HAL open science

Nouvelle technique magnéto-acoustique à ondes de cisaillement pour la caractérisation de fluides visqueux

Nicolas Wilkie-Chancellier, Yohan Le Diraison, Emmanuel Caplain, Stéphane Serfaty, Jean-Yves Le Huérou

To cite this version:

Nicolas Wilkie-Chancellier, Yohan Le Diraison, Emmanuel Caplain, Stéphane Serfaty, Jean-Yves Le Huérou. Nouvelle technique magnéto-acoustique à ondes de cisaillement pour la caractérisation de fluides visqueux. 10ème Congrès Français d'Acoustique, Apr 2010, Lyon, France. hal-00537204

HAL Id: hal-00537204

https://hal.science/hal-00537204v1

Submitted on 17 Nov 2010

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

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

10ème Congrès Français d'Acoustique
Lyon, 12-16 Avril 2010

Nouvelle technique magnéto-acoustique à ondes de cisaillement pour la caractérisation de fluides visqueux

N. Wilkie-Chancellier, Y. Le Diraison, E. Caplain, S. Serfaty, J.-Y. Le Huérou

Laboratoire Systèmes et Applications des Technologies de l'Information et de l'Energie (SATIE),
Université de Cergy-Pontoise, ENS Cachan, UMR CNRS 8029, 5 Mail Gay Lussac, F-95000 Cergy-Pontoise, nicolas.wilkie-chancellier@u-cergy.fr

Les matériaux hybrides organique - inorganique synthétisés par "chimie douce" représentent une alternative intéressante dans la conception de nouveaux matériaux. Pour les optimiser, le contrôle de la viscosité dans les premiers instants de formation est primordial. A ce jour, seule une technique ultrasonore utilisant un transducteur de cisaillement permet d'assurer un suivi complet du matériau. Il nécessite néanmoins une excitation filaire peu adaptée à une utilisation industrielle. Ce travail présente une nouvelle technique magnéto acoustique radiofréquence et un modèle approprié permettant de caractériser les propriétés visqueuses de ces matériaux. Cette technique ultrasonore utilise un nouveau capteur conçu pour fonctionner dans une large gamme de fréquences (1 - 200 MHz). Celui-ci est constitué d'un support piézoélectrique et d'un circuit rayonnant auto résonant à fort coefficient de qualité excité par induction. Le suivi de l'impédance électrique induite de ce résonateur permet de caractériser le matériau en contact. La première partie présente le modèle électrique équivalent approprié permettant d'extraire les propriétés mécaniques du matériau. On montre que le décalage de la fréquence de résonance et l'amortissement liés aux propriétés viscoélastiques du matériau peuvent être représentés par une inductance (L_i) et une résistance (R_i) induites équivalentes supplémentaires. Différents liquides de viscosité connue (mélanges eau - glycérol) ont, ensuite, été étudiés afin de valider le modèle. On montre que les paramètres R_i et L_i sont liés à la racine carrée du produit viscosité - masse volumique du liquide. Ces résultats concordent avec les travaux de Martin et de Kanazawa qui ont couplé l'onde de cisaillement d'une microbalance à quartz à l'onde amortie dans un liquide. Ils laissent présager que cette technique pourra être utilisée pour mesurer les propriétés viscoélastiques de matériaux hybrides au cours de leur formation.

1 Introduction

Le procédé Sol-Gel (SG) est couramment utilisé pour élaborer, au travers de réactions de "chimie douce", une grande variété de matériaux aux propriétés spécifiques [1]. Basé sur des réactions de polymérisation inorganique, ce procédé permet l'élaboration de nouveaux matériaux pouvant être hybrides organique-inorganique grâce à leur élaboration à une température proche de l'ambiante. De nombreuses applications dans les domaines optiques [2] ou celles nécessitant une bioencapsulation [3], sont ainsi développées. Pour optimiser l'élaboration de ces matériaux, le contrôle des paramètres viscoélastiques et électriques au cours de la transition de phase (de la phase sol à la phase gel) peut s'avérer être pertinent. Des méthodes rhéologiques à basses fréquences (inférieures à quelques kHz) peuvent être utilisées. La méthode la plus courante utilise la rhéologie de Couette (typiquement entre 0,1 et 10 Hz). Elle ne permet néanmoins de contrôler le processus qu'autour du temps de gel, c'est-à-dire, à proximité de la forte augmentation de la viscosité [4]. Plus récemment, une technique de mesure acoustique dans le domaine audible (50 - 10000 Hz) donne également accès au même temps de gélification [5]. Toutefois, en raison des fortes variations du module complexe de cisaillement G^* au cours de la formation de ces gels, ces méthodes ne permettent pas un suivi complet sans changer de dispositif. De plus, on accède avec ces techniques à une information macroscopique alors que l'optimisation des propriétés finales du matériau nécessite également de suivre l'évolution de leur nanostructure. L'évolution des propriétés diélectriques des matériaux hétérogènes est également importante pour accéder à une compréhension plus approfondie des procédés de fabrication. La prévision à priori des propriétés diélectriques de ces milieux demeure également un problème. En effet, la connaissance fondamentale des mécanismes de polarisation de la matière condensée hétérogène constituant ces milieux est loin d'être complète. Par exemple, le traitement approprié de l'anisotropie et de l'inhomogénéité spatiale n'est toujours pas maîtrisé. Pourtant une compréhension des liens entre la structure du matériau et les propriétés électromagnétiques macroscopiques fournirait des informations pertinentes sur l'arrangement spatial des macromolécules et sur leurs interactions [6].

Notre laboratoire a donc cherché à développer des techniques assurant un suivi des caractéristiques mécaniques et électriques de ces matériaux à une échelle microscopique. Les techniques développées utilisent des méthodes ultrasonores à ondes de cisaillement et à induction radiofréquences. Parmi les techniques ultrasonores, la plus adaptée au suivi des matériaux à transition de phase utilise un résonateur piézoélectrique à quartz de coupe AT (TSM) [7]. Avec un modèle électrique approprié, cette technique permet d'extraire G^* à hautes fréquences [8] en tenant compte de l'évolution électrique des gels.

Pour effectuer à terme un suivi simultané des propriétés diélectriques et mécaniques, nous proposons un nouveau système magnéto-acoustique. Dans cet article, nous présentons d'abord l'architecture auto-résonnante du nouveau capteur magnéto-acoustique. Elle permet de

rayonner un champ magnétique radiofréquence relativement intense tout en générant un mouvement de cisaillement. Une description de la technique de mesure est ensuite présentée. Cette technique est particulièrement originale car elle permet simultanément d'exciter le capteur et de caractériser le matériau par induction. A cet effet un modèle d'extraction des propriétés viscoélastiques d'un matériau en contact avec le capteur est proposé. Enfin, une étude préliminaire sur différents mélanges eau-glycérol de viscosité contrôlée est réalisée afin d'évaluer l'efficacité de la mesure de viscosité.

2 Présentation du capteur magnéto-acoustique à ondes de cisaillement

L'évolution simultanée, à l'échelle de la macromolécule, des propriétés électriques et mécaniques des gels en formation, justifie l'utilité d'un capteur sensible aux deux effets. Une nouvelle génération de capteurs est actuellement à l'étude dans notre laboratoire pour réaliser ce type de caractérisation. Cette famille de capteurs a la particularité de récupérer, à l'image du résonateur TSM, les évolutions rhéologiques du matériau en contact par l'intermédiaire d'une excitation à distance. Compte tenu du champ magnétique rayonné, ce type de capteur doit permettre, à terme, d'étudier simultanément l'évolution des propriétés diélectriques du matériau.

L'utilisation de capteurs couplant les effets électromagnétiques et mécaniques dans le domaine du contrôle non destructif n'est pas nouvelle [9, 10, 11]. Différents transducteurs à ondes de surface et à ondes de volume, de la famille des Transducteurs ou capteurs ElectroMagnétiques Acoustiques ou Ultrasonores (EMAT/EMUS), sont en effet particulièrement appréciés pour leur fonctionnement sans contact. Pourtant, aucune technique utilisant ces transducteurs ne permet de suivre les propriétés viscoélastiques hautes fréquences de matériaux complexes.

2.1 Principe de fonctionnement du résonateur RF

L'architecture du transducteur à excitation sans contact s'approche de celle d'un capteur de surface développé pour l'imagerie de la peau par RMN [12]. Le capteur est formé de deux bandes conductrices parallèles circulaires, multi-tours, et séparées par un diélectrique à faibles pertes.

On crée ainsi une ligne de transmission dont les conditions de résonance sont données par la relation suivante [13] :

$$\frac{L\,\omega_0}{4\,Z_0}\tan\left(\frac{\omega_0\sqrt{\varepsilon_d}\,l_m}{4\,c}\right)=1 \qquad (1)$$

où ω_0 est la pulsation de résonance, L est l'inductance équivalente du système à deux bandes, Z_0 est l'impédance caractéristique de la ligne de transmission (dépendant de la largeur de chaque bande, de l'épaisseur du diélectrique et de la permittivité du diélectrique ε_d), l_m constitue la longueur moyenne de la ligne, c est la vitesse de la lumière dans le vide.

Afin d'observer cette condition de résonance, la ligne de transmission concentrique doit être ouverte et déséquilibrée de sorte que les courants dans les bandes de chaque face du diélectrique soient déphasés les uns par rapport aux autres. Pour y parvenir, les fentes délimitant les extrémités des bandes enroulées sont diamétralement opposées (voir figure 1).

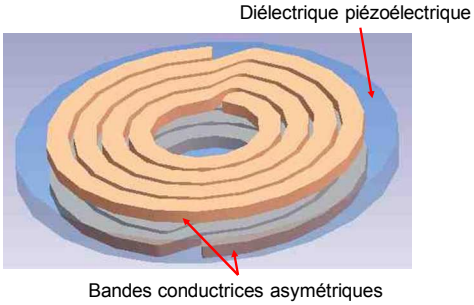

Figure 1 : Résonateur radiofréquence à induction magnétique.

Compte tenu de l'absence de contact, le facteur de qualité est uniquement inversement proportionnel aux pertes diélectriques. Par conséquent, si le diélectrique est à faibles pertes, ce facteur de qualité peut être important. En utilisant du Cuflon, le facteur de qualité observé à la température ambiante atteint une valeur proche de 1000 dans la bande de fréquence 1-200 MHz.

2.2 Adaptation du capteur à la rhéologie

Pour que ce capteur puisse générer des ondes de cisaillement, le diélectrique qui sépare les deux circuits peut être remplacé par un matériau piézoélectrique. Celui-ci permet, simultanément, d'ajuster la fréquence de résonance électromagnétique et d'assurer la transduction électrique-mécanique. Dans ce cas, le matériau piézoélectrique ne doit pas uniquement être choisi en fonction de ses propriétés piézoélectriques mais également en fonction de ses propriétés diélectriques.

Pour rendre homogène le champ magnétique dans la zone d'investigation, assurant dans le même temps un mouvement de cisaillement uniforme du matériau piézoélectrique, une architecture proche de celle des bobines de Helmholtz a été utilisée [14]. Ce travail d'optimisation a consisté à coupler deux résonateurs RF (présenté dans la figure 1) séparés par un film en PolyVinylidene DiFluoride (PVDF) (voir figure 2).

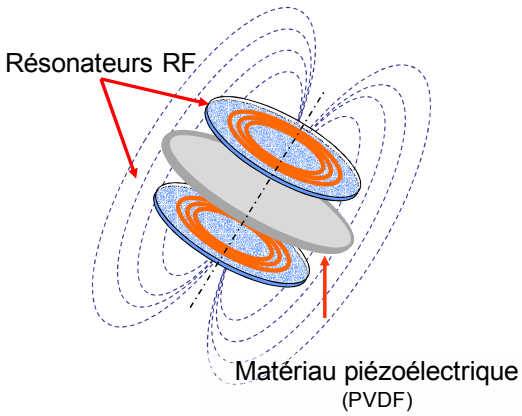

Figure 2 : Capteur magnéto-acoustique à ondes de cisaillement.

La distance de couplage et les dimensions des résonateurs ont été choisies en fonction de la répartition des champs électriques dans le PVDF et du mode d'excitation privilégié. Le diamètre extérieur des résonateurs est de 40 mm. Le nombre de tours a été fixé à 4 et la largeur des

bandes fait 2 mm. L'épaisseur du diélectrique en Cuflon est de 254 µm (soit 10 mils).

La fréquence de résonance du capteur dépend des fréquences de résonance de chacun des résonateurs et du coefficient de couplage k. Afin d'assurer un courant identique dans les deux résonateurs, ces derniers doivent avoir la même fréquence de résonance f_{01}. On peut alors montrer que la fréquence de résonance résultante f_0 est donnée par :

$$f_0 = f_{01} \Big/ \sqrt{1+k}\,.$$

La fréquence de résonance de chaque résonateur étant de 44 MHz, on observe une fréquence de résonance du capteur de 32,4 MHz. Compte tenu du couplage, ce résultat permet également de confirmer que les dimensions des résonateurs ont été optimisées afin d'atteindre un couplage maximum à cette distance et donc un déplacement maximum [14]. Notons néanmoins que compte tenu de l'angle de pertes diélectrique relativement fort du PVDF ($tan\ \delta = 0,25$) par rapport à celui du Cuflon, cette configuration optimale entraine une diminution maximum du coefficient de qualité.

3 Résultats et discussion

3.1 Technique de mesure par induction

Le capteur est excité par une sonde, circulaire et faiblement couplée. Cette sonde est également utilisée pour mesurer la réponse du capteur (voir figure 3). Dans le cas d'un faible couplage entre la sonde et le capteur, on peut montrer que leurs interactions dépendent de la surface de la sonde et du rapport quadratique entre le champ magnétique induit et le courant d'excitation (dans la sonde) [15]. Les modifications du champ magnétique induit par le capteur mis à proximité de la sonde impliquent alors par réciprocité des modifications des propriétés de la sonde. Une mesure d'impédance, vue de l'entrée de la sonde, permet, dans ce cas, de caractériser le capteur en présence ou non du matériau.

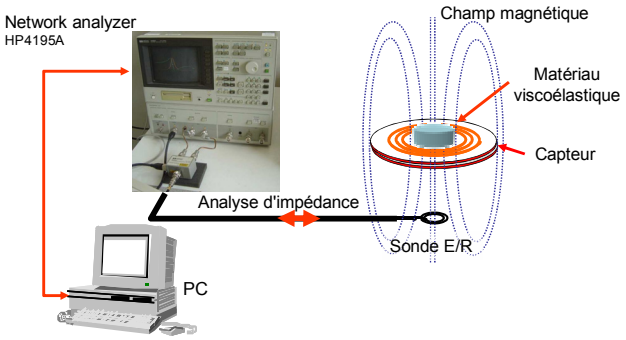

Figure 3 : Système de mesure sans contact.

3.2 Modélisation des interactions sonde-capteur

Les interactions du couple sonde/capteur sont purement inductives. Le couplage entre la sonde et le capteur peut donc être représenté par un transformateur, de mutuelle inductance M, dont le primaire est la sonde (inductance avec pertes) et le secondaire est le capteur chargé par le matériau viscoélastique ou non. Le schéma équivalent de l'ensemble "sonde/capteur chargé" est donc celui de la figure 4.

L'impédance vue à l'entrée est alors donnée par :

$$Z_e = Z_p + \frac{M^2\omega^2}{Z_s + \eta_V Z_i} \qquad (2)$$

où Z_p est l'impédance équivalente de la sonde, Z_s est l'impédance du capteur (à vide) et M la mutuelle inductance entre la sonde et le capteur. Les éléments équivalents L_s, C_s et R_s sont respectivement l'inductance, le condensateur et la résistance intrinsèque du capteur à vide. Z_i est représentatif des effets liés au matériau déposé sur le piézoélectrique du capteur.

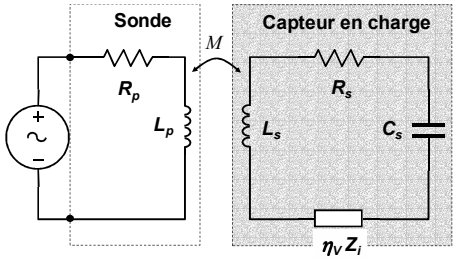

Figure 4 : Représentation électrique du système sonde/capteur en présence du matériau.

Dans notre configuration, l'évolution de la réponse du capteur en présence du matériau ne suffit pas pour déterminer les propriétés mécaniques du milieu. Le matériau étant faiblement conducteur, il faut distinguer l'énergie magnétique créée dans le volume du milieu étudié, de l'énergie magnétique créée à l'extérieur de ce volume. Le coefficient de remplissage η_V ($\eta_V < 1$) permet de quantifier cette notion [16]. Il tient compte des courants induits dans le matériau en présence du champ magnétique. En considérant, dans ce travail préliminaire, que les propriétés électriques et le volume des matériaux étudiés sont constants, il est alors possible de relier $\eta_V Z_i$ aux propriétés viscoélastiques.

En effet, différentes approches développées dans la littérature permettent de modéliser le comportement d'un résonateur piézoélectrique chargé. Elles utilisent une représentation équivalente constituée soit d'une ligne de transmission mécanique [17], soit d'un circuit électrique à éléments localisés autour de la fréquence de résonance [18]. Cependant, la validité de ces équivalences dépend de la nature du matériau en contact avec le quartz. Cela limite donc l'utilisation de ce dispositif à la caractérisation des liquides viscoélastiques ou des gaz [19].

Afin d'extraire les propriétés mécaniques du matériau en contact avec le capteur magnéto-acoustique, on peut décrire le lien entre l'impédance électrique du capteur en charge (*i.e.* en présence du matériau) et l'impédance mécanique. A la surface de contact, cette impédance s'exprime par le rapport entre la contrainte appliquée et la vitesse de déplacement au niveau de l'électrode. Ceci explique, d'une certaine manière, que les conditions de résonance du capteur soient modifiées par les caractéristiques du matériau en contact. Une description macroscopique des interactions permet de distinguer deux effets : un effet d'inertie qui est décrit par Sauerbrey [20] pour la microbalance à quartz chargée par un film mince parfaitement rigide, et un effet lié aux propriétés viscoélastiques du matériau en contact. Cet effet est mesurable en excitant sinusoïdalement le capteur. Si l'on ne tient compte que des effets liés à la propagation de l'onde ultrasonore ainsi générée, l'impédance mécanique à la

surface de l'électrode est alors celle de l'impédance caractéristique du matériau, soit :

$$Z_m = \sqrt{\rho_{mat}\, G^*(\omega)} \qquad (3)$$

où ρ_{mat} est la masse volumique du matériau en contact.

Dans le cas d'un fluide newtonien (*i.e.* liquide uniquement visqueux), $G^*(\omega)$ ne dépend que de la viscosité dynamique η et de la fréquence d'excitation. Les parties réelle et imaginaire de l'impédance caractéristique sont alors égales et l'expression précédente devient :

$$Z_m = \sqrt{\frac{\rho_{mat}\,\omega\,\eta}{2}}\,(1+j) \qquad (4)$$

La charge peut alors être modélisée, d'un point de vue électrique, par une résistance en série avec une inductance [21, 22]. Cette équation laisse de ce fait présager une diminution du coefficient de qualité du résonateur et un décalage de la fréquence de résonance lorsque l'élément piézoélectrique est chargé par un liquide. Conformément à l'expression fréquemment utilisée et décrite par Kanazawa et Gordon pour les microbalances à quartz [23], le décalage de la fréquence de résonance, dans le cas des fluides faiblement visqueux, devrait donc s'écrire :

$$\Delta f \approx K\sqrt{\rho_{mat}\,\eta} \qquad (5)$$

3.3 Mesures de la réponse du capteur en contact avec des fluides newtoniens de viscosité différente

L'objectif de l'étude est d'évaluer qualitativement l'évolution de la réponse du capteur en fonction de la viscosité. Une série de mesures de validation a donc été réalisée lorsque le capteur magnéto-acoustique a été chargé par un mélange eau-glycérol de concentration de glycérol contrôlée (entre 0 et 80% de glycérol dans l'eau). Les caractéristiques de ces mélanges eau - glycérol, c'est-à-dire la masse volumique ρ (en kg.L^{-1}) et la viscosité dynamique η (en mPa.s), sont parfaitement connues et tabulées. La Table 1 décline les caractéristiques mécaniques des fluides à 20°C. La quantité de glycérol dans l'eau est donnée par le rapport massique $x_{m,gly}$ défini par :

$$x_{m,gly} = \frac{m_{gly}}{m_{gly} + m_{eau}} \times 100 \qquad (6)$$

où m_{gly} et m_{eau} sont respectivement les masses de glycérol et d'eau. Notons ainsi que $x_{m,gly}$=0% correspond à de l'eau sans glycérol et que $x_{m,gly}$=100%.correspond à du glycérol sans eau.

En outre, la propriété électrique de ces matériaux reste constante pour une température donnée.

$x_{m,gly}$ (%)	ρ_{mat} (kg.L^{-1})	η (mPa.s)	$\sqrt{\rho_{mat}\,\eta}$ (kg.m^{-2}.s$^{-1/2}$)
0	1	1,005	1,002
40	1,100	3,720	2,023
50	1,127	6,000	2,600
70	1,182	22,500	5,157
77	1,199	48,173	7,599

Table 1 : Caractéristiques des fluides utilisés, constitués d'un mélange de glycérol dans l'eau, à 20°C.

Une mesure systématique de l'impédance électrique aux bornes de la sonde a été réalisée en déposant, au centre du capteur et sur le PVDF, 150 µL de mélange à 20°C.

Afin de mesurer la réponse du capteur, on réalise au préalable une opération de compensation de l'impédance de la sonde Z_p. D'après l'équation 2, cette opération nous permet de mesurer l'impédance suivante :

$$Z_{mes} = \frac{M^2\omega^2}{Z_s + \eta_V\, Z_i} \qquad (7)$$

La mesure est alors directement proportionnelle à l'admittance du capteur en charge. La figure 5 représente, dans le plan complexe, Z_{mes} aux bornes de la sonde pour différents fluides.

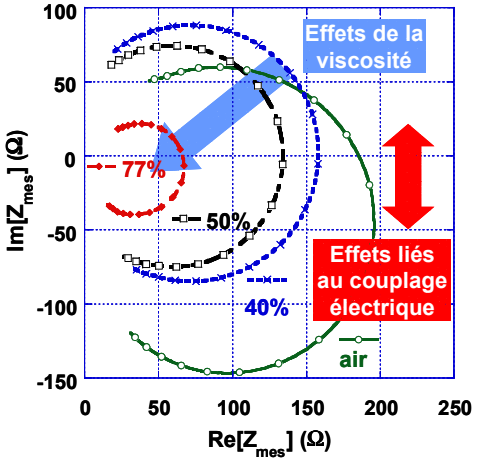

Figure 5 : Réponse du couple sonde/capteur pour différents mélanges eau - glycérol.

Quel que soit le pourcentage de glycérol dans l'eau, la réponse du couple capteur/sonde est fidèle à la réponse habituellement obtenue pour un résonateur. En effet, dans le plan complexe, les mesures autour de la résonance du capteur constituent des cercles dont le centre et le rayon évoluent en fonction du couplage électrique et des propriétés mécaniques. Les fluides utilisés ayant une conductivité constante proche de celle de l'eau, on peut clairement distinguer que les effets liés au couplage électrique entrainent une modification verticale du centre du cercle. En revanche, un changement de viscosité du fluide déposé entraine essentiellement une réduction du rayon du cercle.

Puisque les fluides déposés sur le PVDF sont newtoniens, la mesure de la partie réelle de l'impédance suffit pour déduire l'effet de la viscosité sur la variation de fréquence et sur les pertes du résonateur (voir figure 6).

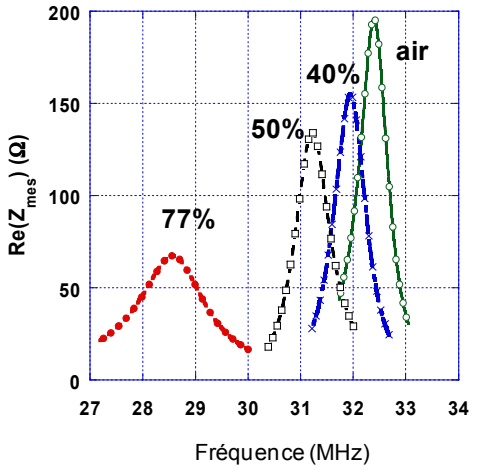

Figure 6 : Partie réelle de l'impédance mesurée après compensation pour différents mélanges eau – glycérol.

La masse volumique des différents mélanges évoluant très faiblement en fonction de la concentration de glycérol (écart maximum de 17%), on peut noter que la résistance induite liée au capteur est surtout affectée par la variation de viscosité. Ce constat peut être observé dans figure 6 au regard de la diminution de l'amplitude et de l'augmentation de la largeur des pics de résonance. L'augmentation de la viscosité affecte également la fréquence de résonance.

3.4 Étude de l'évolution de la fréquence et du coefficient de qualité en fonction de la viscosité

A partir des mesures du capteur à vide puis en charge, on peut accéder facilement à la variation de fréquence en fonction des propriétés mécaniques. La figure 7 présente les résultats observés pour différents mélanges eau-glycérol.

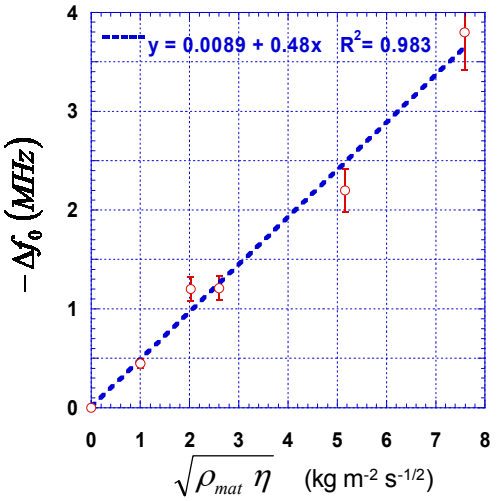

Figure 7 : Variation de fréquence de résonance du capteur magnéto - acoustique en fonction de la viscosité.

Ces résultats montrent une bonne corrélation entre la variation de fréquence et la viscosité du produit. Conformément au modèle présenté au paragraphe 3.2, la présence du fluide à la surface du matériau piézoélectrique modifie le mouvement de cisaillement. Les données expérimentales obtenues peuvent être ajustées par une droite de régression linéaire d'équation :

$$y = 0{,}48\ x + 89.10^{-4} \qquad (8)$$

Si l'on compare ces résultats avec l'équation 5, cette droite de régression linéaire nous permet d'obtenir un coefficient $K \approx 0.48$. Ce coefficient tient compte à la fois des facteurs de couplages électromagnétiques et piézoélectriques. Notons que la valeur de la constante (non nulle puisque qu'égale à 89 10^{-4}) s'explique par le fait qu'il existe des courants induits dans le fluide qui perturbent le champ magnétique rayonné par le couple sonde/capteur. Une étude plus approfondie de ces interactions doit permettre de remonter également aux propriétés électriques du matériau en contact.

Il est également possible de remonter aux propriétés de viscosité du fluide à partir de la variation des pertes induites dans le capteur. Un des moyens de mesure relativement fiable permettant de remonter à ces pertes est de mesurer le facteur de qualité du capteur à vide puis en charge. La figure 8 montre la variation du facteur de qualité en fonction du fluide déposé.

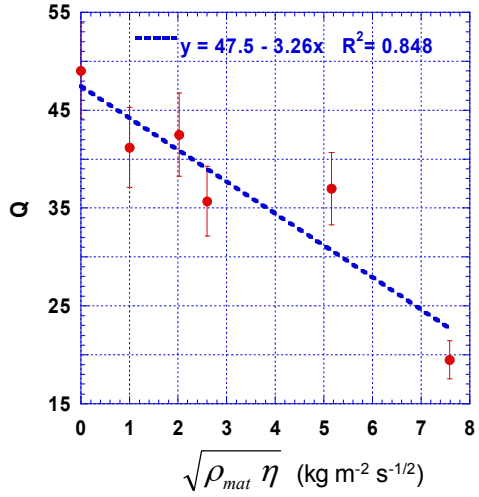

Figure 8 : Variation du facteur de qualité électrique du capteur magnéto - acoustique en fonction de la viscosité.

Bien que les valeurs observées soient relativement bruitées, on peut constater qu'il existe une relation linéaire entre les pertes induites dans le capteur et $\sqrt{\rho_{mat}\,\eta}$.

Une étude plus approfondie devrait permettre de mesurer ces pertes au travers de la variation de résistance électrique induite dans le capteur. Pour extraire correctement cette résistance induite, il est préférable de tenir compte de la partie réelle et imaginaire de l'impédance mesurée.

4 Conclusion

Au contact d'un fluide visqueux, la réponse électrique du capteur magnéto-acoustique est analogue à celle du capteur TSM à quartz. Elle est représentative de l'impédance mécanique du matériau et donc des caractéristiques viscoélastiques dynamiques. Les résultats pour des mélanges eau-glycérol ont montrés la capacité de ce capteur à mesurer la viscosité dynamique. Ces résultats, particulièrement encourageants, laissent présager la possibilité de caractériser à distance des matériaux viscoélastiques, à l'aide de capteurs à excitation sans contact.

Ce type d'architecture peut, par exemple, être implanté sur un élément piézoélectrique en quartz pour obtenir des EMAT de cisaillement, particulièrement sélectifs, dont les effets liés à la connectivité et à la fixation sont supprimés. Leur aptitude à mesurer les effets diélectriques et à transmettre les informations par induction augmente considérablement le champ des applications potentielles.

L'utilisation d'EMAT pour accéder à l'évolution des paramètres viscoélastiques et diélectriques devrait permettre l'optimisation et le suivi de matériaux plus complexes. De nombreuses applications peuvent alors être envisagées aussi bien dans le domaine médical, environnemental, agroalimentaire ou pour le diagnostic moléculaire.

5 Références

[1] Brinker C.J. and Scherer G.W, Sol-gel Science, academic press, San Diego, 1990.

[2] Klein L.C., "in Sol Gel optics : Processing and Applications", *Kluwer International Series in Engeineering and Computer Science*, 259, (1994).

[3] Gill I., "Bio-doped Nanocomposite Polymers: Sol−Gel Bioencapsulates", *Chem. Mater.*, 13/10, 3404–3421 (2001).

[4] Winter H.H. and Chambon F., " Analysis of linear viscoelasticity of a crosslinking polymer at the gel point", *J. Rheol.*, 30/2, 367-382 (1986).

[5] Serfaty S., Griesmar P., Gindre M., Gouedard G., Figuiere P., "An acoustic technique for investigating the sol-gel transition", *J. of Materials Chemistry*, 8/10, 2229-2231 (1998).

[6] Asami K., "Characterization of heterogeneous systems by dielectric spectroscopy," *Progress in Polymer Science*, 27, 1617–1659 (2002).

[7] Cernosek R.W. et al., *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 45, 1399-1407 (1998).

[8] Ould Ehssein C., Serfaty S., Griesmar P., Le Huérou J.-Y., Martinez L., Caplain E., Wilkie-Chancellier N., Gindre M., "Kinetic study of silica gels by a new rheological ultrasonic investigation", *Ultrasonics*, 44, 881-885 (2006).

[9] Hohr W., Repplinger W., "Contactless EMA-Excitation of Ultrasonic Bulk Waves", *Materialpruf.*, 20/4 et 20/6 : 147-154 et 221-225 (1978).

[10] Alers G. A., "Noncontact Ultrasonic Testing with Electromagnetic Transducers", *Handbook of Intelligent Sensors for Industrial Automation*, Chap. 17, 285-306 (1992).

[11] Palmer S. B., Dixon S., "Industrially viable non-contact ultrasound", *Bint*, 45/3, 211-217 (2003).

[12] Serfaty S., Haziza N., Kan S., Darasse L., "Multi-Turn Split-Conductor Transmission-Line Resonator", *Magn. Reson. Med.*, 38, 687-689 (1997).

[13] Gonord P., Kan S., Leroy-Willig A., "Multigap Parallel-Plate Bracelet Resonator Frequency Determination and Applications", *Rev.Sci. Instrum.*, 65/11, 3363-3369 (1994).

[14] Serfaty S., Kan S., Darasse L., "Double-Bracelet Resonator Helmholtz Probe for NMR Experiments". *Rev. Sci. Instrum.*, 66/12, 5522-5526 (1995).

[15] Darrasse L. and Kassab G., "Quick measurement of NMR-coil sensitivity with a dual-loop probe", *Rev. Sci. Instrum.*, 64/7, 1841-1844 (1993).

[16] Hoult D.I., Richards R.E., "The signal to noise ratio of the nuclear Magnetic Resonance experiment", *J. Magn. Reson.*, 24, 71-85 (1976).

[17] Mason W. P., *Crystal physics of interaction process*, New York : Academic Press, 1966.

[18] Cernosek R. W., Martin S. J., Hillman A. R., Bandey H. L., "Comparison of Lumped-Element and Transmission-Line Models for Thickness-Shear-Mode Quartz Resonator Sensors," *IEEE Trans. UFFC,* 45/5, 1399-1046 (1998).

[19] Bandey H. L., Martin S. J., Cernosek R. W., "Modelling the Response of thickness-Shear Mode Resonators under Various Loading Conditions," *Analytical Chemistry,* 71, 2205-2214 (1999).

[20] Sauerbrey G., "(in. German) Verwendung von schwingquarzen zur wagung dünner schichten und für mikro-wagung (= The use of quartz oscillators for weighing thin layers and for microweighing)," *Z Phys,* 155, 206-222 (1959).

[21] Cernosek R. W., Martin S. J., Hillman A. R., Bandey H. L., "Comparison of Lumped-Element and Transmission-Line Models for Thickness-Shear-Mode Quartz Resonator Sensors," *IEEE Trans. UFFC,* 45/5, 1399-1046 (1998).

[22] Arnau A., Jimenez Y., Sogorb T., "Thickness-shear mode quartz crystal resonators in viscoelastic fluid media," *J. appl. phy.,* 88/8, 4498-4506 (2000).

[23] Kanazawa K.K., Gordon J.G., "Frequency of quartz microbalance in contact with liquid," *Analytical Chemistry*, 57, 1770-1771 (1985).