



HAL
open science

Modélisation de la propagation des ondes ultrasonores longitudinales dans le béton

Jean François Chaix, Vincent Garnier, Gilles Corneloup

► **To cite this version:**

Jean François Chaix, Vincent Garnier, Gilles Corneloup. Modélisation de la propagation des ondes ultrasonores longitudinales dans le béton. 17ème Congrès Français de Mécanique, CFM2005, Aug 2005, Troyes, France. hal-04243644

HAL Id: hal-04243644

<https://hal.science/hal-04243644>

Submitted on 16 Oct 2023

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.

Modélisation de la propagation des ondes ultrasonores longitudinales dans le béton endommagé.

Jean-François Chaix, Vincent Garnier, Gilles Corneloup

Laboratoire de Caractérisation Non Destructive (LCND)
LUE CIME, Université de la Méditerranée
IUT d'Aix, Avenue Gaston Berger
13625 AIX-EN-PROVENCE

Résumé :

Le sujet porte sur l'étude de la propagation des ondes ultrasonores longitudinales dans les milieux hétérogènes. L'apport d'un modèle d'homogénéisation dynamique intégrant les équations de diffusion multiple est, en particulier, étudié dans la caractérisation ultrasonore du milieu. Le modèle de propagation et la diffusion sur un obstacle seul sont présentés. Ce modèle permet d'établir un lien entre les tailles et taux volumiques de diffuseurs présents dans un milieu à matrice solide et les vitesses et atténuation des ondes longitudinales. Les comportements de ces quantités sont observés selon la fréquence des ondes puis comparés aux comportements expérimentaux obtenus sur des éprouvettes de ciment et bétons contenant des billes polystyrène expansé. Les diamètres et taux volumiques des billes sont maîtrisés lors de la fabrication. Les résultats sont en très bon accord, notamment en ce qui concerne les évolutions de la vitesse de phase. La validation du modèle est ainsi réalisée dans le cas de diffuseurs sphériques et l'application au cas de béton thermique endommagé est finalement présentée.

Abstract :

The subject concerns the study of the longitudinal waves propagation in heterogeneous media. The contribution of a dynamic homogenisation model which integrates the multiple scattering equations is, particularly, studied in the ultrasonic characterisation of the medium. The propagation model and the scattering of an obstacle are introduced. This model allows establish the link between sizes and volume rate of scatterers present in the medium with solid matrix and the velocity and the attenuation of longitudinal waves. The behaviours of this quantities are observed versus the wave frequency then compared to the experimental behaviours obtained for cement and concrete specimen with expanded polystyrene balls included. The diameter and volume rate of balls are controlled during the manufactured process. The results are in very good agreement, especially as concern the phase velocity evolutions. The model validation is thus obtained in the case of spherical scatterers and the application to the case of thermal damaged concrete is finally introduced.

Mots clefs :

Propagation ultrasonore ; Solide Hétérogène ; Caractérisation Non Destructive ; Endommagement.

1 Introduction

Le thème général de ce travail concerne la caractérisation ultrasonore de l'endommagement de béton. Le béton est un matériau solide composé de ciment de sable et de granulats. Ses différents modes d'endommagement conduisent souvent, au niveau microstructural, à l'apparition puis l'évolution de microfissures et microporosités dans le milieu [1,2,3]. Ce type de milieu endommagé peut-être décrit par l'intermédiaire d'un milieu hétérogène composé d'une matrice élastique (le ciment) contenant des inclusions élastiques (les granulats) et d'inclusions de vide (les microfissures).

Dans le cas de milieux hétérogènes où les inclusions sont nombreuses, il est nécessaire de prendre en compte, dans la description de la propagation de l'onde, le phénomène de diffusion multiple. De plus, lorsque les positions et orientations d'inclusions sont aléatoires dans le milieu, on a recours à des quantités moyennes. Les méthodes d'homogénéisation du milieu, intégrant les équations de diffusion multiple, propose alors une solution de modélisation de l'onde se propageant dans le milieu homogène équivalent. Parmi les modèles existants valables sur l'ensemble du domaine fréquentiel et adaptés à des taux de diffuseurs importants [4,5,6], nous retenons celui de Waterman et Truell [4] dont le formalisme est de loin le plus simple et dont les validations obtenues pour des milieux fluides sont proches des autres modèles [7]. Cette simplicité de formalisme est un atout indéniable lorsque l'on se place dans le cadre du problème inverse qui constituera l'étape suivante à cette étude. Plus généralement les validations expérimentales concernant ce modèle sont nombreuses pour les milieux à matrice fluide mais rares pour le cas de matrices solides. Ceci conduit à une méconnaissance des limites des modèles en terme de domaine fréquentiel ou de densité volumique d'obstacle dans le milieu.

La propagation de l'onde longitudinale dans un milieu hétérogène sur un large domaine fréquentiel est envisagée. Nous présentons tout d'abord le principe de fonctionnement et les équations résultats du modèle d'étude ainsi que les caractéristiques de diffusion calculées sur un obstacle seul. Nous simulons ensuite le comportement du modèle pour des diffuseurs fluides dans une matrice élastique et nous étudions en particulier les comportements en vitesse de phase et atténuation. Nous finissons par les validations expérimentales pour ce dernier cas et présentons une application à la caractérisation ultrasonore de l'endommagement thermique de béton.

2 Modèle d'homogénéisation dynamique

Le modèle d'étude est dit de milieux effectifs, il propose d'homogénéiser le milieu hétérogène, c'est à dire de déterminer les caractéristiques ultrasonores d'un milieu homogène équivalent au milieu initial. Dans une première étape nous modélisons la géométrie des inclusions réelles par des formes approchées puis nous homogénéisons ce milieu

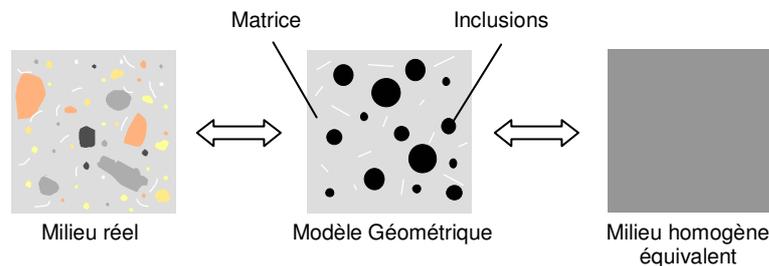


FIG. 1 – Principe d'homogénéisation

En dynamique l'homogénéisation du matériau porte sur le nombre d'onde k défini par

$$k = \frac{\omega}{c} + i.\alpha \quad (1)$$

où ω est la pulsation, c est la vitesse de phase et α est l'atténuation de l'onde.

Le potentiel de l'onde longitudinale s'écrit

$$\varphi = \varphi_0 . e^{i.(k^* . z - \omega . t)}$$

où k^* est le nombre d'onde dans le milieu équivalent (*). Ce nombre est défini à partir du nombre d'onde dans la matrice et du nombre d'onde dans les inclusions.

Dans le milieu équivalent, ce potentiel doit vérifier l'équation de Helmholtz

$$\left(\nabla^2 + k^{*2}\right) \cdot \varphi = 0$$

Le modèle de Waterman-Truell prend en compte les équations de diffusion multiple et considère un milieu diffusant semi-infini. Les diffuseurs sont tous identiques et isotropes, de taille caractéristique a , leur densité dans le milieu est supposée constante égale à n_0 , leurs positions sont statistiquement indépendantes et l'interpénétration entre deux diffuseurs est impossible.

Le résultat obtenu pour l'onde longitudinale se propageant dans le milieu équivalent, pour des diffuseurs sphériques est

$$\left(\frac{k^*}{k_1}\right)^2 = \left[1 + \frac{2 \cdot \pi \cdot n_0 \cdot f(0)}{k_1^2}\right]^2 - \left[\frac{2 \cdot \pi \cdot n_0 \cdot f(\pi)}{k_1^2}\right]^2$$

où k_1 est le nombre d'onde dans la matrice, $f(0)$ et $f(\pi)$ sont les amplitudes diffusées en avant et en arrière par un obstacle sphérique; ces amplitudes sont définies par partir des éléments de calcul de diffusion sur un obstacle

$$f(\theta) = \frac{1}{i \cdot k_1} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} (2 \cdot n + 1) \cdot (T^{11})_{n0n0}^{11} \cdot P_n^0(\cos \theta)$$

Cette expression du champ lointain repose sur la décomposition des potentiels sur la base des polynômes de Legendre et sur l'utilisation de la T-matrice [8] dans les calculs de diffusion. L'expression de cette matrice pour le cas d'un obstacle sphérique est possible [9] à partir des paramètres ultrasonores de la matrice et des diffuseurs.

3 Simulation de la propagation dans un milieu endommagé

Nous souhaitons modéliser, dans cette étude, la propagation d'une onde longitudinale dans un milieu hétérogène isotrope et élastique. Nous nous intéressons en particulier aux évolutions de la vitesse et celles de l'atténuation des ondes ultrasonores en fonction des paramètres d'endommagement du milieu. Nous étudions un milieu composé d'une matrice élastique contenant un ensemble d'obstacles sphériques d'air pour des tailles et densités volumiques différents.

Nous considérons dans un premier temps des milieux contenant 10% de diffuseurs de différents diamètres, et nous observons les comportements fréquentiels des vitesse et atténuation ultrasonores.

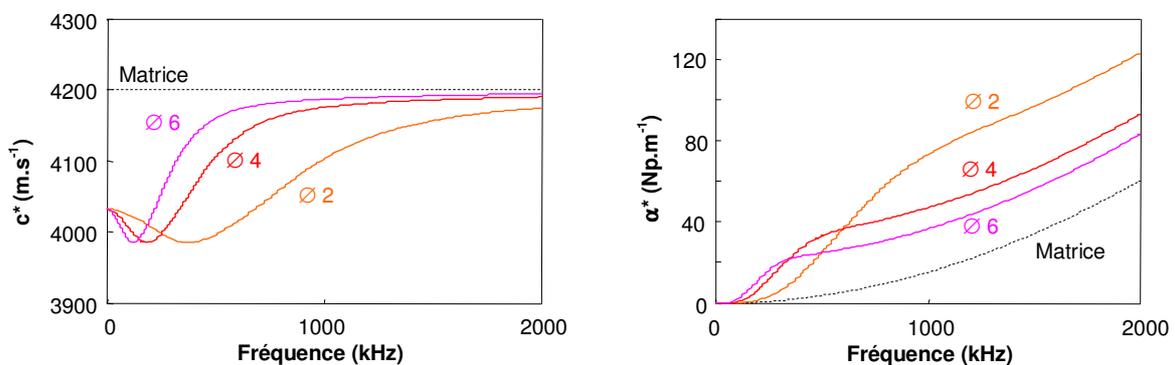


FIG. 2 – Evolutions des vitesses et atténuations ultrasonores en fonction de la fréquence pour des tailles d'inclusion différentes (densité volumique d'obstacle dans le milieu = 10%)

Concernant les courbes de vitesse nous observons une première partie dans laquelle la vitesse est fortement décroissante puis une seconde partie où elle est croissante jusqu'à la valeur de la matrice. Quelque soit la

taille, la valeur du minimum est identique, par contre la position fréquentielle de ce minimum dépend de la dimension des obstacles dans le milieu.

Pour ce qui est de l'atténuation, le découpage des comportements peut également être réalisé en deux parties dont la limite est décalée par rapport à celle de la vitesse. Dans la première partie, l'atténuation croît fortement depuis une valeur nulle, alors que dans la seconde elle suit l'évolution de l'atténuation dans la matrice seule donc une partie où la diffusion dans le milieu n'influe plus. Comme pour la vitesse, l'évolution des tailles de diffuseurs conduit à nouveau à un décalage des comportements dans le domaine fréquentiel.

Nous considérons dans un second temps des milieux contenant des obstacles sphériques de diamètre 4 mm et des densités volumiques d'obstacles allant de 5 à 15%. Comme précédemment, nous observons les comportements fréquentiels des vitesses et atténuation ultrasonores.

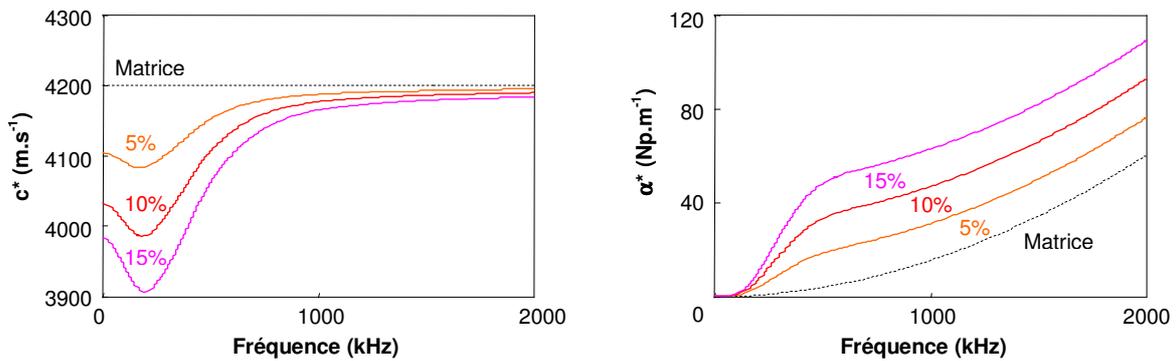


FIG. 3 – Evolutions des vitesses et atténuation ultrasonores en fonction de la fréquence pour des densités volumiques différentes (tailles des obstacles = \varnothing 4 mm)

L'augmentation de la densité volumique de sphères d'air conduit sur tout le domaine à une chute des valeurs de vitesse et une augmentation de l'atténuation par rapport à celles de la matrice. Plus la densité volumique est importante, plus les variations sont conséquentes. Pour les deux grandeurs observées, il apparaît un comportement fréquentiel marqué dépendant de la taille des diffuseurs.

Les comportements en vitesse et atténuation présentent des évolutions significatives lors de variations de tailles et densité volumique des diffuseurs. Lorsque la longueur d'onde est de l'ordre de la taille des diffuseurs, la vitesse et l'atténuation présentent des phases transitoires marquées qui peuvent être exploitées pour identifier des paramètres liés aux diffuseurs. Ce modèle de multidiffusion peut ainsi apporter une solution à la caractérisation ultrasonore de milieux hétérogènes.

4 Validations expérimentales et application au cas du béton

Afin de parvenir à cette validation du modèle de propagation dans le cas de milieux à matrice élastique nous avons développé une chaîne de mesure ultrasonore adaptée à la caractérisation de milieux hétérogènes. Les quantités moyennes sur les positions des diffuseurs sont obtenues expérimentalement par des moyennes spatiales réalisées sur l'éprouvette. Le montage est réalisé en transmission d'onde longitudinale en immersion ce qui permet d'obtenir un couplage reproductif entre les pièces et les transducteurs. Nous avons utilisé trois couples de transducteurs et la bande passante totale obtenue à -12dB s'étend de 160 kHz à 1.3 MHz. La mesure repose sur une méthode de comparaison entre le signal direct transmis dans l'eau et celui correspondant à un trajet dans l'eau et la pièce testée. Les signaux temporels à large bande obtenus sont traités par analyse de Fourier afin d'en extraire la phase et l'amplitude. La vitesse de phase et l'atténuation de l'onde ultrasonore sont alors déduites connaissant l'épaisseur de la pièce.

Les éprouvettes ont été conçues afin de valider le modèle de propagation dans le cas d'une matrice élastique. Les milieux retenus sont des matériaux hétérogènes dont la matrice est à base de ciment et les diffuseurs sont de type roche ou/et air.

Dans un premier temps, nous étudions le comportement de l'onde longitudinale dans le cas d'un milieu solide à matrice de ciment contenant 10% et 30% de diffuseurs sphériques d'air. Pour obtenir les courbes théoriques du modèle de Waterman-Truell, les caractéristiques prises en compte pour la matrice sont des

données expérimentalement obtenues sur une pâte de ciment pur et pour les caractéristiques des diffuseurs, celles des sphères d'air de diamètre $2.a = 2,84$ mm.

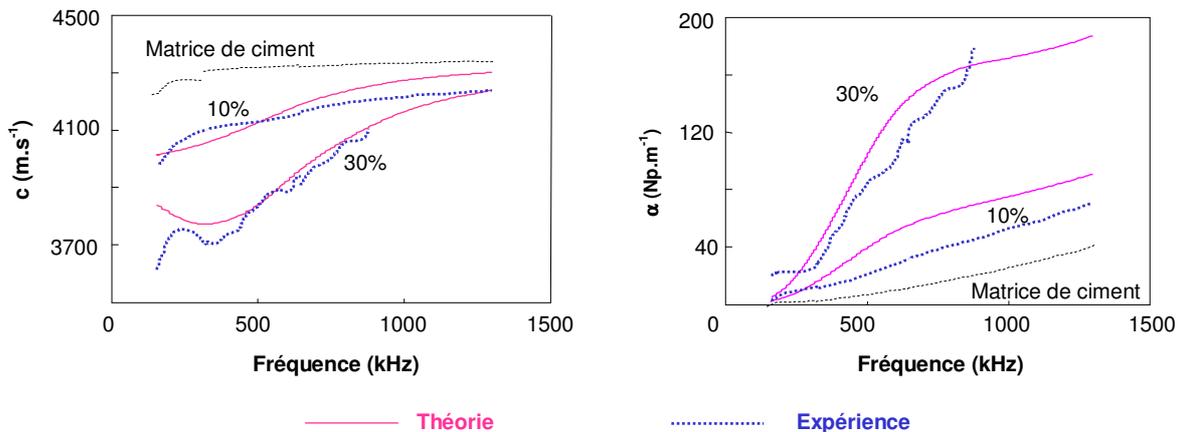


FIG. 4 – Comparaison théorie-expérience pour des milieux contenant 10 et 30% de diffuseurs de sphériques de diamètre moyen 2,84 mm

Nous obtenons un très bon accord théorie-expérience pour les évolutions de vitesse en fonction de la fréquence. Les amplitudes de variations sont du même ordre de grandeur et les comportements en fonction de la taille sont correctement décrits. Les écarts théorie-expérience sont inférieurs à 2% pour les valeurs des vitesses, les minimums sont aussi bien observés dans les courbes théoriques qu'expérimentales, et de plus, leurs positions par rapport à la fréquence sont bien estimées par le modèle. Pour l'atténuation, un bon accord est obtenu pour le comportement qualitatif du modèle, cependant les valeurs d'amplitudes sont légèrement différentes à hautes fréquences. Les comportements locaux qui apparaissent en fonction de la fréquence sont très proches.

En synthèse, nous pouvons conclure à la validité du modèle en ce qui concerne les évolutions des vitesses de phase en fonction de la fréquence de l'onde et de la taille des obstacles ainsi qu'en fonction de la densité de diffuseurs. L'évolution de l'atténuation est correctement décrite mais l'on remarque que le modèle a tendance à surévaluer légèrement l'atténuation pour les hautes fréquences. Ces différences peuvent provenir de la dispersion des mesures dans nos milieux fortement hétérogènes malgré le moyennage, les incertitudes sur le taux volumique et la taille de diffuseurs, la sphéricité des diffuseurs, ou encore l'intégration de l'atténuation de la matrice, dans le modèle, qui équivaut à une addition avec celle calculée par la diffusion.

Le modèle étant validé dans le cas particulier de diffuseurs sphériques, il est intéressant, par une étude expérimentale, de juger de son applicabilité dans le cas d'un endommagement réel. Nous proposons un exemple d'application à l'étude de l'endommagement thermique d'éprouvette à matrice cimentaire contenant 60% d'inclusions rocheuses.

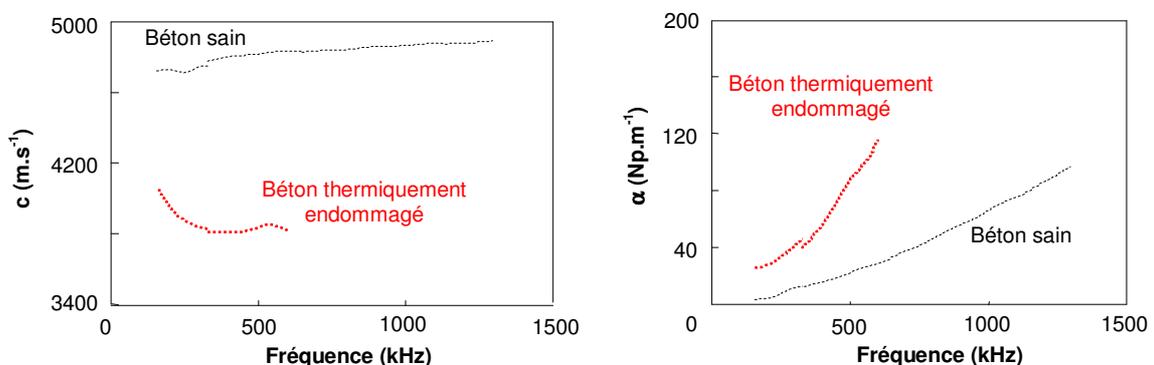


FIG. 5 – Application au cas d'un béton thermiquement endommagé

Le comportement général observé est similaire à celui des simulations avec une chute de vitesse de phase et une augmentation de l'atténuation par rapport aux valeurs dans la matrice seule. Les amplitudes maximales

de variation sont plus marquées avec 1000 m.s^{-1} pour la vitesse. La forte atténuation dans le milieu ne nous permet pas de pouvoir traiter les signaux sur l'ensemble du domaine fréquentiel qui se trouve réduit dans la partie haute fréquence. On observe un minimum local de la vitesse de phase vers 400 kHz. L'atténuation offre une augmentation des pentes de croissance avec la fréquence entre le milieu sain et celui qui est thermiquement endommagé .

5 Conclusion

Nous avons mené l'étude théorique de la propagation de l'onde longitudinale dans un milieu hétérogène à matrice solide. Nous avons observé les évolutions de la vitesse de phase et de l'atténuation en fonction du taux volumique et de la taille des sphères d'air sur un large domaine fréquentiel.

L'analyse des résultats de simulations montre un comportement caractéristique de la vitesse de phase de l'onde à travers les paramètres de positions et formes associées à un minimum dans le domaine fréquentiel. Les comparaisons théorie-expérience proposées permettent de valider le modèle, au niveau du comportement de la vitesse de phase dans le cas de diffuseurs sphériques. Le lien entre la vitesse et le taux volumique et la taille des diffuseurs d'air peut être correctement décrit par le modèle. De plus, l'application au cas d'un béton thermiquement endommagé montre que les résultats expérimentaux sont en accord qualitatif pour les variations de la vitesse de phase et de l'atténuation face aux évolutions simulées.

References

- [1] H.W. Chung, "Ultrasonic testing of concrete after exposure to high temperatures", *NDT Int.* **18**, 275-278 (1985).
- [2] S.K. Handoo, S. Agarwal, S.K. Agarwal, "Physicochemical, mineralogical, and morphological characteristics of concrete exposed to elevated temperatures", *Cement and Concrete Research* **32**, 1009-1018 (2002).
- [3] V. Vydra, F. Vodak, O. Kapickova, S. Hoskova, "Effect of temperature on porosity of concrete for nuclear-safety structures", *Cement and Concrete Research* **31**, 1023-1026 (2001).
- [4] P.C. Waterman, R. Truell, "Multiple scattering of waves", *J. Math. Phys.* **2**, 512-537 (1961).
- [5] V.K. Varadan, Y. Ma, V.V. Varadan, "A multiple scattering theory for elastic wave propagation in discrete random media", *J. Acoust. Soc. Am.* **77**, 375-385 (1985).
- [6] L. Tsang, J.A. Kong, T. Habashy, "Multiple scattering of acoustic waves by random distribution of discrete spherical scatterers with the Quasicrystalline and Percus-Yevick approximation", *J. Acoust. Soc. Am.* **71**, 552-558 (1982).
- [7] F. Vander Meulen, G. Feuillard, O. Bou Matar, F. Levassort, M. Lethiecq, "Theoretical and experimental study of the influence of the particle size distribution on acoustic wave properties of strongly inhomogeneous media", *J. Acoust. Soc. Am.* **110**, 2301-2307 (2001).
- [8] P.C. Waterman, "Matrix theory of elastic wave scattering", *J. Acoust. Soc. Am.* **60**, 567-580 (1976).
- [9] D. Brill, G. Gaunard, "Resonance theory of elastic waves ultrasonically scattered from an elastic sphere", *J. Acoust. Soc. Am.* **81**, 1-21 (1987).