

PROJET DE RECHERCHE

1. Titre du Projet : ONDES DE SURFACE EN MILIEUX DISSIPATIFS.

2. Participants :

- **Stan Chiriță**, Faculté des Mathématiques, Université *Al. I. Cuza* Iași, Roumanie et Institut de Mathématiques *Octav Mayer* (Académie des Sciences), Iași, Roumanie ;
- **Alexandre Danescu**, Département Mécaniques des Solides, Ecole Centrale de Lyon, France et Institut de Nanotechnologies de Lyon - UMR CNRS 5270, Ecole Centrale de Lyon, France.

3. Description du projet

La collaboration entre les chercheurs participants à ce projet existe depuis quelques années. Les résultats obtenus se sont concrétisés par des publications communes [1], [2], [3]. L'intérêt scientifique commun dans ce projet est la modélisation mathématique de la propagation des ondes de surface en milieux dissipatifs.

Les matériaux dissipatifs jouent un rôle majeur dans plusieurs branches de l'ingénierie (le génie civil, le génie sismique, les nano-technologies et les bio-matériaux). Les résultats fondamentaux concernant les prédictions de leurs comportements sous différents types de chargements permettent une utilisation optimale, sûre et efficace. A titre d'exemple, la propagation d'ondes dans les milieux viscoélastiques et l'atténuation des ondes sismiques sont des résultats théoriques du premier ordre dans le domaine de la prospection géologique. A une toute autre échelle, le comportement macroscopique viscoélastique des matériaux micro et nano-poreux et leurs applications potentielles (barrière thermiques, protection mécanique contre l'impact, etc.) est étroitement lié à la réponse instantanée et dissipative, ainsi que la microstructure (forme, taille et connectivité des pores). Parmi les nombreuses applications des matériaux visco-élastiques on cite Polarz et Smarly [4] et les monographies Voyiadjis et Song [5], Park et Lakes [6], Lakes [7] et les références cités dans ces ouvrages.

L'archetype des ondes de surface sont les ondes de Rayleigh [8] qui se propagent à l'interface entre un demi-plan solide et le vide tout en gardant la surface du solide libre des contraintes. L'exemple le plus élémentaire dans le domaine du génie sismique sont les ondes engendrées par les tremblements de terre qui se propagent sur la surface terrestre, et qui sont parmi les plus destructrices. Une méthode mathématique classique à la fois élégante et puissante pour l'analyse des équations de l'élasticité anisotrope est le formalisme de Stroh (Destradre [9], Ting [10] et Norris et Shuvalov [11]). Il a été démontré que, dans le cadre de l'élasticité linéaire, l'anisotropie et l'hétérogénéité introduisent des comportements qualitativement nouveaux dans l'analyse de la propagation d'ondes de surface. Même si au premier abord les équations de l'élasticité semble impossible à résoudre, le problème au limite pour une onde de type Rayleigh est complètement

résolu, grace notamment à une formulation Hamiltonienne connue sous le nom de formalism de Stroh et d'un certain nombre d'outils algébriques avancées.

Ieşan [12–14] a proposé plusieurs modèles théoriques pour le comportement des matériaux poreux thermo-visco-élastiques, modèles basées sur un ensemble des variables indépendantes qui contient, parmi d'autres, les dérivées temporelles du tenseur des déformations, de la fraction volumique et de son gradient. Récemment, suivant le point de vue de Chadwick [18], Sharma et Kumar [15] (mais aussi Svanadze [16] et Tomar *et al.* [17]) ont étudié le problème de la propagation des ondes dans le cadre de la thermo-visco-élasticité. Dans le cas stationnaire, l'étude d'une onde harmonique de fréquence fixée se propageant dans un milieu poreux thermo-viscoélastique, conduit à des solution qui possèdent des energies infinies.

Dans le cadre du projet actuel on se propose de prendre en compte le caractère dissipatif des modelés thermo-visco-élastiques proposées par Ieşan [12-14] pour étudier le problème de la propagation des ondes de surface dans le cadre général d'un milieu anisotrope et inhomogène. La présence de l'énergie dissipée conduit les solutions de type ondes à une décroissance vers zéro. Ce résultat est en accord avec celui concernant la stabilité asymptotique (quand le temps tend vers l'infini) dans les matériaux avec mémoire (comme par exemple, Appleby *et al.* [19], Amendola *et al.* [20] et les références citées par ces auteurs). A partir de là, en suivant une méthode développée par Chiriță en [21, 22], on recherche des ondes planes harmoniques par rapport au temps dans la classe des champs amortis dans le temps. En particulier, pour le modèle thermo-visco-élastique proposé en [12] on prendra le déplacement, la fraction volumique et la variation de la température $\{u_r, \varphi, \theta\}$ sous la forme

$$\begin{aligned} u_r(\mathbf{x}, t) &= \operatorname{Re} \left\{ A_r e^{i\kappa(n_s x_s - vt)} \right\}, \\ \varphi(\mathbf{x}, t) &= \operatorname{Re} \left\{ B e^{i\kappa(n_s x_s - vt)} \right\}, \\ \theta(\mathbf{x}, t) &= \operatorname{Re} \left\{ C e^{i\kappa(n_s x_s - vt)} \right\}, \end{aligned}$$

où A_r , B et C sont des paramètres complexes, κ est le nombre d'onde (réel) et n_s sont les composantes d'un vecteur unitaire réel - la direction de propagation. La scalaire v est un paramètre complexe tel que $\operatorname{Re}(v) > 0$ donne la vitesse de propagation et $\exp[\kappa \operatorname{Im}(v) t]$ donne l'amortissement de l'onde dans le temps; on supposera donc que $\operatorname{Im}(v) \leq 0$.

La représentation ci-dessus pour les champs inconnues permet l'introduction d'une vitesse complexe. On établit ainsi la relation de dispersion qui met en évidence les effets des paramètres thermo-visco-élastiques, en mettant l'accent sur le lien entre la dissipation d'énergie et la propagation des ondes longitudinales et transversales. En particulier, cela conduit à une décroissance exponentielle vers zéro (par rapport au temps) mais à des taux différents suivant le type d'ondes (longitudinale ou transversale). Des calculs numériques seront également mis en place afin de couvrir certaines classes des matériaux thermo-visco-élastiques déjà proposées dans la littérature.

En ce qui concerne la classes des matériaux avec micro-structure et micro-température, on attend seulement un lien entre la dissipation thermique et l'amortissement des ondes longitudinales, tandis que les ondes transversales ne seront pas amorties. L'analyse proposée ci-dessus

utilise la condition d'ellipticité forte établie en [2,3].

Objectifs scientifiques

Les objectifs scientifiques du projet sont :

- (a) L'étude des effets de la dissipation thermique et dissipation visqueuse sur le problème de propagation ; une forme explicite pour les ondes de surface de type Rayleigh pour un demi-espace homogène et isotrope.
- (b) L'étude des effets de la dissipation thermique dans le cadre du modèle des milieux avec microstructure et micro-température.
- (c) Un modèle pour le problème de la propagation d'ondes de surface dans un demi-espace anisotrope et inhomogène en utilisant le formalisme de Stroh.
- (d) Mise en place d'une méthode numériques pour le problème d'onde de surface et comparaison avec les résultats existants.

Les résultats attendus répondent au questions suivantes :

- (1) Quel est l'impact de la dissipation thermique et de la mémoire sur le propagation des ondes de surface dans un demi-espace ?
- (2) Le dissipation thermique (ou la dissipation visqueuse) sont à elles seules, suffisantes pour assurer la décroissance temporelle des ondes dans un demi-espace ?
- (3) Quelles sont les spécificités des ondes longitudinales et transversales dans le cadre des modèles de comportement étudiés ?
- (4) Quel est le nombre des solutions pour le problème de Rayleigh ?

Références

- [1] S. Chiriță, A. Danescu, Spatial decay and growth properties for the incremental thermoelasticity. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik*, 51 (2000) 39-60.
- [2] S. Chiriță, A. Danescu, M. Ciarletta, On the strong ellipticity of the anisotropic linearly elastic materials. *Journal of Elasticity*, 87 (2007) 1–27.
- [3] S. Chiriță, A. Danescu, On the strong ellipticity condition for tetragonal system of linearly elastic solids. *International Journal of Solids and Structures*, 45 (2008) 4850–4859.
- [4] S. Polarz, B. Smarsly, Nanoporous materials. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* 2 (2001) 581-612.
- [5] G. Z. Voyiadjis, C. R. Song, *The Coupled Theory of Mixtures in Geomechanics with Applications*. Springer, Berlin-Heidelberg-New York, 2006.
- [6] J. Park, R.S. Lakes, *Biomaterials. An introduction*, Third Edition, Springer, Berlin-Heidelberg-New York, 2007.
- [7] R. S. Lakes, *Viscoelastic Materials*, Cambridge University Press, Cambridge, 2009.
- [8] Lord Rayleigh : On waves propagated along the plane surface of an elastic solid. *Proc. Lond. Math. Soc.*, 17 (1885) 4–11.
- [9] M. Destrade, Seismic Rayleigh waves on an exponentially graded, orthotropic half space. *Proc. R. Soc. A*, 463 (2007) 495–502.

- [10] T.C.T. Ting, Secular equations for Rayleigh and Stoneley waves in exponentially graded elastic materials of general anisotropy under the influence of gravity. *J. Elasticity*, 105 (2011) 331–347.
- [11] A.N. Norris, A.L. Shuvalov, Elastodynamics of radially inhomogeneous spherically anisotropic elastic materials in the Stroh formalism. *Proc. R. Soc. A*, 468 (2012) 467–484.
- [12] D. Ieşan, On a theory of thermoviscoelastic materials with voids, *Journal of Elasticity*, 104 (2011) 369–384.
- [13] D. Ieşan, Thermoelasticity of bodies with microstructure and microtemperatures. *International Journal of Solids and Structures*, 44 (2007) 8648-8662.
- [14] D. Ieşan, On the theory of heat conduction in micromorphic continua. *International Journal of Engineering Science*, 40 (2002) 1859-1878.
- [15] K. Sharma, P. Kumar, Propagation of plane waves and fundamental solution in thermo-viscoelastic medium with voids, *Journal of Thermal Stresses*, 36 (2013) 94–111.
- [16] M. M. Svanadze, Potential method in the linear theory of viscoelastic materials with voids, *Journal of Elasticity*, 114 (2014) 101–126.
- [17] S. K. Tomar, Jai Bhagwan and H. Steeb, Time harmonic waves in thermo-viscoelastic material with voids, *Journal of Vibration and Control*, DOI : 10.1177/1077546312470479.
- [18] P. Chadwick, Thermoelasticity. The dynamical theory. In : Sneddon, I.N., Hill, R. (Eds.), *Progress in Solid Mechanics*, vol. 1. North-Holland, Amsterdam, pp. 263–328 (1960).
- [19] J. A. D. Appleby, M. Fabrizio, B. Lazzari and D. W. Reynolds, On exponential asymptotic stability in linear viscoelasticity, *Math. Mod. Meth. Appl. Sci.*, 16 (10) (2006) 1677—1694.
- [20] G. Amendola, M. Fabrizio, J.M. Golden, *Thermodynamics of Materials with Memory : Theory and Applications*, Springer, Berlin-Heidelberg-New York, 2012.
- [21] S. Chiriță, On the Rayleigh surface waves on an anisotropic homogeneous thermoelastic half space, *Acta Mechanica*, 224 (2013) 657-674.
- [22] S. Chiriță, Thermoelastic surface waves on an exponentially graded half space, *Mechanics Research Communications*, 49 (2013) 27–35.

4. Visites envisagées

- En 2014 :
 - Deux semaines de visite de Stan Chiriță à l’Ecole Centrale de Lyon (fin aout - début septembre) : dépenses de voyage : 400 EUR + perdiem $90 \times 14 = 1260$ EUR.
 - Une semaine de visite de Alexandre Danescu à l’Université A.I. Cuza à Iași (fin octobre - debut novembre) : dépenses de voyage : 400 EUR + perdiem $90 \times 7 = 630$ EUR
 Subvention demandée pour 2014 : **2690 EUR**.
- En 2015 :
 - Deux semaines de visite de Stan Chiriță à l’Ecole Centrale de Lyon : dépenses de voyage : 400 EUR + perdiem $90 \times 14 = 1260$ EUR.
 - Une semaine de visite de Alexandre Danescu à l’Université A.I. Cuza à Iași : dépenses de voyage : 400 EUR + perdiem $90 \times 7 = 630$ EUR
 Subvention demandée pour 2014 : **2690 EUR**.

5. Financement demandé au Laboratoire Européen Associé CNRS Franco - Roumain :

- Pour 2014 : **2690 EUR.**
- Pour 2015 : **2690 EUR.**

6. Notice individuelle - Stan Chiriță

- Position actuelle : Professeur à l'Université de Iasi et Directeur de Recherche à l'Institut de Mathématiques Octav Mayer de l'Académie Roumaine à Iasi.
- Formation :
 - 1972** - Diplôme d'Études Supérieures en Mathématiques à la Faculté de Mathématiques de l'Université de Iasi (5 ans)
 - 1977** - Doctorat en Sciences Mathématiques (specialisation mécanique) à l'Université de Iasi.
 - 1987** - Prix de la Recherche "Gheorghe Lazăr" de l'Académie Roumaine des Sciences.
- Domaines d'intêret : Elasticité, Viscoelasticité, Thermoelasticité, Modèles generalizées des solides, Propagation des ondes, Comportement spatiale des solutions, Saint-Venant principle, Saint-Venant problem, Modèles élastiques avec longueur interne et comportement des cristaux nano-poreux.
- Stages scientifiques, collaborations : Université de Salerno (une ou deux mois par anne, collaboration en recherche avec Professeurs M. Ciarletta e C. D'Apice), Université de Bologna (collaboration en recherche avec Professeurs M. Fabrizio e B. Lazzari), Université de Catania (collaboration en recherche avec Professeur A. Scalia), Université de Napoli (collaboration en recherche avec Professeur S. Rionero), Ècole Centrale de Lyon (collaboration en recherche avec Professeur A. Danescu), Université Politechnique de Barcelone (collaboration en recherche avec Professeur R. Quintanilla), Université de Plymouth (collaboration en recherche avec Professeur M. Aron) ; Participant de la Conference International "Thermal Stresses" et l'Editor de la section *Thermoelastodynamics* de l'*Encyclopedia of Thermal Stresses* publié par Springer-Verlag en 2014.

7. Notice individuelle - Alexandre Danescu

- Position actuelle : Maître de Conférences à l'Ecole Centrale de Lyon et membre de l'Institut de Nanotechnologies de Lyon (équipe Hétéroepitaxie et Nanostructures) - UMR CNRS 5270, Ecole Centrale de Lyon.
- Formation :
 - 1986** - Master en Mathématique Appliquée (section Mathématique-Mécanique, spécialité Mécanique des Solides) à l'Université de Bucarest, Roumanie.
 - 1994** - Doctorat en Sciences pour l'Ingénieur (spécialité Mécanique) à l'Université de Franche-Comté.
 - 2005** - Habilitation à Diriger les Recherches à l'Ecole Centrale de Lyon.
- Domaines d'intêret : Elasticité (discrète et continue) à très faible échelle spatiale et auto-organisation ; modélisation de la croissance cristalline et instabilités morphologiques ; modèles

élastiques avec longueur interne et comportement des cristaux nano-poreux ; modélisation des interfaces (diffuses et nettes) en thermo-élasticité, problème de Stefan.

- Stages scientifiques, collaborations : Université Tor Vergatta (1 mois en 1993, 1 mois en 1994 - collaboration avec P. Podio-Guidugli, M. Vianello), Université de Madrid (15 jours en 1997 - collaboration avec M. Epstein, Université de Calgary et M. de Leon, Université de Madrid), invités à ECL : C. Făciu - IMAR, Bucarest- (1 mois en 2001, 1 mois en 2003), S. Chiriță - Université A.I. Cuza, Iași (2 mois en 2006), S. Țigoiu Université de Bucarest (1 mois en 2005).