

Mesures et modélisation de la signature électronique de l'huile d'Argan par la technique acoustique non destructive

[Measurement and modeling of electronic signature of Argan oil by non-destructive acoustic technique]

Abdessamad Malaoui

Laboratoire Interdisciplinaire de Recherche en Sciences et Techniques (LIRST),
Université Sultan Moulay Slimane, B.P 592, Mghila, Béni Mellal, Maroc

Copyright © 2016 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: In this paper, we study the application of a non-destructive technique to analyze the argan oil. This is to measure the velocity and attenuation of acoustic waves that propagate in the oil, depending on the temperature and the concentration of other mixtures oils. Information is derived from these measurements find a correlation between measurable parameters and other physical parameters that characterize the liquid. Analytical and empirical models are extracted and studied through these measures. Significant results are presented and discussed to show the interest of the application of this technique on the quality control of this specific oil.

KEYWORDS: Argan oil, physical parameters, acoustic waves, nondestructive testing, quality control.

RESUME: Ce travail traite l'application d'une technique non destructive pour analyser l'huile d'argan. Il s'agit de mesurer la vitesse et l'atténuation des ondes acoustiques qui se propagent dans cette huile, en fonction de la température et la concentration d'une autre huile mélange. Des informations sont déduites à partir de ces mesures indiquant une corrélation entre les grandeurs mesurables et d'autres paramètres physiques qui caractérisent ces huiles. Des modèles analytiques et d'autres empiriques sont traités et étudiés à travers ces mesures. Des résultats importants sont présentés et discutés qui montrent les intérêts de l'application de cette technique sur le contrôle de la qualité de cette huile spécifique.

MOTS-CLEFS: Huile d'argan, paramètres physiques, ondes acoustiques, contrôle non destructif, contrôle qualité.

1 INTRODUCTION

Dans les dernières années les techniques d'analyse basées sur les ondes acoustiques ont connu une grande focalisation scientifique et technique grâce à ses caractères non destructifs. Ces techniques ont été utilisées dans plusieurs domaines tels que la médecine (Wells-1977), le contrôle de la qualité des produits alimentaires (Malaoui-2005), le test des métaux (Papadakis-1976), les produits pharmaceutiques [1], les composants électroniques, la télécommunication, et autres. L'étude de la propagation des ondes acoustiques dans les milieux liquides (en particulier ceux contenant des suspensions), a été abordée pour la première fois, au début du XIXème siècle par plusieurs auteurs (Sewell-1910, Epstein-Carhart-1953 et McClement-Povey-1989) [2], [3]. Cette propagation est modélisée par une matrice incluant des sphères solides ou fluides, qui étudie la diffusion d'une onde acoustique plane par une inclusion sphérique. Contrairement aux autres méthodes (chimiques et optiques), qui nécessitent que les milieux analysés soient transparents ou dilués, ce qui risque ses destructions pendant l'analyse, la méthode proposée met en œuvre des moyens simples, précis, instantanés, rapides, moins coûteux et occupent

tout le volume analysé. Les paramètres mesurables les plus utilisés avec la technique acoustique, sont la vitesse, l'impédance et le spectre fréquentiel du signal physique qui se propage dans le milieu analysé. La détermination de la vitesse de propagation de ces ondes dans un tel milieu permet de détecter des éventuelles inclusions, et aide à déterminer la densité volumique (ρ), les coefficients de compressibilité (χ), la concentration et la fraction volumique des différentes suspensions dans ce milieu. L'atténuation de ces ondes est liée directement à la viscosité (η) et à l'homogénéité du milieu.

Ce travail est consacré à l'application de cette technique pour analyser les huiles alimentaires, en particulier l'huile d'argan. L'objectif est de chercher des modèles qui corrélerent quelques propriétés physiques et les paramètres électro-acoustiques mesurés. Le choix de l'huile d'argan dans notre travail vient de sa particularité comme une nouvelle source alimentaire au Maroc, génétiquement non modifié, et présente des intérêts pour les secteurs économique, cosmétique et pharmaceutique [4]. La technique de mesure suivie dans ce travail permet de mesurer dans un premier temps, la vitesse acoustique avec une erreur de 0,5 m/s et ensuite l'atténuation de ces ondes. La température est bien contrôlée et mesurée avec une précision de 0,1°C à l'aide de la technologie des semi-conducteurs. Les résultats obtenus montrent l'existence des lois de corrélation entre les grandeurs électroniques mesurées et des paramètres physiques et chimiques de ces liquides analysés.

2 MODELES DE LA PROPAGATION DES ONDES ACOUSTIQUES DANS LES FLUIDES

2.1 ONDE ACOUSTIQUE DANS LES FLUIDES PARFAITS

Un fluide homogène, isotrope, non visqueux et non absorbant, est un fluide idéal pour la propagation des ondes acoustiques. Les phénomènes thermodynamiques, au sein de ce milieu sont adiabatiques. L'évolution des particules dans la perturbation s'effectue de façon si rapide qu'elles n'ont pas le temps de procéder à des échanges de chaleur avec leurs voisins. Les variations locales de la pression P et la densité ρ dues à la propagation de la perturbation acoustique sont décrites par trois équations mathématiques (l'équation d'état, l'équation d'Euler et l'équation de la conservation de masse) [5]. La dérivation de ces équations par rapport au temps « t » et l'espace x_M conduit à l'équation de Navier-Stokes [6] :

$$\frac{\partial^2 V_M}{\partial t^2} = \left(\frac{\delta P}{\delta \rho}\right) \cdot \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x_M^2}\right) \quad (1)$$

V_M est la vitesse du volume élémentaire du milieu de densité ρ_0 situé en M . Dans le cas d'une dimension ($V_x=V$, $V_y=V_z=0$) et pour une onde plane dont ω et k sont respectivement la pulsation et le vecteur d'onde, la forme de la vitesse est :

$$V_M(x, t) = V_0 \cdot e^{(i \cdot \omega \cdot t - k \cdot x_M)} \quad (2)$$

Où V_0 est la vitesse initiale.

La vitesse de phase C_0 des ondes acoustiques dans un liquide idéal peut être obtenue en remplaçant l'expression de l'onde plane dans l'équation (1.5), d'où [7] :

$$C_0 = \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{\delta P}{\delta \rho}} = \sqrt{\frac{1}{\rho_0 \cdot \chi_s}} = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho_0 \cdot \chi_T}} \quad (3)$$

Où $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ est le rapport des chaleurs spécifiques. Les termes χ_s et χ_T sont respectivement les compressibilités adiabatique et isotherme du fluide. L'onde acoustique dépend donc, du caractère compressible du milieu. L'amplitude de cette onde est d'autant plus grande que le milieu est moins dense ou moins compressible, ce qui permet d'avoir des indications quant aux variations de la vitesse des ondes d'un milieu à un autre.

2.2 PROPAGATION DES ONDES ACOUSTIQUES DANS LES LIQUIDES AVEC ÉMULSIONS

Parmi les premiers travaux théoriques qui ont déterminé la vitesse de l'onde acoustique dans les émulsions [3] le modèle d'Urlick [8] est le plus connu, cette vitesse est déterminée dans des milieux liquides supposés comme des liquides idéals (le plus souvent de l'eau). Ce modèle suppose que la taille des particules « sphériques » est très inférieure à la longueur d'onde

λ . La vitesse ultrasonore est déterminée grâce à une densité effective ρ_{ef} et une compressibilité effective χ_{ef} . Ces deux grandeurs dépendent de la densité et de la compressibilité des émulsions (ρ_{em}, χ_{em}), ceux de la phase liquide (ρ_l, χ_l) et la fraction volumique des particules ϕ . L'expression de la vitesse de propagation est :

$$C = \frac{1}{\sqrt{(\rho_{ef} \cdot \chi_{ef})}} \quad (4)$$

Avec
$$\rho_{ef} = \rho_{em} \cdot \phi + \rho_l \cdot (1 - \phi) \quad , \quad \chi_{ef} = \chi_{em} \cdot \phi + \chi_l \cdot (1 - \phi) \quad (5)$$

Dans certains milieux, cette dernière équation n'est applicable que pour une fraction volumique ϕ de 0 à 25% [9]. Urick a établi une autre équation de la vitesse ultrasonore C dans une solution (χ_{sol}, ρ_{sol}) qui contient une phase continue de vitesse ultrasonore V_1 et fraction volumique ϕ [9] :

$$\frac{1}{C^2} = \frac{1}{V_1^2} + C_1 \cdot \phi + C_2 \cdot \phi^2 \quad (6)$$

Les paramètres C_1 et C_2 sont donnés par :

$$C_1 = \frac{1}{V_1^2} \cdot \left(\frac{\chi_{sol} - \chi_l}{\chi_l} + \frac{\rho_{sol} - \rho_l}{\rho_l} \right) \quad (7)$$

Et
$$C_2 = \frac{1}{V_1^2} \cdot \left(\frac{\chi_{sol} - \chi_l}{\chi_l} \cdot \frac{\rho_{sol} - \rho_l}{\rho_l} \right) \quad (8)$$

2.3 PROPAGATION DES ONDES ACOUSTIQUES DANS LES LIQUIDES AVEC SUSPENSIONS

Dans un fluide visqueux, qui contient des dispersions solides (ρ_p, χ_p), il existe des interactions entre ces particules [10]. La viscosité dynamique du milieu ζ est remplacée par une viscosité dynamique effective ζ_{ef} . Cette expression a été déterminée par Vand [11].

$$\zeta_{ef} = \zeta (1 + 2.5 \phi + 7.349 \phi^2 + \dots) \quad (9)$$

Dans ce cas le nombre d'onde k est donné par la relation suivante [12] :

$$k = \frac{\omega \sqrt{\chi_{ef} \cdot \rho_l \cdot \rho_p} \cdot ((1 - \phi + \phi \cdot \psi) + \psi \cdot \rho_l \cdot (1 - \phi))}{\sqrt{(\rho_p \cdot (1 - \phi)^2 + \rho_l \cdot (\psi + \phi - \phi^2))}} \quad (10)$$

Avec
$$\psi = 0.5 \left[\frac{1 + 2\phi}{1 - \phi} \right] + (9/4\theta) \left[1 + i \left(1 + \frac{1}{\theta} \right) \right] \quad (11)$$

- $\theta = r \sqrt{\omega / 2 \chi_c}$.

- r est le rayon de la particule.

- ω est la pulsation de l'onde.

- χ_c est la viscosité cinématique du fluide.

La présence de la quantité complexe ψ , est synonyme d'un nombre d'onde complexe et d'une atténuation de l'onde ultrasonore. La vitesse et l'atténuation sont déterminées par les équations (10) et (11). Dans les limites ($\phi = 0$) et ($\phi = 1$), l'équation (10) se ramène à celles d'un liquide parfait ($k = \omega / \sqrt{\chi_l \cdot \rho_l}$) et d'un solide parfait ($k = \omega / \sqrt{\chi_{solid} \cdot \rho_{solid}}$).

3 EXPERIENCES ET TECHNIQUE DE MESURE UTILISEE

C'est une technique qui exploite la mesure de l'atténuation, de la vitesse et de l'impédance des ondes acoustiques qui propagent dans les liquides analysés. Il s'agit de mesurer les variations de la vitesse ultrasonore et la fréquence de résonance dans l'huile d'argan en fonction de la température et de la concentration des autres huiles mélanges. L'instrument électronique de mesure est développé à l'aide d'un système embarqué qui génère une impulsion électrique ayant une fréquence centrale de 5Mhz, qui se propage entre deux transducteurs acoustiques (Figure 1). Le système de mesure permet le contrôle de la température des liquides avec une précision de 0,1°C à l'aide de la technologie de Peltier, il est aussi bien étalonné par des liquides références [13].

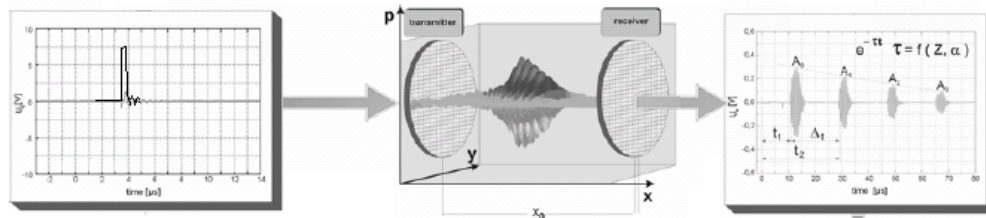


Fig. 1. Technique utilisée

3.1 MESURE DE LA VITESSE ACOUSTIQUE

Plusieurs techniques ont été faites pour mesurer la vitesse ultrasonore, suivant plusieurs critères [14]. Une méthode s'appelle (*Sing-around Method*) utilise deux transducteurs dont le signal détecté par le transducteur récepteur est utilisé pour synchroniser le générateur d'impulsions d'excitation [15]. La précision de cette méthode dépend des circuits électroniques, constituant le système, qui génèrent des retards supplémentaires (de l'ordre de 100ppm). Une deuxième méthode qui s'appelle Technique analogique, est basée sur la multiple réflexion du signal d'excitation. Si la durée de ce signal est inférieure au temps d'un aller-retour dans l'échantillon, de multiples échos en résultent. La vitesse ultrasonore est mesurée par la détermination du temps de transit entre les différents échos durant le chemin parcouru. Une autre méthode est celle nommée par « *temps de vol* », elle consiste à mesurer avec précision le temps de propagation (τ) de l'impulsion envoyée par le transducteur émetteur, et son arrivée sur le transducteur récepteur dans le liquide analysé [16]. Ce temps peut être calculé par le temps total de propagation (T_{mesure}) et un temps (T_p) propre au retard, due au système de mesure. D'où le temps de vol est :

$$\tau = T_{\text{mesure}} - T_p \quad (12)$$

$$T_{\text{mesure}} = \frac{L}{C} \quad (13)$$

Avec (L) est la longueur du liquide (dans notre cas $L = 52$ mm) et (C) est la vitesse de propagation des ondes acoustiques dans l'huile. Une précision de l'ordre de 10^{-5} et une erreur de 0,5 m/s sur la valeur de la vitesse ont été assurées par cette technique dans les mesures.

3.2 MESURE DE L'ATTENUATION ACOUSTIQUE

L'origine de l'atténuation des ondes acoustiques est l'effet de la viscosité et de la diffusion thermique. Dans la plupart des liquides, l'atténuation due au second effet est négligeable. En général, deux formes d'atténuation peuvent être distinguées selon les mécanismes impliqués dans la conversion de l'énergie acoustique dans la chaleur: atténuation extrinsèque et atténuation intrinsèque. La première est due à la déperdition d'énergie acoustique, tandis que la deuxième atténuation (atténuation spécifique) qui résulte seulement de l'interaction entre onde acoustique et le milieu dans lesquels elle propage (par exemple milieu poreux ou visqueux). L'atténuation intrinsèque peut être caractérisée par un coefficient $\alpha(f)$ qui dépend de la fréquence et qui définit la diminution d'une amplitude sinusoïdale (A_0) d'une onde plane suivant la distance (x):

$$A(x) = A_0 \cdot e^{-\alpha(f) \cdot x} \quad (14)$$

L'étude de l'atténuation en fonction de la fréquence peut être effectuée généralement par deux techniques, suivant la nature du signal propagé dans les huiles. La méthode de mesure utilisée est appelée « *Technique d'impulsions* », qui présente une large bande dans le domaine fréquentiel. Cette technique consiste à envoyer une impulsion de l'ordre de 0,2 (μ s) entre les deux transducteurs à travers le liquide. Les mesures sont effectuées par les différentes amplitudes des signaux

après réflexion sur les deux transducteurs. Il apparaît alors une succession d'échos dont la variation d'amplitude reflète l'absorption du milieu. L'amplitude de l' $n^{\text{ième}}$ écho reçu s'écrit [17] :

$$A_n = A_1 \cdot e^{-2\alpha L(n-1)} \quad (15)$$

Où bien

$$\alpha = \frac{\text{Ln}\left(\frac{A_1}{A_2}\right)}{2(n-1) \cdot L} \quad (16)$$

Le paramètre (A_1) représente l'amplitude du premier écho, (α) est le coefficient d'absorption de l'onde et (L) représente la distance entre les deux transducteurs. Cette équation (16) permet de déterminer (α) à condition de connaître la distance (L). Cette formule n'est valable que dans le cas d'atténuation (α) faible ou d'un signal mono fréquentiel [18]. L'atténuation entre deux échos successifs est donnée par :

$$\alpha_1 - \alpha_2 = \frac{\text{Ln}\left(\frac{A_1}{A_2}\right)}{L} \quad (17)$$

Où A_1 et A_2 représentent les amplitudes du signal acoustique aux températures T_1 et T_2 .

3.3 PREPARATION DES ECHANTILLONS

Cette étude a choisi l'huile d'Argan comme milieu d'analyse parce qu'elle représente des spécifications pour le Maroc. C'est un arbre résistant à la sécheresse, et qui a plusieurs caractéristiques cosmétiques et alimentaires. L'arganier produit des amandes proches à l'olivier qui passent par plusieurs étapes avant qu'elle donne de l'huile liquide. Ces amandes sont déulpés et ses noyaux sont cassés et torréfiés puis broyés avant d'être pressés mécaniquement puis décantés.

Pour réaliser cette étude, plusieurs échantillons de l'huile d'argan ont été préparés selon six régions différentes du Maroc, qui sont la région d'Essaouira, Assaka, Tamri, Tamanar, Taghazoute et la région d'Agadir. La préparation de ces échantillons ont été faite manuellement à l'abri de la lumière et de l'air dans la température ambiante durant la période des expériences.

4 RESULTATS ET DISCUSSIONS

Le tableau 1 présente les mesures de la vitesse ultrasonore dans l'huile d'argan selon ces régions à la température 23°C.

Tableau 1. Vitesse ultrasonore mesurée dans l'huile d'argan à 23°C, selon les régions

Région de prélèvement	Vitesse acoustique mesurée dans Argan (m/s)
Essaouira	1454,9
Assaka	1454,0
Tamri	1454,4
Tamanar	1455,4
Taghazoute	1455,1
Agadir	1453,8

Ce tableau montre que la vitesse ultrasonore dans l'huile d'argan se diffère d'une région à une autre. Cette différence de vitesse est tout à fait normale, à cause de la préparation manuelle de cette huile. D'où la présence des impuretés et des traces variantes de l'eau, des acides gras et d'autres suspensions, mais la moyenne des vitesses reste de l'ordre de $1454,5 \pm 0,5$ (m/s) à 23°C. Par la suite les mesures sont effectuées sur l'huile d'une région qui représente la moyenne des vitesses des autres régions.

Nous présentons donc, dans le tableau suivant pour la première fois pour l'huile d'argan, une nouvelle base mesurée de la vitesse ultrasonore et la compressibilité adiabatique entre les températures 6,1°C et 68,4°C. Ces mesures nous permettent

de déduire la compressibilité adiabatique de l'huile d'Argan en fonction de la température en se basant sur le modèle de l'équation (3). Le tracé de cette compressibilité adiabatique présenté dans la figure 2, montre que cette grandeur augmente lorsque la température augmente aussi. Cette augmentation est modélisée par le modèle de l'équation (18).

Tableau 2. Base mesurée de la vitesse ultrasonore et la compressibilité adiabatique de l'huile d'argan.

Température °C ±0,1 °C	Vitesse ultrasonore ± 0,5 (m/s)	Compressibilité adiabatique (1E ⁻⁷ Pa-1)
06,1	1515,80	4,72
10,5	1500,32	4,86
15,5	1480,42	5,01
20,3	1464,58	5,15
23,3	1453,93	5,29
25,2	1448,05	5,44
30,0	1431,70	5,60
39,6	1400,06	5,75
49,2	1367,52	5,90
58,8	1336,58	6,06
61,5	1328,50	6,21
65,1	1316,70	6,36

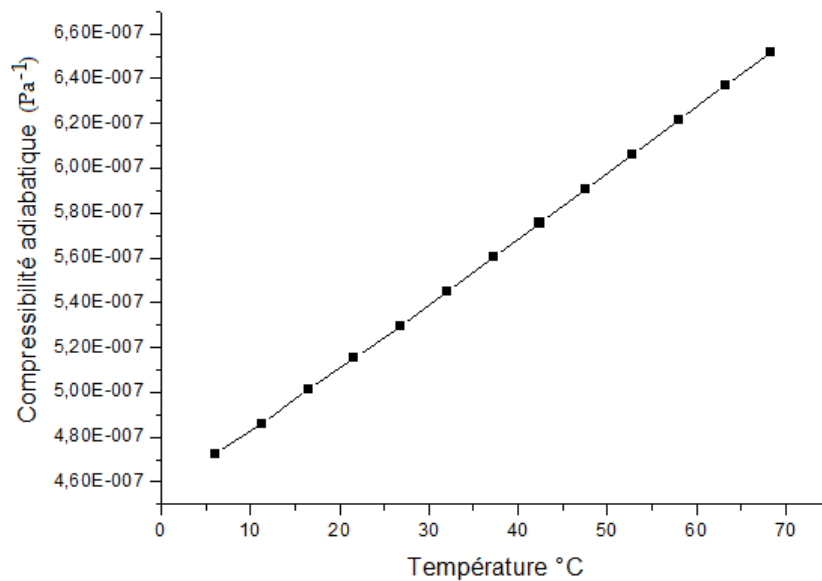


Fig. 2. Compressibilité adiabatique mesurée en fonction de la température

La compressibilité nous permet d'informer sur la manière dont ils se comportent les constituants de l'huile d'argan localement en fonction du changement de la température. Cette grandeur peut être modélisée par le modèle polynomial d'ordre 3 (équation 18). L'erreur (SD) de ce modèle est optimale, elle est de l'ordre de (2,37309E-10) et ses coefficients sont donnés sur la table 3.

$$\chi_s = b_0 + b_1.T + b_2.T^2 + b_3.T^3 \quad (18)$$

Tableau 3. Coefficients du modèle de la compressibilité adiabatique de l'Argan

Paramètres	Valeur	Erreur
b0	4,5645E-7	3,98116E-10
b1	2,5732E-9	4,38908E-11
b2	7,47143E-12	1,33524E-12
b3	-4,81768E-14	1,1818E-14

Pour bien analyser ces résultats, nous présentons le zoom de la courbe sur la figure 3. Pour comparer mathématiquement la vitesse ultrasonore mesurée en fonction de la température dans l'huile d'argan, avec autres huiles, nous présentons l'équation de cette vitesse par un polynôme d'ordre 3. Nous avons limité l'ordre du polynôme à 3, parce que la déviation standard (SD) de cet ordre est minimale.

$$V(T) = k_0 + k_1.T + k_2.T^2 + k_3.T^3 \tag{19}$$

Les coefficients de ce polynôme sont donnés sur la table suivante.

Tableau 4. Coefficients du polynôme dans la gamme 6,1°C à 68,4°C

K ₀	K ₁	K ₂	K ₃
1539,32	-3,91	0,013	-9,14 10 ⁻⁵

D'après la figure 3, nous remarquons que la distribution des mesures des vitesses autour du fit présente des variations anormales, en particulier entre les températures 10.5°C et 15.5°C.

Afin de vérifier l'origine de cette anomalie nous avons répété la mesure de la vitesse acoustique dans la gamme 6,1 °C à 15,5 °C, avec un pas plus petit. Nous remarquons donc, que la vitesse mesurée transite spontanément entre les températures 12,6°C et 15,5°C de 1492,99 m/s à 1480,42 m/s respectivement.

L'huile d'argan est constituée de plusieurs éléments chimiques. La connaissance de ses propriétés physiques et chimiques, nous aide à comprendre l'évolution de la vitesse ultrasonore dans ce liquide. Pour expliquer cette transition au niveau de la vitesse acoustique dans l'huile d'argan, au voisinage de T=14°C, nous avons consulté les constituants chimiques et moléculaires de cette huile.

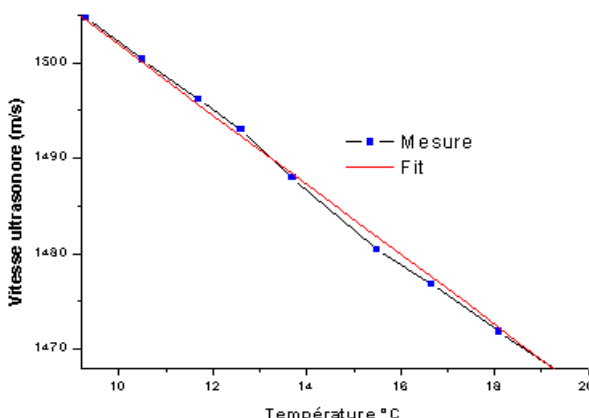


Fig. 3. zoom de la courbe de la vitesse ultrasonore mesurée

Les caractéristiques physiques de chaque acide sont données sur les tables 5 et 6 [19]:

Tableau 5. Variations du point de fusion selon la nature des acides gras

Désignation « Acide »	Nombres de carbone	Point de fusion
Myristique	14	54,0°C
Palmitique	16	63,0°C
Stéarique	18	69,5°C
Oléique	18	13,4°C
Linoléique	18	-5,0°C
Linoléinique	18	-11°C

Le point de fusion d'un corps gras est la température à laquelle se produit le passage de l'état solide à l'état liquide. La valeur du point de fusion d'un acide gras diminue avec le degré d'insaturation et augmente avec la longueur de la chaîne carbonée.

Tableau 6. Pourcentage des acides gras et nombre de double liaison dans les 2 huiles

Acides Gras	Double liaisons	Argan [14]	Tournesol [15]
Palmitique	0	11,7%	5,2%
Stéarique	0	5%	3,2%
Oléique	1	48,1%	26,4%
Linoléique	2	34,3%	65,2%

D'après ces tableaux, le point de fusion de l'acide oléique, qui est majoritaire dans l'argan (48,1%) est 13,4°C ; c'est à dire la température entre les phases liquide et solide. Pour les températures inférieures, les ondes ultrasonores trouvent un support solide pour une propagation rapide, ce qui explique que la vitesse de propagation est élevée par rapport à la vitesse dans la phase liquide dans la gamme de 6,1°C à 13,7°C. Par contre, pour les températures 54°C et 63°C, qui représentent les points de fusion des acides gras Myristique (0,2%) et Palmitique (11,7%) respectivement.

Nous concluons donc que la technique ultrasonore est capable de détecter le changement de phase des acides gras, qui ont un pourcentage de présence supérieure ou égale à 48,1%, et incapable pour les autres ayant un pourcentage inférieur ou égale à 11,7%. Dans les marchés des huiles, le coût d'un litre de tournesol est d'environ 2 euros, par contre le prix d'un litre d'argan peut arriver jusqu'à 50 euros. Les tricheurs des huiles, exploitent cette différence de prix pour mélanger les deux liquides alimentaires. La technique ultrasonore est-elle capable de détecter ce mélange ? En effet, pour comparer l'huile d'argan avec d'autres huiles alimentaires, en particulier l'huile de tournesol, nous avons mesuré les vitesses ultrasonores dans cette dernière entre 10°C et 51°C. La figure 4 présente la comparaison de ces mesures avec celles dans l'huile d'Argan.

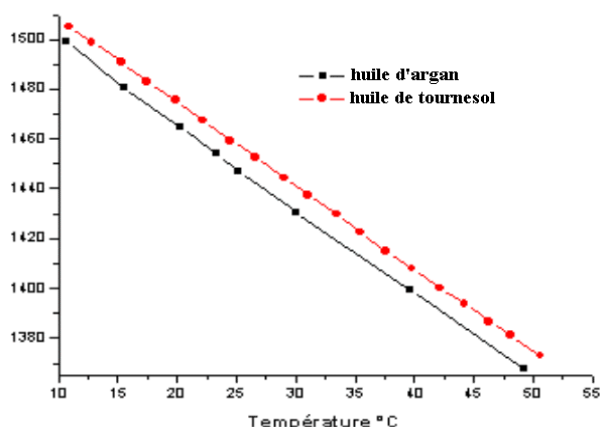


Fig. 4. Mesure de la vitesse ultrasonore dans les huiles d'argan et de tournesol

La propagation des ondes ultrasonores dans l'argan est donc, moins rapide que celle dans les autres huiles de table. Ce résultat donne des informations sur la rigidité des liaisons entre les molécules de l'argan et les autres huiles. Les liaisons chimiques qui constituent l'huile de tournesol sont plus rigides que celles d'argan. Les acides gras majeurs dans le tournesol contiennent 2 doubles liaisons, par contre ceux dans argan ne contiennent qu'une double liaison.

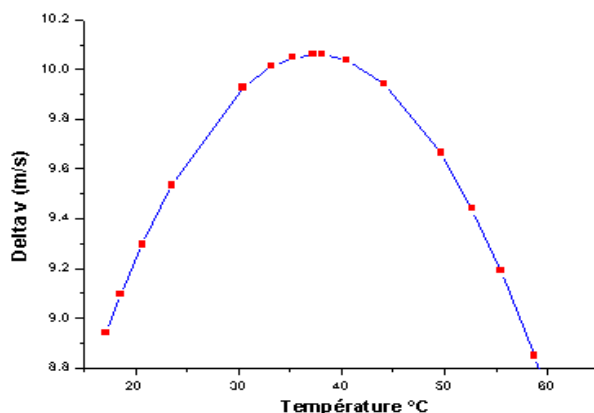


Fig. 5. Différence de vitesses ultrasonores entre argan et tournesol

Ce résultat est en accord avec les pourcentages des acides gras qui contiennent les doubles liaisons dans chaque huile (Tables 3 et 4). Pour voir l'évolution des huiles d'argan et de tournesol en fonction de la température, nous traçons dans la figure 5, la différence de la vitesse ultrasonore dans la gamme (18°C ; 60°C). Nous constatons que cette différence de la vitesse varie de 8,65 (m/s) à 10,1 (m/s), mais elle présente un maximum aux températures 37°C et 38°C. Donc pour déterminer s'il y a des traces de l'huile de tournesol mélangé avec argan, nous avons chauffé les échantillons à ces températures maximales, avant de mesurer la vitesse ultrasonore. Pour l'expérience suivante, nous mesurons à la température ambiante, la vitesse ultrasonore dans l'huile d'argan en faisant varier la fraction volumique ϕ de l'huile de tournesol dans la solution mélange.

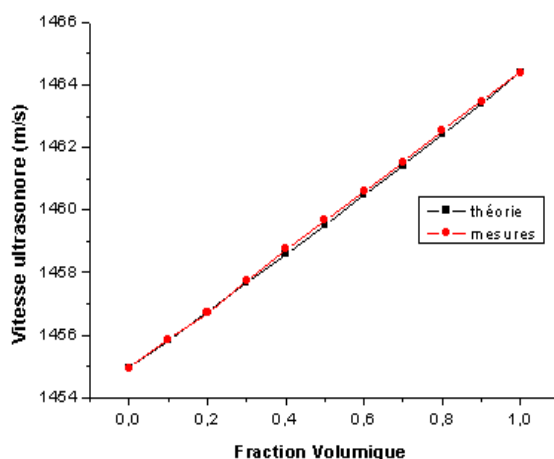


Fig. 6. Vitesse ultrasonore dans Argan en fonction de la fraction ϕ du tournesol

La vitesse acoustique mesurée dans l'huile d'Argan en fonction de la fraction ϕ peut être modélisée par un modèle linéaire :

$$V(\phi) = 1454,89 + 9,5 \cdot \phi \tag{20}$$

Ce modèle suit celui d'Urick pour $0 \leq \phi \leq 0,3$ et $\phi > 0,9$ [20, 21]. L'erreur maximale de la vitesse entre le modèle théorique d'Urick et la mesure, ne dépasse pas 0,2 m/s au pourcentage de mélange de 50 % soit $\phi = 0,5$. Cette erreur reste inférieure à

celle de la mesure qui est de l'ordre de 0,3 m/s. Donc, on peut dire que, la théorie d'*Urlick* peut représenter ces mesures dans toute la gamme de la fraction volumique (0 % - 100 %), car les paramètres physiques des deux huiles (densité, compressibilité,...), sont très voisins. Le modèle trouvé est très utile dans le domaine du contrôle de qualité de l'huile d'argan. En effet, la mesure de la vitesse ultrasonore dans le mélange, nous permet de déterminer le pourcentage volumique de l'huile mélangée. Selon le modèle d'*Urlick*, la vitesse ultrasonore peut être déterminée en fonction de la densité effective ρ_{ef} et une compressibilité adiabatique effective χ_{ef} . Ces deux grandeurs effectives dépendent des grandeurs réelles de l'huile du tournesol ($\rho_{\text{tournesol}}, \chi_{\text{tournesol}}$), de celles du mélange ($\rho_{\text{mélange}}, \chi_{\text{mélange}}$) et de la fraction volumique (φ). La vitesse ultrasonore C , dans le mélange, peut être approximée donc, par les équations (4) et (5).

On s'intéresse par la suite, à la mesure de l'atténuation acoustique dans l'huile d'Argan, afin de trouver une corrélation entre la viscosité du milieu analysé et l'atténuation des d'ondes acoustiques. Les mesures présentées sur la figure (7), concernent la mesure du coefficient d'absorption dans l'Argan, ainsi que les différents échos du signal reçu sur le transducteur récepteur. Les mesures ont été effectuées en utilisant une excitation impulsion de faible puissance et d'une durée égale à 0,2 μ s. Les coefficients d'atténuation α_n entre le premier écho et le $n^{\text{ème}}$ écho, sont déterminés entre les températures 4 °C et 50 °C.

D'après ces résultats, l'atténuation des amplitudes ne reste pas constante au cours des différentes réflexions entre les transducteurs, comme c'était prévu. La méthode des impulsions, que nous avons utilisées, apparaît facile à manipuler, mais il est difficile de mesurer avec une grande précision les amplitudes à partir du 2^{ème} écho. Plusieurs causes peuvent être sources des bruits supplémentaires de ces atténuations, à savoir l'effet de *divergence géométrique* qui peut devenir important; c'est pour cela qu'il faut travailler avec une onde ultrasonore quasiment plane. Cette approximation dépend de la taille du transducteur, de la longueur d'onde émise et de la distance du point d'émission au point de détection. Autres causes possibles de ces erreurs d'atténuations, provient des phénomènes de *diffraction* qui peuvent intervenir, surtout lorsque la longueur d'onde devient comparable au diamètre du transducteur. Pour résoudre ce problème on utilise en général, des dimensions relativement grandes devant la longueur d'onde. Une autre difficulté typique sur les mesures de l'atténuation de l'amplitude des ondes ultrasonores, concerne les problèmes de *couplage* entre le transducteur et le liquide analysé. Ces difficultés peuvent nous obliger de travailler, avec l'atténuation du premier écho durant le reste du travail.

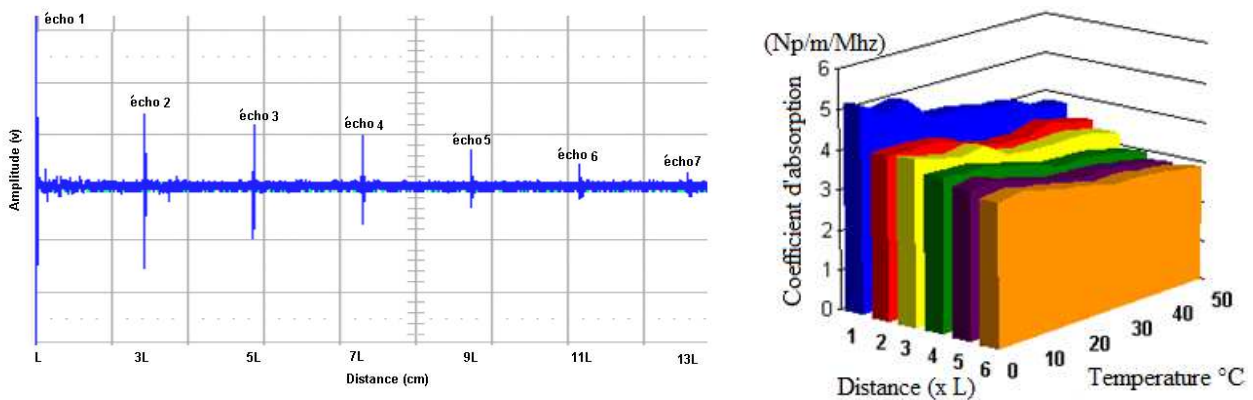


Fig. 7. Mesures de l'atténuation dans l'huile d'argan en fonction de T° et la distance

L'atténuation dans l'huile d'Argan diminue lorsque la température augmente, et cela peut nous informer sur l'évolution de la viscosité de cette huile en fonction de la température. Cette viscosité a été mesurée aussi (à l'aide du 1^{er} écho) en faisant varier la fraction volumique φ du tournesol mélangé avec l'argan à $T=23^\circ\text{C}$. Les résultats sont présentés sur la figure 8.

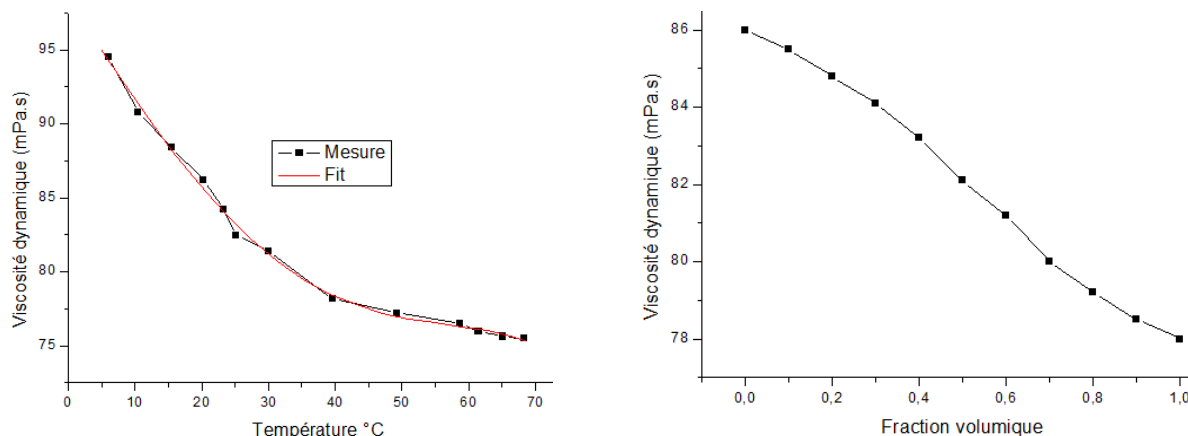


Fig. 8. Mesures de la viscosité dynamique d'Argan en fonction de T° et la fraction volumique du tournesol

D'après ces résultats, des informations utiles sont extraites ; la viscosité dynamique diminue d'une manière relativement linéaire en fonction de la fraction (ϕ), et exponentiellement en fonction de la température selon le modèle polynomial de l'équation (21). Les coefficients de ce modèle sont donnés sur le tableau 7, ils sont mesurés avec des erreurs relatives minimales.

$$\xi = C_0 + C_1.T + C_2.T^2 + C_3.T^3 + C_4.T^4 \tag{21}$$

Tableau 7. Coefficients du modèle polynomial de la Viscosité dynamique d'Argan

Parameters	Valeur	Erreur
C ₀	98,38396	1,24094
C ₁	-0,67308	0,20989
C ₂	-0,00183	0,011
C ₃	2,30263E-4	2,1928E-4
C ₄	-1,92259E-6	1,46798E-6

La diminution de la viscosité dynamique de l'argan est de l'ordre de (2 mPa.s) pour une augmentation de 60°C en température. Cette variation de viscosité représente 23,5% par rapport à la viscosité moyenne qui de l'ordre de (84 mPa.s). En revanche, lorsque la fraction volumique du tournesol dans l'Argan augmente d'environ 10%, une diminution de la viscosité du mélange diminue de (0,08 mPa.s) ce qui représente d'environ 0,1% par rapport à la viscosité de l'argan.

Avec cette méthode, il n'est pas facile d'effectuer des mesures sur des échantillons très atténuants. Toute l'énergie est absorbée dans le parcours multiple à l'intérieur du milieu analysé sauf si on diminue la longueur de la trajectoire des ondes. Les corrections doivent être envisagées comme les corrections de diffraction et de couplage aux diverses interfaces. Ces corrections sont clarifiées à l'aide d'un bon étalonnage du système de mesure. Lorsque l'absorption du milieu étudié est trop importante (un seul écho observable) ou lorsque les échos d'ordre supérieur sont affectés par la diffraction, la méthode pulsionnelle ne fournit alors que la variation relative de la l'absorption en fonction de la température.

5 CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons mesuré, pour la première fois, une base de données de la vitesse et l'atténuation des ondes ultrasonores, dans l'huile d'Argan, en fonction de la température et de la fraction volumique des mélanges avec l'huile de tournesol. Nous avons également expertisé ces mesures pour trouver que la relation entre la vitesse ultrasonore et la fraction volumique du mélange, est une fonction croissante et linéaire. En effet, nous avons prouvé que la technique

ultrasonore, est capable de détecter la présence des concentrations d'huile de tournesol dans celle d'argan. Par la suite, nous avons montré que cette technique peut indiquer le changement de phase des acides gras majoritaires dans l'huile d'argan.

Nous avons aussi effectué un banc de mesures de l'atténuation des ondes ultrasonores dans ces huiles pour des différentes températures et concentrations. Des résultats intéressants ont été trouvés qui permet de déterminer expérimentalement des lois qui relient la viscosité et d'autres paramètres mesurés tels que l'atténuation, la température et la concentration de l'huile de tournesol dans l'argan. D'autres travaux de recherche sont en cours pour expertiser cette technique pour contrôler autres produits alimentaires comme le lait et ses dérivées, les jus et les boissons alimentaires, ainsi qu'elle peut être exploitée dans plusieurs domaines, en particulier dans la détection des fraudes.

REFERENCES

- [1] Jean-Paul Mathiew, « Vibration et phénomènes de propagations », Tome II, PP 22 Edition Masson.
- [2] G. C. Gaunard-Applied, « Elastic and Acoustic resonance wave scattering »- Mechanics Reviews, 42 143 (1989).
- [3] R. J. Urick, A sound velocity method for determining the compressibility of finely divided substances, J. Appl. Phys. 18 (1947) 983-987.
- [4] Boukhobza, M., Pichon, P., « L'arganier, ressource économique et médicinale pour le Maroc ». Phytotherapy 27, (1988).
- [5] R. J. Urick, The absorption of sound in suspensions of irregular particles, J. Acoust. Soc. Am. 20 (3) (1948) 283-289.
- [6] A. Schröder, « Applications de techniques ultrasonores à l'étude de milieux diphasiques formes d'inclusions sphériques dans une matrice continue », Thèse de doctorat de l'Université LOUIS PASTEUR de Strasbourg 1, (1996).
- [7] A.B. Bhatia, Ultrasonic Absorption, An Introduction to the Theory of Sound Absorption and Dispersion in Gases, Liquids and Solids, Dover Pub. Inc., New York (1967).
- [8] M. J. W. Povey, ultrasonic techniques for fluides characterization, Academic Press, USA, (1997).
- [9] V. Vand, Viscosity of solutions and suspensions, J. Phys. Colloid. Chem. 52 (1948) 277- 321.
- [10] T. E Gómez Alvarez-Arenas, L. Elvira segura, E. Riera Franco de Sorabia, « Characterization of suspensions of particules in water by ultrasonic resonant celle », Ultrasonics 39(2002) 715-727.
- [11] A. H. Harker, J.A.G. Temple, Velocity and attenuation of ultrasound in suspensions of particles in fluids, J. Phys. D : Appl. Phys. 21 (1988) 1576-1588.
- [12] A. H. Harker, P. Schofield, B.P. Stimpson, R.G.Taylor, J.A.G. Temple, Ultrasonic propagation in slurries, Ultrasonics 29 427-438, (1991).
- [13] A. Malaoui, K. Quotb, M. Benhayoun, M. Ankrim , "Development of a data-processing tool using the G programming, for the Mediterranean water with the acoustic spectroscopy characterization", Phys. Chem. News **21**, 63-72, (2005).
- [14] M. J. W. Povey, "Ultrasonic techniques for fluides characterization", Academic Press, USA, (1997).
- [15] A. Malaoui, K. Quotb, M. Ankrim and M. Benhayoun, "Accurate temperature control of a ultrasonic cell using a microcontroller," Industrial Electronics, 2004 IEEE International Symposium on, pp. 213-215 vol. 1, (2004).
- [16] A. Malaoui, « Automatisation en température par microcontrôleur d'un banc de mesure ultrasonore : Application au contrôle qualité en agroalimentaire ». Thèse de doctorat, Université de Provence, (2005).
- [17] Vincent Reys, « Propriétés Dynamiques de certains fluides ordonnées », Thèse de doctorat, Univ. Louis Pasteur (1990).
- [18] Acoustique des milieux poreux; T. BOURBIE O. COUSSY Editions Technique 27 rue Ginoux 75737 PARIS CEDEX 15.
- [19] Charrouf, M. « Contribution à l'étude chimique de l'huile d'Arganiaspinosa (L.) (sapotaceae)". PhD Thesis, (1984).
- [20] R.J. Urick, "The absorption of sound in suspensions of irregular particles", J. Acoust. Soc. Am. 20, 283-289, (1948).
- [21] A. Malaoui, K. Quotb, K. Auhmani, M. Ankrim and M. Benhayoun, "An accurate electronic device for ultrasonic measurements using a microcontroller," Industrial Technology, 2004. IEEE ICIT '04. 2004 IEEE International Conference on, 2004, pp. 1432-1437 Vol. 3.