

Profils de concentration de la neige soufflée

Théorie, résolution numérique et validation expérimentale in situ

par Florence Naaïm-Bouvet, Mohamed Naaïm, Hugo Martinez

Division Nivologie / CEMAGREF (1)

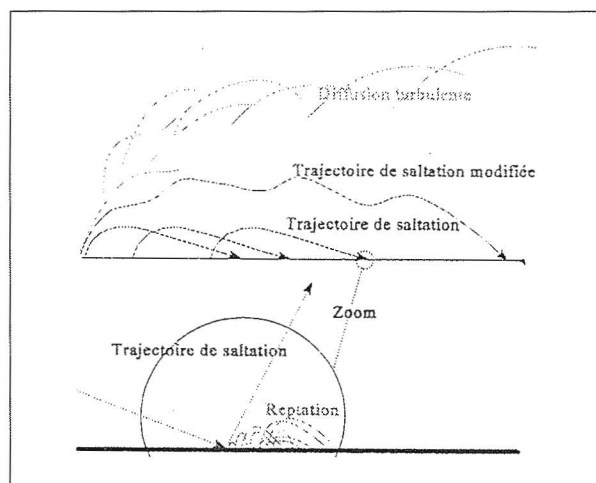
I ■ INTRODUCTION

La modélisation physique du transport de la neige par le vent en soufflerie permet de reproduire sur un modèle réduit un épisode de transport de neige. Ce type de modélisation a été utilisé avec succès à la division nivologie depuis 1989. Cependant il faut être conscient de ses limites d'applications, la modélisation physique ne pouvant être utilisée que pour des topographies faiblement accidentées ([1] [2] [3]). En effet du fait du manque de cohésion des particules utilisées, il est impossible de reproduire des corniches ou des congères sur des pentes fortes. Par ailleurs, il est difficile d'estimer la durée réelle des tempêtes ([1] [2]). Cet état de fait nous a donc conduits à envisager une modélisation numérique du transport éolien de la neige. La première étape de cette modélisation numérique consiste à représenter correctement le développement du profil de concentration des particules, ce à quoi nous allons nous attacher maintenant.

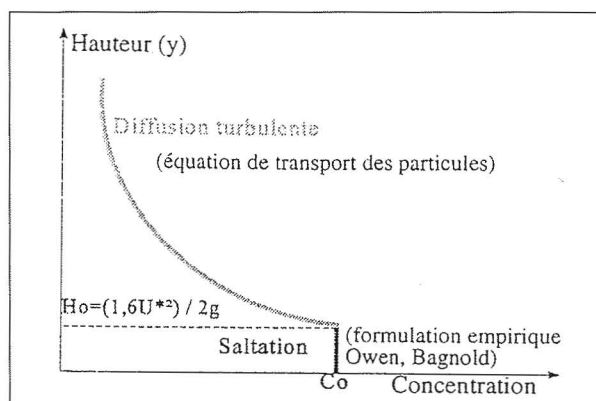
II ■ LES DIFFÉRENTS MODES DE TRANSPORT ÉOLIEN ET LEUR REPRÉSENTATION

La neige est transportée suivant trois mécanismes : la reptation, la saltation et la diffusion turbulente dont nous rappellerons ici les grandes lignes.

Au début de l'épisode de transport, les particules sont arrachées uniquement par entraînement aérodynamique. La particule éjectée retombe sur le sol sous l'effet de la gravité. Elle rebondit et éjecte d'autres particules ; on parle de saltation. Lorsque les particules éjectées n'ont pas suffisamment d'énergie pour en éjecter d'autres, on parle alors de reptation. Lorsque les particules sont transportées uniquement par les tourbillons de l'air et ne touchent plus le sol, on emploie alors le terme de diffusion turbulente. Il existe un état intermédiaire appelé saltation modifiée où les particules qui sont amenées à avoir des impacts fréquents au niveau du sol ont des trajectoires modifiées par les tourbillons de l'air. Or dans le cadre de la modélisation numérique qui est proposée, on est amené à simplifier l'ensemble de ces processus par la représentation schématisée ci-dessus. L'équation de transport



1. Les différents mécanismes de transport des particules.



2. Représentation schématisée des modes de transport.

des particules permet de représenter la diffusion turbulente avec une concentration en particules à la base de la couche de suspension égale à C_o .

Dans le cas d'une couche limite turbulente développée sur une plaque plane ($v_x = k y u_*$), l'équation de transport des particules s'écrit sous la forme :

(1) 2 rue de la Papeterie, BP 76, 38402 Saint-Martin-d'Hères.

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + (v - |U_F|) \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k u_y}{\sigma_s} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k u_y}{\sigma_s} \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} \right) \quad (1)$$

ce qui nous permet d'obtenir dans le cas d'un profil à saturation (la concentration ne varie plus en fonction de x) :

$$\bar{C} = \bar{C}_0 \left(\frac{y}{y_0} \right)^{\frac{-|U_F| \sigma_s}{0.41 u_s}} \quad (2)$$

avec $\bar{C}_0$ et y_0 , concentration et hauteur de référence correspondante.

Cette dernière formulation a été validée en soufflerie avec des particules de PVC ([5] [6]).

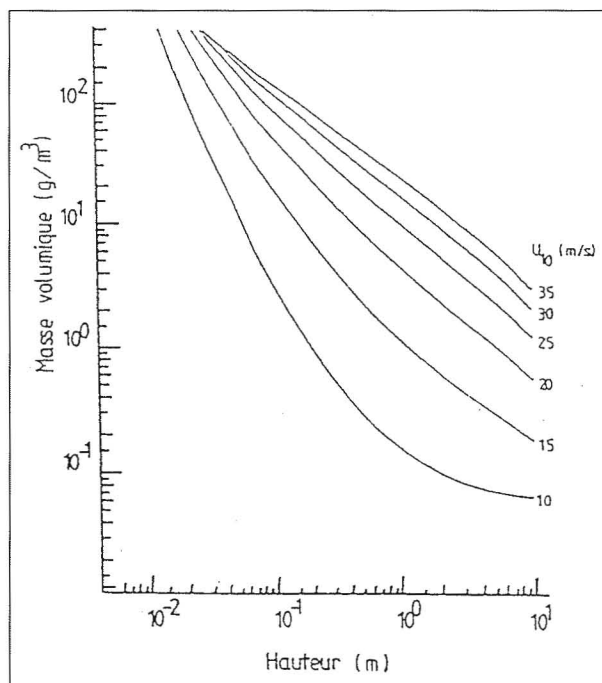
III ■ PROFIL DE CONCENTRATION À SATURATION : VALIDATION EXPÉRIMENTALE POUR LA NEIGE

La validation ayant été effectuée en soufflerie pour des particules sphériques "idéales", il nous est paru intéressant d'étudier ce qu'il en était pour les profils de concentration de neige. Pour cela nous avons traité les données recueillies en Antarctique par Dingle [7], pour lesquelles la configuration du site (*zone plate étendue*) nous permettait d'utiliser l'hypothèse "couche limite sur plaque plane".

● 3.1 Régressions linéaires multiples proposées par Mellor et Fellers

Ces données avaient été déjà traitées par Mellor et Fellers [7], qui par régression linéaire multiple avaient abouti à la relation suivante :

$$Y_2 = 4,8679 - 0,42209 X_1 - 34,369 X_2 - 0,13265 X_1^2 - 17,427 X_1 X_2^3 - 972,01 X_2^3 - 0,0070277 X_1^3 + 3,2692 X_1^2 X_2 + 135,54 X_1 X_2^2 + 6430,2 X_2^3$$



3. Concentration en fonction de la hauteur (Mellor et Fellers).

$Y_2 = \ln C$ (où C est la concentration massique à la hauteur y en g/m^3), $X_1 = \ln y$ (où y est la hauteur), $X_2 = 1/U_{10}$ (où U_{10} est la vitesse du vent en m/s à 10 m de la surface) avec $r = 0,978$.

On constate ainsi que la relation (2) est remise en cause (la représentation diffère d'une droite sur le graphique log-log) notamment dans le cas des faibles vitesses de vent.

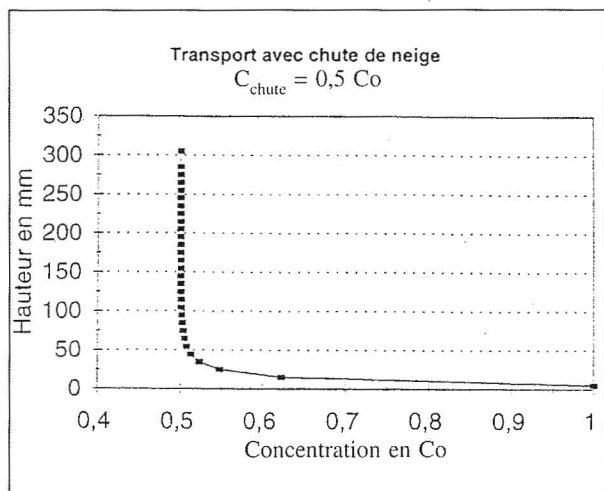
Cependant si l'on étudie plus précisément les données brutes, on constate qu'elles recouvrent deux cas fort différents, à savoir :

- reprise de particules avec chute de neige simultanée,
- reprise de particules sans chute de neige simultanée.

● 3.2 Influence des chutes de neige

La modélisation numérique (fig. 4) nous a permis de montrer que dans le cas d'une reprise de particules avec chute de neige simultanée la relation (2) précédemment établie devait être remplacée par la relation suivante :

$$\bar{C} - \bar{C}_{chute} = (\bar{C}_0 - \bar{C}_{chute}) \left(\frac{y}{y_0} \right)^{\frac{-|U_F| \sigma_s}{0.41 u_s}} \quad (3)$$



4. Influence d'une chute de neige sur le profil de concentration.

● 3.3 Retraitement des données

Compte tenu de ce nouvel élément nous avons retraité les données de Dingle, dans lesquelles n'était pas précisée

Notation

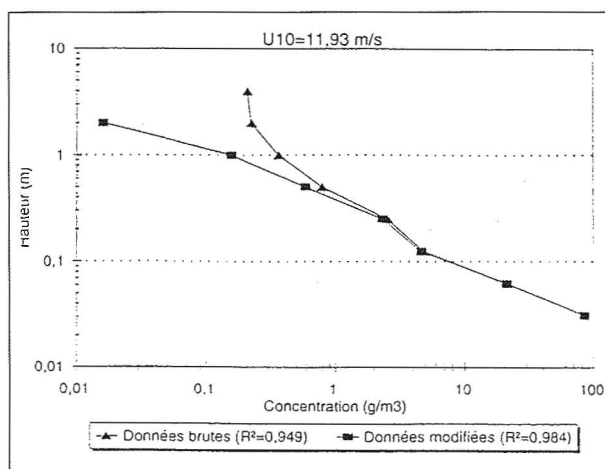
- $\bar{u}$: composante horizontale de la vitesse moyenne (m/s)
- $\bar{v}$: composante verticale de la vitesse moyenne (m/s)
- u_s : vitesse de frottement (m/s)
- U_F : vitesse de chute (m/s)
- k : constante de von Karman
- σ_s : nombre de Schmidt
- $\bar{C}$: concentration en particules (kg/m^3)
- $\bar{C}_{chute}$: concentration moyenne de la chute de neige (kg/m^3)

l'intensité de la chute de neige. En première approche nous avons donc émis comme hypothèse supplémentaire $\overline{C_{chute}} = \overline{C_{4m}}$ sachant que la mesure de la concentration à 4 m était la mesure à la hauteur la plus élevée.

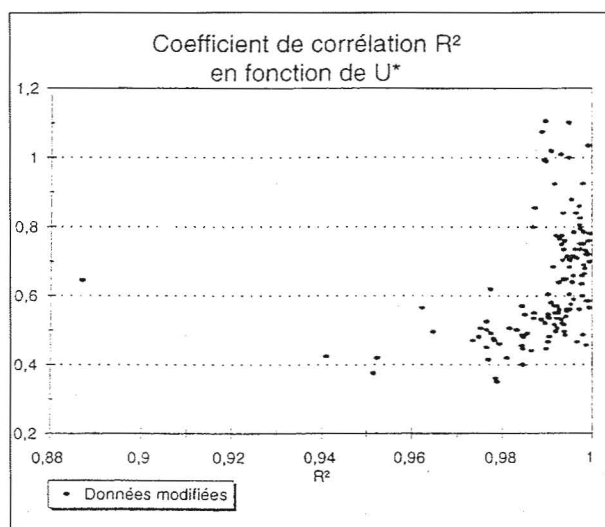
On constate sur l'exemple suivant (fig. 5) l'amélioration du coefficient de corrélation lorsque la relation (3) (données modifiées) remplace la relation (2).

Ce traitement a été généralisé à l'ensemble des données. On constate d'une part qu'il y a une amélioration des coefficients de corrélation (fig. 6) et d'autre part que le coefficient de corrélation est d'autant plus faible (fig. 7) que la vitesse de frottement est faible.

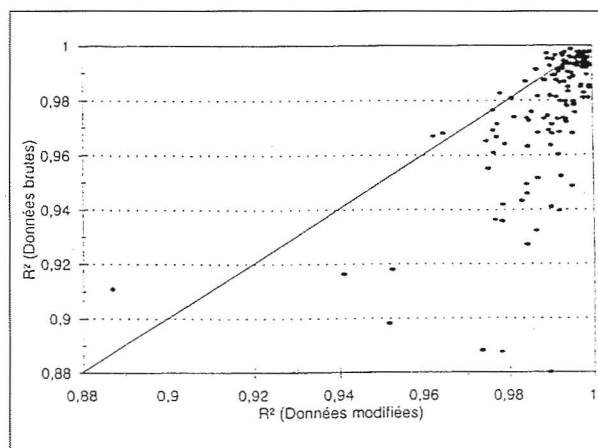
On en conclut donc que l'approche présentée au 2^e paragraphe est valide pour les profils de concentration de neige à saturation. Cependant pour pouvoir l'utiliser, il est nécessaire de déterminer un certain nombre de paramètres caractéristiques de la neige à savoir, la vitesse de chute, le nombre de Schmidt et la concentration de référence, ce que nous avons fait à partir des données de Dingle. Dans le cas du profil de concentration à saturation, il n'est pas possible de dissocier l'effet de la vitesse de chute de celui du nombre de Schmidt.



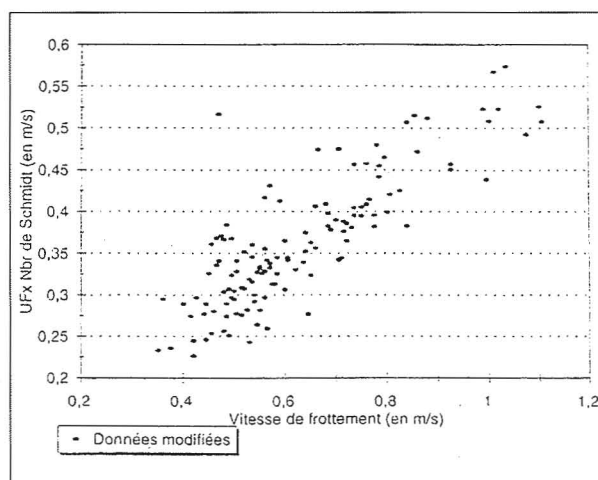
5. Exemple de retraitement des données de Dingle.



6. Variation du coefficient de corrélation en fonction de la vitesse de frottement.

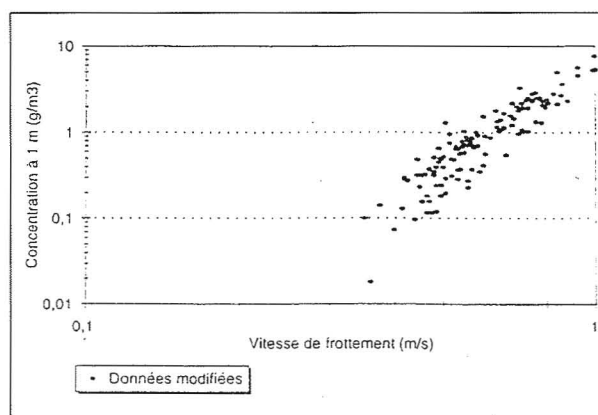


7. Amélioration du coefficient de corrélation lors de l'application de la relation (3). (données brutes : relation 2/données modifiées = relations 3)



8. Evolution du produit de la vitesse de chute par le nombre de Schmidt en fonction de la vitesse de frottement.

$$\sigma_s U_F = 0,384 U_* + 0,121 \text{ avec } R^2 = 0,70$$



9. Evolution de la concentration de neige à 1 m en fonction de la vitesse de frottement :

$$\ln C_{1m} = 4,083 \ln U_* + 1,824 \text{ avec } R^2 = 0,85$$

Bibliographie

- [1] NAAIM-BOUVET F. et NAAIM M. — Modélisation physique en soufflerie et à l'extérieur du transport de neige par le vent. *La Houille Blanche* n° 7, p. 68-75, 1995.
- [2] NAAIM-BOUVET F. — Comparaison of requirements for modeling snowdrift in the case of outdoor and wind-tunnel experiments. *Surveys in Geophysics* 16, p. 711-727, 1995.
- [3] NAAIM-BOUVET F. — La protection du col d'Engayresque (A75). Modélisation physique en soufflerie et à l'extérieur de la formation de congères. *Annales des Ponts et Chaussées* n° 73 p. 27-41, 1995.
- [4] ANDERSON R., SORENSEN M. et WILLETS B. — A review of recent progress in our understanding of aeolian sediment transport. In : *Acta Mechanica*. Springer Verlag, tome 1, p. 1-19, 1991.
- [5] NAAIM M. et MARTINEZ H. — Détermination expérimentale et numérique du profil vertical de concentration dans un écoulement chargé. 11^{ème} Congrès Français de Mécanique, tome 2, p. 289-292, 1991.
- [6] NAAIM M. et MARTINEZ H. — Experimental and theoretical determination of concentration profiles and influence of particle characteristics in blowing snow. *Surveys in Geophysics* n° 16, p. 695-710, 1995.
- [7] FELLERS F. et MELLOR M. — Concentration and flux of wind blown snow. Cold Region Research and Engineering Laboratory, Special Report 86-11 1986, 16 p.
- [8] TAKEUCHI M. — Vertical profile and horizontal increase of drift-snow transport. *Journal of Glaciology* n° 94, p. 481-492.
- [9] GUYOT G. — Brise-vent et rideaux abris avec références particulières aux zones sèches (*chapitre VI : les brise-vent et l'érosion éolienne*) in *Cahier FAO Conservation* 15, p. 153-174, 1986.
- [10] ANDERSON R. — A theoretical model for aeolian impact ripples. *Sedimentology* 34, p. 943-956, 1987.

IV ■ LONGUEUR DE LA ZONE D'EMPRUNT NÉCESSAIRE À LA SATURATION

● 4.1 Des ordres de grandeur divers

La validation expérimentale pour la neige de la modélisation numérique des profils de concentration étant faite, reste maintenant à aborder le problème de la longueur de la zone d'emprunt nécessaire à l'obtention de la saturation.

Les mesures réalisées en soufflerie avec des particules de PVC ([5] [6]) ont montré que dans ce cas l'ordre de grandeur de cette longueur était de quelques mètres.

La modélisation numérique de l'évolution de la couche de saltation de sable réalisée par Anderson [7] confirme cet ordre de grandeur.

Cependant si l'on se réfère aux travaux expérimentaux *in situ* réalisés par Takeuchi [8] avec de la neige, l'ordre de grandeur est cette fois-ci de quelques centaines de mètres.

Par ailleurs, on retrouve cet ordre de grandeur dans les travaux de Chepil [9] qui a étudié l'érosion des sols.

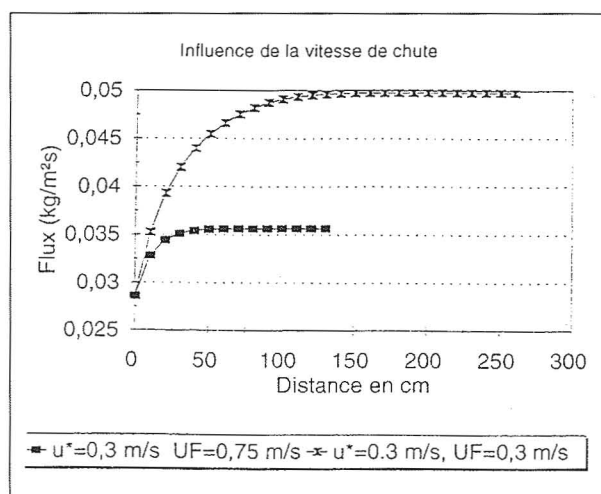
● 4.2 Influence du processus de diffusion turbulente sur l'obtention de la saturation en particules

Pour essayer de comprendre cette différence entre les diverses expériences et modélisations, nous avons voulu séparer l'influence du processus de diffusion turbulente du processus de saltation sur l'obtention de la saturation en particules. Ceci n'est possible que par une approche numérique. Or quelque soit le paramètre testé (*vitesse de chute, vitesse de frottement et nombre de Schmidt*), on constate que la longueur nécessaire à l'obtention de la saturation par diffusion turbulente n'est que de quelques mètres.

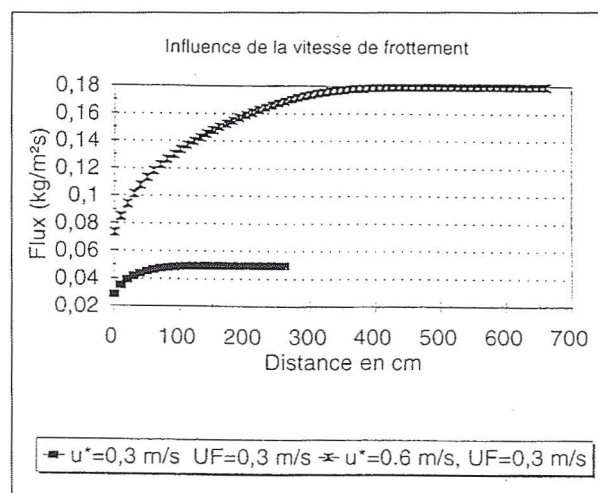
● 4.3 Caractérisation des processus de saltation et de reptation : la fonction "splash"

L'une des caractéristiques essentielles des processus de saltation et de reptation (*fig. 1*) est la fonction splash [4], l'entraînement aérodynamique n'ayant une influence prépondérante qu'au début de la mise en mouvement des particules [4].

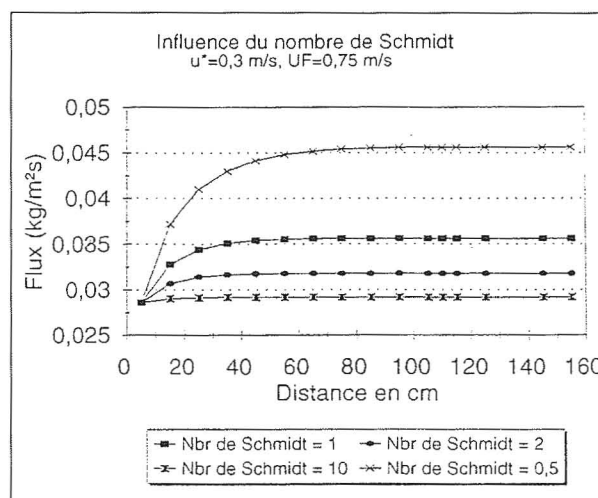
La fonction "splash" permet de déterminer le nombre de particules qui rebondissent ou qui sont éjectées avec une vitesse V_0 . Cette fonction a été déterminée expérimentalement pour des particules sphériques avec une distribution granulo-



10. Influence de la vitesse de chute.



11. Influence de la vitesse de frottement.



12. Influence du nombre de Schmidt.

métrique monodisperse [4]. Et il est vraisemblable que sa forme va varier en fonction de la cohésion, de la forme et de la granulométrie (*plus ou moins étendue*) des particules. Nous nous proposons donc de l'étudier à travers des incidences (*évolution des profils de concentration et formation des ripples* [10]) pour différents paramètres que sont la cohésion des particules, la forme des particules, et la granulométrie.

V ■ CONCLUSIONS

Nous avons validé expérimentalement la modélisation numérique proposée pour des profils de concentration de neige à saturation et nous avons déterminé les différents facteurs (σ_s , U_F , C_0) qui interviennent.

Par ailleurs nous avons mis en évidence les différences pouvant intervenir dans le processus d'obtention de la saturation en particules entre "particules idéales" et neige et nous avons proposé des axes de recherche permettant d'améliorer la connaissance dans ce domaine.