observer les résultats sur 10 fruits (1 par variété) et en considérant les 40 mesures d'un même fruit comme des répétitions, en négligeant l'effet face. Les résultats du tableau 1 montrent une bonne répétabilité de l'AFS avec des coefficients de variation (CV) bien inférieurs à 5 %. Pour la donnée purement sonométrique qu'est la fréquence de résonance f_0 , nous avons un CV moyen de 1,73 %, concernant le Firmness (Fi), celui-ci est un peu plus élevé (3,4 %), puisqu'il résulte de deux mesures. Concernant la cohérence des résultats, on voit que la masse de la pomme Pink Lady 1-2 présente un coefficient de variation bien plus élevé (3,62 %) que ceux des autres pommes. En effet, sur les 40 mesures réalisées sur ce fruit en particulier, 39 valeurs de masse du fruit varient entre 159 g et 161 g et une seule est égale à 197 g. Ceci nous montre que l'appareil est susceptible de fournir des valeurs erronées; pour nos expérimentations ultérieures, nous avons choisi de répéter au moins trois fois chaque mesure et de nous assurer de leur cohérence.

La réponse temporelle de la pomme Elstar 1-1 (fig.3) présente 3 des 40 signaux enregistrés: ces trois réponses ne sont pas synchronisées et nous constatons un décalage de l'origine à l'échelle du temps. De plus, les amplitudes sont différentes d'une courbe à l'autre. En calant ces trois courbes sur une même origine (fig.4), les oscillations se superposent, attestant de la répétabilité de la réponse temporelle du fruit, mais en excluant l'amplitude. Celle-ci diverge d'un essai à l'autre, bien que la force d'impact du marteau et le niveau d'amplification du signal sonore restent inchangés. Ces éléments sont confirmés par la réponse fréquen-

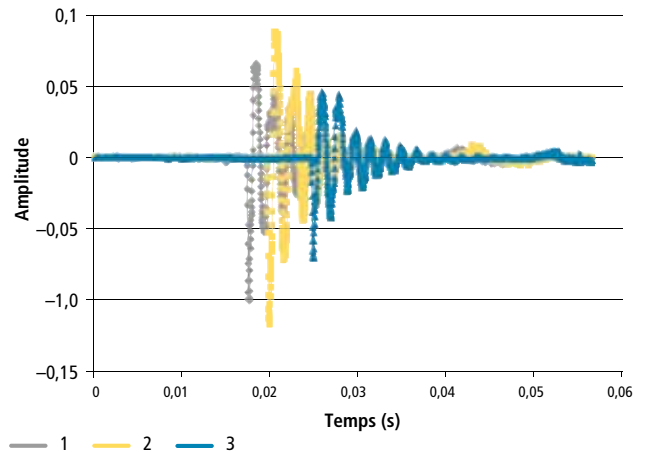


Figure 3 | Réponse temporelle brute de la pomme Elstar 1-1 (3 répétitions).

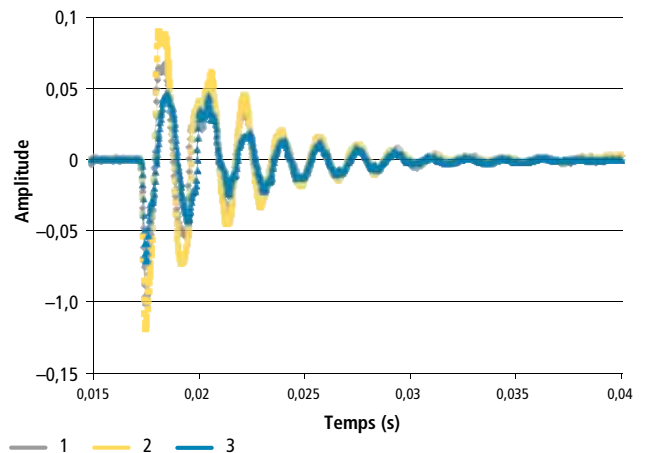


Figure 4 | Réponse temporelle synchronisée de la pomme Elstar 1-1 (3 répétitions).

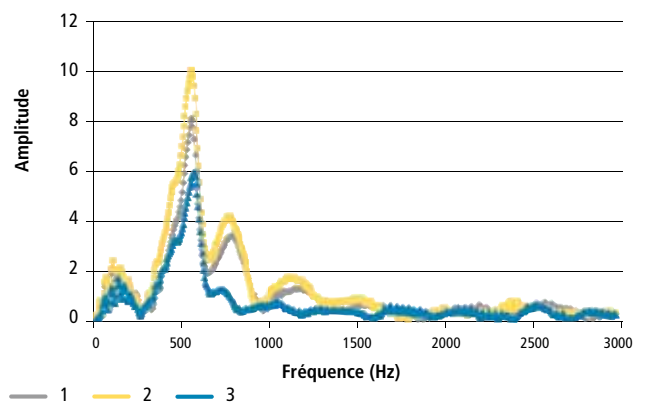


Figure 5 | Réponse fréquentielle de la pomme Elstar 1-1 (3 répétitions).

tielle (fig. 5), les pics apparaissent pour les mêmes fréquences mais avec des amplitudes différentes.

En conclusion, la répétabilité de l'AFS est bonne pour l'ensemble des fréquences composant la réponse sonométrique, mais médiocre pour l'amplitude. De plus, cet appareil est susceptible de donner des valeurs erronées, ce qui demande de faire des répétitions pour s'assurer de la cohérence des résultats.

Essais sur la fermeté

La question posée est de définir l'indicateur le plus sensible à la modification de la texture du fruit qui conduit à la perte de sa fermeté.

Un essai extrême a été réalisé sur ce critère de fermeté : 4 pommes (2 Gala et 2 Braeburn) achetées dans le commerce ont été testées fraîches puis placées dans un congélateur pendant 24 heures et à nouveau testées après décongélation. Six mesures ont été réalisées par pomme. Pour déterminer la courbe de réponse fréquentielle pour une pomme donnée, la médiane des 6 amplitudes a été prise à chaque point de la courbe. La congélation a eu pour effet de modifier fortement la fermeté des pommes. En 24 heures, leur fermeté a évolué d'un état commercialisable à celui d'un fruit pourri. La fréquence de résonance a nettement chuté (tabl. 2), mais également les amplitudes de la réponse sonométrique (fig. 6). L'observation de la réponse sonométrique temporelle (fig. 7) indique que l'amortissement de la courbe de réponse est beaucoup plus important lorsque la texture du fruit est déstructurée. En effet, le nombre d'oscillations est moins important. La modification des propriétés mécaniques du fruit s'accompagne d'une réponse sonométrique très différente de celle d'un fruit frais. La fréquence de résonance et donc le coefficient *Fi* ne sont donc pas les seuls paramètres à pouvoir caractériser la fermeté de la pomme. Cette expérience montre qu'il s'agit de déterminer le facteur le plus discriminant et d'examiner si tous les paramètres sont corrélés entre eux. Si tel est le cas, la réponse sonométrique pourrait être résumée par un seul facteur.

Effet de la face du fruit

Les résultats obtenus montrent que l'ensemble des fréquences de la réponse sonométrique ne permet pas de distinguer les différentes faces d'un fruit; en revanche,

Tableau 2 | Comparaison des fréquences de résonance entre la même pomme fraîche et congelée

Fruit	f_0 (Hz)	
	Frais	Congelé
1	936	161
2	903	149
3	794	166
4	747	160

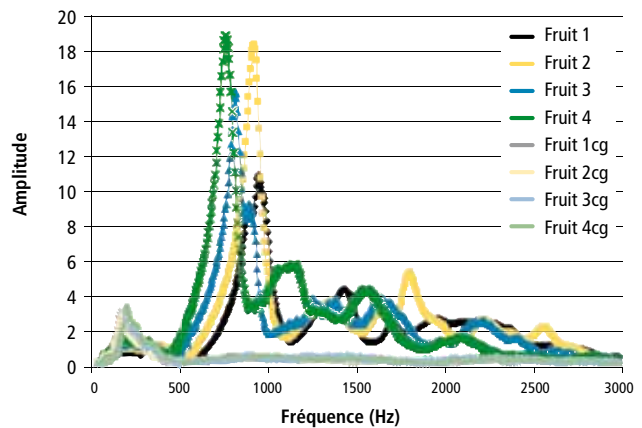


Figure 6 | Comparaison des réponses fréquentielles entre pommes fraîches et congelées.

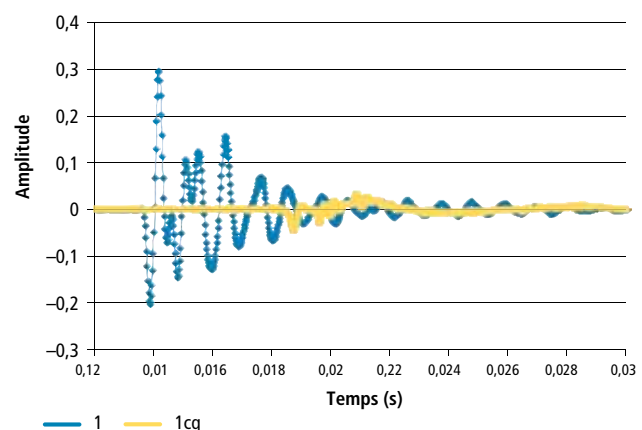


Figure 7 | Comparaison des réponses temporelles entre pomme fraîche et congelée sur 1 essai.

des écarts d'amplitude peuvent être observés d'une face à l'autre (fig. 8 et 9). La réponse fréquentielle de la pomme Braeburn 1-1 (fig. 9) est intéressante à ce sujet: les pics correspondant à la deuxième fréquence comprise entre 1000 Hz et 1500 Hz se superposent, attestant d'une bonne répétabilité des mesures dans cette gamme de fréquence, alors que pour la fréquence de résonance, le pic le plus important, (entre 500 Hz et 1000 Hz) l'amplitude est différente d'une face à l'autre. Nous observons le même phénomène pour la troisième fréquence (entre 1500 Hz et 2000 Hz). En conclusion, cet essai indique que la fréquence ne permet pas de discriminer les différentes faces d'un même fruit, contrairement à l'amplitude qui présente une certaine potentialité de discrimination. Celle-ci ne s'exprime pas pour toutes les fréquences de la réponse sonométrique du fruit et peut varier d'une gamme de fréquence à une autre en fonction du fruit sélectionné.

Conclusions

- L'étude montre que l'appareil de mesure acoustique AFS présente une bonne répétabilité, mais le paramètre indice de fermeté (*Fi*) qu'il propose d'exploiter ne semble pas être le plus discriminant. L'amplitude semble offrir des possibilités plus intéressantes pour utiliser cet équipement comme outil discriminant, par exemple pour la classification des fruits, à condition de disposer d'un nombre de répétitions suffisant (10 mesures par fruit) pour assurer d'une bonne répétabilité de la mesure. D'autres facteurs, non étudiés ici, comme l'amortissement de la réponse temporelle, pourraient être également intéressants à exploiter.
- La sonométrie, méthode simple, rapide et non destructive, est potentiellement prometteuse pour la mesure de la fermeté des fruits. A l'heure actuelle, cependant, l'exploitation et l'interprétation des données obtenues par sonométrie ne sont pas aisées et ne permettent pas une exploitation facile de la

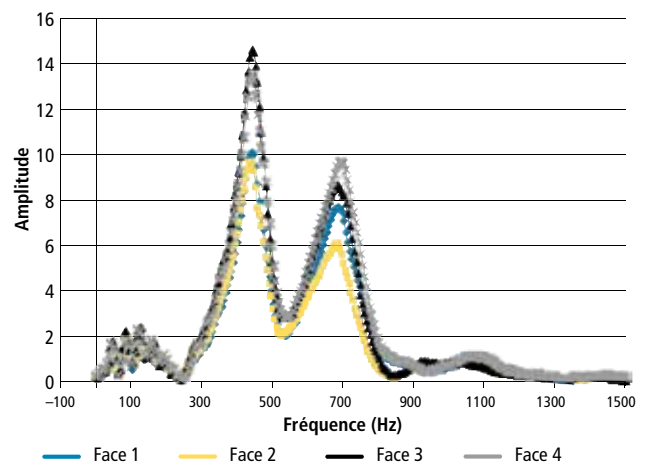


Figure 8 | Réponse temporelle par face de la pomme Jubile 2-4.

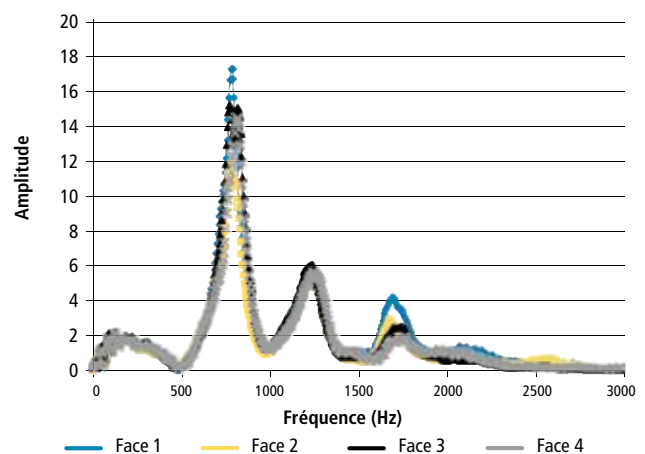


Figure 9 | Réponse temporelle par face de la pomme Braeburn 1-1.

mesure par les professionnels. Un seul facteur comme le *Fi* est loin de donner toutes les informations, il faudrait extraire et combiner plusieurs facteurs de la courbe de réponse sonométrique pour bien caractériser la fermeté d'un fruit. Des recherches complémentaires sont donc encore nécessaires afin de pouvoir préconiser cette technique aux professionnels de la filière arboricole. ■

Bibliographie

- De Ketelaere B., Howarth M. S., Crezee L., Lammertyn J., Viaene K., Bulens I. & De Baerdemaeker J., 2006. Postharvest firmness changes as measured by acoustic and low-mass impact devices: a comparison of techniques. *Postharvest Biology and Technology* **41** (3), 275–284.
- Herppich W. B., Landahl S., Herold B. & De Baerdemaeker J., 2003. Interactive effects of water status and produce texture – An evaluation of non-destructive methods. *In: Proceedings of the International Conference. Postharvest Unlimited, Leuven, Belgium.*

- Mehinagic E., Royer G., Symoneaux R. & Jourjon F., 2006. Objective measurements of apple texture with penetrometry, compression and acoustic methods in relation to the sensory perceptions. *In: Proceeding ISFRS, Zurich, Suisse, 395–398.*
- Shmulevich I., Galili N. & Howarth M. S., 2003. Non destructive dynamic testing of apples for firmness evaluation. *Postharvest Biology and Technology* **29** (3), 287–299.
- Symoneaux R., Royer G., Madieta E. & Jourjon F., 2004. Acoustic and sensory measurements of different ripeness of apples. *In: Proceedings of the 5th International Postharvest Symposium, Verona, Italy.*

Summary ■ **Characterizing apple firmness by acoustic measurement**
 Apple texture, particularly firmness, figures among the main attributes of fruit quality in commercial transactions. The reference method for controlling apple firmness is penetrometry (destructive and punctual measure). The development of new technologies and new methods for signal analysis should permit to progress in domain of non-destructive measurement of fruit quality. The acoustic measurements seem very promising for this purpose. The work presented in this article shows that frequencies from the fruit response to the acoustic solicitation are repeatable. Moreover the method could be sensitive enough to discriminate the blushed from unblushed fruit face.

Key words: acoustic measurement, texture, apple.

Zusammenfassung ■ **Ist die Sonometrie nützlich für die Charakterisierung der Apfelfestigkeit?**
 Die Textur der Äpfel und ganz besonders deren Festigkeit ist eine der wesentlichen Qualitätskriterien, die im Handel benutzt werden. Die dafür angewandten Messmethoden beruhen auf der Penetrometrie und bestehen damit aus einem destruktivem Test. Mit der Entwicklung neuer Technologien und Methoden der Signalverarbeitung ist die Anwendung neuer nicht destruktiver Techniken ein unleugbarer Fortschritt. Die Sonometrie, beruhend auf der Reaktion der Frucht bei einem Schlag mit dem Presskörper, könnte zu diesen Methoden gehören. Die in diesem Artikel präsentierte Forschungstätigkeit zeigt eine gute Wiederholbarkeit der erhaltenen Messungen, besonders des Frequenzniveaus im Zusammenspiel mit der Frequenzrückmeldung der Frucht. Dieses scheint mit der Festigkeit der Frucht zu korrelieren, aber die relevantesten sonometrischen Parameter müssen noch bestimmt werden. Diese Methode wäre zudem in der Lage alle Seiten der Frucht zu beschreiben und somit ein sehr vielversprechendes Werkzeug für die Charakterisierung zu ergeben.

Riassunto ■ **Può la sonometria caratterizzare la compattezza delle mele?**
 La tessitura delle mele e, in particolare, la loro compattezza, è uno dei principali criteri di qualità impiegati nelle transazioni commerciali. I metodi utilizzati per misurarla sono basati sulla penetrometria e sono, dunque, distruttivi. Lo sviluppo di nuove tecnologie e di nuovi metodi di trattamento del segnale, permetterebbero di appellarsi a metodi non distruttivi, costituendo così un innegabile progresso. La sonometria, basata sulla risposta di un frutto all'impatto con un martello, potrebbe far parte di questi metodi. Il lavoro preliminare presentato in questo articolo mostra una buona ripetibilità delle misure strumentali, in particolare a livello delle frequenze che compongono la risposta frequenziale del frutto. Questa può essere ricondotta alla sua compattezza, nonostante i parametri più pertinenti della risposta sonometrica siano ancora da determinare. Questo metodo sarà ugualmente in grado di discriminare i lati dello stesso frutto fornendo, inoltre, uno strumento di caratterizzazione molto promettente.

- Tu K., De Baerdemaeker J., Deltour R. & De Barys T., 1996. Monitoring post-harvest quality of Granny Smith apple under simulated shelf-life conditions. Destructive, non-destructive and analytical measurements. *International Journal of Food Science and Technology* 31 (3), 267–276.
- Zude M., Herold B., Roger J.-M., Bellon-Maurel V. & Landahl S., 2006. Non-destructive tests on the prediction of apple fruit flesh firmness and soluble solids content on tree and in shelf life. *Journal of Food Engineering* 77 (2), 254–260.