

## MODELISATION PHYSIQUE DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE A L'ECHELLE D'UN PAYSAGE HETEROGENE

### *PHYSICAL MODELLING OF ATMOSPHERIC DISPERSAL OVER A HETEROGENEOUS LANDSCAPE*

YVES BRUNET <sup>(1)</sup>, HADJIRA FOUHIL <sup>(1, 2)</sup>, JEAN-PAUL CALTAGIRONE <sup>(2)</sup>

(1) INRA, Unité de Bioclimatologie, BP 81, 33883 Villenave d'Ornon cedex

(2) Laboratoire MASTER, ENSCPB, BP 108, 33402 Talence cedex

#### RESUME

Un modèle mécaniste reposant sur les équations de la dynamique des fluides a été développé afin de pouvoir simuler la dispersion atmosphérique de particules telles que le pollen à l'échelle de paysages hétérogènes, caractérisés par un assemblage de différentes parcelles, de bandes de sol nu, de rideaux d'arbres ou de bosquets, etc. Un code numérique existant a été pour cela adapté aux conditions atmosphériques et enrichi de manière à prendre en compte explicitement un couvert végétal ainsi que l'ensemble des processus accompagnant la dispersion (émission, transport, dépôt). Le modèle a ensuite été validé avec succès sur de nombreuses données expérimentales acquises en conditions naturelles et en soufflerie, représentant une large gamme de

situations : transitions de rugosité, sauts de concentration, écoulement en couvert homogène, écoulement en couvert discontinu, dispersion de particules dans diverses configurations. Une étude de sensibilité à plusieurs paramètres a été menée, permettant de quantifier par exemple l'influence de la rugosité de la surface sur la dispersion de pollen. Des cas plus complexes ont pu être ensuite abordés, visant à analyser le rôle de bandes de sol nu entre une parcelle émettrice et une parcelle réceptrice. Le travail se poursuit avec des validations supplémentaires rendues possibles par la réalisation de campagnes récentes, et la prise en compte d'assemblages complexes de différentes surfaces et d'éléments d'hétérogénéité tels que haies ou bosquets.

#### SUMMARY

*A mechanistic model based on the equations of fluid dynamics was developed in order to simulate the atmospheric dispersal of particles such as pollen grains over a heterogeneous landscape, characterized by a mozaic of various plots of land, strips of bare soil, tree lines, forest plots etc. For this purpose, an existing numerical code was adapted to the atmospheric conditions and modified so as to*

*explicitly take into account a plant canopy, and include various processes responsible for pollen dispersal (emission, transport, deposition). The model was then successfully validated against several sets of experimental data collected in natural conditions and in wind tunnels, representing a broad range of situations: roughness changes, step changes in concentration, flow in a homogeneous*

*canopy, flow in a discontinuous canopy, dispersion of particles in various configurations. A sensitivity study to several parameters was performed, making it possible to quantify for example the influence of surface roughness on pollen dispersal. It was then possible to tackle more complex cases, aiming at analyzing the role of strips of bare soil*

*between a source plot and a target one. Future work will include additional validations made possible by recent field experiments, and further modelling of landscapes consisting in mixtures of various surface areas and elements of heterogeneity such as hedges or forest plots.*

## INTRODUCTION

Les mécanismes de diffusion (émission, transport, dépôt) de particules (pollen, spores) sont mal connus aux échelles supérieures à celle de la parcelle homogène, caractérisées par des changements de rugosité, la présence de bandes de sol nu ou de rideaux d'arbres etc. Ces situations sont pourtant plus la règle que l'exception dès lors qu'on s'intéresse à la dissémination d'OGM dans l'environnement par voie anémophile. Dans ces conditions, une modélisation mécaniste de la dispersion, reposant sur la physique des processus de transport, peut s'avérer un outil particulièrement puissant pour l'étude de ces phénomènes, dans la mesure où elle a une vocation générique. Une fois dûment validé, un tel modèle peut en effet être utilisé pour simuler la dispersion du pollen dans des configurations variées.

Un travail est entrepris dans ce cadre depuis 1999, avec l'appui d'une bourse de thèse (financée conjointement par l'INRA et la Région Aquitaine) et le soutien des AIP "OGM et Environnement" (projet "Transport et dissémination efficace du pollen") et "ECOPATH" (projet "Climat, Epidémiologie et Maîtrise des Risques de l'oïdium de la vigne").

## LE MODELE DE TRANSPORT

La simulation de l'écoulement repose sur l'intégration numérique des équations de Reynolds, obtenues en moyennant les équations de Navier-Stokes de façon à faire apparaître les statistiques de l'écoulement. Ces équations expriment la conservation de la quantité de mouvement moyenne (et donc de la vitesse) selon les trois directions du repère choisi.

Le code d'origine (Aquilon, développé au MASTER pour des applications industrielles) a été étendu à l'atmosphère (Foudhil *et al.*, 2000). Pour cela ont été adoptées, de manière très classique, les hypothèses de Boussinesq et deux termes ont dû être ajoutés aux équations de Reynolds : la force de Coriolis, due à la rotation terrestre, et la poussée d'Archimède, due aux variations de densité au sein du fluide. L'équation d'énergie est prise en compte, permettant de calculer le champ de température. Un modèle de fermeture à deux équations de transport (énergie cinétique et dissipation) a été adopté. Enfin, des lois de paroi reposant sur la théorie de similitude de Monin-Obukhov ont été introduites dans le modèle.

Les cas particuliers qui nous préoccupent ici (modélisation de la dispersion de particules dans la couche de surface et au sein de la végétation) nous ont amenés en outre à introduire (1) des termes sources et puits pour la quantité de mouvement, la température et les particules, et (2) une équation de transport pour ces dernières (Foudhil *et al.*, 2001). Sont ainsi pris en compte les phénomènes d'émission, de transport et de dépôt (impact et sédimentation). Les possibilités de ré-entraînement ne sont pas traitées à l'heure actuelle.

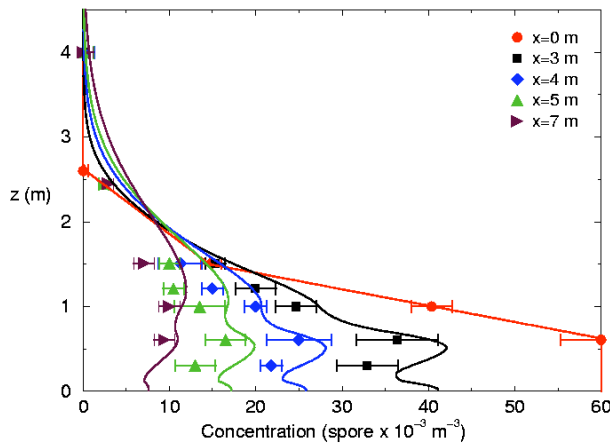
## VALIDATIONS

Il importait dans un premier temps de valider le code à l'aide de données expérimentales disponibles, acquises en conditions naturelles ou en soufflerie. Ayant choisi pour cela de tester par étapes toutes les possibilités du modèle, nous avons été amenés à aborder successivement un certain nombre de configurations :

- transition de rugosité lisse-rugueux, permettant de tester la représentation de la dynamique de l'écoulement (Bradley, 1968) ;
- saut de température avec inversion du flux pariétal (Charnay *et al.*, 1979) ;
- écoulement au sein d'un couvert végétal homogène (Brunet *et al.*, 1994) ;
- écoulement dans le cas d'un couvert hétérogène constitué d'une succession de bandes de végétation et de sol nu (Raupach *et al.*, 1987) ;

- dispersion de particules (spores, à défaut de pollen) sur une végétation homogène (Bainbridge & Stedman, 1979).

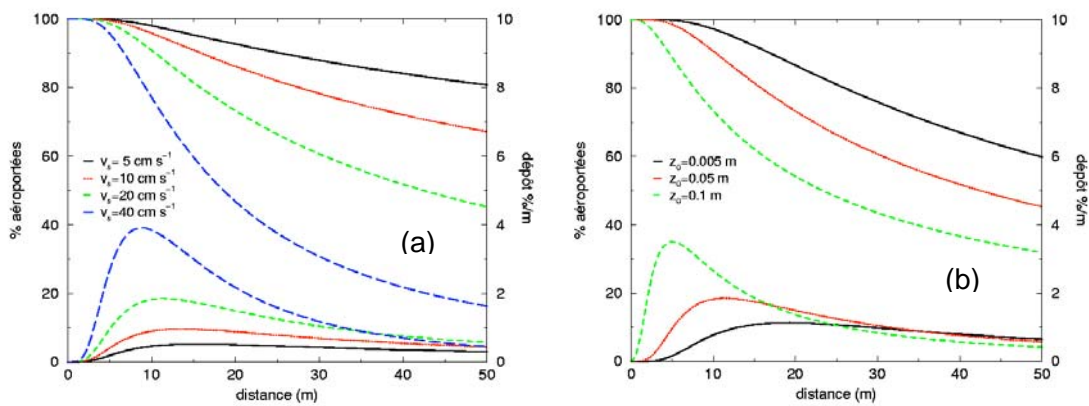
Dans l'ensemble de ces cas, le code a pu être validé de manière satisfaisante. À titre d'exemple la *Figure 1* montre, pour ce dernier cas de figure, une comparaison des profils de concentration en spores simulés et mesurés à différentes distances d'une source linéique, sur un couvert d'orge de hauteur 1 m. Mis à part une légère surestimation des concentrations, sans conséquence sur les dépôts, le modèle restitue bien à toutes les distances la variation verticale des teneurs en particules.



**Figure 1.** Comparaison des profils de concentration en spores, simulés et mesurés, sur un couvert d'orge de hauteur 1 m, à différentes distances d'une source linéique (expérience de Bainbridge & Stedman, 1979).

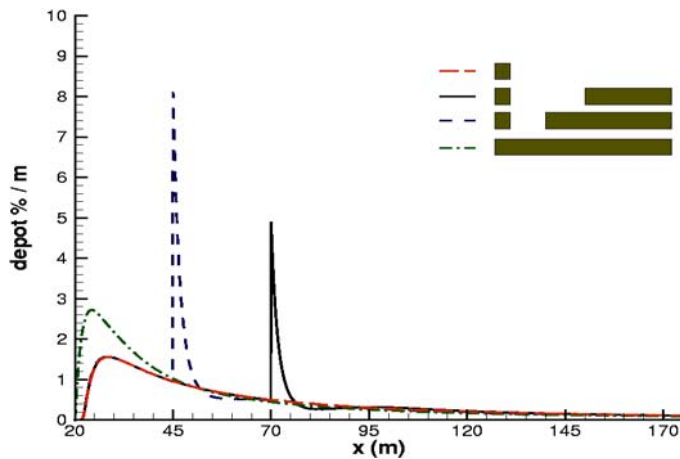
## SIMULATIONS

Quelques cas d'étude ont été sélectionnés pour cette présentation. La *Figure 2* montre l'influence de la vitesse de chute (liée à la masse du grain de pollen considéré) et de la rugosité de surface sur le dépôt de pollen à différentes distances d'une source ponctuelle, sur une surface homogène. Une zone de faible rugosité (bande de sol nu non travaillé, par exemple) aura tendance à favoriser le maintien en suspension du pollen par rapport à une surface de plus forte rugosité qui, elle, favorisera le dépôt.



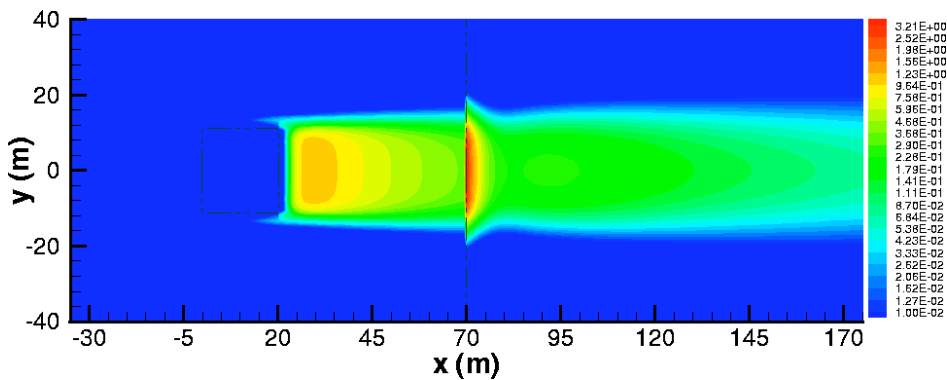
**Figure 2.** Influence de la vitesse de chute (a) et de la rugosité de surface (b) sur le dépôt de pollen à différentes distances d'une source ponctuelle.

De façon à quantifier l'effet de discontinuités dans la végétation, plusieurs configurations bi-dimensionnelles ont été étudiées. Des calculs de dispersion ont été effectués à partir d'une source-plage simulant une petite parcelle de maïs de 20 m de côté. La *Figure 3* permet de comparer les résultats obtenus dans quatre cas : (1) sol nu continu, (2) bande de 50 m de sol nu suivie d'une grande parcelle de maïs de même structure, (3) bande de 25 m de sol nu suivie de la même parcelle de maïs, (4) maïs continu. Conformément à ce que nous avons montré avec la *Figure 2*, le dépôt est plus rapide lorsque la surface aval se trouve être du maïs plutôt que du sol nu.



**Figure 3.** Comparaison des dépôts de pollen pour quatre types de paysage bi-dimensionnels, à partir d'une source-plage (voir texte)

Un résultat intéressant réside dans le comportement du dépôt au niveau de la face amont des parcelles de maïs, juste après une bande de sol nu : dans les deux cas on observe un fort pic de dépôt dû à un phénomène d'impaction, la hauteur du panache de pollen restant suffisamment faible pour que ce dernier soit absorbé par les premières tranches de végétation. Nous avons voulu confirmer ce résultat en nous plaçant dans les conditions du dispositif expérimental de l'AGPM (parcelle carrée de maïs bleu de 20 x 20 m entourée de sol nu, à 50 m d'une parcelle de maïs jaune), décrit par Klein (2000). Une simulation tri-dimensionnelle a été réalisée et donne des résultats (Fig. 4) qualitativement très proches des résultats expérimentaux (voir *Figure IV.10* de Klein, 2000).



**Figure 4.** Dépôt calculé à partir d'une simulation tri-dimensionnelle reproduisant les conditions expérimentales décrites par Klein (2000).

## PERSPECTIVES ET CONCLUSIONS

Les résultats obtenus dans le cadre de ce travail sont encourageants et incitent fortement à poursuivre dans cette voie. Une validation expérimentale plus poussée doit être entreprise, et deux campagnes ont été réalisées à cet effet (l'une sur du pollen de maïs à Grignon, l'autre sur des spores d'oïdium sur de la vigne à Bordeaux). Le modèle pourra ensuite être utilisé pour simuler diverses configurations de paysage hétérogène et quantifier le rôle de sa structure sur la dissémination du pollen, un objectif à plus long terme étant de pouvoir définir des aménagements du paysage susceptibles de limiter cette dissémination.

## REFERENCES

- Bainbridge A., O.J. Stedman, 1979. Dispersal of *Erisiphe graminis* and *Lycopodium clavatum* spores near to a source in a barley crop. *Ann. appl. Biol.*, 91,187-198.
- Bradley E.F., 1968. A micrometeorological study of velocity profiles and surface drag in the region modified by a change in surface roughness. *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.*, 94, 361-379.
- Brunet Y., Finnigan J.J., Raupach M.R., 1994. A wind tunnel study of air flow in waving wheat : single-point velocity statistics. *Boundary Layer Meteorol.*, 70, 95-132.
- Charnay G., Schon J.P., Alcaraz E., Mathieu J., 1979. Thermal characteristics of a turbulent boundary layer with inversion of wall heat flux. *Turbulent Shear Flows*, 15, 47-55.
- Foudhil H., Caltagirone J.P., Brunet Y., 2000. Modélisation de la couche limite atmosphérique en stratification thermique. *Congrès Français de Thermique, Société Française des Thermiciens*, Lyon, 15-17 mai 2000, 6 p.
- Foudhil H., Brunet Y., Caltagirone J.P., 2001. Modélisation numérique de la dispersion atmosphérique du pollen d'organismes génétiquement modifiés. *Seconde Conférence Internationale sur la modélisation et la simulation de la pollution atmosphérique*, Champs-sur-Marne, 9-12 avril 2001, 4 p. (poster).
- Klein E., 2000. *Estimation de la fonction de dispersion du pollen. Application à la dissémination de transgène dans l'environnement*. Thèse de l'Université Paris XI Orsay, 17 janvier 2000, 80 p. + annexes.
- Raupach M.R., Bradley E.F., Ghadiri H., 1987. A wind tunnel investigation into aerodynamic effect of forest clearings on the nesting of Abbott's Booby on Christmas Island. *Internal Report T12, CSIRO Centre for Environmental Mechanics*, 21 p.