

# Détermination par la méthode de scintillométrie du flux de chaleur sensible moyen dans le cas d'une surface composite Maïs/Jachère

Jean-Pierre Lagouarde, K. John Mcaneney, A.E. Green

► **To cite this version:**

Jean-Pierre Lagouarde, K. John Mcaneney, A.E. Green. Détermination par la méthode de scintillométrie du flux de chaleur sensible moyen dans le cas d'une surface composite Maïs/Jachère. Atelier de Modélisation de l'Atmosphère, Nov 1995, Toulouse, France. hal-02772962

**HAL Id: hal-02772962**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02772962>**

Submitted on 4 Jun 2020

**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.

# DETERMINATION PAR LA METHODE DE SCINTILLOMETRIE DU FLUX DE CHALEUR SENSIBLE MOYEN DANS LA CAS D'UNE SURFACE COMPOSITE MAIS/JACHERE

J.P. Lagouarde (1), K.J. McAneney (2), A.E. Green (2)

(1) INRA Bioclimatologie, BP 81, 33883 Villenave d'Ornon, FRANCE

(2) Hort+Research, Purerua Road, PO Box 23, Kerikeri, NOUVELLE-ZELANDE

## 1. INTRODUCTION

La méthode des scintillations repose sur l'analyse des fluctuations d'intensité que subit un signal optique le long d'un trajet entre un émetteur et un récepteur. Ces fluctuations sont liées à la turbulence et dépendent des variations de l'indice de réfraction du milieu. On peut en déduire les flux de surface (Green et al., 1994; McAneney et al., 1995, Lagouarde et al., 1995). Sur le plan pratique, les longueurs de trajet optique peuvent varier de quelques centaines de mètres à quelque kilomètres (selon le type d'instrument, la longueur d'onde utilisée et le diamètre du faisceau analysé...). Parce qu'elle offre la possibilité d'intégrer les flux de surface sur de telles longueurs, la scintillométrie comble bien le fossé existant à l'heure actuelle entre les méthodes locales (stations micrométéorologiques, corrélations turbulentes, débits de sève...), et les méthodes reposant sur l'utilisation d'avions instrumentés (tels que l'ARAT). Ces caractéristiques en font une méthode bien adaptée à la validation des flux issus des données des satellites météorologiques dont la résolution va de 1km (NOAA/AVHRR, ATRSR2) à 8 kilomètres (METEOSAT) environ.

On présente ici les résultats d'une expérience destinée à tester les processus d'intégration du signal dans le cas simple d'une surface composite comportant deux types de végétation.

## 2. EQUATIONS DE BASE

L'instrument utilisé est un scintillomètre à large ouverture construit par l'équipe du Hort+Research Institute à Kerikeri, en Nouvelle Zélande. Cet instrument fonctionne à 0.93  $\mu\text{m}$ , et est décrit en détail par McAneney et al. (1995).

Tatarski (1961) et Clifford (1973) ont montré que la variance du logarithme de l'intensité au niveau du récepteur est:

$$\sigma_{\ln I}^2 = 16 \pi^2 k^2 L \int_0^{\infty} dK K \phi_N(K) \sin^2(K^2 L u(1-u)/2k) A \quad (1)$$

$$\text{avec } A = [2J_1(x_1)2J_1(x_2)/(x_1 x_2)]^2 \quad (2)$$

où L désigne la longueur du trajet optique, u la distance normalisée depuis l'émetteur ( $u=x/L$ ), k le nombre d'onde optique ( $k=2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  longueur d'onde).  $x_1 = KD u/2$ ,  $x_2 = KD(1-u)/2$ , K étant le nombre d'onde turbulent, et D le diamètre d'ouverture de l'émetteur et du récepteur.  $J_1$  est la fonction de Bessel de première espèce et d'ordre 1.  $\phi_N(K)$  est le spectre de Fourier du milieu défini par:

$$\phi_N(K) = 0.033 C_N^2 K^{-11/3} \quad (L_0)^{-1} \ll K \ll (l_0)^{-1} \quad (3)$$

$l_0$  et  $L_0$  sont les échelles interne et externe de turbulence et  $C_N^2$  un paramètre de structure de l'indice de réfraction.

En faisant l'hypothèse que  $C_N^2$  reste constant le long du trajet optique, et que les diamètres de l'émetteur et de récepteur sont identiques, Wang et al. (1978) ont tiré de (1):

$$\sigma_{Lnl}^2 = 0.892 C_N^2 D^{-7/3} L^3 \quad (4)$$

avec la condition:

$$D/F > (0.124 k^{7/6} L^{11/6} C_N^2)^{3/5} \quad (5)$$

$F = (\lambda L)^{1/2}$  (zone de Fresnel).  $\sigma_{Lnl}^2$  est proportionnel à  $C_N^2$  tant que le trajet optique L satisfait à l'équation (5).

En combinant (1), (2), et (3),  $C_N^2$  moyen sur le trajet optique s'écrit:

$$\overline{C_N^2} = \int_0^1 C_N^2(u) W(u) du \quad (6)$$

où  $W(u)$  désigne la fonction de pondération. Dans le cas où deux surfaces sont présentes sur le trajet optique, on a:

$$\overline{C_N^2} = (C_N^2)_1 W_1 + (C_N^2)_2 W_2 \quad (7)$$

Dans le cas où les ouvertures de l'émetteur  $D_T$  et du récepteur  $D_R$  diffèrent, Wang et al. (1978) donnent l'expression suivante:

$$\overline{C_N^2} = C \sigma_{Lnl}^2 (D_R/D_T)^{7/3} L^{-3} \quad (8)$$

C est un coefficient de calibration. Les termes  $x_1$  et  $x_2$  figurant dans l'expression de A (eq. 2) sont alors à remplacer par:

$$x_1 = (y / y_r)^{1/2}$$

$$x_2 = (y / y_t)^{1/2}$$

avec:

$$y_r = (1 - u) / \alpha_r^2 \pi u$$

$$y_t = u / \{ \alpha_t^2 \pi (1 - u) \}$$

$\alpha_r$  et  $\alpha_t$  sont les diamètres du récepteur et de l'émetteur normalisés par F.

Pour les équations permettant de calculer le flux de chaleur sensible à partir de la mesure de  $C_N^2$  par scintillométrie, le lecteur est renvoyé à Lagouarde et McAneney (1994) et à McAneney et al. (1995).

### 3. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le site expérimental est situé à Saucats (20 km au Sud de Bordeaux) sur de vases pivots de maïs irrigué et séparés par des zones de jachère (fétuque) de grandes dimensions (figure 1). L'expérience s'est déroulée en 3 phases.

### Phase 1 : validation de l'instrument utilisé

Un jour (31/05/1994) de mesure a été fait sur une zone homogène de jachère de 2 ans (R-E1, fig. 1), sur un trajet optique de 260 m (hauteur de mesure: 2.5 m).

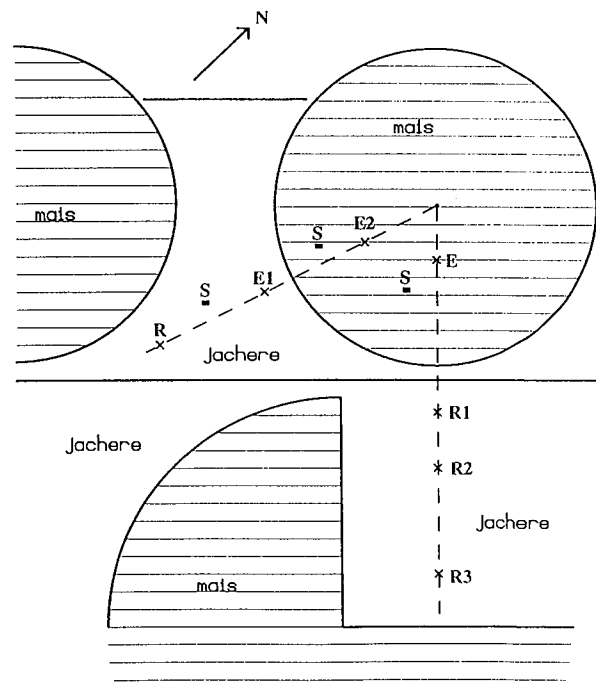
### Phase 2 : cas simple de surface composite

Six journées de mesure (05-13/06/1994) ont été acquises sur un trajet optique de 600 m comportant des parts égales de jachère et de maïs (R-E2, fig.1). Lors de cette période la hauteur du maïs est passée graduellement de 45 à 80 cm environ. La jachère présentait une structure en 2 couches: la première jusqu'à 30 cm assez dense (taux de couverture du sol estimé à 70%), la seconde de densité très faible et correspondant à des tiges atteignant 1.0 à 1.2 m. L'état hydrique des deux surfaces était comparable, sauf le 12/06, date de début de l'irrigation du maïs.

### Phase 3 : analyse de cas complexes

Cette partie de l'expérience s'est déroulée entre le 27/07 et le 03/08/1994. Les deux surfaces présentaient des caractéristiques très différentes. La jachère (d'un an) était peu développée en hauteur (20-30 cm) et relativement sèche, alors que le maïs atteignait la hauteur totale de 3.3 m (2.9 m pour les dernières feuilles et 0.4 m environ de fleur). La hauteur de mesure était alors de 5.6 m. Les configurations de mesure étaient destinées à tester les points suivants :

- effet de la composition du trajet optique : on a répété dans ce but deux expériences avec 300 m de maïs puis 150 et 570 m de jachère (respectivement E-R1 et E-R2 sur la fig. 1),
- effet des ouvertures relatives de l'émetteur et du récepteur : dans une configuration 300 m de maïs et 300 m de jachère, des mesures ont été faites en réduisant de 15 à 7.5 cm à l'aide d'un cache l'ouverture de l'émetteur et du récepteur alternativement (E-R2, fig1).



**Figure 1:** Implantation du dispositif expérimental. E, R et S désignent respectivement les positions de l'émetteur, du récepteur et des stations micrométéorologiques de référence.

Les caractéristiques des diverses phases de l'expérience sont rassemblées dans le tableau suivant:

| Configuration | Surface<br>(m)       | Trajet optique<br>(m) | $D_T$<br>(m) | $D_R$ | $W_1$ ( $W_2$ ) |
|---------------|----------------------|-----------------------|--------------|-------|-----------------|
| 1             | Jachère              | 260                   | 0.15         | 0.15  |                 |
| 2             | 50% Jachère 50% Maïs | 600                   | 0.15         | 0.15  | 0.50 (0.50)     |
| 3A            | 33% Jachère 67% Maïs | 450                   | 0.15         | 0.15  | 0.84 (0.16)     |
| 3B            | 67% Jachère 33% Maïs | 870                   | 0.15         | 0.15  | 0.21 (0.79)     |
| 3C            | 50% Jachère 50% Maïs | 600                   | 0.15         | 0.075 | 0.69 (0.31)     |
| 3D            | 50% Jachère 50% Maïs | 600                   | 0.075        | 0.15  | 0.35 (0.65)     |

Dans tous les cas, des mesures micrométéorologiques (vent, température...) ainsi que des mesures de référence des flux de chaleur sensible  $H$  et d'évaporation  $LE$  (instruments Campbell CA27 et KRYPTON KH2O) étaient faites sur chaque surface. Le rayonnement net ainsi que le flux de conduction étaient mesurés directement. Lorsque les couverts étaient suffisamment bas (phases 1 et 2), des mesures classiques à 2 niveaux destinées à mettre en oeuvre la méthode aérodynamique avaient été ajoutées.

Lors des phases 1 et 2, la comparaison entre les mesures à deux niveaux et les corrélations turbulentes a permis d'évaluer la hauteur de déplacement  $d$  de chaque surface. La rugosité  $z_0$  a été déterminée par la méthode de dissipation: Kaimal et al., 1972; Fairhall et al., 1990) à partir des mesures spectrales de la composante verticale de la vitesse du vent effectuées à 20 Hz. En l'absence de mesures de ce type lors de la phase 3,  $d$  et  $z_0$  ont été simplement estimés à partir de la hauteur de la végétation.

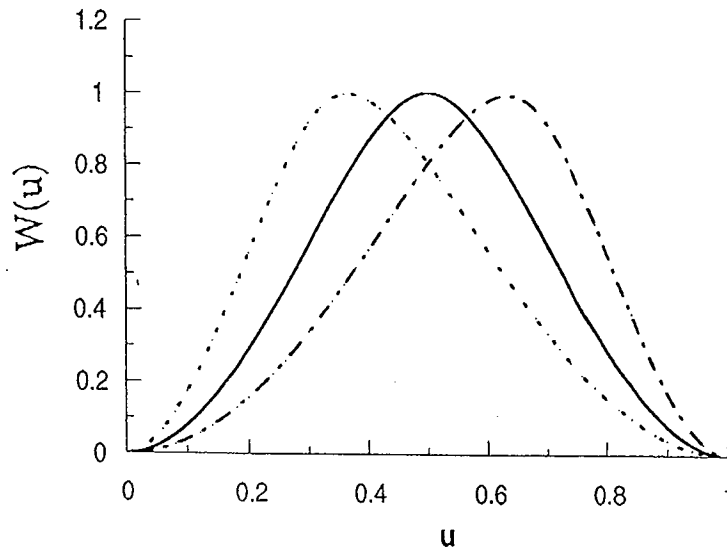
#### 4. PONDERATION DES PARAMETRES DE STRUCTURE

##### 4.1 Détermination de $C_N^2$

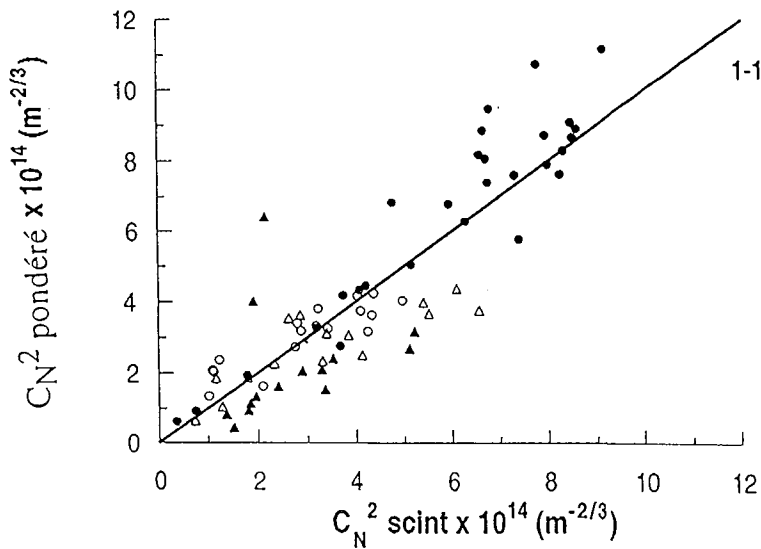
Les mesures effectuées ne permettant pas de déterminer directement les  $C_N^2$  de chacune des 2 surfaces, ceux-ci ont été estimés à partir des mesures météorologiques et des mesures de flux en inversant les équations (données dans Lagouarde et McAneney (1994). La figure 2 (obtenue à partir des données de la phase 1 et de mesures acquises sur prairie en Nouvelle Zélande par McAneney et al., 1995) illustre, pour un site homogène, la validité de cette méthode.

### 4.3 Effet de la composition du trajet optique et des diamètres d'ouverture des émetteur et récepteur

La figure 4 montre les fonctions de pondération correspondant à chaque cas. On note que, dans la cas de diamètres différents, la zone de sensibilité maximum se déplace du côté de l'ouverture la plus petite.



**Figure 4:** Fonctions de pondération normalisées pour les diverses configurations étudiées:  
 $D_R = D_T = 15 \text{ cm}$  (—),  $D_T/D_R = 2$  (- - -),  $D_T/D_R = 0.5$  (....)



**Figure 5:** Comparaison des  $C_N^2$  pondérés et mesurés par le scintillomètre sur des surfaces composites maïs/jachère pour les configurations 3A à 3B (Saucats, Juillet-Août 1994).

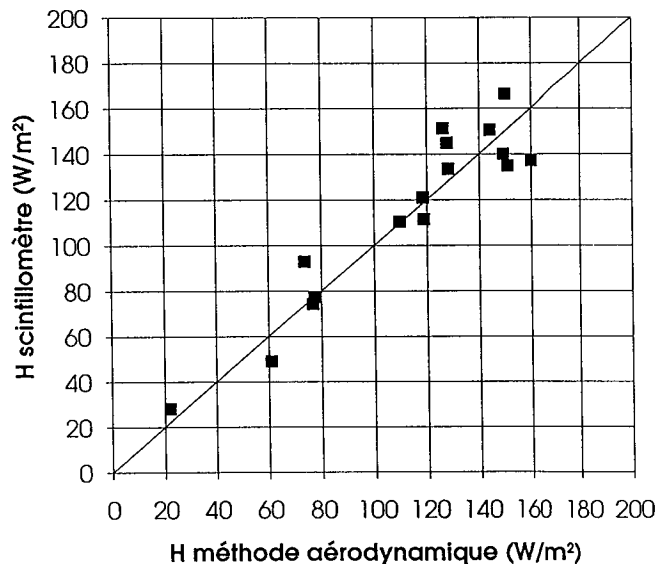
La figure 5 rassemble les résultats correspondant à ces diverses configurations (les coefficients de pondération  $W_1$  et  $W_2$  étant donnés dans la tableau ci-dessus). L'accord est globalement satisfaisant :

$$C_N^2(\text{pondéré}) = 1.02 (\pm 0.031) C_N^2 (\text{scintillomètre})$$

avec un écart type résiduel de  $1.263 \times 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$  et une ordonnée à l'origine non significative. On notera cependant une tendance à sous-estimer la réponse du scintillomètre dans le cas où les diamètres d'ouverture diffèrent, et à la surestimer dans le cas du plus long trajet optique. Dans le premier cas, le fait de limiter le diamètre avec un cache de 7.5 cm de diamètre non centré par rapport à l'axe du faisceau pourrait constituer une source d'erreur : l'ouverture réelle pourrait en fait être inférieure en raison du masque supplémentaire constitué par une partie du bloc détecteur. Dans le second cas, une erreur de quelques mètres sur la distance suffirait à expliquer en partie les différences observées (en raison de la forte sensibilité du terme en  $L^3$  dans l'éq. 4). De plus il n'a pas été tenu compte dans cette première approche de l'effet possible de l'étroite bande de jachère arrosée en bout de pivot... Ces divers points devront être pris en compte lors de futures expériences.

## 5. DISCUSSION: POSSIBILITE D'ESTIMER LE FLUX DE CHALEUR SENSIBLE

Dans le cas d'une surface homogène, la scintillométrie permet d'estimer le flux de chaleur sensible de façon satisfaisante, à condition de connaître les caractéristiques aérodynamiques de la surface (rugosité et hauteur de déplacement). McAneney et al. (1995) ont présenté de tels résultats sur prairie. On trouvera sur la figure 6 un exemple supplémentaire obtenu sur 260 m de jachère.

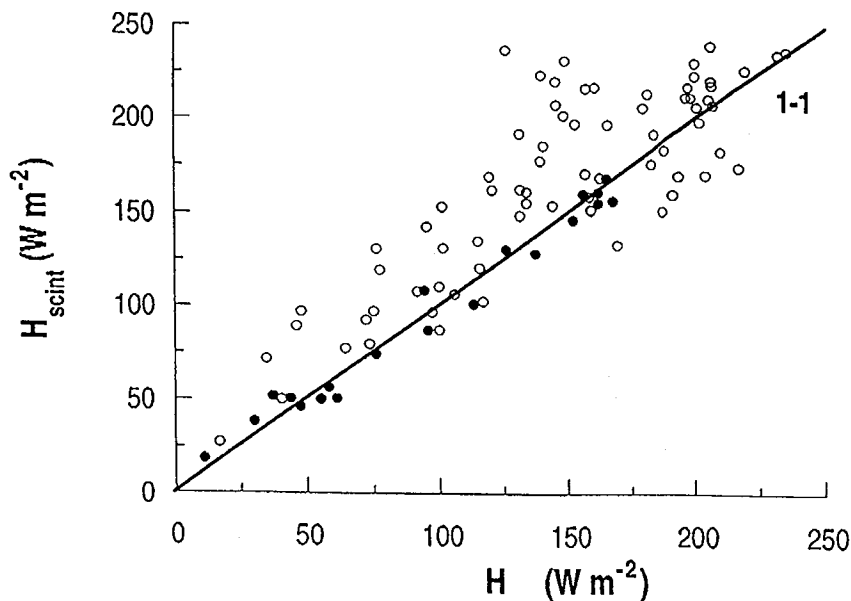


**Figure 6:** Comparaison du flux de chaleur sensible obtenu sur jachère par la méthode des scintillations et par la méthode aérodynamique (Saucats, 31 Mai 1994).

Dans le cas particulier d'une surface hétérogène composée à parts égales de deux cultures ayant des caractéristiques aérodynamiques voisines (cas de la phase 2 de l'expérience), la détermination du flux de chaleur sensible reste aisée (figure 7). L'accord entre le flux moyen estimé par pondération des mesures directes et le flux fourni par le scintillomètre est satisfaisant, même lorsque les deux surfaces présentent un contraste hydrique important (cas du jour 164, après irrigation du maïs, matérialisé par des points en gras).

En revanche, dans les cas de trajets optiques complexes (cultures en proportions variables et présentant des différences importantes de caractéristiques aérodynamiques et d'état hydrique), ou de configurations particulières (variations des diamètres d'ouverture des émetteur et récepteur), il est impossible de déterminer *a priori* les

caractéristiques aérodynamiques 'moyennes' permettant de restituer le flux de chaleur sensible intégré le long du trajet optique. Un modèle simulant la réponse du scintillomètre dans le cas de parcelles composites est actuellement en cours d'écriture : il sera utilisé dans le but d'étudier la sensibilité à la composition du trajet optique des paramètres 'moyens' permettant de restituer correctement le flux intégré, en vue des applications pratiques pour lesquelles on ne connaît pas les  $C_N^2$  élémentaires.



**Figure 7:** Comparaison du flux de chaleur sensible moyen issu de la scintillométrie et des mesures directes par la méthode des fluctuations lors de la phase 2 de l'expérience (voir texte). Les points en gras correspondent au jour 164.

**Remerciements:** Ce travail a bénéficié du soutien du PATOM. Les auteurs remercient A. Hall (Hort Research, Palmerston North), J.M. Bonnefond et A. Kruszewski pour leur aide. Ils remercient également M. Marsaux et Cottavoz qui ont mis à leur disposition le site expérimental.

## 6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Clifford, S.F., Ochs, G.R. and Lawrence, R.S. 1974. Saturation of optical scintillation by strong turbulence. *J. Opt. Soc. Am.*, **64** 148-154.
- Fairall, C.W., Edson, J.B., Larsen, S.E. and Mestayer, P.G. 1990. Inertial dissipation air-sea flux measurements: a prototype system using realtime spectral computations. *J. Atmos. and Ocean Techn.* **7** 425-453.
- Green, A.E., McAneney, K.J., Astill, M.S. 1994. Surface layer scintillation measurements of daytime heat and momentum fluxes. *Boundary-layer Meteorol.*, **68** 357-373.
- Kaimal, J.H.C., Wyngaard, J.C., Izumi, Y. and Coté, O.R. 1972. Spectral characteristics of surface layer turbulence. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **98** 563-589.
- Lagouarde J.P., McAneney K.J. 1994. Flux de surface en parcelle hétérogène: test de la méthode des scintillations. *Atelier de Modélisation de l'Atmosphère*, Toulouse, 29 Nov.-1 Déc., 113-120
- McAneney, K.J., Green, A.E. and Astill, M.S. 1995. Large-aperture scintillometry: the homogeneous case. *Agric. and Forest Meteorol.* (in press).
- Panofsky, H. A, and Dutton, J.A. 1984. *Atmospheric Turbulence: Models and Methods for Engineering Applications*. John Wiley & Sons, Inc. NY, 397pp.
- Tatarskii, V.I. 1961. *Wave propagation in turbulent medium*. McGraw-Hill, New York.
- Wang, Ting-i, Ochs, G.R. and Clifford, S.F. 1978. A saturation-resistant optical scintillometer to measure  $C_N^2$ . *J. Opt. Soc. Am.*, **68** 334-338.