

MODÉLISATION DU MICROCLIMAT VÉGÉTAL EN RELATION AVEC L'ÉPIDÉMIOLOGIE

Jean-Paul LHOMME

Laboratoire d'hydrologie, ORSTOM, Montpellier

Résumé

Pour de nombreux pathogènes des plantes la contamination d'un organe végétal est sous l'étroite dépendance des conditions microclimatiques qui règnent au niveau de cet organe. De même, la libération des ascospores de certains champignons nécessite des conditions ambiantes particulières. Nous examinons comment, par une approche de modélisation, il est possible d'accéder au microclimat à l'intérieur du couvert végétal à partir de données météorologiques classiques représentatives du climat local. Nous passons en revue successivement la vitesse du vent, le rayonnement solaire, la température et l'humidité de l'air. Une importance particulière est accordée à la durée d'humectation des organes végétaux qui joue un rôle fondamental dans la contamination par de nombreux champignons.

Introduction

L'environnement atmosphérique joue un rôle très important en phytopathologie car c'est lorsqu'il devient favorable que la contamination et l'infection se produisent. Il est habituel de dire que c'est le climat qui fait la maladie. La météorologie (science du temps qu'il fait) intervient au niveau de la prévision des risques et de la programmation des traitements phytosanitaires (JEGER, 1987), tandis que la climatologie (étude du temps qu'il a fait) trouve une application dans le zonage agroclimatique et la détermination des zones à risques.

Les mesures normalisées des stations météorologiques sont représentatives du climat local, qui concerne une surface plus ou moins grande autour de celles-ci. Mais ce qui affecte les agents pathogènes, c'est le microclimat qui règne autour de l'organe

végétal infecté ou en voie d'infection. Il est donc nécessaire d'établir les fonctions de transfert permettant de passer du climat local au microclimat à l'intérieur des couverts végétaux. Ce sera le thème de cette présentation. Nous passerons en revue les principales grandeurs météorologiques : vitesse du vent, rayonnement, température et humidité de l'air. Et nous accorderons une importance particulière à la durée de mouillage des surfaces végétales, paramètre qui joue un rôle fondamental dans le développement des maladies fongiques.

Microclimat à l'intérieur du couvert végétal

Prise en compte de la structure du couvert

Le microclimat régnant à l'intérieur du couvert végétal dépend très étroitement de sa structure. Pour les couverts présentant une homogénéité horizontale, cette structure est caractérisée par le profil vertical de densité de surface foliaire $a(z)$. A une hauteur z au sein du couvert (comptée à partir de la surface du sol), la fonction $a(z)$ est définie comme la surface de feuille par unité de volume ($m^2 m^{-3}$). L'intégration de cette fonction entre le sommet du couvert, à la hauteur h , et un niveau z ($0 \leq z \leq h$) donne la surface foliaire cumulée entre ces deux niveaux.

$$L(z) = \int_z^h a(z) dz$$

En faisant $z = 0$, on obtient la surface foliaire cumulée entre la surface du sol et le sommet du couvert, ce qui représente l'indice de surface foliaire LAI (Leaf Area Index) : $L(0) = LAI$.

Profil de vitesse du vent

Au-dessus du couvert végétal, le profil vertical de la composante horizontale de la vitesse du vent $u(z)$ suit une loi de variation logarithmique en fonction de la hauteur z . La vitesse du vent croît avec la hauteur suivant la relation

$$u(z) = u(z_r) \left\{ \ln \left[\frac{z-d}{z_0} \right] / \ln \left[\frac{z_r-d}{z_0} \right] \right\}$$

z_r est un niveau de référence où la vitesse du vent est $u(z_r)$. d est la hauteur de déplacement du plan de référence aérodynamique et z_0 la hauteur de rugosité. Ces deux paramètres sont liés à la structure du couvert. En première approximation, ils peuvent se calculer à partir de la hauteur du couvert : $d = 0,65h$, $z_0 = 0,10h$ (MONTEITH et UNSWORTH, 1990).

A l'intérieur du couvert la vitesse du vent décroît avec la profondeur. On utilise généralement une loi d'atténuation exponentielle, soit en fonction d'une profondeur normalisée $p^*(z) = ((h-z)/h)$ (formation utilisée par CHOUDHURY et MONTEITH (1988)), soit en fonction de la surface foliaire cumulée $L(z)$ (PERRIER, 1967)

$$u(z) = u(h) \exp \left[-\alpha_w p^*(z) \right]$$

$$u(z) = u(h) \exp \left[-\alpha_w' L(z) \right]$$

$u(h)$ est la vitesse du vent au sommet du couvert, α_w et α_w' sont des coefficients d'atténuation dont les valeurs respectives sont de l'ordre de 2,5 et 0,60 pour les couverts homogènes de type agricole.

Profils de rayonnement

Il existe différents types de rayonnements. Le rayonnement solaire correspond au domaine spectral 0,3-3 μm . Le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) se restreint au domaine 0,4-0,7 μm . Le rayonnement net représente le bilan des rayonnements de courte longueur d'onde (émis par le soleil) et de grande longueur d'onde (émis par l'atmosphère et les corps à la surface de la terre). La loi généralement utilisée pour décrire l'atténuation de ces rayonnements avec la profondeur est une loi de type Beer, qui correspond à une atténuation exponentielle, fonction de la surface foliaire cumulée

$$R(z) = R(h) \exp[-\alpha_r L(z)]$$

Le coefficient d'atténuation α_r dépend essentiellement de l'architecture du couvert (port planophyle ou érectophyle) et secondairement du type de rayonnement. Nous donnons ci-après les valeurs du coefficient d'atténuation du rayonnement solaire pour quelques couverts caractéristiques des régions tempérées (MONTEITH and UNSWORTH, 1990) : tournesol (0,97), maïs (0,70), orge (0,69), sorgho (0,49).

Profils de température et d'humidité

Les profils verticaux de température et d'humidité de l'air, au sein du couvert végétal, ainsi que celui de température de surface de feuille, sont plus difficiles à modéliser, car ils sont la résultante des transferts d'énergie au niveau des surfaces d'échange. Cependant, on sait maintenant assez bien résoudre ce type de problème au moyen de ce qu'on appelle les modèles multi-couche. Le couvert végétal est divisé en un certain nombre de couches ou strates parallèles, chacune caractérisée par une épaisseur δz_i (avec $\sum_i \delta z_i = h$), un indice de surface foliaire partielle δL_i (avec $\sum_i \delta L_i = LAI$) et une résistance stomatique foliaire. Le bilan d'énergie est résolu au niveau de chaque couche par des techniques mathématiques appropriées, connaissant les profils de rayonnement net, de vitesse du vent et de diffusivité turbulente (qui commande les transferts turbulents). On peut déterminer ainsi pour chaque couche la température de surface des feuilles, la température et l'humidité de l'air.

Durée d'humectation

Durée d'humectation et maladies fongiques

Pour de nombreux champignons phytopathogènes la présence d'eau libre sur les organes foliaires est nécessaire soit à l'infection de l'hôte par le champignon soit à la sporulation. Le tableau 1 donne, pour un certain nombre de champignons, les durées d'humectation nécessaires à l'infection. Généralement la sporulation a besoin de périodes de mouillage plus longues que l'infection (HUBER et GILLESPIE, 1992).

L'influence du mouillage externe sur la phase de colonisation, c'est-à-dire de développement interne de la maladie, n'est pas bien connue. Mais généralement on observe que la durée de la période de colonisation décroît quand la durée de mouillage augmente. En conditions naturelles, la présence d'eau libre sur les feuilles est provoquée soit par la pluie, soit par le dépôt de rosée. Elle peut provenir aussi de l'irrigation par aspersion.

La pluie a aussi un effet mécanique sur le développement des maladies : effet « splash » et lessivage favorisant la dispersion des spores, action mécanique des gouttes de pluie sur l'ouverture des périthèces. Ces aspects ont été peu étudiés et sont donc encore mal connus.

Tableau 1. Besoins en durée d'humectation pour l'infection par plusieurs champignons pathogènes (d'après HUBER et GILLESPIE, 1992).

| Champignon | Hôte | Durée d'humectation (heures) |
|--------------------------------|----------------|------------------------------|
| <i>Botrytis cinerea</i> | fleur fraisier | 6 - 32 |
| <i>Botrytis squamosa</i> | feuille oignon | 6 - 32 |
| <i>Colletotrichum acutatum</i> | fruit fraisier | 3 - 40 |
| <i>Colletotrichum coccodes</i> | fruit tomate | 15 - 50 |
| <i>Diaporthe phaseolorum</i> | soja | 2 - 140 |
| <i>Phakopsora pachyrizi</i> | soja | 6 - 12 |
| <i>Phythophthora cactorum</i> | fruit fraisier | 0,5 - 5 |
| <i>Puccinia arachidis</i> | arachide | 4 - 40 |
| <i>Puccinia recondita</i> | blé | 9 - 15 |
| <i>Puccinia striiformis</i> | blé | 3 - 6 |
| <i>Pyricularia grisea</i> | ray-grass | 6 - 48 |
| <i>Pyrenophora teres</i> | orge | 3 - 24 |
| <i>Uromyces phaseoli</i> | haricot | 4 - 25 |

Mécanismes responsables de l'humectation

- Interception de l'eau de pluie

On définit l'interception (I) d'un couvert végétal comme la différence entre la précipitation incidente ou précipitation brute (P_b), c'est-à-dire celle qui arrive au sommet du couvert, et la précipitation nette (P_n), c'est-à-dire celle qui atteint le sol

$$I = P_b - P_n$$

La précipitation nette est la somme de la précipitation interne (T) (throughfall en anglais), qui est la combinaison de l'eau qui s'égoutte du feuillage et de l'eau qui tombe directement à travers les trous laissés par le feuillage, et de l'écoulement le long des troncs ou des tiges (S) (stemflow)

$$P_n = T + S$$

La capacité de rétention (C) du couvert végétal est définie comme la quantité d'eau qui reste sur le feuillage à la fin d'un événement pluvieux, s'il a été suffisamment important pour saturer le couvert. L'interception d'un couvert peut être considérée comme la somme de trois termes : la quantité d'eau interceptée évaporée pendant la pluie (E), la quantité d'eau interceptée qui a été absorbée (A) et la capacité de rétention (C)

$$I = E + A + C$$

Généralement les termes E et A sont petits devant C et peuvent donc être négligés. Ce qui signifie que l'interception est égale à la capacité de rétention.

Pour un couvert de bananier plantain (LAI = 2) au Costa Rica (JIMÉNEZ et LHOMME, 1994) la capacité de rétention a été estimée à 1,9 mm. La précipitation interne et l'écoulement le long des tiges représentent en moyenne respectivement 78 % et 9 % de la précipitation brute, les pertes par interception représentant donc en moyenne 13 %. Mais ces chiffres dépendent de la quantité de pluie tombée et de son intensité.

- Formation de rosée

La rosée apparaît sur un organe foliaire quand sa température de surface (T_s) devient supérieure à la température du point de rosée de l'air environnant (T_d) (dew point temperature)

$$T_s < T_d \text{ ou } e^*(T_s) < e^*(T_d) = e_a$$

$e^*(T)$ représentant la pression de vapeur saturante à la température T et e_a la pression réelle de vapeur d'eau de l'air. La température de surface est la résultante du bilan énergétique qui met en jeu différents types de transferts, radiatifs, convectifs et conductifs.

La baisse de température de l'organe foliaire est généralement due au déficit radiatif nocturne.

Modélisation

- Feuille ou organe végétal isolé

Le dépôt de rosée et l'évaporation de cette rosée (ou de l'eau de pluie qui se serait déposée) sont donnés par la même équation classique de flux

$$\lambda E = (h(u) / \gamma) [e^*(T_s) - e_a]$$

où $h(u)$ représente le coefficient d'échange, fonction de la vitesse du vent u , et γ la constante psychrométrique. Si le flux est négatif, ($e^*(T_s) < e_a$) il y a dépôt de rosée. S'il est positif ($e^*(T_s) > e_a$), il y a évaporation de l'eau déposée.

Dans le cas d'une feuille échangeant de l'énergie sur ses deux faces, il est possible d'exprimer T_s en développant l'équation du bilan énergétique tout en négligeant la capacité calorifique de la feuille en question. L'écart de température entre la surface et l'air ($T_s - T_a$) s'exprime alors en première approximation sous la forme suivante (PEDRO et GILLESPIE, 1982a, b)

$$\delta T = T_s - T_a = [R_n - 2 h(u) D_a / \gamma] / [8\sigma T_a^3 + 2 h(u) (1 + s/\gamma)]$$

où R_n représente le bilan radiatif de l'organe, D_a le déficit de saturation de l'air ($D_a = e^*(T_a) - e_a$), s la pente de la courbe de pression de vapeur saturante, fonction de la température de l'air, et σ la constante de STEFAN-BOLTZMANN. Le rayonnement net s'exprime de la façon suivante

$$R_n = \alpha R_s + R_l - 2\sigma T_a^4$$

R_s et R_l sont les rayonnements incidents respectivement de courte et grande longueur d'onde et α est le coefficient d'absorption de la feuille pour le rayonnement de courte longueur d'onde ($\alpha = 0,3$ pour le bananier). Le rayonnement de grande longueur d'onde est constitué par le rayonnement atmosphérique et par le rayonnement propre du sol et de la végétation environnante. Le problème dans ce type de modèle consiste à estimer correctement les rayonnements incidents R_s et R_l . Ils dépendent de la géométrie de la feuille et de sa position dans le couvert.

L'abaissement maximal de température s'observe quand le rayonnement net est minimal, c'est-à-dire lorsque le rayonnement solaire (R_s) est nul (la nuit) et le rayonnement de grande longueur d'onde (R_l) minimal, soit par nuit claire, lorsque le ciel est dégagé et donc le rayonnement atmosphérique faible.

Ce type de modèle a été appliqué au bananier plantain au Costa Rica (LHOMME et JIMENEZ, 1992) et a permis d'obtenir de bonnes estimations de la durée de rosée à partir d'observations météorologiques standard. Sur le versant atlantique de ce pays (plus humide que le versant pacifique), la durée journalière d'humectation par la rosée de la première feuille (feuille drapeau) avoisine très souvent 14 h.

• Couvert homogène

Le dépôt de rosée et l'évaporation de cette rosée, ou de l'eau de pluie interceptée, peut s'appréhender à l'aide des modèles micrométéorologiques multi-couche. Comme pour le calcul des profils de température et d'humidité au sein d'un couvert homogène on divise le couvert en un certain nombre de couches horizontales parallèles et on résout le système constitué par les équations de transfert et de conservation d'énergie appliquées à chacune de ces couches (GOUDRIAAN, 1977 ; HUBER, 1988). Dans la plupart des modèles, on utilise le concept de diffusivité turbulente pour paramétriser les transferts turbulents. Et les profils de rayonnement, de vitesse du vent et de diffusivité doivent être introduits en entrée.

Dans le cas d'un couvert végétal bien développé ($h > 60\text{cm}$) et dense ($\text{LAI} > 2,5$), il existe une forte atténuation de l'énergie radiative disponible et de la vitesse du vent en fonction de la profondeur. Mais, l'effet de cette atténuation sur le mouillage est différent selon qu'il est provoqué par le dépôt de rosée ou par l'eau de pluie interceptée.

En ce qui concerne la rosée, les couverts denses présentent des durées de mouillage plus courtes dans leur partie basse à cause de pertes radiatives réduites qui limitent le dépôt de rosée. Par contre, dans le cas du mouillage par la pluie, la partie basse des couverts denses reste plus longtemps humectée que la partie proche du sommet à cause d'une évaporation réduite, de 10 à 20 fois plus selon HUBER et WEHRELEN (1988).

Conclusion

Parallèlement aux études de modélisation du microclimat végétal, il importe de bien caractériser les conditions microlimatiques dont ont besoin les agents pathogènes pour se développer, de façon à pouvoir mettre au point des modèles opérationnels en protection des plantes. L'évolution des techniques de mesure et de traitement de l'information devrait favoriser, dans les années à venir, la synergie entre mesure et simulation épidémiologique, et accroître ainsi les possibilités de prévision des infections en temps réel.

Références

- CHOUHDURY B.J. et MONTEITH J.L., 1988. A four-layer model for the heat budget of homogeneous land surfaces. *Q.J.R. Meteorol.Soc.* 114: 373-398.
- GOUDRIAAN J., 1977. *Crop Micrometeorology: a Simulation Study*. Simulation Monographs. Pudoc, Wageningen, 249 p.
- HUBER L., 1988. Modèle de stimulation de la durée d'humectation des feuilles au champ après une pluie. Cas d'un couvert homogène. *Agronomie* 8 : 675-684.
- HUBER L. et WEHRELEN J.M., 1988. La durée d'humectation en protection des plantes : mesure et modélisation. *La défense des végétaux* 252 : 3-11.
- HUBER L. et GILLESPIE T.J., 1992. Modeling leaf wetness in relation to plant disease epidemiology. *Annu. Rev. Phytopathol.* 30: 553-577.
- JEGER M.J., 1987. *Meteorology and plant disease*. In (F. Prodi et al. editors) International Conference on Agrometeorology, Cesena 1987. Fondazione Cesena Agricoltura Publ.
- JIMENEZ O.F., et LHOMME J.-P., 1994. Rainfall interception and radiation regime of plantain canopy. *Fruits* sous presse.
- LHOMME J.-P. et JIMENEZ O.F., 1992. Estimating dew duration on banana and plantain leaves from standard meteorological observation. *Agric For. Meteorol* 62: 263-274.
- MONTEITH J.L. et UNSWORTH M.H., 1990. *Principles of Environmental Physics*. Edward Arnold, London, 291 p.

- PERRIER A., 1967. Approche théorique de la microturbulence et des transferts dans les couverts végétaux. *La Météorologie Sér. 5 4* : 527-550.
- PEDRO M.J. et GILLESPIE T.J., 1982a. Estimating dew duration. I- Utilizing micrometeorological data. *Agric. Meteorol.* 25: 283-296.
- PEDRO M.J. et GILLESPIE T.J., 1982b. Estimating dew duration. II- Utilizing standard weather station data. *Agric. Meteorol.* 25: 297-310.