

Estimation du flux de chaleur sensible par la méthode de scintillométrie

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

► **To cite this version:**

Jean-Pierre Lagouarde, K. John Mcaneney, A.E. Green. Estimation du flux de chaleur sensible par la méthode de scintillométrie. Atelier, Oct 1996, Toulouse, France. hal-02766220

HAL Id: hal-02766220

<https://hal.inrae.fr/hal-02766220>

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.

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 (scintillations) sont liées à la turbulence et dépendent des variations de l'indice de réfraction du milieu. Les scintillomètres fournissent une mesure du paramètre de structure pour l'indice de réfraction C_N^2 qui permet d'estimer le flux de chaleur sensible et éventuellement le flux de quantité de mouvement. On pourra se reporter ici à la revue de Hill (1992). Sur le plan pratique, les longueurs de trajet optique peuvent varier de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres (selon le type d'instrument, la longueur d'onde utilisée et le diamètre du faisceau utilisé...). Parce qu'elle laisse entrevoir la possibilité d'intégrer les flux de surface sur de telles longueurs, la scintillométrie comblerait 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). Ses principaux avantages résideraient dans la facilité de mise en oeuvre sur le terrain, les possibilités de suivi en continu des flux moyens et son coût limité.

2. PRINCIPE DE L'ESTIMATION DU FLUX DE CHALEUR SENSIBLE

Nous n'indiquons ici que le principe de la méthode. Pour plus de détails, on se reportera à Green et al. (1994) et McAneney et al. (1995). Pour les scintillations dans le domaine visible ou proche infrarouge, le paramètre de structure pour la température C_T^2 est relié à C_N^2 par :

$$C_T^2 = C_N^2 (T_a^2 / \gamma p_a)^2 (1 + 0.03 / \beta)^2 \quad (1)$$

où T_a et p_a désignent la température moyenne et la pression de l'air. γ ($7.9 \times 10^{-7} \text{ kPa}^{-1}$) est un coefficient reliant l'indice de réfraction de l'air à la pression (Weseley, 1976), β le rapport de Bowen. C_T^2 est relié à l'échelle de température T_* par (Panofsky et Dutton, 1984; Hill et al., 1992) :

$$T_*^2 = C_T^2 z^{2/3} / f(z/L_{MO}) \quad (2)$$

z est la hauteur de mesure, L_{MO} la longueur de Monin-Obukhov. f est une fonction empirique universelle (Wyngaard et al., 1971) sur l'expression de laquelle il n'existe pas de consensus (voir Hill et al., 1992, De Bruin et al., 1995). L'estimation de u_* , soit à partir de la mesure de la vitesse du vent à un niveau et d'une estimation de la rugosité, soit à partir de mesures optiques (cf. ci-dessous), permet ensuite de calculer H :

$$H = \rho c_p u_* T_* \quad (3)$$

ρ est la masse volumique de l'air, c_p sa chaleur spécifique. H figurant dans l'expression de L_{MO} , un calcul itératif est ici nécessaire.

3. LES INSTRUMENTS

3.1 Les systèmes à faisceau laser

Dans le cas d'une source ponctuelle fournie par un laser, la variance du logarithme de l'intensité σ_{LnI}^2 mesurée au niveau du récepteur est reliée au paramètre de structure moyen pour l'indice de réfraction C_N^2 par :

$$\sigma_{LnI}^2 = 0.496 C_N^2 (2\pi/\lambda)^{7/6} L^{11/6} \Phi(l_0/F) \quad (4)$$

L est la longueur du trajet optique, λ la longueur d'onde, $F = (\lambda L)^{1/2}$ la première zone de Fresnel. La fonction Φ (Hill et Clifford, 1978) a été paramétrée de façon simple par Green et al. (1994). La mesure de C_N^2 nécessite la connaissance de l_0 échelle interne de turbulence. Sa détermination peut se faire à partir du taux de dissipation (paramétré en fonction de u_* et z/L) selon :

$$\varepsilon = v^3 (7.4 / l_0)^4 \quad \text{et} \quad kz\varepsilon / u_*^3 = h(z/L_{MO}) \quad (5 \text{ et } 6)$$

v viscosité cinématique de l'air, k constante de Von Karman, h fonction universelle (Wyngaard et al., 1971).

Une autre option pour déterminer I_0 consiste à combiner des mesures optiques. Thiermann et Grassl (1992) ont ainsi utilisé des mesures à 2 longueurs d'onde différentes, tandis que Thiermann (1992) a développé un instrument sur le principe de la combinaison des scintillations mesurées sur 2 trajets parallèles très voisins.

La proportionnalité entre σ_{LnI}^2 et C_N^2 n'est garantie que tant que $\sigma_{LnI}^2 \leq 1.2$. Il en résulte que, dans des conditions d'utilisation courantes, la portée de tels scintillomètres est limitée à la centaine de mètres environ ($L < 200$ m), ce qui les rend mal adaptés à l'étude de l'intégration spatiale des flux de surface. Les phénomènes de saturation sont repoussés à des distances beaucoup plus grandes (quelques kilomètres) si l'on utilise des systèmes à faisceau incohérent de grand diamètre (Wang et al., 1978).

3.2 Les scintillomètres à 'large ouverture'

Les instruments existant à l'heure actuelle sont construits sur le principe de celui de Ochs et Cartwright (1980) (voir aussi Ochs et Wilson, 1993). Le faisceau incohérent provient de la réflexion sur un miroir parabolique de la lumière émise par une diode émettrice. Au niveau du récepteur le faisceau est focalisé sur le détecteur (photodiode) par un miroir identique, et un système de filtre permet d'isoler une longueur d'onde de fonctionnement. Une modulation en fréquence du signal lumineux est faite pour le distinguer du rayonnement ambiant. On trouvera dans McAnaney et al. (1995) la description d'un appareil récent. La réponse d'un instrument de diamètre de faisceau D pour un paramètre de structure moyen C_N^2 le long du trajet optique est la suivante :

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

La courbe de sensibilité de l'instrument est une courbe 'en cloche' (fig. 1) caractérisée par une sensibilité maximum au milieu du trajet optique, et une sensibilité réduite aux extrémités (ce qui présente l'avantage de minimiser les erreurs éventuelles liées aux perturbations apportées par les supports des appareils). De façon générale, si $W(u)$ désigne la fonction de pondération (u distance normalisée x/L) dont on pourra trouver l'expression dans Wang et al. (1978), et $C_N^2(u)$ le paramètre de structure à la même distance u , C_N^2 moyen sur le trajet optique est tel que :

$$\sigma_{LnI}^2 = \int_0^1 C_N^2(u) W(u) du \quad (8)$$

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 :

$$C_N^2 = C \sigma_{LnI}^2 D_T^{7/3} L^{-3} \quad (9)$$

C est un coefficient de calibration dépendant du rapport D_R/D_T . Dans ce cas les fonctions de pondération ne présentent plus de symétrie, et leur maximum se voit décalé du côté de la plus petite ouverture (fig. 1).

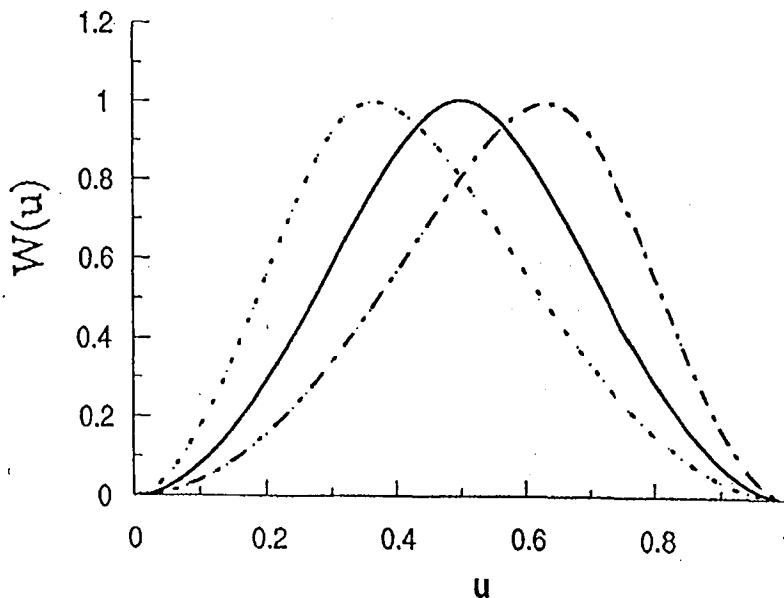


Figure 1 : Fonctions de pondération normalisées pour diverses configurations expérimentales

4. RESULTATS ACQUIS SUR DES SURFACES HOMOGENES

La détermination du flux de chaleur sensible à partir d'un scintillomètre unique impose de mettre en oeuvre des mesures micrométéorologiques complémentaires destinées en général à estimer la vitesse adimensionnelle u_* . Certains auteurs ont étudié les possibilités de combiner plusieurs mesures optiques différentes de façon à s'affranchir des mesures météorologiques. On trouvera une revue détaillée de ces travaux dans Hill et al. (1991) et Hill (1992). Nous ne donnerons dans la suite que quelques exemples de résultats récents.

Green et al. (1994) présentent des comparaisons (fig. 2) entre des flux H et des vitesses de frottement u_* issus de mesures réalisées avec un scintillomètre laser pour 2 types de surfaces (prairie et steppe à thym dominant), sur un trajet optique de 100 m. Les écarts moyens sont respectivement de 30 W m^{-2} et 0.06 ms^{-1} pour des valeurs moyennes de 300 W m^{-2} (pour H) et 0.5 ms^{-1} (pour u_* , obtenu par combinaison des mesures optiques et de mesures de la vitesse du vent et de la rugosité). Sur une distance de 100 m environ en chaume, Thiermann (1992) et Thiermann et Grassl (1992) proposent des comparaisons établies uniquement à partir de mesures optiques (au moyen d'un laser bichromatique et d'un laser à faisceau parallèle bi-polarisé).

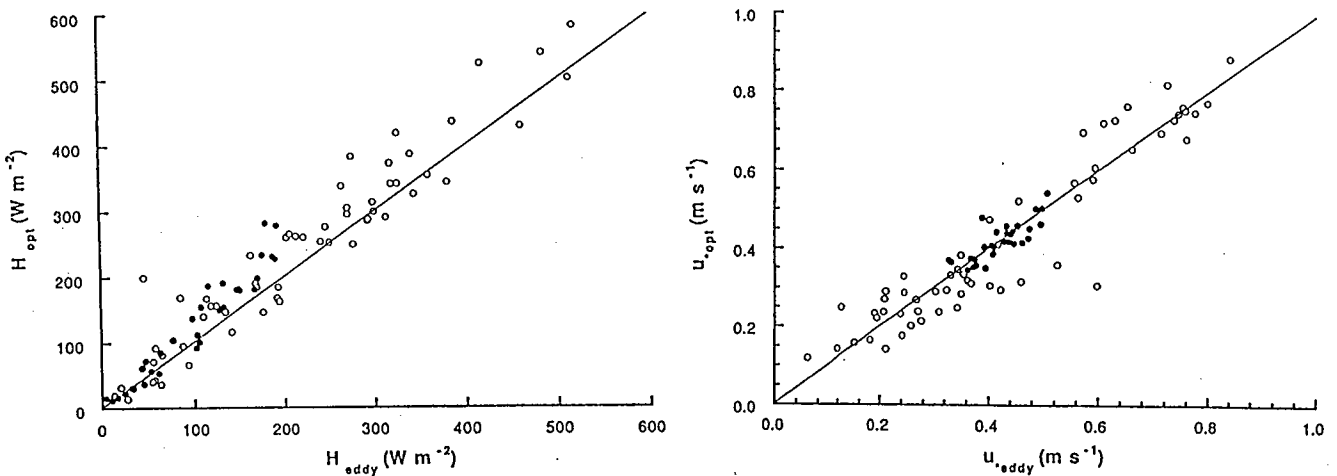


Figure 2 : Comparaison des flux de chaleur sensible H et vitesse adimensionnelle u_* estimés par scintillométrie et par la méthode des fluctuations (d'après Green et al. 1994)

En matière de scintillométrie 'large ouverture' (LA), on trouve plusieurs exemples d'estimation de H sur des distances beaucoup plus importantes (fig. 3) : 260 m de jachère herbeuse (Lagouarde et al., 1994), 350 m de prairie (McAneney et al., 1995), 875 m de vignoble (De Bruin et al., 1995)... Les résultats sont prometteurs dans le cas de conditions instables. En revanche, la validité de la méthode -en particulier la paramétrisation de la fonction $f(z/L)$ - reste à vérifier dans le cas de conditions stables (De Bruin et al., 1995). Après une première expérience réalisée sur une distance de 1640 m, les conditions de mise en oeuvre de la méthode sur couvert forestier restent encore à préciser (Kohsiek, 1992).

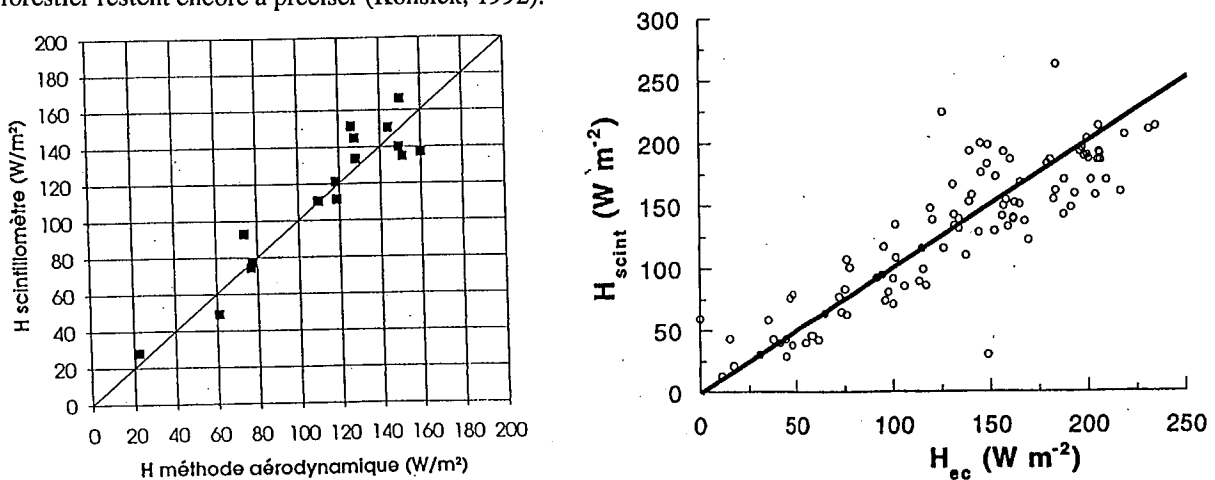


Figure 3 : Comparaison entre le flux H obtenu par scintillométrie LA sur jachère (a) et sur prairie (b) et le flux issu de la méthode des fluctuations.

A la suite de Hill et al. (1992), Green et al. (1996) ont testé l'utilisation combinée d'un scintillomètre laser et d'un LA (ISM 'inner-scale meter') de façon à s'affranchir des mesures micrométéorologiques. Si les résultats sont acceptables pour le flux de chaleur sensible, ils restent encore de qualité insuffisante pour l'estimation directe du flux de quantité de mouvement.

Enfin, Hill et al. (1992) ont tenté de déterminer simultanément les flux de chaleur et de quantité de mouvement en combinant 2 scintillomètres placés à 2 hauteurs différentes au-dessus d'une surface semi-aride, le long d'un trajet de 600 m environ. Cette méthode est très sensible à la qualité des instruments utilisés, et la précision obtenue sur les flux est encore insuffisante.

5. CAS DES SURFACES HETEROGENES

Les travaux menés au-dessus de surfaces hétérogènes sont encore très rares, et n'ont été menés qu'avec des scintillomètres LA.

De Bruin (communication orale, 1996) rapporte des résultats obtenus en Crète (Grèce) au-dessus d'un parcellaire agricole très morcelé de fond de vallée en plaçant l'émetteur et le récepteur sur des collines environnantes (trajet de 4.8 km). Le fait de se placer à une hauteur importante au-dessus de la surface où la convection l'emporte sur la turbulence d'origine mécanique permet de minimiser les erreurs liées à la méconnaissance de la rugosité.

Des travaux sur des surfaces composites simples maïs/jachère ont été récemment menés à l'INRA dans les Landes (Sud-Ouest de la France) (Lagouarde et al., 1995, 1996). La détermination directe du flux H à l'aide d'un seul scintillomètre n'est possible que dans des cas très particuliers. Ainsi la figure 4 rassemble des résultats obtenus sur un trajet de 600 m constitué à parts égales de maïs et de jachère, à un moment (mai-juin) où les deux surfaces présentaient des caractéristiques aérodynamiques (rugosité et hauteur de déplacement) très proches.

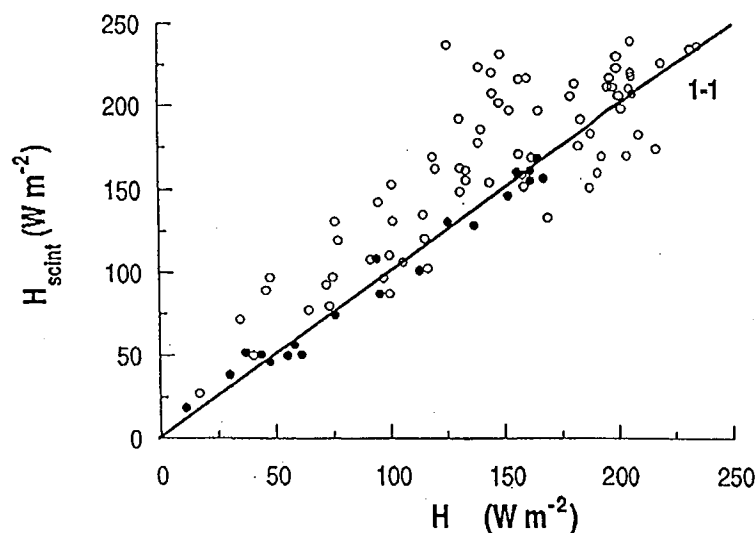


Figure 4 : Comparaison entre le flux H moyen obtenu par scintillométrie LA sur un trajet composé de 300 m de maïs et 300 m de jachère, et le flux issu de la méthode des fluctuations (voir Lagouarde et al. 1996 pour détails).

Dans le cas général où se combinent des différences sur les proportions de chacune des deux cultures le long du trajet optique, sur leur état hydrique (irrigué/non irrigué), et sur leurs caractéristiques aérodynamiques (mesures à divers stades du maïs), seule a pu être vérifiée expérimentalement la loi de pondération des paramètres de structure C_N^2 (fig. 5). L'effet de la combinaison de diamètres d'émetteur et de récepteur différents sur la pondération de C_N^2 a également pu être testé au cours du même travail. Il apparaît que la combinaison de plusieurs mesures de scintillations avec des configurations instrumentales variées (mise en oeuvre simultanée d'appareils de diamètres différents dans le but de réaliser plusieurs échantillonnages du même trajet par exemple) pourrait fournir le moyen d'estimer le flux moyen sur des parcellaires composites. Cette voie devrait être explorée dans le cadre de la prochaine expérience Alpilles/ReSeDA.

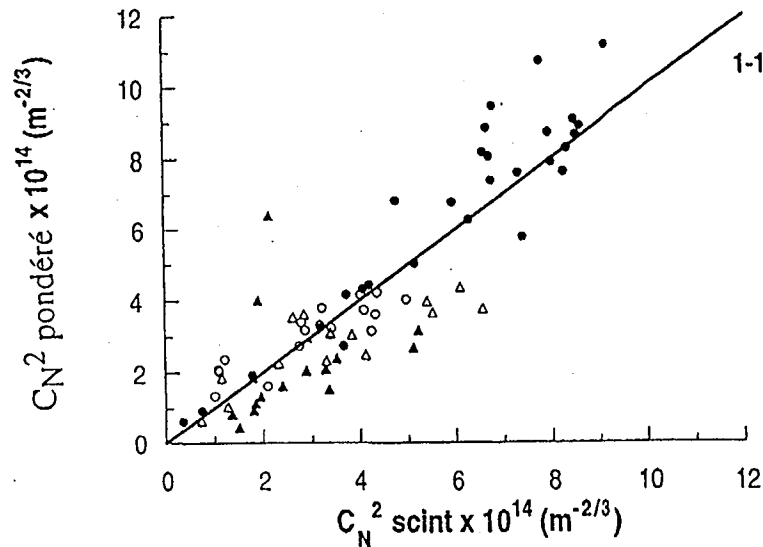


Figure 5 : Comparaison des C_N^2 mesurés par scintillométrie LA et déterminés à partir de mesures micrométéorologiques sur des surfaces composites maïs/jachère (les symboles correspondent à diverses configurations expérimentales; voir Lagouarde et al., 1996).

6. CONCLUSION

A l'heure actuelle, les meilleurs résultats en termes de flux de chaleur sensible ont été obtenus en combinant une estimation de la température adimensionnelle T^* par scintillométrie avec une estimation de la vitesse de frottement u_* faite à partir de mesures classiques de micrométéorologie. La détermination des flux de chaleur sensible et de quantité de mouvement semble possible uniquement à partir de mesures optiques (plusieurs configurations sont envisageables : combinaison de systèmes laser et LA, combinaison de plusieurs instruments LA opérant à des hauteurs différentes, combinaisons de divers diamètres d'ouverture d'émetteurs et de récepteurs...), mais exige encore une amélioration de la précision des instruments utilisés. Par ailleurs, les méthodes proposées souffrent encore de paramétrisations inadéquates en conditions stables. Enfin, sur les zones hétérogènes telles que le parcellaire agricole, les travaux sont encore peu nombreux et un effort de recherche doit être fait dans ce sens.

7. BIBLIOGRAPHIE

- De Bruin H.A.R., Van Den Hurk B.J.J.M., Koshiek W., 1995 :** The scintillation method tested over a dry wineyard area. *Boundary-layer Meteorol.*, 76, 25-40.
- De Bruin H.A.R., 1996 :** communication orale, Atelier "Scaling-up in Hydrology using remote sensing", 10-12 Juin 1996, Institut d'Hydrologie, Wallingford, Grande-Bretagne
- 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.
- Green, A.E., McAneney, K.J., Lagouarde J.P., 1996 :** Sensible heat and momentum flux measurement with an optical scale meter. A paraître dans *Agric. For. Meteorol.*
- Hill R.J., Clifford S.F., 1978 :** Modified spectrum of atmospheric turbulence fluctuations and its application to optical propagation. *J. Opt. Soc. Am.*, 68, 892-899.
- Hill R.J., Ochs G.R., Wilson J.J., Furtney D.A., Priestley J.T., 1991 :** Results of the 1988 fluxes-from-scintillation experiment. NOAA Technical Memorandum ERL WPL-192, 147pp.
- Hill R.J., 1992 :** Review of optical scintillation methods of measuring the refractive-index spectrum, inner scale and surface fluxes. *Waves in Random Media*, 2, 179-201.
- Hill R.J., Ochs G.R., Wilson J.J., 1982 :** Measuring surface-layer fluxes of heat and momentum using optical scintillation. *Boundary-layer Meteorol.*, 58, 391-408.
- Koshiek W., 1992 :** A scintillation experiment over a forest. KNMI scientific report WR-92-04. 22pp.
- Lagouarde J.P., McAneney K.J., 1994 :** Flux de surface en parcellaire hétérogène: test de la méthode des scintillations. *Atelier de Modélisation de l'Atmosphère*, Toulouse, 29 Nov.-1 Déc., 113-120.

- Lagouarde J.P., McAneney K.J., Green A.E., 1995 :** 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*, CNRM, Météo France, Toulouse, 28-30 Novembre 1995, 8p.
- Lagouarde J.P., McAneney K.J., Green A.E., 1996 :** Spatially-averaged measurements of sensible heat flux using scintillations : first results above a heterogeneous surface. *Atelier "Scaling-up in Hydrology using remote sensing"*, 10-12 Juin 1996, Institut d'Hydrologie, Wallingford, Grande-Bretagne, Wiley & sons Ed., 147-160.
- McAneney, K.J., Green, A.E. and Astill, M.S., 1995 :** Large-aperture scintillometry: the homogeneous case. *Agric. and Forest Meteorol.*, 76, 149-162.
- Ochs G.R., Cartwright W.D., 1980 :** Optical system model IV for space-averaged wind and C_N^2 measurements. NOAA Tech. Memor. ERL WPL-52. NOAA Environmental Research Laboratories, Boulder, CO, USA.
- Ochs G.R., Wilson J.J., 1993 :** A second-generation large-aperture scintillometer. NOAA technical Memorandum ERL WPL-232. NOAA Environmental Research Laboratories, Boulder, CO, USA.
- Panofsky H.A., Dutton J.A., 1984 :** Atmospheric Turbulence: Models and Methods for Engineering Applications. *John Wiley & Sons, Inc.* NY, 397pp.
- Thiermann V., Grassl H., 1992 :** The measurement of turbulent surface-layer fluxes by use of bichromatic scintillation. *Boundary-layer Meteorol.*, 58, 367-389.
- Thiermann V., 1992 :** A displaced-beam scintillometer for line-averaged measurements of surface layer turbulence. *10th Symposium on Turbulence and diffusion*, American Meteorological Society, Portland, Oregon, Sept 29-Oct 2, 1992.
- Wang Ting-i, Ochs G.R., Clifford S.F., 1978 :** A saturation-resistant optical scintillometer to measure C_N^2 . *J. Opt. Soc. Am.*, 68 334-338.
- Weseley M.L., 1976 :** The combined effect of temperature and humidity fluctuations on refractive index. *J. Appl. Meteorol.*, 15, 43-49.
- Wyngaard J.C., Izumi Y., Collins S.A., 1971 :** Behaviour of the refractive index structure parameter near the ground. *J. Opt. Soc. Am.*, 61, 1646-1650.