



**HAL**  
open science

# Déterminisme et mesure de la durée d'humectation en vue de la protection des plantes

L Huber

► **To cite this version:**

L Huber. Déterminisme et mesure de la durée d'humectation en vue de la protection des plantes. Agronomie, 1992, 12 (4), pp.281-295. hal-00885474

**HAL Id: hal-00885474**

**<https://hal.science/hal-00885474>**

Submitted on 11 May 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.

# Déterminisme et mesure de la durée d'humectation en vue de la protection des plantes

L Huber

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE  
INRA - DOCUMENTATION  
17, Rue Sully - B.V. 1540  
21034 DIJON CEDEX  
Tél. 80.63.30.02

INRA, station de bioclimatologie, centre de recherches Grignon-Massy-Paris 78850 Thiverval-Grignon, France

(Reçu le 18 avril 1991; accepté le 21 février 1992)

**Résumé** — Due principalement aux précipitations sous forme de pluie ou de rosée, l'humectation des organes végétaux joue un rôle déterminant lors du processus de contamination des plantes par de nombreux agents phytopathogènes fongiques. Au même titre que la température, la durée d'humectation constitue une variable importante des modèles de simulation des épidémies et des systèmes d'avertissements agricoles. Une revue critique des méthodes instrumentales mises en œuvre pour estimer la durée d'humectation à l'échelle de la feuille ou du couvert végétal est présentée, avec pour objectif de répondre à la demande émanant du secteur de la protection des plantes.

**eau libre / durée d'humectation / méthode de mesure / protection des plantes**

**Summary** — **Causes of wetness periods and measurement of leaf wetness duration for plant protection purposes.** *Mainly as a result of precipitation in the form of rainfall or dew, moisture on leaves plays a major role during the process of plant infection by a number of fungal pathogens. Leaf wetness duration and temperature must be taken into account in developing plant disease epidemic models or agricultural warning systems. Natural and artificial causes of canopy wetness are described. Leaf wetness duration (a variable that is difficult to define) is governed by both leaf and canopy structural parameters. Several physical principles are used to construct various types of sensors (mechanical instruments, resistance sensors, radiometric methods). A critical review of the instrumentation available for measuring leaf wetness duration is presented. Both leaf and canopy scales are considered in an effort to answer the demand from plant pathology and plant protection specialists.*

**Free moisture / leaf wetness / wetness duration / measurement method / plant protection**

## INTRODUCTION

La présence d'eau libre sur les organes végétaux agit sur divers processus biologiques, chimiques ou physiques, d'importance agronomique qui se déroulent aux interfaces du système plante-atmosphère.

La présence d'eau libre, encore appelée « humectation », joue un rôle important dans

l'épidémiologie des maladies des plantes (Friesland et Schrödter, 1988; Campbell et Madden, 1990) et constitue une variable fondamentale dans nombreux systèmes de prévision (Jones, 1986). Le déclenchement des épidémies est souvent la résultante d'une succession ou d'une coïncidence plus ou moins exceptionnelle d'événements météorologiques favorables (Rapilly, 1983) : à ce titre, la phase de contamination de l'hôte par un inoculum fongique dépend très étroitement des condi-

tions micrométéorologiques et de la durée d'humectation en particulier.

Pour la grande majorité des champignons phytopathogènes, rappelons que la phase de contamination se compose successivement de la germination des spores, de l'élongation des tubes germinatifs et de la pénétration à l'intérieur de l'hôte. La réussite potentielle de la contamination est une fonction de 2 variables, à savoir la durée d'humectation et la température de surface, déterminantes de la vitesse de réalisation de cette phase du cycle. Le phénomène d'humectation intervient aussi bien par l'occurrence que par l'interruption de celle-ci : la durée minimale d'humectation nécessaire à la contamination doit être connue ainsi que la durée maximale d'interruption de l'humectation que peut subir, sans dommages irréversibles, un inoculum sporifère donné, et cela à différentes températures (Schrödter, 1987, p 56-59).

Par ailleurs, l'humectation peut accroître l'affinité des surfaces végétales pour certains polluants contenus dans l'atmosphère et donc augmenter l'intensité du dépôt de ceux-ci sur la végétation (Fowler et Unsworth, 1979; Lee et Wesely, 1989; Schuepp, 1989); l'humectation peut aussi modifier l'efficacité de la pénétration des produits phytopharmaceutiques (Tadros, 1987) et la capacité des surfaces foliaires à neutraliser des gouttes de pluie acide (Adams et Hutchinson, 1987). Enfin, lors de l'exploitation de données multispectrales (Pinter et Jackson, 1981) ou radar (Ulaby *et al*, 1986, p 1879) acquises par télédétection, la présence d'eau libre sur le couvert peut être à l'origine de modifications notables du signal.

Enfin, il est bon de rappeler que le bilan hydrique des écosystèmes végétaux comprend les composantes de condensation (Sharma, 1976; Hicks, 1983) et d'interception (Wronski, 1984; Chassagneux et Choïnel, 1986). Un des premiers à souligner le rôle de la rosée est John Dalton (1802), mais l'importance des condensations nocturnes dans le bilan hydrique est beaucoup plus faible que son essai ne le laissait supposer (Rutter, 1975).

Le but de cet article est de présenter une synthèse relative au mesurage de la durée d'humectation en relation avec des applications à la protection raisonnée des cultures. Bien évidemment, les méthodologies décrites pourront être appliquées à l'analyse de données de télédétection, à l'analyse des mécanismes de dépôt de certains polluants, ou bien encore à la modélisation du bilan

hydrique ou de la durée d'humectation elle-même.

## CAUSES DE L'HUMECTATION DES ORGANES VÉGÉTAUX

Le phénomène d'humectation du couvert est décomposable en 2 périodes distinctes : la première période correspond à l'interception d'eau en phase liquide (pluie, irrigation : sédimentation des gouttes; brouillard : impaction des gouttelettes) par le couvert (von Hoyningen-Huene, 1983) ou à la condensation sur les feuilles à partir de la vapeur d'eau atmosphérique (Garratt et Segal, 1988), la seconde période correspond à l'évaporation de l'eau interceptée ou condensée (Thompson, 1981). Monteith (1957) a mis en lumière l'importance potentielle du phénomène de distillation, à savoir la condensation sur le couvert de vapeur d'eau issue de la vaporisation de l'eau du sol sous l'action d'un gradient thermique (Philip et de Vries, 1952; Prat, 1986).

Parmi les causes naturelles d'humectation du couvert végétal, citons encore le phénomène de guttation bien que son importance reste faible : celui-ci se traduit par l'exsudation d'eau liquide à la surface des feuilles lorsque celles-ci sont fortement turgescents et que la demande évaporative est nulle (Meidner, 1977). Les précipitations sous forme de pluie et de rosée diffèrent fortement : l'une constitue un événement météorologique quasi-indépendant du système sol-plante-microclimat, l'autre résulte du déficit radiatif compensé par un flux de chaleur latente. Une condensation peut également apparaître par transformation d'énergie calorifique en chaleur latente : c'est classiquement ce que l'on observe en fin de nuit lorsque se condensent des gouttelettes d'eau sur un organe végétal pour lequel le terme de stockage de chaleur n'est pas négligeable (pomme ou épi femelle de maïs par exemple).

En ce qui concerne les humectations dues à une pluie ou une rosée, une étude statistique des durées d'humectation sur une longue période fait apparaître une distribution multimodale des classes de fréquence. La valeur des modes décroît progressivement et correspond à des abscisses séparées par des intervalles de temps d'environ 12 h (Seem *et al*, 1988).

La principale cause artificielle d'humectation des organes végétaux est l'irrigation par aspersion. La durée d'humectation dépend non seulement de la durée et de la fréquence des cycles d'irrigation, mais aussi des conditions de la demande évaporative entre les cycles. L'influence de l'irrigation sur les maladies des plantes est évidente (Rotem et Pati, 1969; Hallaire *et al*, 1970; Lomas, 1991). La figure 1 illustre cette action dans le cas de *Ascochyta fabae* de la féverole. Il doit être rappelé ici que, si l'irrigation par aspersion et la pluie contribuent à l'humectation du couvert, elles contribuent également au lessivage des spores : il y a donc lieu de nuancer l'utilisation du paramètre « durée d'humectation » lorsque l'on considère des précipitations à partir d'une phase liquide; dans ce cas, il pourra être fait usage de l'intensité de précipitation mesurée sur un pas de temps court comme variable supplémentaire à prendre en compte.

#### DÉFINITION ET DÉTERMINISME DE LA DURÉE D'HUMECTATION

Les difficultés liées au mesurage de la durée d'humectation sont essentiellement dues à l'imprécision de la définition du mesurande puisque la répartition de l'eau sur une surface est rarement uniforme (portions de film, populations de gouttes, zones d'accumulation privilégiée de l'eau). La durée d'humectation est une variable qui caractérise l'état de surface d'un solide donné (surface mince, feuille, fruit, couvert) et non pas l'état thermodynamique de l'atmosphère dont la température ou l'humidité relative en un point sont des variables intensives parfaitement définies.

En raison de la variabilité spatiale de la durée d'humectation des organes végétaux au sein du couvert (fig 2), une définition cohérente de cette grandeur n'est possible que pour un organe végétal de dimensions faibles par rapport aux dimensions caractéristiques du couvert. Dans le cas d'une feuille ou d'un fruit, une définition possible serait par exemple le temps au bout duquel 99% de l'eau interceptée ou condensée se sera évaporée en prenant pour instant initial le début de l'épisode pluvieux ou de la formation de rosée. Cette définition a le mérite d'être claire mais n'est certainement pas pratique.

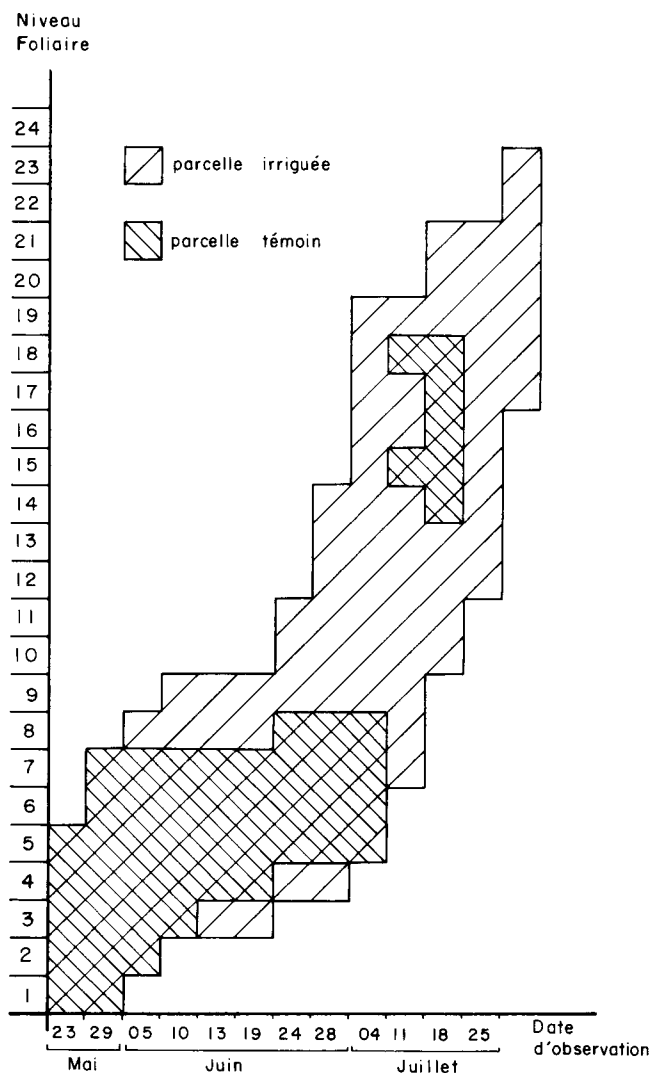
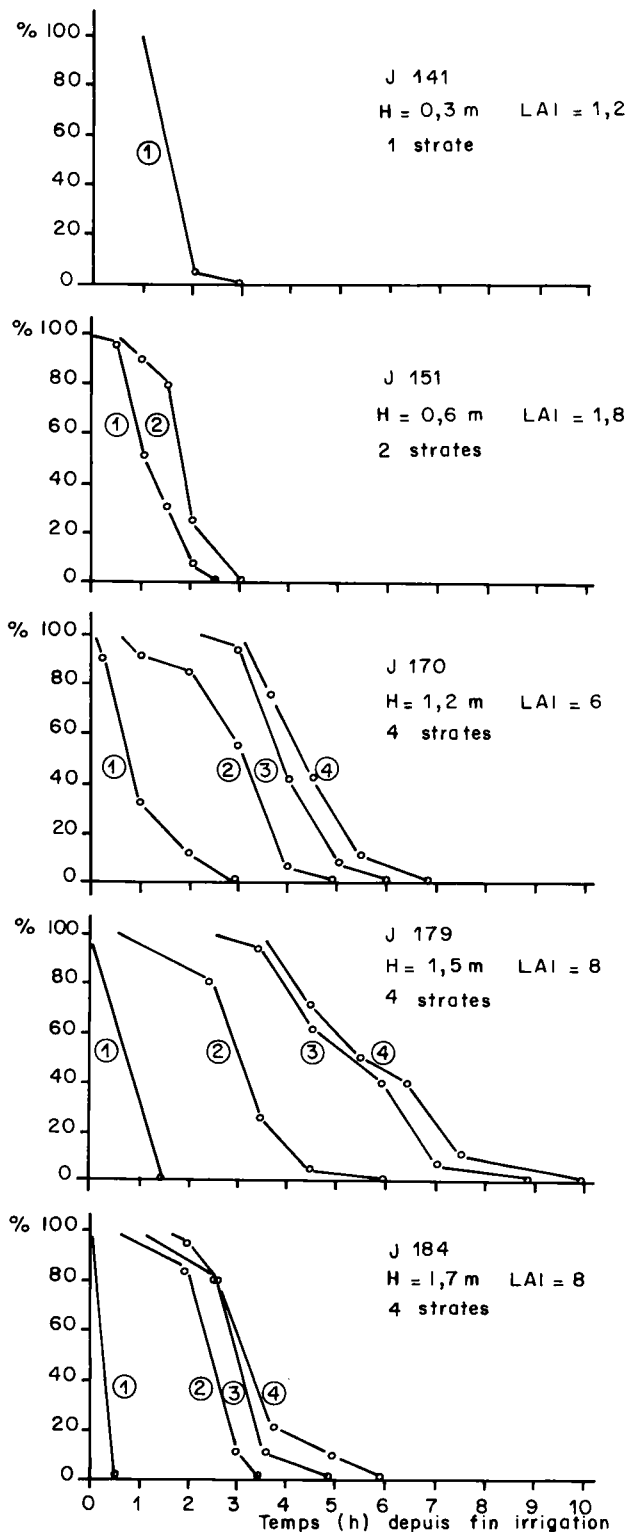


Fig 1. Influence de l'irrigation par aspersion sur le développement du champignon *Ascochyta fabae*, agent pathogène de la féverole: comparaison entre une parcelle irriguée et une parcelle non irriguée en termes d'incidence du champignon (présence ou absence de taches) sur les différents étages foliaires du couvert de chaque parcelle (résultats non publiés, M Leconte et L Huber, INRA, La Minière, 1985).

Les caractéristiques physico-chimiques des surfaces végétales déterminent la mouillabilité de celles-ci et contribuent à modifier la statique et la dynamique de l'eau superficielle. Pour une analyse détaillée des mécanismes physiques complexes qui déterminent la mouillabilité d'une surface, on renvoie le lecteur à un article de revue (de Gennes, 1985); par ailleurs, Tanner (1986) propose une méthodologie expérimentale pour mieux comprendre le jeu des forces qui s'exercent sur une goutte d'eau. En ce qui concerne la mouillabilité des feuilles et contrairement aux résultats de Fogg (1947), il semble bien que



**Fig 2.** Évolution spatio-temporelle de l'humectation d'un couvert de féverole après irrigation par aspersion (5 journées expérimentales, La Minière, 1985; J: numéro du jour). En fonction du développement vertical du couvert (caractérisé par sa hauteur  $H$  et l'indice foliaire  $LAI$ ), les résultats correspondent à l'observation d'un nombre variable (de 1 à 4) de strates foliaires horizontales; chaque point des courbes correspond au pourcentage de feuilles encore humectées dans un échantillon de 30 feuilles choisies au hasard dans la strate considérée.

l'angle de contact moyen de gouttelettes d'eau sur une feuille est indépendant du potentiel hydrique foliaire (Weiss, 1988).

Les paramètres de la structure du couvert jouent un rôle majeur dans le déterminisme des transferts de masse et d'énergie au sein de ce dernier; les flux d'eau interceptée, condensée ou évaporée sont donc fortement liés à ces paramètres (Norman et Campbell, 1983), ainsi que la dynamique de l'eau liquide par écoulement ou égouttement (Royle et Butler, 1986). La durée d'humectation varie donc, non seulement en fonction des conditions météorologiques, mais aussi avec l'architecture et le stade de développement de la culture, de même qu'avec la position, l'angle, la forme des feuilles et leur mode d'insertion sur les tiges. Il est assez aisé d'obtenir des mesures représentatives au sommet du couvert, tandis que les difficultés existent à l'intérieur du couvert ou du fait de l'héliotropisme des feuilles de certaines cultures (Weiss *et al*, 1989).

En plus des flux et des paramètres classiquement pris en compte (Perrier, 1979), une modélisation soignée de la durée d'humectation d'une feuille devra considérer le mode de répartition de l'eau sur les feuilles et les transferts par conduction de chaleur entre gouttes ou films d'eau et feuilles (Butler, 1985; Huber et Itier, 1990). Dans le cas d'un fruit, on devra considérer le stockage de chaleur (Monteith et Butler, 1979).

## PRINCIPES PHYSIQUES DES DIFFÉRENTES MÉTHODES DE MESURE

Les principes physiques utilisés qui permettent de fournir une mesure de la durée d'humectation sont au nombre de 5; certains de ces principes permettent de caractériser de manière assez fine l'évolution temporelle d'une grandeur physique extensive ou intensive qui varie en fonction de la quantité d'eau libre sur une surface. Les différents principes de mesure correspondent aux phénomènes suivants provoqués par l'humectation :

- changement de constitution physique de l'élément sensible;
- variation de longueur de l'élément sensible;
- variation de masse de la surface considérée;

— variation de conductibilité électrique d'un capteur;

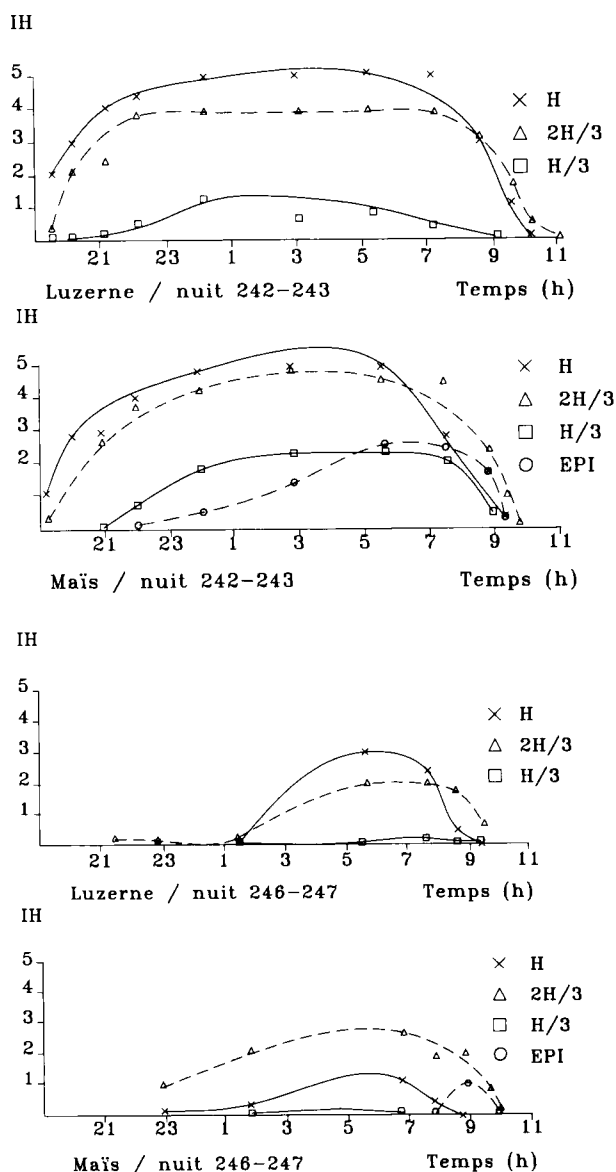
— variation de caractéristiques radiométriques de surface.

Remarquons d'emblée que seul le principe d'un mesurage radiométrique est synonyme d'une grande discrétion du capteur; tous les autres principes impliquent une interaction plus ou moins forte entre la méthode de mesure et la grandeur à mesurer. Notons qu'aucun de ces principes ne débouche sur une méthode de mesure directe, méthode qui fournirait la durée d'humectation d'une surface sans utiliser le mesurage d'une grandeur physique liée fonctionnellement à la présence d'eau libre sur cette surface. L'observation à l'aide de la vue (Guzman et Gomez, 1987) ou du toucher (fig 3) constitue une méthode directe, mais celle-ci souffre, bien sûr, de la variabilité liée à l'observateur. Enfin, soulignons qu'il est délicat de tester la répétabilité et la reproductibilité des mesurages sachant qu'il n'est pas aisé de reproduire des conditions d'humectation ou de les faire varier de manière contrôlée.

Malgré les difficultés évoquées, de nombreux capteurs ont été développés; par définition, un capteur fournit une mesure de la durée d'humectation du capteur, autrement dit, celle d'un objet dont le bilan d'énergie sera par essence différent de celui d'une feuille partiellement recouverte par une population de gouttes d'eau ou par un film d'eau. Toutefois, dans un but de prévision agrométéorologique, une telle estimation pourra bien souvent suffire. Dans cet esprit, différents groupes de capteurs sont décrits relativement aux différents principes cités précédemment. L'essentiel des instruments qui seront de plus en plus utilisés se rangent au sein des 2 sections consacrées aux capteurs de mesure de résistance électrique et aux méthodes radiométriques. Le tableau I illustre la diversité des instruments ou méthodes employées dans les systèmes d'avertissement.

## MÉTHODES ET INSTRUMENTS DE MESURE

Plusieurs auteurs ont jadis essayé d'estimer la durée d'humectation en utilisant la durée pendant laquelle l'humidité relative mesurée au parc météorologique est supérieure à un seuil donné (Smith, 1958; Preece et Smith,



**Fig 3.** Variation temporelle de l'intensité d'humectation des feuilles de luzerne et maïs. L'indice IH est estimé au toucher sur une échelle variant de 0 à 5 (moyenne sur 12 feuilles). H, 2H/3 et H/3 désignent 3 niveaux correspondant à 3 strates situées respectivement au sommet du couvert, à 2/3 et 1/3 de la hauteur H de celui-ci. Dans le cas du maïs, l'humectation de l'épi est également figurée.

1961; Lomas et Shashoua, 1970). Selon Jones (1986) et comme ont pu le montrer Huber et Wehrlen (1988), une telle démarche demeure fort approximative. D'autres auteurs ont tenté une estimation de la durée d'humectation à partir de critères simples mais ces méthodes restent également grossières et souffrent de la difficulté de transposition géographique (Crowe *et al*, 1978; Gillespie et Sutton, 1979). En regard de ces méthodes empiriques, se sont développées plusieurs fa-

**Tableau I.** Illustration de la diversité des méthodes de mesure ou d'estimation de la durée d'humectation employées en protection des plantes dans les systèmes d'avertissement ou de simulation des épidémies (abréviations : *DH*: durée d'humectation; *HR*: humidité relative de l'air à 2 m sous abri;  $T_m$ ,  $T_M$  et  $T_x$  désignent respectivement les températures minimale, maximale ou moyenne de l'air durant les périodes d'humectation;  $T_a$  désigne la température de l'air calculée en moyenne sur 1 h).

	Données météorologiques			Auteurs
	Température	HR et/ou DH	Pluie et/ou vent	
<i>Alternaria solani</i> (tomate)	$T_m$ , $T_M$	<i>DH</i> (Taylor)	mm/semaine	Madden <i>et al</i> (1978)
<i>Venturia inaequalis</i> (pommier)	$T_x$	Nombre d'heures avec $HR \geq 90\%$		Jones <i>et al</i> (1980)
<i>Sclerotinia sclerotiorum</i> (tournesol)	$T_m$ , $T_M$	$HR_{min}$ $HR_{max}$	mm/12 h $V_{max}$	Payen (1983)
<i>Peronospora effusa</i> (épinard)		<i>DH</i> (Belfort)		Dainello (1984)
<i>Colletotrichum graminicola</i> ( <i>Poa annua</i> var <i>reptans</i> )	$T_x$	<i>DH</i> (Belfort)		Danneberger <i>et al</i> (1984)
<i>Botrytis squamosa</i> (oignon)	$T_a$ (moyenne horaire)	<i>HR</i> (capteur résistif)	Pluie journalière	Sutton <i>et al</i> (1986)
<i>Cercospora beticola</i> (betterave à sucre)	$T_{surface}$ (radiothermomètre)	<i>DH</i> (capteur résistif)		Weiss et Kerr (1989)

milles de capteurs qui font ici l'objet d'une synthèse. Les capteurs existants sont regroupés dans 3 groupes: capteurs mécaniques, capteurs de mesure de la résistance électrique, méthodes radiométriques.

### Capteurs mécaniques

Correspondant au premier principe de mesure cité (changement de constitution physique), quelques instruments ont vu le jour dans les années 1950; il s'agit d'un style ou d'un crayon dont la pointe est en contact avec un plateau animé d'un mouvement de rotation. Le plateau est recouvert d'un vernis protecteur rendu malléable au contact de l'eau, l'inscription du style ou du crayon n'ayant donc lieu que lors de précipitations sous forme de pluie ou de rosée (Bazier, 1955; Taylor, 1956; Theis et Calpouzos, 1957). Les faibles dépôts de rosée ne sont pas enregistrés et les fortes pluies peuvent effacer l'enregistrement. Les inconvénients font que ces instruments n'ont

plus aujourd'hui qu'un intérêt historique. Les capteurs mécaniques employés aujourd'hui appartiennent aux 2 sous-groupes dont la description suit.

Dans un premier sous-groupe, le principe est similaire à celui de l'hygrographe, avec un ou plusieurs éléments sensibles exposés librement aux précipitations; ces capteurs pourront être qualifiés de capteurs de mouillage, sachant qu'il y a pénétration de l'eau dans la masse de l'élément sensible. Certains types utilisent l'allongement d'une membrane d'origine animale ou végétale (Wallin et Polhemus, 1954). L'humectographe « Bazier » a pour principe l'allongement d'une bande de buvard en présence d'eau; les appareils de De Wit (Post, 1959) et de Woefle utilisent la contraction d'un cordon de chanvre. L'humectographe « Belfort » utilise le même principe (Danneberger *et al*, 1984).

De tels instruments répondent à la présence d'eau libre mais également aux fortes humidités; ils présentent des temps de séchage en général plus longs qu'un capteur

d'humectation du fait de l'existence d'une résistance supplémentaire à l'évaporation. La cinétique de réponse de ces instruments permet de distinguer pluie et rosée. Pour une description détaillée de certains de ces capteurs, on se reportera à un guide publié par Howard et Gillespie (1985). D'après Sutton *et al* (1984), l'instrument de De Wit fournit une mesure des durées de rosée satisfaisante (incertitude < 1 h) dans les cas de cultures de carottes et pommes de terre tandis que la mesure est susceptible d'une erreur de plusieurs h dans le cas d'une culture d'oignons.

Dans un deuxième sous-groupe, la masse d'eau condensée constitue la grandeur physique enregistrée. Les instruments ou méthodes sont les suivants : balance de Hiltner (Van Eimern, 1959), drosographe de Kessler-Fuess (Kessler, 1939), enregistreur de Hirst et Mac Dowell (Hirst, 1957), méthodes de Jennings et Monteith (1954) et de Wales-Smith (1983).

Si l'on met à part la méthode gravimétrique qui a été utilisée avec succès dans plusieurs études sur l'évaporation ou l'interception des couverts agricoles et forestiers (Waggoner *et al*, 1969; Hancock et Crowther, 1979), les méthodologies précédemment décrites correspondent à des appareils qui, pour la plupart, sont de conception assez critiquable et leur description dans cet article est volontairement réduite (pour une description détaillée, on renvoie le lecteur aux articles de Schnelle *et al* (1963), Noffsinger (1965), Monteith (1972) et Van der Wal (1978). La méthode gravimétrique constitue un bon outil de recherche pour la compréhension et la modélisation des condensations (par utilisation d'un lysimètre de précision).

D'une manière générale, les capteurs de ce premier groupe présentent un degré d'automatisation souvent insuffisant et des problèmes météorologiques parfois non négligeables (exactitude, fidélité, justesse, résolution, sensibilité, temps de réponse). Pour certains d'entre eux, ils constituent encore des outils fort utiles pour les pathologistes, épidémiologistes et professionnels de la protection des plantes.

### Capteurs de mesure de résistance électrique

De nombreux capteurs ont été développés, mais le principe général demeure le même :

un ou plusieurs couples d'électrodes placées sur une surface détectent l'humectation de la surface considérée à l'aide d'une mesure de résistance. La résistance est faible lorsque la surface est humectée et très élevée lorsque la surface est sèche. Un circuit électronique classique est représenté sur la figure 4. L'utilisation d'un courant électrique alternatif de faible ampérage permet d'éviter l'électrolyse du capteur et de négliger la production de chaleur par effet Joule. Pour une description détaillée des méthodologies de construction de tels capteurs, on renvoie le lecteur aux articles de Sutton *et al* (1984, 1988). On peut distinguer 2 sous-groupes principaux selon que les électrodes sont situées sur un support artificiel ou directement sur une feuille.

Concernant le premier sous-groupe, il existe de nombreux travaux (Zislavsky, 1964; Lomas et Shashoua, 1970; Schurer et Van der Wal, 1972; Gillespie et Kidd, 1978; Small, 1978; Smith et Gilpatrick, 1980; Pinguet, 1983). Certains capteurs donnent en plus une estimation du degré d'humectation (David et Hugues, 1970; McCoy *et al*, 1972). On est en droit de penser que les capteurs de ce type de conception récente donnent une réponse assez satisfaisante pour une utilisation au champ en protection des plantes et ne pourront guère connaître maintenant d'amélioration majeure (A Weiss, comm pers 1990).

Une forme fréquente pour le capteur est celle d'un parallépipède rectangle aplati avec pour dimension caractéristique celle de la feuille de l'espèce végétale considérée. Certains auteurs ont proposé une forme cylindrique (Howard et Gillespie, 1985) ou sphérique, pour simuler les comportements thermiques respectifs d'une feuille d'oignon ou d'une pomme. Le comportement mécanique du capteur vis-à-vis des rafales de vent a été pris en considération par Huband et Butler (1984)

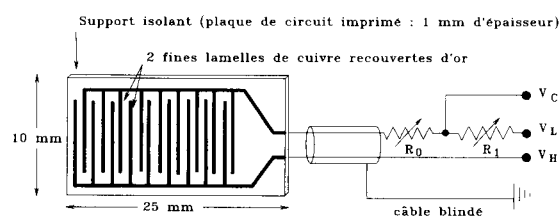


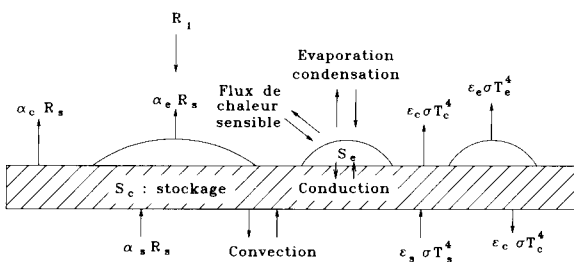
Fig 4. Schéma classique d'un capteur de durée d'humectation. Celui-ci se comporte comme une résistance électrique au sein du circuit. L'indice d'humectation du capteur est fourni par le rapport  $(V_C - V_L) / (V_H - V_L)$  égal à  $(R_1 / (R_C + R_0 + R_1))$  où  $R_C$  désigne la résistance du capteur.  $R_0$  et  $R_1$  sont 2 résistances destinées à ajuster les niveaux de mesure.



qui proposent un capteur flexible pour simuler une feuille de blé.

Le matériau retenu est le plus souvent un polymère isolant dont les caractéristiques sont calculées de manière à simuler le mieux possible le comportement thermique d'une feuille. La forme du capteur et les valeurs d'albédo et d'émissivité du matériau sont bien sûr déterminantes pour le bilan d'énergie du capteur (fig 5). Par exemple, une plaque d'aluminium poli réfléchit non seulement les longueurs d'onde du spectre visible mais aussi les longueurs d'onde de l'infrarouge thermique, cela explique les différences observables quant à la présence de rosée entre une plaque d'aluminium poli et la même plaque peinte en noir, ne différant notablement que par leurs réflectivités. Une attention particulière pour le choix de la peinture est donc nécessaire (Sutton *et al*, 1984, 1988). On doit toutefois remarquer que des conditions d'humectation du capteur correspondent à une transpiration négligeable des feuilles, ce qui signifie que les termes du bilan d'énergie d'une feuille et d'un capteur de caractéristiques radiatives et thermiques similaires à celles d'une feuille seront voisins.

Dans le cas d'une rosée, le déclenchement du capteur n'interviendra qu'à partir du moment où s'établit une continuité entre les paires d'électrodes *via* des gouttelettes de rosée coalescentes, ce qui ne se produit pas immédiatement au début du processus de condensation. En conséquence, la peinture doit faciliter le repérage du début de la condensation (sans présenter de réponse aux fortes humidités) et garantir une valeur d'albédo proche de celle d'une feuille sèche et

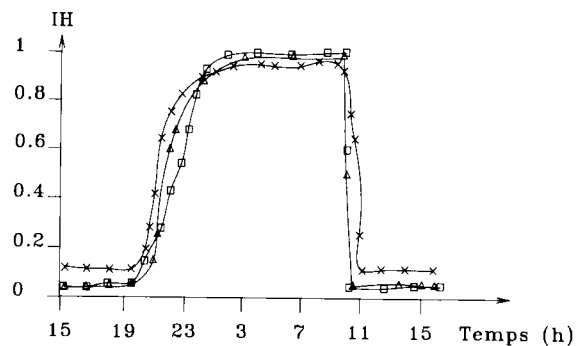


**Fig 5.** Bilan d'énergie d'un capteur plat humecté par des gouttes de pluie ou des portions de film. Les différents termes du bilan d'énergie du système capteur + eau sont figurés.  $R_s$  et  $R_l$  désignent les rayonnements incidents de courte et grande longueurs d'onde, la composante  $R_s$  donne naissance à 3 composantes réfléchies par le capteur, l'eau et le sol (identifiés respectivement par les indices  $c$ ,  $e$  et  $s$ ). Les symboles  $\alpha$  et  $\epsilon$  désignent respectivement les albédos et émissivités. Les rayonnements de grande longueur d'onde émis par les différents éléments du système sont exprimés à l'aide de la loi de Stefan-Boltzmann où  $T$  désigne la température en kelvins.  $S$  désigne un terme de stockage de chaleur.

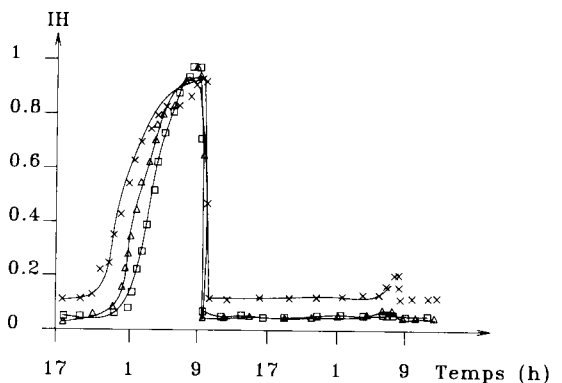
une émissivité hémisphérique totale de valeur proche de 1.

La figure 6a,b montre la cinétique de réponse de 3 capteurs durant 3 nuits de refroidissement radiatif avec formation de rosée. En accord avec Gillespie et Duan (1987), il est à noter que la taille du capteur détermine l'intensité des échanges et donc la durée d'humectation : un capteur de grande taille est humecté pendant une durée plus longue qu'un capteur de dimensions plus faibles. Cette observation est la conséquence d'une résistance aérodynamique réduite pour un petit objet par rapport à celle d'un objet plus grand.

Alors que la variabilité intercapteurs est faible, ce type de capteur présente une variabilité aléatoire élevée (fig 7) en raison des conditions d'environnement qui varient entre les capteurs d'un même type. Pour une po-



(a)



(b)

**Fig 6a,b.** Courbes de réponse de 3 capteurs parallélépipédiques de type résistance électrique lors de 3 nuits de refroidissement radiatif.  $IH$  désigne un indice d'intensité de l'humectation. Les dimensions des capteurs placés horizontalement à 50 cm au-dessus du sol sont les suivantes : épaisseur : 1 mm ; surface de (X) :  $5 \times 7 \text{ cm}^2$  ; surfaces de ( $\Delta$ ) et ( $\square$ ) :  $1 \times 7 \text{ cm}^2$ . Ces mesures ont été effectuées durant l'été 1989 sur le site expérimental de l'université de Guelph en Ontario, Canada ; (a) : jour 242 - jour 243, (b) : jour 245 - jour 247.

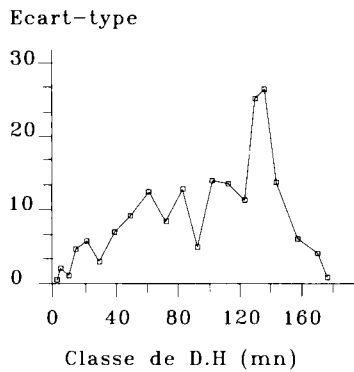


Fig 7. Variabilité des mesures de durée d'humectation. L'écart type calculé donne une estimation de la variabilité aléatoire entre 4 capteurs résistifs identiques situés à 50 cm au-dessus du sol fonctionnant simultanément sur un même site (La Minière, 1984). Le calcul a été effectué sur une population d'un millier d'événements (pluie ou rosée) dont les durées sont réparties par classes d'au moins 30 individus.

pulation de capteurs identiques, et toutes conditions égales par ailleurs, la quantité d'eau interceptée par un capteur lors d'une pluie présente une distribution approximativement gaussienne. Cette distribution est due essentiellement au caractère discret du phénomène pluvieux sous forme de gouttes, là où les phénomènes de condensation et d'évaporation de la rosée présentent un caractère continu, même si la formation de rosée sur des surfaces naturelles correspond à une condensation en gouttes.

Gillespie et Duan (1987) proposent une comparaison de capteurs plat et cylindrique appartenant à ce premier sous-groupe : la formation de rosée dépend de la taille du capteur tandis que l'évaporation de gouttes de pluie dépend de la taille des gouttes. Ils démontrent que les durées de rosée peuvent être 3-5 h plus longues pour un capteur plat par rapport à un capteur cylindrique; ceci est imputable à la géométrie des capteurs qui détermine des facteurs de forme fort différents.

Huband et Butler (1984) comparent 6 différents capteurs et mettent en relief l'importance des conditions d'environnement du capteur : en particulier les différences entre capteurs sont d'autant plus grandes que les capteurs sont saturés d'eau et que le taux d'évaporation postérieur au phénomène générateur de l'humectation est plus faible. L'analyse de sensibilité d'un modèle simple de prévision de la durée d'humectation confirme que les paramètres et variables les plus importants sont respectivement la quantité d'eau maximale in-

terceptée par le capteur et l'évaporation potentielle (Huber, 1988).

Concernant le second sous-groupe (le capteur est installé directement sur la surface végétale), les travaux sont moins nombreux (Melching, 1974; Häckel, 1980, 1984). Weiss *et al* (1989) présentent une comparaison satisfaisante de durées d'humectation obtenues par simulation et observées avec de tels capteurs. Les instruments de mesure présentent une plus grande exactitude, puisque la surface considérée est la feuille elle-même, sur laquelle sont installées des électrodes sous la forme de fils électriques. Weiss *et al* (1988) proposent un schéma détaillé de construction; ils décrivent également une chambre permettant de simuler des conditions d'humectation correspondant à une rosée (obtenue par la création d'un déficit radiatif à partir d'une surface refroidie). Une telle chambre permet de comparer plusieurs capteurs en conditions contrôlées ou de tester l'influence des caractéristiques sur la durée d'humectation.

Cette méthode directe est surtout utilisable pour la recherche en épidémiologie, pour la modélisation de la durée d'humectation ou la validation d'autres méthodes de mesure de la durée d'humectation. L'emploi de cette méthode exige un contrôle des capteurs au début de toute expérimentation : en effet, les électrodes peuvent se déplacer sous l'action du vent ou de la pluie et ne plus être en bon contact avec les feuilles ou même les endommager. De tels capteurs exigent un calibrage, sachant qu'ils sont susceptibles de répondre aux humidités élevées. Melching (1974) présente une calibration du capteur qu'il a développée par rapport à des résultats de mesure gravimétrique : ce capteur fournit donc des estimations de la durée et de l'intensité de l'humectation.

Il existe des instruments de mesure de la durée des épisodes pluvieux. Pour certains d'entre eux, le principe est le même que précédemment pour détecter la présence d'eau, mais l'on ajoute une résistance chauffante qui provoque l'évaporation des précipitations sous forme de rosée ou de brouillard (Viton, 1990).

### Méthodes radiométriques

À la suite de Bunnenberg et Kuhn (1977) qui avaient utilisé le principe de l'absorption du

rayonnement  $\beta$  par un film d'eau pour mesurer le dépôt de rosée sur le sol, Barthakur (1983) applique ce même principe à la mesure de la durée d'humectation des feuilles. La méthode nécessite une source de rayonnement et un compteur Geiger-Mueller; elle permet d'obtenir une cinétique de variation de l'épaisseur d'un film d'eau sur une feuille.

Cette méthode a été mise en œuvre pour valider un modèle simple d'évaporation de gouttes d'eau sur une surface artificielle (Barthakur, 1988). Un tel instrument présente une meilleure résolution qu'un capteur du second sous-groupe de la précédente famille de capteurs puisqu'il détecte l'humectation plus tôt; il a aussi l'avantage de faire une mesure directe. Des comparaisons ont été effectuées entre les 2 types de capteurs au champ et en chambre de rosée (Barthakur, 1985, 1987) et tendent à montrer la supériorité de ce dernier type, mais une utilisation en routine demandera encore des améliorations (Weiss, 1990). Par ailleurs, la source de rayonnement occulte une fraction de l'angle solide au-dessus de la feuille et donc modifie le bilan radiatif de celle-ci.

Dans certains domaines de longueurs d'onde (visible et moyen infrarouge), il a été montré (Pinter, 1986) que la rosée, qui correspond à une condensation en gouttelettes sphéroïdes et favorise la réflexion spéculaire, a un effet sur la réflectance des couverts végétaux. Les résultats expérimentaux prouvent la nécessité de corriger des données multispectrales acquises le matin, sachant que les situations de ciel clair, favorables à des mesures de réflectance par satellite, sont également favorables à la formation de rosée pendant la nuit.

Les modèles de rétrodiffusion d'un signal radar doivent prendre en compte certains paramètres de l'environnement; en particulier Allen *et al* (1984) ont montré que la présence de gouttes d'eau sur le couvert végétal obtenue par une irrigation par aspersion modifie le comportement diffusif de celui-ci. Gillespie *et al* (1990) ont mis en évidence la possibilité de détecter la présence de rosée sur un couvert de blé pour une configuration donnée du radar.

On se reportera au tableau II pour trouver les éléments d'une comparaison des capteurs décrits dans cet article en fonction de l'objectif et des conditions expérimentales. Les 2 dernières méthodes radiométriques citées ne

sont pas considérées dans ce tableau en raison du développement encore insuffisant des applications à caractère opérationnel. L'auteur propose de porter son choix sur un capteur de type (C) pour un objectif opérationnel en protection des végétaux dans un pays développé; les types (A) ou (B) semblent plus indiqués dans un environnement technologique peu avancé. Les méthodes de type (D) et (F) offrent des possibilités qu'il serait intéressant d'exploiter en pathologie végétale si l'on souhaite une description fine de l'humectation du couvert.

## CONCLUSIONS

Les méthodologies existantes ont permis de formuler les spécifications de capteurs assez satisfaisants pour les pathologistes et agents de la protection des végétaux; ceux-ci sont actuellement les principaux demandeurs pour intégrer le mesurage de la durée d'humectation dans l'ensemble des observations instrumentales effectuées par les stations des réseaux agrométéorologiques. En ce qui concerne le pas de temps retenu, il est conseillé d'utiliser un intervalle assez réduit (entre 10 et 30 min) afin de bien cerner la durée des périodes d'occurrence et d'interruption de l'humectation; ce pas de temps pourra également être modulé en fonction de l'agent pathogène considéré.

Parmi les questions à résoudre, figure celle de la définition d'un capteur de référence, ou tout au moins d'une méthode normalisée de mesure de la durée d'humectation au parc météorologique afin de pouvoir comparer les résultats d'expérimentations sur différents sites et prescrire l'utilisation de systèmes d'avertissements phytosanitaires.

Il serait douteux de proposer un instrument étalon dans l'état actuel de nos connaissances. Par contre, une comparaison approfondie des capteurs de durée d'humectation existants est envisageable dans l'esprit de la comparaison d'hygromètres que Skaar *et al* (1989) ont effectuée à la demande de l'OMM (Organisation météorologique mondiale); en l'absence d'un instrument étalon, cette comparaison d'hygromètres a été effectuée par référence à une méthode d'estimation impliquant plusieurs instruments de mesure de l'humidité relative de l'air.

**Tableau II.** Tableau comparatif des différents instruments ou méthodes de mesure de la durée d'humectation utilisables en routine (*DH* désigne la durée d'humectation).

<i>Méthodes</i>	<i>Applications</i>	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
(A) Allongement de l'élément sensible ex: humectographe « Bazier »	systèmes d'avertissement	simple d'emploi distinction entre pluie et rosée	hystérésis réglage variable en fonction de l'observateur
(B) Contraction de l'élément sensible ex: humectographe de « De Wit »	épidémiologie protection des plantes	automatisation aisée distinction entre pluie et rosée	dérive de la tension à l'état sec sensibilité aux humidités élevées
(C) Variation de la résistance électrique ex: « feuille artificielle »	protection des plantes équipe les stations agroclimatiques	adaptation de la forme du capteur à l'organe considéré bon marché nombreux capteurs commercialisés	mesure indirecte représentativité spatiale sensibilité aux fortes humidités méthode indirecte
(D) Variation de la résistance électrique ex: mesurage direct sur les organes végétaux	modélisation de la <i>DH</i> peu employé en protection des plantes	représentativité à l'échelle de l'organe (feuille, fruit, épi, tige) méthode indirecte	non commercialisé
(E) Méthode gravimétrique ex: méthode de Wales-Smith	modélisation de la <i>DH</i> étalonnage de capteurs de <i>DH</i> méthode de référence	signal proportionnel à la quantité d'eau présente utilisable pour la rosée	peu utilisable en cas de pluie sensibilité au vent représentativité spatiale
(F) Absorption des rayonnements $\beta$ ex: méthode de Barthakur	modélisation des durées de rosée et de l'évaporation des gouttes	précision méthode directe méthode de référence	coût élevé sensibilité à la teneur en eau de l'organe

Parallèlement au développement de méthodes de mesure, l'utilisation de modèles de simulation de la durée d'humectation due à une pluie (Butler, 1986; Huber, 1988) ou à une rosée (Pedro et Gillespie, 1982; Weihong et Goudriaan, 1991) et de données satellitaires, devrait aboutir à une meilleure compréhension de l'influence de l'eau liquide superficielle sur la réflectance des couverts végétaux ou la rétrodiffusion d'un signal ra-

dar. De telles approches fourniront à terme des outils supplémentaires pour la spatialisation de la prévision de la durée d'humectation dans le cadre de la rationalisation de la protection des plantes, la programmation de l'acquisition des observations satellitaires, voire la prévision des épisodes de dépôt de polluants atmosphériques.

Des efforts de recherche demeurent nécessaires pour améliorer la modélisation et la

prévision à court terme de la durée d'humectation, ainsi que le développement de méthodes de mesure relatives à d'autres variables comme par exemple le flux de condensation et d'évaporation de rosée.

## RÉFÉRENCES

- Adams CM, Hutchinson TC (1987) Comparative abilities on leaf surfaces to neutralize acidic raindrops. II. The influence of leaf wettability, leaf age and rain duration on changes in droplet pH and chemistry of leaf surfaces. *New Phytol* 106, 437-456
- Allen CT, Brisco B, Ulaby T (1984) *Modeling the temporal behaviour of the microwave backscattering coefficient of agricultural crops*. RSL Tech Rep 360-21, Remote Sensing Lab, Univ Kansas Center Res, Lawrence, USA
- Barthakur NN (1983) The beta-ray gauge as a leaf surface wetness detector. *Int J Appl Radiat Isot* 34, 1549-1552
- Barthakur NN (1985) A comparative study of radiometric and electronic leaf wetness sensors. *Agric For Meteorol* 36, 83-90
- Barthakur NN (1987) Comparisons of beta-ray and electronic leaf wetness sensors in a dew chamber. *Int J Biometeorol* 31, 57-63
- Barthakur NN (1988) A non-equilibrium thermodynamics approach to surface evaporation of water drops. *Agric For Meteorol* 42, 287-294
- Bazier J (1955) Un « humectographe » *Fruit Belg* 23, 167
- Bunnenberg L, Kuhn W (1977) Application of the beta-absorption method to measure dew on soil and plant surfaces. *Int J Appl Radiat Isot* 28, 751-754
- Butler DR (1985) The energy balance of water drops on a leaf surface. *Boundary-Layer Meteorol* 32, 337-350
- Butler DR (1986) Evaporation from raindrops on leaves in a cereal canopy: a simulation model. *Boundary-Layer Meteorol* 36, 39-52
- Campbell CL, Madden LV (1990) *Introduction to plant disease epidemiology. Chap 4 – Monitoring epidemics: environment*. John Wiley, London, 43-73
- Chassagneux P, Choisnel E (1986) Modélisation de l'évaporation globale d'un couvert forestier. I Principes physiques et description du modèle. *Ann Sci For* 43, 505-520
- Crowe JM, Coakley SM, Emge RG (1978) Forecasting dew duration at Pendleton, Oregon, using simple weather observations. *J Appl Meteorol* 17, 1482-1487
- Dainello FJ (1984) Continuous hours of leaf wetness as a parameter for scheduling fungicide applications to control white rust in spinach. *Plant Dis* 68, 12, 1069-1072
- Dalton J (1802) Experiments and observations to determine whether the quantity of rain and dew is equal to the quantity of water carried off by the rivers and raised by evaporation; with an enquiry into the origin of springs. *Mem Literary Phil Soc Manchester* V, II, 346-372
- Danneberger TK, Vargas JM, Jones AL (1984) A model for weather-band forecasting of anthracnose on annual bluegrass. *Phytopathology* 74, 448-451
- Davis DR, Hughes JE (1970) A new approach to recording the wetting parameter by the use of electrical resistance sensors. *Plant Dis Rep* 54, 474-479
- Fogg LE (1947) Quantitative studies on the wetting of leaves by water. *Proc R Soc B* 134, 503-522
- Fowler DS, Unsworth MH (1979) Turbulent transfer of sulphur dioxide to a wheat crop. *Q J R Meteorol Soc* 105, 446, 767-783
- Friesland H, Schrödter H (1988) The analysis of weather factors in epidemiology. In: *Experimental techniques in plant disease epidemiology* (J Kranz, J Rotem, eds) Springer-Verlag, Berlin
- Garrat JR, Segal M (1988) On the contribution of atmospheric moisture to dew formation. *Boundary-Layer Meteorol* 45, 209-236
- Gennes PG de (1985) Wetting: statics and dynamics. *Rev Mod Phys* 57, 3, 1, 827-863
- Gillespie TJ, Brisco B, Brown RJ, Sofko GJ (1990) Radar detection of a dew event in wheat. *Remote Sens Environ* 33, 151-156
- Gillespie TJ, Duan RX (1987) A comparison of cylindrical and flat plate sensors for surface wetness duration. *Agric For Meteorol* 40, 61-70
- Gillespie TJ, Kidd GE (1978) Sensing duration of leaf moisture retention using electrical impedance grids. *Can J Plant Sci* 58, 179-187
- Gillespie TJ, Sutton JC (1979) A predictive scheme for timing fungicide applications to control *Alternaria* leaf blight in carrots. *Can J Plant Pathol* 1, 95-99
- Guzman O, Gomez L (1987) Permanence of free water on coffee leaves. *Exp Agric* 23, 213-220
- Häckel H (1980) Neues über die elektrische Methode zur Messung der Benetzungsdauer unmittelbar an der Pflanze. *Agric Meteorol* 22, 113-119
- Häckel H (1984) Zur Messung der Benetzungsdauer von Pflanzen: Verfahren und Ergebnisse. *Meteorol Rdsch* 37, 97-104
- Hallaire M, Rapilly F, Pauvert P (1969) Effets de l'irrigation sous ses différents modes sur la biologie, l'étiologie et l'épidémiologie des maladies

- des plantes. 2<sup>e</sup> Congr Union Phytopathol Méditerran, Avignon-Antibes (France), 21-27 septembre 1969
- Hancock NH, Crowther JM (1979) A technique for the direct measurement of water storage on a forest canopy. *J Hydrol* 41, 105-122
- Hicks BB (1983) A study of dewfall in an arid region: an analysis of Wangara data. *Q J R Meteorol Soc* 109, 900-904
- Hirst JM (1957) A simplified surface wetness recorder. *Plant Pathol* 6, 57-81
- Howard AM, Gillespie TJ (1985) *A field guide for surface wetness duration measurement*. Tech Memo 85-1, Dept Land Resources Sci, Univ Guelph, Ont, Canada
- Hoyningen-Huene J (von) (1983) Die Interzeption des Niederschlags in landwirtschaftlichen Pflanzenbeständen. *Schriftenn Dtsch Verb Wasserwirtsch Kulturbau* 57, 1-53
- Huband NDS, Butler DR (1984) A comparison of wetness sensors for use with computer or microprocessor systems designed for disease forecasting. In: *Pests and diseases*. Proc Br Crop Protec Conf, vol2, 633-638
- Huber L (1988) Modèle de simulation de la durée d'humectation des feuilles au champ après une pluie. Cas d'un couvert homogène. *Agronomie* 8, 675-684
- Huber L, Gillespie TJ (1980) Dew duration on alfalfa and corn canopies during nights of radiative cooling. In: *Biometeorology* (D Driscoll, H Lieth, A Machalek, eds) 12th Int Congr Biometeorol, Vienna (AUT), 26 août-3 sept 1990, p21 (communication abstract)
- Huber L, Itier B (1990) Leaf wetness duration in a field bean canopy. *Agric For Meteorol* 51, 281-292
- Huber L, Wehrlen JM (1988) La durée d'humectation en protection des plantes: mesure et modélisation. *Déf Vég* 252, 3-11
- Jennings EG, Monteith JL (1954) A sensitive recording dew-balance. *Q J R Meteorol Soc* 80, 344, 222-226
- Jones AL, Lillevik SL, Fisher PD, Stebbins TC (1980) A microcomputer based instrument to predict apple scab infection periods. *Plant Dis* 64, 69-72
- Jones AL (1986) Role of wet periods in predicting foliar diseases. In: *Plant disease epidemiology. Population dynamics and management* (KJ Leonard, WE Fry, eds) vol I, 87-100
- Kessler OW (1939) Der Tauschreiber Kessler-Fuess. *Bioklimat Beibl* 6, 23-26
- Lee IY, Wesely ML (1989) Effects of surface wetness on the evolution and vertical transport of submicron particles. *J Appl Meteorol* 28, 3, 176-184
- Lomas J (1991) The effect of overhead irrigation on plant disease. *Bull OEPP* (in press)
- Lomas J, Shashoua Y (1970) The performance of three types of leaf wetness recorders. *Agric Meteorol* 7, 159-166
- McCoy CW, Hill AJ, Horanig GE (1972) A device for measuring and recording the amount and duration of free water on vegetation in the field. *J Econ Entomol* 65, 1, 135-138
- Madden L, Pennypacker SP, Macnab AA (1978) FAST, a forecast system for *Alternaria solani* on tomatoes. *Phytopathology* 68, 1354-1358
- Meidner H (1977) Sap exudation via the epidermis of leaves. *J Exp Bot* 28, 107, 1408-1416
- Melching JS (1974) *A portable self-contained system for the continuous electronic recording of moisture conditions on the surface of living plants*. Agric Res Serv USDA, ARS-NE-42, 13 p
- Monteith JL (1957) Dew. *Q J R Meteorol Soc* 83, 357, 322-341
- Monteith JL (1972) *Survey of instruments for micrometeorology*. IBP Handbook No 22, Blackwell Scientific Publ, Oxford
- Monteith JL, Butler DR (1979) Dew and thermal lag: a model for cocoa pods. *Q J R Meteorol Soc*, 105, 207-215
- Noffsinger TL (1965) Survey of techniques for measuring dew. In: *Humidity and moisture measurement and control in science and industry* (A Wexler, ed) Reinhold Publ, New York, vol2, 523-531
- Norman JM, Campbell G (1983) Application of a plant environment model to problems in irrigation. In: *Advances in irrigation* (D Hillel, ed) Acad Press, New York, vol2, 155-189
- Payen D (1983) Modélisation de l'épidémiologie de *Sclerotinia sclerotiorum* sur tournesol. *Bull OEPP* 13, 272-281
- Pedro MJ, Gillespie TJ (1982) Estimating dew duration. I Utilizing micrometeorological data. *Agric Meteorol* 25, 283-296
- Pedro MJ, Gillespie TJ (1982) Estimating dew duration. II Utilizing standard weather station data. *Agric Meteorol* 25, 297-310
- Perrier A (1979) Variation du microclimat d'une culture en fonction de ses caractéristiques biologiques. *Bull OEPP* 9, 187-204
- Philip JR, de Vries DA (1957) Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Trans Am Geophys Union* 38, 2, 222-232
- Pinguet A (1983) Mesure de l'humectation: transformation d'un thermohygrographe en thermohumectographe et application à une station automatique agroclimatique. *Bull OEPP* 13, 43-45
- Pinter PJ (1986) Effect of dew on canopy reflectance and temperature. *Remote Sens Environ* 19, 187-206

- Pinter PJ Jr, Jackson RD (1981) Dew and vapor pressure as complicating factors in the interpretation of spectral radiance from crops. *In: Remote sensing of environment*, Proc 15th Int Symp, Ann Arbor, MI (USA), vol 15, 547-554
- Post JJ (1959) Het Instrumentarium voor het bepalen van infectieperioden. *Meded Dir Tuinbouw Neth* 22, 365-371
- Prat M (1986) Analysis of experiments of moisture migration caused by temperature differences in unsaturated porous medium by means of two-dimensional numerical simulation. *Int J Heat Mass Transfer* 29, 7, 1033-1039
- Preece TF, Smith LP (1961) Apple scab infection weather in England and Wales, 1956-60. *Plant Pathol* 10, 43-51
- Rapilly F (1983) Effets de quelques facteurs physiques du climat sur diverses séquences épidémiques. *Bull OEPP* 13, 63-68
- Rotem J, Palti J (1969) Irrigation and plant diseases. *Ann Rev Phytopathol* 7, 267-288
- Royle DJ, Butler DR (1986) Epidemiological significance of liquid water in crop canopies and its role in disease forecasting. *In: Water, fungi and plants* (PG Ayres, L Boddy, eds) CUP
- Rutter AJ (1975) The hydrological cycle in vegetation. *In: Vegetation and the atmosphere. Vol 1: Principles* (JL Monteith, ed) Acad Press, New York, 111-150
- Schnelle F, Smith LP, Wallin JR (1963) *Report on instruments recording the leaf wetness period*. WMO Tech Note No 55, WMO 140, 15-41
- Schrödter H (1987) *Wetter und Pflanzenkrankheiten. Biometeorologische Grundlagen der Epidemiologie*. Springer-Verlag, Berlin, 191 p
- Schuepp PH (1989) Microstructure, density and wetness effects on dry deposition to foliage. *Agric For Meteorol* 47, 2-4, 179-198
- Seem RC, Rubin G, Becker CIM (1988) Duration of leaf wetting and drying periods in orchards. *Phytopathology* 78, 12, p. 1571 (abstract)
- Sharma ML (1976) Contribution of dew in the hydrologic balance of a semi-arid grassland. *Agric For Meteorol* 17, 321-331
- Shurer K, Van der Wal AF (1972) An electronic leaf wetness recorder. *Neth J Plant Pathol* 78, 29-32
- Skaar J, Hegg K, Moe T, Smedstud K (1989) *WMO international hygrometer intercomparison. Instruments and observing methods*. World Meteorol Org, Rep No 38, WMO/TD No 316, 246 p
- Small CG (1978) A moisture-activated electronic instrument for use in field studies of plant diseases. *Plant Dis Rep* 62, 12, 1039-1043
- Smith CA, Gilpatrick JD (1980) Geneva leaf-wetness detector. *Plant Dis* 64, 286-288
- Smith LP (1958) The duration of surface wetness (a new approach to horticultural climatology). *In: Proc Int Horticult Congr*, vol 3, Pergamon Press, Oxford, 478-484
- Sutton JC, Gillespie TJ, Hildebrand PD (1984) Monitoring weather factors in relation to plant disease. *Plant Dis* 68, 1, 78-84
- Sutton JC, James TDW, Rowell PM (1986) Botcast: a forecasting system to time the initial fungicide spray for managing *Botrytis* leaf blight of onions. *Agric Ecosyst Environ* 18, 123-143
- Sutton JC, Gillespie TJ, James TDW (1988) Electronic monitoring and use of microprocessors in the field. *In: Experimental techniques in plant disease epidemiology* (J Kranz, J Rotem, eds) Springer-Verlag, Berlin
- Tadros TF (1987) Interactions at interfaces and effects on transfer and performance. *In: Studies of pesticide transfer and performance. Aspects Appl Biol* 14, 1-22
- Tanner LH (1986) Les gouttes. *Recherche* 17, 174, 183-191
- Taylor CF (1956) A device for measuring the duration of dew deposits. *Plant Dis Rep* 40, 1025-1028
- Theis T, Calpouzos K (1957) A seven-day instrument for recording periods of rainfall and dew. *Phytopathology* 47, 746-747
- Thompson N (1981) The duration of leaf wetness. *Meteorol Mag* 110, 1302, 1-12
- Ulaby FT, Moore RK, Fung AK (1986) Effects of dew, wind, and other environmental factors. *In: Microwave remote sensing active and passive. Vol 3: From theory to applications* (FT Ulaby, RK Moore, AK Fung) Artech House, Dedham (USA), 1873-1881
- Van der Wal AF (1978) Moisture as a factor in epidemiology and forecasting. *In: Water deficits and plant growth, Vol 5: Water and plant disease* (TT Kozlowski ed) 253-295
- Van Eimern J (1959) Erfahrungen bei der Messung der Benetzungsdauer von Blättern für Pflanzenpathologische Zwecke. *Wetter Leben (Wien)* 11, 131-138
- Viton P (1990) Mesures de la pluie. *Météorologie* 33, 22-32
- Waggoner PE, Begg JE, Turner NC (1969) Evaporation of dew. *Agric Meteorol* 6, 227-230
- Wales-Smith BG (1983) An inexpensive device for measuring net dewfall. *Weather* (fév), 54-56
- Wallin JR, Polhemus DN (1954) A dew recorder. *Science* 119, 294-295
- Weihong L, Goudriaan J (1991) Analysis of leaf wetness in the rice crop caused by dew formation. A simulation study. *EPPO Bull* 21, 551-559
- Weiss A (1988) Contact angle of water droplets in relation to leaf water potential. *Agric For Meteorol* 43, 251-259

- Weiss A (1990) Leaf wetness : measurements and models. *Remote Sens Rev* 5, 1, 215-224
- Weiss A, Kerr ED (1989) Evaluating the use of pest management information by growers : an example using *Cercospora* leaf spot of sugar beet. *Appl Agric Res* 4, 168-172
- Weiss A, Lukens DL, Norman JM, Steadman JR (1989) Leaf wetness in dry beans under semi-arid conditions. *Agric For Meteorol* 48, 1-2, 149-162
- Weiss A, Lukens DL, Steadman JR (1988) A sensor for the direct measurement of leaf wetness : construction techniques and testing under controlled conditions. *Agric For Meteorol* 43, 241-249
- Wronsky E (1984) A model of canopy drying. *Agric Water Manage* 8, 243-262
- Zislavsky W (1964) Ein neues elektrisches Blatt-nässeregistriergerät (BNR-Gerät). *Pflanzen Bericht* 31, 3-18