

VARIABILITÉ DES FLUX DE SURFACE LORS DE TRANSITIONS SEC/IRRIGUÉ

B. ITIER¹, Y. BRUNET², J.P. LAGOUARDE³, J. McANENEY⁴, D. FLURA⁵

RÉSUMÉ

L'étude, conduite par deux équipes du département de bioclimatologie de l'Inra (Unité de Bioclimatologie de Grignon – Centre de Grignon-Massy – Paris et Unité de Bioclimatologie de Bordeaux, s'inscrit dans le cadre de l'expérience Efeda, organisée en Espagne en 1991 par différentes équipes de recherches atmosphériques et de science du sol des pays de la communauté européenne.

Cette participation correspondait à un double objectif :

- améliorer la paramétrisation des flux de surface au moyen de modèles faisant intervenir la température radiative obtenue par thermographie infrarouge. Cette première partie était directement financée par le projet Efeda ;
- effectuer un contrôle expérimental d'une hypothèse relative à l'évolution longitudinale des flux en situation d'advection locale. Cette deuxième partie bénéficiait de l'appui du programme Pamos et fera l'objet de l'essentiel du compte rendu.

¹Inra - Département de Bioclimatologie - F 78550 Thiverval-Grignon.

²Inra - Bioclimatologie - BP 81 - F 33883 Villenave d'Ornon cedex.

³Inra - Bioclimatologie - BP 81 - F 33883 Villenave d'Ornon cedex.

⁴New Zealand Research Centre - PO Box 23 - Kerikeri - New Zealand.

⁵Inra - Bioclimatologie - F 78550 Thiverval-Grignon.

PROBLÉMATIQUE

La plupart des modèles d'estimation de l'évapotranspiration régionale utilisent la température de surface pour déterminer les flux de chaleur sensible sur des zones homogènes de la mosaïque du paysage, afin de déduire l'évapotranspiration de l'énergie disponible ($R_n - G$).

Les différentes études conduites au cours des dix dernières années, qu'il s'agisse de l'élaboration des relations dites « simplifiées » (JACKSON *et al.*, 1977, SEGUIN et ITIER, 1983 ; RIOU *et al.*, 1988 ; LAGOUARDE et McANENEY, 1992) ou de modèles de couche limite (BRUNET *et al.*, 1991 ; TACONET *et al.*, 1986 ; CARLSON *et al.*, 1981) ont cherché à améliorer les relations flux-température par la prise en compte de l'importance de la rugosité d'une part, de la stabilité thermique des basses couches d'autre part et de la différence entre rugosité thermique et rugosité dynamique d'autre part. Aucune étude n'a porté sur la possibilité d'une évolution longitudinale des flux lors de transitions entre zones voisines fortement contrastées ni sur l'incidence de cette évolution sur l'estimation des flux moyens. Dans toutes les études, en effet, on suppose de façon implicite qu'à l'homogénéité de température à l'intérieur de chaque élément de la mosaïque correspond une homogénéité de flux de surface.

Le premier auteur de ce rapport s'était fortement investi dans les années 75 à 80 dans l'étude des phénomènes d'advection locale (ITIER et PERRIER, 1976a, 1976b, 1978 ; ITIER *et al.*, 1978 ; ITIER *et al.*, 1983).

Lors d'une transition entre deux zones d'états surfaciques différents les flux évoluent approximativement comme $F = F_0 + aX^b$ où F_0 est un flux sur la zone amont, X la distance à cette zone et b un exposant voisin de 0,15.

Ce type d'évolution a été parfaitement confirmé par des études expérimentales conduites sur des lacs, des sols nus ou des zones irriguées par submersion. On pensait qu'il en était de même pour les zones irriguées entourées de zones sèches. Un nouvel examen des différentes mesures publiées dans la littérature a conduit à penser qu'il pourrait ne pas en être ainsi et que l'on pourrait avoir affaire à une réponse biologique de la végétation au voisinage des transitions qui conduirait à avoir des flux pratiquement constants sur la surface irriguée (ITIER *et al.*, 1994).

C'est cette interrogation qui est à la base du projet présenté au comité Pamos en 91. En effet, cette hypothèse repose non pas sur des mesures de flux, mais sur des observations relatives aux transects de température au-dessus de zones irriguées : ceux-ci semblent en effet évoluer comme si l'on avait affaire à des flux constants en surface. Il s'agissait donc, d'une part de mettre en œuvre une expérience qui permette à la fois de se faire une idée de l'évolution des flux en fonction de la distance au bord au-dessus d'une zone irriguée, et d'autre part d'être à même de contrôler que si ces flux sont quasiment constants, cela provient bien d'une adaptation biologique. Par voie de conséquence, il s'agissait d'effectuer des mesures de résistance de surface en fonction de la position au sein de la zone irriguée.

PARTICIPATION AU PROJET EFEDA 1991

L'expérience Efeda (BOLLE *et al.*, 1993) a eu lieu en mai et juin 91 en Espagne, dans la région d'Albacete (Castille La Manche). Elle s'appuyait sur trois sites expérimentaux, l'un sur zone de vignobles à Tomelloso, le second à Belmonte sur une zone vallonnée et peu cultivée, et le troisième à Barrax, sur une zone de plateaux comportant une forte proportion de zones irriguées cultivées de maïs, le reste étant couvert d'orge conduit en sec. C'est sur ce troisième site que l'expérimentation de l'Inra a été effectuée du 24 mai au 19 juin (figure 1). Pour des raisons indépendantes de notre volonté, il n'a pas été possible d'effectuer l'expérience sur un couvert irrigué de maïs de 1 kilomètre de diamètre comme prévu initialement dans le projet. La seule possibilité que nous avons eue a consisté à équiper en irrigation un hectare environ au sein d'une surface d'orge de plus d'1 kilomètre carré (figure 1).

MATÉRIELS ET MÉTHODES

MESURE DES FLUX

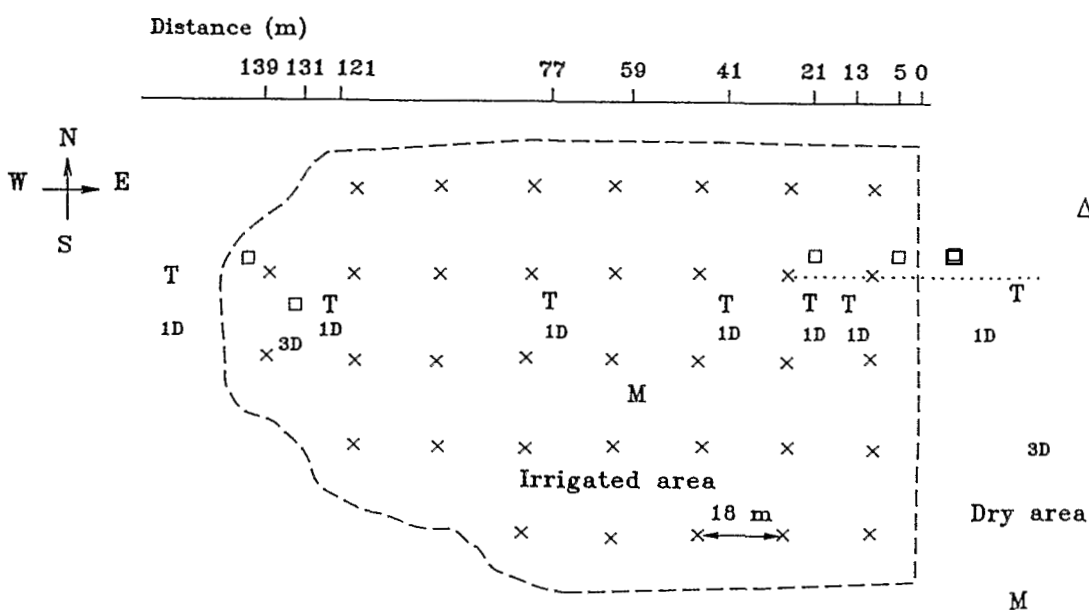


Figure 1 :

Schéma du dispositif expérimental. Les différents symboles indiquent les positions des anémomètres soniques tridimensionnels (3D), les anémomètres soniques monodimensionnels (1D), des capteurs de température et d'humidité de l'air (T), des chambres d'évaporation (q), des stations micrométéorologiques type Samer (M), du profil vertical de vent (D), des aspersionnaires (x) et des transects de température de surface (-----).

L'estimation de l'évolution longitudinale des flux a été effectuée au moyen d'anémomètres soniques mono et tridimensionnels, installés à une hauteur de un mètre au-dessus du couvert à différentes distances du bord (figure 1). La procédure retenue pour décrire l'élaboration de mesures propres est largement décrite dans BRUNET *et al.* (1994). Le problème essentiel consistait non pas à avoir une mesure très précise du flux en lui-même, mais à obtenir une grande précision relative, de manière à pouvoir adopter l'hypothèse de constance de flux. Pour cela deux points ont été particulièrement fouillés :

- nous avons procédé à un étalonnage relatif systématique des anémomètres soniques avant chaque expérimentation par installation sur une barre horizontale de tous les anémomètres ;
- nous avons attaché une grande importance au phénomène « d'empreinte » (footprint dans la littérature anglo-saxonne spécialisée), compte tenu du fait qu'il ne nous était pas possible d'effectuer des mesures au niveau de la surface elle-même. Pour cela, nous avons effectué des mesures de variation verticale de flux depuis 50 centimètres jusqu'à une hauteur de 8 mètres, et comparé les résultats avec la fonction « footprint » utilisée dans le modèle ITIER et PERRIER (1976 a).

MESURES DE RÉSISTANCE

L'hypothèse de constance des flux a conduit à réaliser un modèle d'évolution de résistance de surface (ITIER *et al.*, 1994). Les mesures envisagées ont consisté à tester deux types de résistances de surface.

La résistance stomatique mesurée au moyen de poromètres Delta T. Device

Les mesures ont été effectuées en zone non irriguée, dans les cinq premiers mètres de la zone irriguée, et au-delà de 80 mètres dans la direction du vent, au sein de la zone irriguée. On a supposé que l'évolution relative des résistances stomatiques donnait une bonne estimation de l'évolution des résistances de surface.

Résistance de surface au moyen de chambres

On a construit des chambres amovibles de un mètre cube dont les côtés et le sommet étaient en polyéthylène transparent, et qui pouvaient être abaissées sur un mètre carré de végétation. En supposant que les paramètres biologiques restent constants dans les 30 secondes qui suivent l'abaissement de la chambre sur la végétation, il est possible de déduire la résistance moyenne du mètre carré d'orge de l'évolution de l'humidité de l'air à l'intérieur de la chambre. On trouvera des détails dans BRUNET *et al.*, (1994).

Comme pour les poromètres, les mesures ont été faites en zone sèche, près du bord au vent sur la zone irriguée, et au-delà de 80 mètres du bord, sur la même zone irriguée.

TEMPÉRATURE RADIATIVE DE SURFACE

Selon que l'on a affaire à une transition à concentration constante ou à flux constant, l'évolution de la température au voisinage de la transition *sec-irrigué* est différente. On a donc procédé à des transects de température radiative au moyen d'un radio-thermomètre Heiman KT 17 visant à 30° du nadir à partir d'un système portable évoluant le plus régulièrement possible.

PROCÉDURE D'IRRIGATION

L'irrigation était fournie au moyen d'asperseurs la veille du jour de l'expérimentation, de manière à ce que l'on ait affaire à une culture irriguée **et non pas à une culture mouillée.**

DONNÉES DISPONIBLES

Nous disposons de 5 jours d'expérience compris entre le 29 mai et le 11 juin, date à partir de laquelle l'orge était trop mûre pour espérer avoir une réponse physiologique intéressante. Le nombre de jours où nous avons pu expérimenter a été conditionné d'une part par l'absence de couverture nuageuse et, d'autre part, par la direction du vent. Nous avons organisé les appareils dans le sens du vent dominant (figure 1). Malheureusement nous n'avons pu avoir un vent dans cette direction que pour deux journées et avons dû modifier l'installation des appareils pour pouvoir effectuer des enregistrements en profitant des journées de vent d'ouest.

Les journées après le 11 juin ont été utilisées pour des opérations d'inter-étalonnage et d'établissement d'effets *footprint*.

RÉSULTATS*VARIATION DES FLUX*

La figure 2 fournit des exemples de transect au moyen des anémomètres soniques. Si l'on s'en tient à ces figures, on peut conclure que l'hypothèse de constance des flux est bien vérifiée. Il faut toutefois se souvenir qu'il ne s'agit pas de flux de surface mais de flux mesurés à un mètre de hauteur. Il s'agissait donc de restituer l'évolution des flux de surface en utilisant une fonction *footprint* comme celle présentée en figure 3.

Cette restitution conduit à élaborer une forme adimensionnée de l'écart des flux entre zone-aval et zone-amont, en normant par une différence moyenne calculée à partir de toutes les positions de mesures (figure 4). Malgré une forte dispersion de points, liée à des problèmes de précision de mesure, et en dépit des grandes

précautions prises, on constate que les points correspondent davantage à une évolution de type *flux constant* qu'à une évolution de type *concentration constante*, ce qui va bien dans le sens de l'hypothèse à tester.

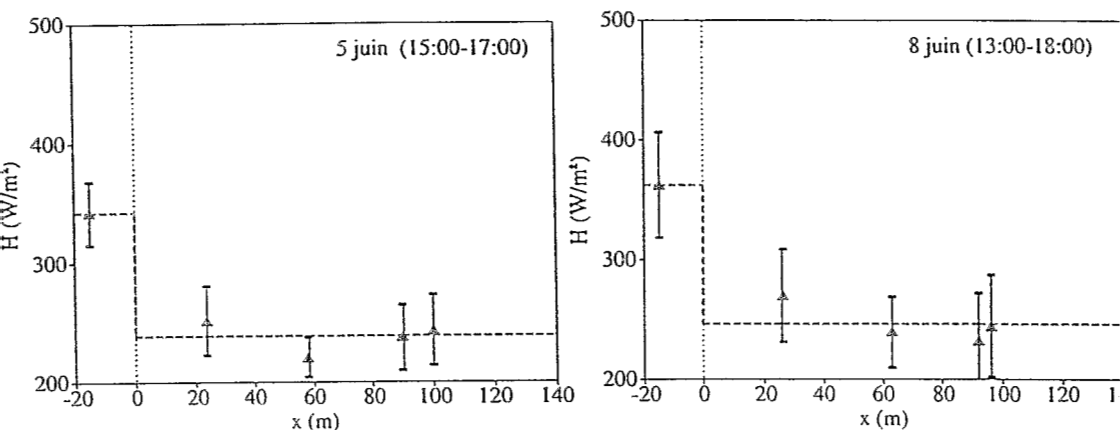


Figure 2 :

Transects de flux de chaleur sensible au cours d'une transition « sec-irrigué » (moyenne sur 10 mn et écarts-types).

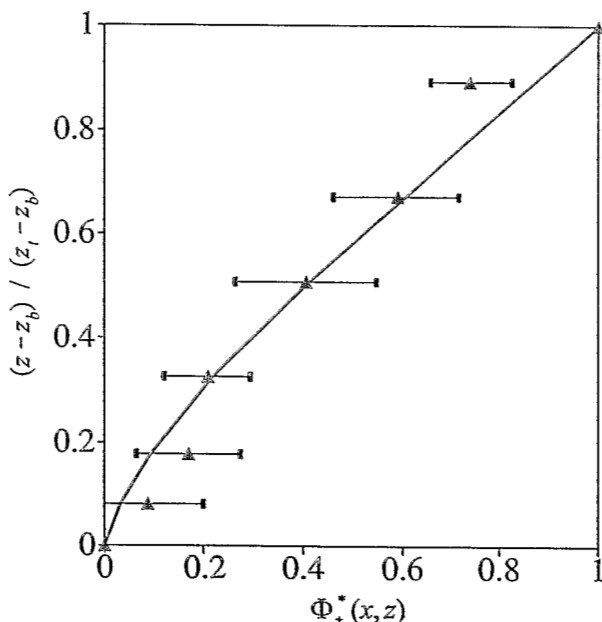


Figure 3 :

Profils de flux de chaleur sensible normalisés entre le sommet (6,73 m) et la base (0,66 m) des niveaux de mesures. La courbe en traits pleins provient du modèle ITIER et PERRIER (1976).

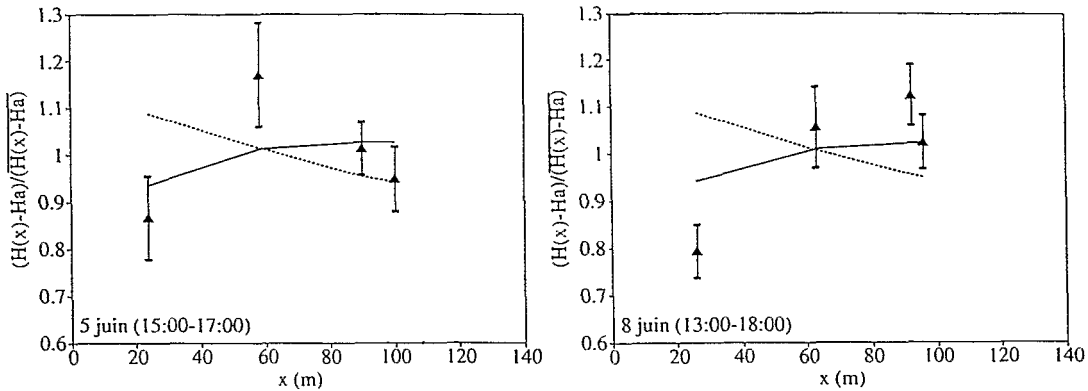


Figure 4 :

Variation sous le vent des différences de flux de chaleur sensible avec la zone au vent, normalisée par la différence moyenne calculée sur toutes les positions sous le vent. La courbe en traits pleins représente un saut de flux, et celle en tiretés un saut de concentration dans le modèle d'TIER et PERRIER (1976).

VARIATION DES RÉSISTANCES

Les valeurs des résistances stomatiques sont présentées sur le tableau 1.

En dépit d'une dispersion des mesures, on observe une différence systématique entre les valeurs mesurées au bord de l'irrigation et celles obtenues plus loin dans la zone irriguée.

La conductance stomatique est systématiquement plus forte au loin de ce qu'elle est au bord, ce qui va bien dans le sens du modèle retenu, en supposant que les flux sont constants.

Cette différence systématique est confirmée par les valeurs de résistance de surface déduites des mesures d'humidité à l'intérieur des chambres amovibles. On a porté sur la figure 5 l'ensemble des résultats des différentes expériences sous la forme du rapport entre la résistance au bord et la résistance au loin dans la zone irriguée. Ces rapports ont été calculés à partir de mesures au poromètre présentées au tableau 1 (□) et à partir des mesures d'humidité dans les chambres (+). Ils sont comparés aux valeurs théoriques obtenues à partir du modèle

présenté dans *ITIER et al.* (1994) en supposant l'évapotranspiration constante sur toute la zone (ce modèle nécessite la mesure de l'évapotranspiration et de l'écart de température entre les deux zones).

On constate d'une part que les valeurs résultant des poromètres et des chambres sont très cohérentes entre elles. Elles donnent toutes deux des valeurs dans la gamme 1,2 à 1,5, alors que si l'on avait affaire à un simple changement de concentration, comme dans le cas d'un sol nu non irrigué, ou d'un lac, on aurait un rapport égal à 1. D'autre part, les deux méthodes de mesure sont en assez bon accord avec le modèle proposé dans *ITIER et al.*, (1994).

Tableau 1
Valeurs des résistances stomatiques

Date	Mai 29	Juin 2	Juin 5	Juin 5	Juin 7	Juin 7	Juin 7	Juin 8	Juin 8	Juin 8	Juin 8	Juin 8
Heure	15:00	15:00	12:30	13:20	11:40	12:30	14:00	12:00	13:00	14:20	16:40	17:50
g_s (près)	1,1 ±0.10	3 ±0.80	2,6 ±0.74	1,63 ±0.57	1,26 ±0.40	1,88 ±0.64	1,58 ±0.34	2,78 ±0.72	1,75 ±0.30	1,98 ±0.56	2,14 ±1.24	1,37 ±0.41
g_s (loin)	1,63 ±0.09	4,72 ±1.10	3,1 ±2.00	2,22 ±0.56	2,01 ±0.57	2,14 ±0.50	2,15 ±0.39	3,32 ±0.78	3,28 ±1.10	2,95 ±0.77	2,34 ±0.38	1,58 ±0.40

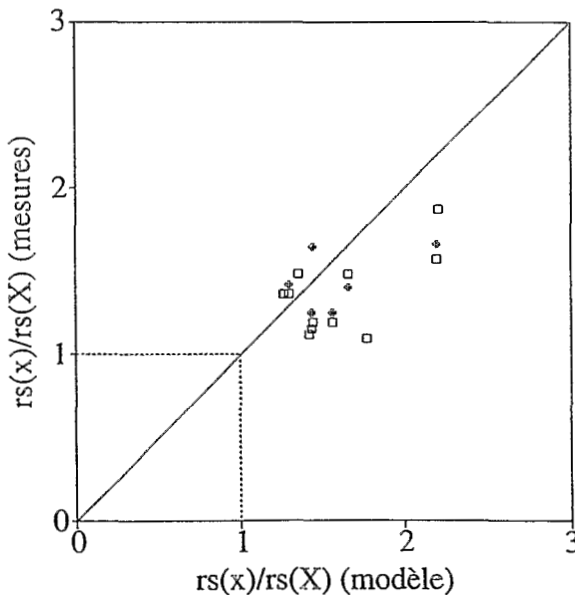


Figure 5 :

Comparaison sur l'ensemble des runs du tableau 1 des valeurs de la résistance stomatique près du bord d'irrigation (1 à 5 m), normalisée par les valeurs au loin (80 à 100 m), avec les valeurs théoriques résultant d'un saut d'évapotranspiration à partir du modèle d'*ITIER et PERRIER* (1976)

□ mesures au poromètre
+ mesures à partir des chambres d'évapotranspiration.

VARIATION DES TEMPÉRATURES DE SURFACE

La figure 6 donne l'évolution de l'écart normalisé de température radiative pour l'ensemble des 32 transects effectués, comparé d'une part (tiretés) à un saut de concentration, et d'autre part (traits pleins) à la courbe théorique correspondant à un saut de flux dans le modèle de ITIER et PERRIER (1976). Là aussi, malgré la dispersion des mesures inhérentes à ce type de surface, on constate que les points expérimentaux se rapprochent davantage de la situation *flux constants* que de la situation *température constante*.

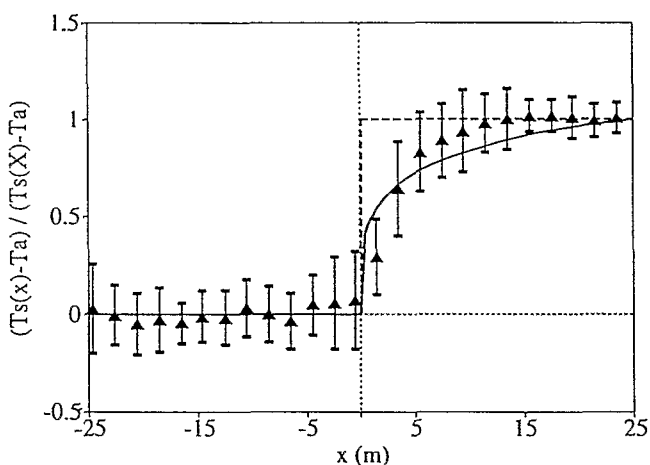


Figure 6 :

Moyenne des transects d'écart de température radiative (32 transects). La ligne en traits pleins représente l'évolution résultant d'un saut de flux. Celle en tiretés l'évolution résultant d'un saut de température.

CONCLUSION

Bien que les conditions expérimentales n'aient pas toujours été idéales, il résulte de cette étude qu'il semble bien y avoir un effet feed-back entre résistance stomatique et déficit de pression de vapeur d'eau qui conduit à une quasi-constance des flux au-dessus d'une zone irriguée. Cette idée a été exploitée parallèlement par KROON et DE BRUIN (1993) en utilisant la formulation des résistances adoptée par NOILHAN et PLANTON (1989) pour mettre en œuvre le modèle d'advection de RAO *et al.* (1974). Même si des doutes subsistent sur la réalité de cette constance des flux au niveau de la surface (figure 4) il n'en reste

pas moins que, dans une optique d'utilisation météorologique, on peut raisonnablement supposer que les flux sont constants au-dessus d'une surface, dès lors qu'ils le sont déjà à un mètre de hauteur (figure 2).

C'était bien celui de nos objectifs qui intéressait le plus le comité de recherche atmosphérique, puisqu'il s'agissait d'établir que, au sein d'une mosaïque de surfaces, on peut supposer qu'il y a homogénéité de flux dès que la température radiative est homogène.

BIBLIOGRAPHIE

- BOLLE H.J., *et al.* (35 co-auteurs), 1993. Efedra : European field experiment in a desertification-threatened area. *Ann. Geophys.*, 11, 173-189.
- BRUNET Y., ITIER B., MCANENEY K.J., LAGOUARDE J.P., 1994. Downwind evolution of scalar fluxes and surface resistance under conditions of local advection. Part II : Measurements over barley. *Agric. For. Meteorol.*, 71, 227-245.
- BRUNET Y., NUNEZ M., LAGOUARDE J.P., 1991. A simple method for estimating regional evapotranspiration from infrared surface temperature data. *ISPR J. Photogramm. Remote Sensing*, 46, 311-327.
- CARLSON T.B., DODD J.K., BENJAMIN S.G., COOPER J.N., 1981. Satellite estimation of the surface energy balance moisture availability and thermal inertia. *J. appl. Meteorol.*, 20, 67-87.
- ITIER B., PERRIER A., 1976a. Présentation d'une étude analytique de l'advection. I- Advection liée aux variations horizontales de concentration et de température. *Ann. agron.*, 27, 2, 111-140.
- ITIER B., PERRIER A., 1976b. Présentation d'une étude analytique de l'advection. II- Application à la mesure et à l'estimation de l'évapotranspiration. *Ann. agron.*, 27, 4, 417-433.
- ITIER B., PERRIER A., 1978. Un modèle analytique d'advection locale. Journées d'Études de l'Action Thématique Programmée « Recherches Atmosphériques ». Session couche limite planétaire, Institut national d'astronomie et de géophysique (FRA), Palaiseau (FRA), 1978/03/15-17 ; *J. Rech. Atmos.*, 12, 2/3, 143-148.
- ITIER B., PERRIER A., GOSSE G., 1978. Présentation d'une étude analytique de l'advection. III. Vérification expérimentale du modèle. *Ann. agron.*, 29, 3, 209-222.
- ITIER B., CARDON D., BAILLE A., 1983. Influence d'une nappe d'eau sur le microclimat environnant. II - Contrôle expérimental de modèles d'advection locale. *J. Rech. atmos.*, 17, 1, 33-44.

- ITIER B., BRUNET Y., McANENEY K.J., LAGOUARDE J.P., 1994. Downwind evolution of scalar fluxes and surface resistance under conditions of local advection. Part I: A reappraisal of boundary conditions. *Accepted Agric. For. Meteorol.*, 71, 211-225.
- JACKSON R.D., REGINATO R.J., IDSO S.B., 1977. Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. *Water Resources Res.*, 13, 651-656.
- KROON L.M.J., DE BRUIN H.A.R., 1993. Atmosphere-vegetation interaction in local advection conditions : effect of lower boundary conditions. *Agric. For. Meteorol.*, 64, 1-28.
- LAGOUARDE J.P., McANENEY K.J., 1992. Daily sensible heat flux estimation from a single measurement of surface temperature and maximum air temperature. *Boundary Layer Meteorol.*, 59, 4, 341-362.
- McANENEY K.J., BRUNET Y., ITIER B., 1993. Downwind evolution of transpiration by two irrigated crops under conditions of local advection. *J. Hydrol.* 161, 375-388.
- NOILHAN J., PLANTON S., 1989. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Monthly Weather Rev.*, 117, 536-549.
- RAO K.S., WYNGAARD J.C., COTE O.R., 1974. Local advection of momentum, heat, and moisture in micrometeorology. *Boundary Layer Meteorol.*, 7: 331-348.
- RIOU C., ITIER B., SEGUIN B., 1988. The influence of surface roughness on the simplified relationship between daily evaporation and surface temperature. *Int. J. Remote Sensing*, 9, 9, 1529-1533.
- SEGUIN B., ITIER B., 1983. Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal I.R. data. *Int. J. Remote Sensing*, 4, 2, 371-383.
- TACONET O., BERNARD R., VIDAL-MADJAR D., 1986. Evapotranspiration over an agricultural region using a surface flux temperature model based on NOAA-AVHRR data. *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 25, 284-307.