

UNIVERSITE DU QUEBEC

MEMOIRE

PRESENTE A

L'UNIVERSITE DU QUEBEC A CHICOUTIMI  
COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAITRISE EN RESSOURCES ET SYSTEMES

PAR

DANIELLE BOUCHARD

B.sp. EN INGENIERIE

SOLUTION NUMERIQUE DE LA CAPTATION DE GOUTTES  
DE PLUIES VERGLACANTES EN PRESENCE DE GRAVITE  
SUR UNE FORME CYLINDRIQUE

MAI 1984



### Mise en garde/Advice

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

**SOLUTION NUMÉRIQUE DE LA CAPTATION DE GOUTTES DE PLUIES VERGLACANTES  
EN PRÉSENCE DE GRAVITÉ SUR UNE FORME CYLINDRIQUE**

**RÉSUMÉ**

Les gouttes contenues dans les pluies verglaçantes, provoquant le verglas, diffèrent de celles obtenues dans les nuages givrants; leur diamètre est environ 20 fois plus grand. On doit donc tenir compte de la gravité, ce qui n'avait jamais été fait auparavant.

Un terme relié à la forme gravitationnelle est ajouté à la force d'inertie et de traînée dans les équations décrivant le mouvement de gouttelettes d'eau dans un courant d'air autour d'un cylindre. La technique des éléments finis est utilisée pour obtenir la solution des équations. A partir des équations différentielles non-linéaires, et en utilisant la méthode de Newton-Raphson pour la solution de ces équations, les résultats donnent les vitesses pour un champ de gouttelettes. La direction à la surface du cylindre de la vitesse de ces gouttelettes, donne le coefficient de captation locale, à partir duquel, le coefficient de captation totale est trouvé en intégrant numériquement.

Les résultats du coefficient de captation total pour une vitesse d'eau adimensionnelle influencée par la gravité, semble donner les mêmes résultats que ceux obtenus par McComber et Touzot 1981, sans gravité. Les résultats montrent que, pour les conditions de pluies verglaçantes, le coefficient de captation total varie de 0,97 à 0,99.

Les ouvrages montrant la grosseur des gouttes provoquant le verglas sont très rares. Par conséquent, les résultats du diamètre des gouttes originent de la région de Montréal et des environs. Quant à la vitesse du vent, elle est calculée en fonction de la température.

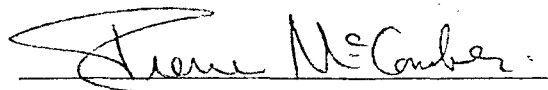
Le maillage utilisé ne permet que le calcul du coefficient de captation en amont du cylindre seulement.

Mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en ressources et systèmes.

Par Danielle Bouchard, ing.



Directeur de recherche, Dr Pierre McComber



Septembre 1985

### REMERCIEMENTS

Je remercie chaleureusement Monsieur Pierre McComber, mon directeur de recherche, professeur à l'Université du Québec à Chicoutimi, ainsi que le groupe de l'Ingénierie Atmosphérique, pour son aide financière.

Je voudrais remercier également Monsieur Jean-Louis Laforte, professeur à l'Université du Québec à Chicoutimi, Monsieur Nguyen Dang Du, assistant de recherche, Monsieur André Ménard, confrère de travail, Messieurs Benoît Thériault et Alain Boivin, dessinateurs et enfin Mesdames Suzanne Truchon et Lisette Tremblay, secrétaires, pour leur aide au cours de ce travail.

Je m'en voudrais de passer sous silence l'aide précieuse de mon époux. Je le remercie beaucoup de m'avoir encouragée et soutenue moralement tout au cours de ce travail.

À mes enfants, je leur dédie ce mémoire et toute mon affection.

TABLE DES MATIERES

|   |      |
|---|------|
| RESUME .....  | ii   |
| REMERCIEMENTS .....   | iv   |
| TABLE DES MATIERES .....  | v    |
| LISTE DES TABLEAUX .....  | vii  |
| LISTE DES FIGURES .....   | viii |
| LISTE DES APPENDICES .....  | x    |
| NOMENCLATURE .....  | xi   |
| INTRODUCTION .....  | 1    |
| 1. PRELIMINAIRES .....  | 3    |
| 1.1 Conditions météorologiques .....  | 3    |
| 1.1.1 Diamètre des gouttes .....  | 3    |
| 1.1.2 Température de l'air .....  | 4    |
| 1.1.3 Vitesse de l'air .....  | 4    |
| 1.2 Ecoulement de l'air autour d'un cylindre .....  | 5    |
| 1.3 Coefficients de trainée d'une goutte dans un écoulement d'air ....  | 6    |
| 2. THEORIE  |      |
| 2.1 Equations de mouvement d'une goutte .....   | 8    |
| 2.1.1 Importance relative de la force de gravité dans l'équation<br>de mouvement d'une gouttelette autour d'un cylindre ..... | 12   |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 2.2   | Conditions aux limites .....  | 13 |
| 2.2.1 | Modifications des équations adimensionnelles basées par rapport à $v_e$ .....                           | 19 |
| 2.2.2 | Importance de la vitesse horizontale et verticale en rapport avec l'inertie de la gouttelette .....     | 22 |
| 2.3   | Détermination du coefficient de captation totale .....  | 23 |
| 2.3.1 | Définition du coefficient de captation .....  | 23 |
| 2.3.2 | Equations .....   | 23 |
| 3.    | SOLUTIONS NUMERIQUE DES VITESSES DES GOUTTES D'EAU .....  | 27 |
| 3.1   | Modifications des équations différentielles non-linéaires d'éléments finis, avec le terme gravité ..... | 27 |
| 3.2   | Solution numérique .....  | 32 |
| 4.    | RESULTATS NUMERIQUES .....  | 35 |
| 5.    | DISCUSSION .....  | 40 |
| 5.1   | Coefficient de captation totale .....   | 40 |
| 5.2   | Coefficient de captation locale .....   | 41 |
| 5.3   | Directions des vitesses de l'eau .....  | 47 |
| 5.4   | Vitesse de l'eau comparé à la vitesse de l'air .....  | 53 |
| 5.5   | Valeurs de captation dans le cas de pluies verglaçantes .....   | 56 |
| 5.6   | Convergence numérique .....   | 57 |
| 5.7   | Importance relative de la façon de rendre les équations adimensionnelles .....                          | 62 |
| 6.    | RECOMMANDATIONS .....   | 64 |
| 7.    | CONCLUSION .....  | 66 |
|       | BIBLIOGRAPHIE .....   | 68 |
|       | CONSTANTES NUMERIQUES UTILISEES .....   | 71 |
|       | APPENDICE 1 .....   | 72 |
|       | APPENDICE 2 .....   | 74 |

LISTE DES TABLEAUX

|          |   |    |
|----------|---|----|
| TABEAU 1 | VALEURS NUMERIQUES DU COEFFICIENT DE CAPTATION<br>LOCALE .....  | 44 |
| TABEAU 2 | ANGLE AUX LIMITES DE LA GOUTTE ET ANGLE DU<br>POINT DE STAGNATION .....   | 44 |
| TABEAU 3 | VALEURS NUMERIQUES DE $\eta_m$ , $\beta_o$ et $\theta_n$ EN FONCTION<br>DE $\phi = 0, 10, 100, 1000, 10\ 000$ ..... | 45 |
| TABEAU 4 | VALEURS NUMERIQUES DE $v_e$ , $u_o$ et $v_g$ EN FONCTION<br>DE $a$ .....  | 59 |
| TABEAU 5 | VALEURS NUMERIQUES DE $K$ EVALUEES A PARTIR DE $v_e$ .....  | 61 |



LISTE DES FIGURES

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Figure 1  | Trajectoire de l'air et de la gouttelette autour d'un cylindre .....  | 9  |
| Figure 2  | Importance relative de la force de traînée par rapport à la gravité en fonction de la grosseur des gouttes et de la vitesse de l'air .....  | 14 |
| Figure 3  | Relation entre les composantes des vitesses aux limites et le rayon de la goutte pour une vitesse de l'air de 10,5 m/s .....  | 18 |
| Figure 4  | L'angle d'incidence du vecteur vitesse de l'eau $\vec{V}_e$ par rapport à la surface de captation .....   | 24 |
| Figure 5  | Maillage utilisé par la méthode des éléments finis pour la solution en deux dimensions de la vitesse des gouttes d'eau avec gravité, autour d'un cylindre (119 noeuds et 48 éléments) ..... | 33 |
| Figure 6  | Graphique du coefficient de captation en fonction de K et $\phi$ .....  | 36 |
| Figure 7  | L'angle maximum de captation ( $\theta_{II}$ ) en fonction du paramètre d'inertie (K) et du paramètre ( $\phi$ ) .....  | 37 |
| Figure 8  | L'angle maximum ( $\theta_{III}$ ) de captation en fonction du paramètre d'inertie (K) et du paramètre ( $\phi$ ) .....   | 38 |
| Figure 9  | Superposition du coefficient de captation locale avec, et sans gravité .....  | 43 |
| Figure 10 | Direction des vecteurs des gouttes d'eau lorsque K = 610, $\phi = 10\ 000$ , pas de gravité .....   | 48 |
| Figure 11 | Direction des gouttes d'eau en présence de gravité lorsque K = 610 et $\phi = 10\ 000$ .....  | 49 |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Figure 12 | Direction des vecteurs aux noeuds avec gravité lorsque<br>$K = 3,6$ et $\phi = 1\ 000$ .....  | 50 |
| Figure 13 | Direction des gouttes d'eau aux noeuds avec gravité lors-<br>que $K = 62,5$ et $\phi = 1\ 000$ .....                                    | 51 |
| Figure 14 | Direction des gouttes d'eau avec gravité lorsque $K = 610$<br>et $\phi = 1\ 000$ .....  | 52 |
| Figure 15 | Relation entre le rayon des gouttes et la vitesse de la<br>goutte d'eau par rapport à différentes vitesses de l'air ..                  | 54 |
| Figure 16 | Relation entre la vitesse de l'eau, $V_e$ , et le paramètre<br>d'inertie, $K$ , pour une vitesse de l'air initiale<br>$u_o$ (m/s) ..... | 55 |
| Figure 17 | Comparaison des valeurs de captation évaluées à partir<br>de $u_o$ et $v_e$ pour $u_o = 10,5$ m/s .....                                 | 58 |
| Figure 18 | Direction de l'angle de rotation .....  | 65 |

LISTE DES APPENDICES

|   |    |
|---|----|
| APPENDICE 1. INTERPOLATION DE LA VITESSE DE L'EAU ENTRE<br>DEUX NOEUDS..... | 72 |
| APPENDICE 2. PROGRAMMES UTILISES.....                                       | 74 |

NOMENCLATURE

|             |   |
|-------------|---|
| a           | Rayon d'une gouttelette, m  |
| $C_d$       | Coefficient de traînée, sans dimensions                                   |
| D           | Diamètre du cylindre, m   |
| {f}         | Vecteur sollicitation, sans dimensions                                    |
| $\vec{F}_g$ | Force de gravité, N   |
| $\vec{F}_d$ | Force de traînée, N   |
| g           | Accélération due à la gravité, $m/s^2$                                    |
| $\vec{j}$   | Vecteur unitaire en direction verticale, sans dimensions                  |
| l           | Longueur à la surface du cylindre, sans dimensions                        |
| $L_{WC}$    | Teneur en eau, $kg/m^3$   |
| L           | Rayon du cylindre, m  |
| $M_w$       | Quantité d'eau captée, kg/ms  |
| $M_{WL}$    | Quantité d'eau arrivant sur 2L, kg/ms                                     |
| r           | Coordonnée polaire, m   |
| {R}         | Vecteur résidu, sans dimensions   |
| t           | Temps, sans dimensions  |
| $u_o$       | Vitesse de l'air loin du cylindre, m/s                                    |
| $\vec{V}$   | Vitesse sans dimensions, $= \frac{\vec{v}}{u_o}$ ou $\frac{\vec{v}}{v_e}$ |
| v           | Vitesse, m/s  |
| x, y        | Coordonnées cartésiennes, m   |
| X, Y        | $\Xi x/L, y/L$ , coordonnées, sans dimensions                             |
| $\alpha$    | angle de déphasage pour la captation locale avec et sans gravité          |

|            |   |
|------------|---|
| $\beta$    | Captation locale de gouttelettes, sans dimensions         |
| $\gamma$   | Angle du vecteur vitesse $\vec{V}$ , rad                  |
| $\delta$   | Angle du vecteur d'un élément de surface du cylindre, rad |
| $\eta_m$   | Coefficient de captation totale, sans dimensions          |
| $\theta$   | Angle au centre du cylindre, rad                          |
| $\theta_m$ | Angle maximum de captation, rad                           |
| $\mu$      | Viscosité dynamique, Pas                                  |
| $\zeta$    | Variable de l'élément de référence, sans dimensions       |
| $\rho_a$   | Densité de l'air, kg/m <sup>3</sup>                       |
| $\rho_e$   | Masse volumique de l'eau, kg/m <sup>3</sup>               |
| $\tau$     | Temps, s  |

#### Paramètres sans dimensions

|        |   |  |
|--------|---|--|
| $K$    | $\equiv \frac{2a^2 \rho_e u_o}{9\mu L}$     | , paramètre d'inertie                      |
| $N_g$  | $\equiv \frac{gL}{u_o^2}$                   | , paramètre de gravité                     |
| $Re_o$ | $\equiv \frac{2a \rho_a u_o}{\mu}$          | , nombre de Reynolds des gouttelettes      |
| $Re_a$ | $\equiv \frac{2L \rho_a u_o}{\mu}$          | , Nombre de Reynolds de l'écoulement d'air |
| $\phi$ | $\equiv \frac{18\rho_a^2 L u_o}{\mu\rho_e}$ | , paramètre fonction de K et Re            |

#### Indices

|   |                    |
|---|--------------------|
| a | air                |
| e | gouttelettes d'eau |

|         |                           |
|---------|---------------------------|
| d       | frottement de l'air       |
| g       | gravité                   |
| i, j, k | pour vecteurs et matrices |
| l,m,n,o | pour vecteurs et matrices |
| II      | pour quadrant II          |
| III     | pour quadrant III         |

## INTRODUCTION

Les dégâts causés par la formation de verglas sur les lignes de transport d'énergie électrique sont désastreux. Par exemple, parmi les orages de verglas survenus dans la province de Québec, le plus important fut celui de novembre 1969 où, vingt-neuf pylônes s'effondrèrent causant des dommages pour plus de \$ 20 000 000.00 (Chaîné, 1973). C'est dire tout l'impact économique impliqué.

Une des actions pouvant remédier à ces accidents est de faire les calculs des tours en considérant une charge de verglas plus adéquate. A ce sujet, la modélisation numérique permet l'étude de la formation de glace sur un cylindre. Pour cela, il faut connaître le coefficient de captation.

Langmuir et Blodgett (1946) et Brun (1952) furent les premiers à travailler sur la captation par un objet. Puis, il y eut Sclamp et Pruppacher (1975), Ackley (1978), McComber et Touzot (1981), pour n'en citer que quelques-uns. Les résultats sont tous considérés pour des conditions de nuages givrants où l'analyse dimensionnelle montre que la force de gravité peut être négligée par rapport à la force de traînée dans les équations du mouvement, puisque le diamètre des gouttes contenues dans les nuages givrants est compris entre 20 et 60 micromètres, Kuroiwa (1958), diamètre qui est relativement petit. Mais personne, jusqu'à

date, n'avait pu trouver les valeurs de captation lorsque les gouttes sont grosses.

Le but de ce mémoire est de trouver les valeurs de captation lorsque le diamètre des gouttes est gros. C'est ce genre de gouttes que l'on trouve dans le cas de pluies verglaçantes. Récemment, Leech (1978) a trouvé entre autres que la grosseur des gouttes contenues dans les pluies verglaçantes se situe entre 440 et 1040 micromètres, donc environ 20 fois plus grands que dans les nuages givrants. La force de gravité doit donc être considérée, terme qui était négligé auparavant.

Le mémoire utilise la solution numérique de McComber et Touzot (1981). Des modifications ont été apportées afin d'adapter leur modèle à celui-ci. Elles se divisent en trois volets. Premièrement, aux équations du mouvement déjà établies lors de nuages givrants, on ajoute un terme qui est relié à la gravité. Deuxièmement, l'ajout d'une vitesse selon l'axe gravitationnel change les conditions aux limites. Troisièmement, la non-symétrie du problème cause une augmentation de la surface à étudier.

Avec toutes ces considérations en place, le calcul du coefficient de captation lors de pluies verglaçantes donne des résultats intéressants.



CHAPITRE I  
PRÉLIMINAIRES

1.1 CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES

Le diamètre des gouttes, la température de l'air et la vitesse de l'air sont les conditions météorologiques essentielles à la détermination des conditions initiales lors de la programmation par éléments finis. Parmi la gamme de gouttes possibles, on s'intéresse ici aux conditions obtenues lors de pluies verglaçantes. La littérature à ce sujet étant rare, c'est pourquoi les conditions obtenues sont restreintes à un auteur, soit à une région géographique en particulier. De plus, la détermination des conditions de pluies verglaçantes permet de cerner le domaine d'application des résultats du mémoire.

1.1.1 Diamètre des gouttes

La grosseur des gouttes de pluies verglaçantes permet de déterminer l'intervalle des valeurs du paramètre d'inertie.

Ainsi, les résultats obtenus par Leech (1978), prévalent pour des pluies verglaçantes dont les statistiques ont été recueillies sur plusieurs années, et donnent le diamètre pour des pluies les plus fréquemment rencontrées

( $440 < D < 1040 \mu\text{m}$ ) dans la région de Montréal et des environs.

### 1.1.2 Température de l'air

Werner (1975) montre que la température de l'air, lors de pluies verglaçantes, peut varier de  $0^{\circ}\text{C}$  à  $-10^{\circ}\text{C}$ . C'est pourquoi la valeur intermédiaire  $-5^{\circ}\text{C}$  a été choisie. Elle permet de déterminer la vitesse de l'air.

### 1.1.3 Vitesse de l'air

La vitesse de l'air est prise d'après une équation élaborée par Stallabrass (1983) reliant la température de l'air à la vitesse de l'air, dont voici l'expression.

$$V_a = 1,5 T + 18 \quad (\text{Stallabrass 1983}) \quad (1)$$

$$V_a = \text{m/s et } T = ^{\circ}\text{C}$$

L'équation (1) donne  $V_a = 10,5 \text{ m/s}$  pour  $T = -5^{\circ}\text{C}$ . Cette vitesse est essentielle à la détermination des conditions aux limites de l'air.

## 1.2 ÉCOULEMENT DE L'AIR AUTOUR D'UN CYLINDRE

La solution du champ de vitesse pour les gouttelettes d'eau nécessite la connaissance au préalable du champ de vitesses de l'air  $\vec{V}_a$ . Ainsi, les composantes de vitesses de l'air autour d'un cylindre sont données par  $U_a$  et  $V_a$ , Langmuir et Blodgett (1946), calculées en fonction des coordonnées adimensionnelles, X et Y:

$$U_a = 1 + \frac{(Y^2 - X^2)}{(X^2 + Y^2)^2} \quad (2)$$

$$V_a = \frac{2XY^2}{(X^2 + Y^2)^2} \quad (3)$$

où  $X = \frac{x}{L}$  et  $Y = \frac{y}{L}$

Ces équations (2) et (3) sont valides pour un écoulement potentiel car pour une vitesse de vent typique de 10 m/s et un diamètre de cylindre de 3,5 cm, le nombre de Reynolds est de l'ordre de 20 000. Dans ce cas, l'hypothèse de l'écoulement potentiel est réaliste en amont du cylindre.

En aval du cylindre, l'écoulement consiste en des tourbillons formés par de la turbulence. Cette partie du cylindre n'est donc pas prise en considération, car les expériences montrent de toute évidence, l'impact négligeable de

gouttes au-delà du point de décollement, Langmuir et Blodgett (1946).

On peut utiliser l'écoulement potentiel pour deux raisons:

1. pas de turbulence en amont du cylindre;
2. effet de viscosité négligeable à  $Re > 10\ 000$  à l'extérieur de la couche limite.

### 1.3 COEFFICIENTS DE TRAINEE D'UNE GOUTTE DANS UN ECOULEMENT D'AIR

Le coefficient de frottement  $C_d$  est essentiel à la détermination de la force de traînée. Le nombre de Reynolds,  $Re$ , calculé pour la gouttelette est plus faible que celui calculé pour l'écoulement de l'air puisque sa vitesse relative est plus petite.

Langmuir et Blodgett (1946) ont suggéré une expression empirique pour approcher les résultats rapportés par Glodstein (1965) pour le coefficient de frottement:

$$\frac{C_d Re}{24} = 1,0 + 0,197 Re^{0,63} + 2,6 \times 10^{-4} Re^{1,38} \quad (4)$$

Des expériences reprises plus récemment par Beard et Pruppacher (1969) montrent les expressions suivantes pour un nombre de Reynolds  $< 200$ :

$$\frac{C_d Re}{24} = 1 + 0,188 Re^{0,632} \quad 21 < Re < 200 \quad (5)$$

$$\frac{C_d Re}{24} = 1 + 0,155 Re^{0,802} \quad 2 < Re < 21 \quad (6)$$

$$\frac{C_d Re}{24} = 1 + 0,902 Re^{0,955} \quad 0,2 < Re < 2 \quad (7)$$

La solution numérique de cette thèse emploie l'expression 4 pour  $Re > 200$  et les expressions 5, 6 et 7 pour  $Re < 200$ .

A noter qu'aux relations 5, 6 et 7, on ne fait qu'un rajout à la loi de Stokes concernant le frottement des gouttelettes dans l'air:

$$\text{Stokes:} \quad \frac{C_d Re}{24} = 1$$

Ce terme additionnel se réajuste suivant la gamme dans laquelle le nombre de Reynolds se trouve.

## CHAPITRE II

### THÉORIE

#### 2.1 EQUATIONS DE MOUVEMENT D'UNE GOUTTE

Lorsqu'un conducteur est placé dans un courant de gouttes, l'air se déplacera autour de celui-ci (voir figure 1). Mais les gouttes d'eau n'ont pas la même trajectoire que l'air, et cela est dû à trois forces agissant sur celles-ci :

1. la force de traînée ou de frottement que l'air exerce sur la gouttelette ( $F_d$ )
2. la force d'inertie qui tend à maintenir la gouttelette dans sa direction initiale
3. la force de gravité ( $F_g$ )

La force de gravité est donnée par :

$$\begin{aligned}
 F_g &= m\vec{g} \\
 F_g &= V\rho_e\vec{g} \\
 F_g &= \frac{4}{3}\pi a^3\rho_e\vec{g}
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

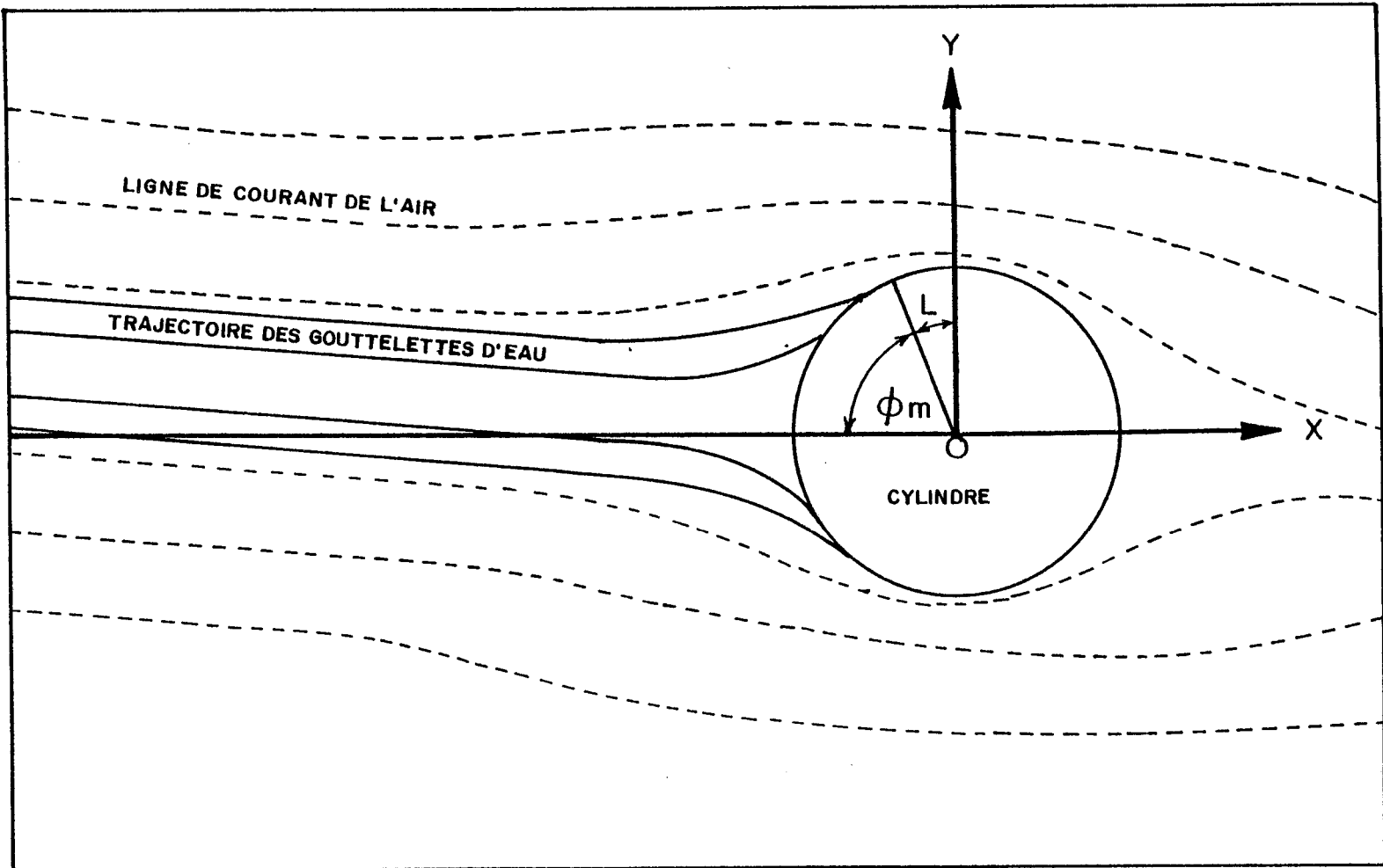


Figure 1. Trajectoire de l'air et de la gouttelette autour d'un cylindre.

La force de traînée est définie en fonction du coefficient de traînée sans dimension,  $C_d$ , et est donnée par:

$$F_d = C_d \frac{1}{2} \pi \rho_a a^2 (\vec{v}_a - \vec{v}_e)^2 \quad (9)$$

Elle tend à faire suivre la direction des vitesses de l'air. Elle dépend de la vitesse relative de l'air et de la gouttelette  $(\vec{v}_a - \vec{v}_e)$ . Voir figure 1.

L'accélération de la gouttelette,  $D\vec{v}_e/D\tau$  peut s'obtenir par l'équilibre des forces:

$$\frac{4}{3} \pi a^3 \rho_e \frac{D\vec{v}_e}{D\tau} = g \frac{4}{3} \pi a^3 \rho_e + \frac{C_d Re}{4} \pi a \mu (\vec{v}_a - \vec{v}_e) \quad (10)$$

où le nombre de Reynolds d'une gouttelette utilisé pour le calcul de traînée est:

$$Re = \frac{2 a \rho_a |\vec{v}_a - \vec{v}_e|}{\mu} \quad (11)$$

Donc, avec cette définition, en regroupant les équations 10 et 11, on obtient la force de traînée, qui devient:

$$F_d = \frac{C_d Re}{4} \pi a \mu |\vec{v}_a - \vec{v}_e| \quad (12)$$



En considérant:

$$\begin{aligned}\vec{V}_e &= \frac{\vec{v}_e}{u_o} \\ t &= \frac{\tau u_o}{L} \\ \vec{V}_a &= \frac{\vec{v}_a}{u_o}\end{aligned}$$

On peut réécrire 10, de façon adimensionnelle:

$$\frac{(2a^2 \rho_e u_o)}{9\mu L} \frac{D\vec{V}_e}{Dt} = \frac{(2a^2 \rho_e \vec{g})}{9\mu u_o} + \frac{C_d Re}{24} (\vec{V}_a - \vec{V}_e) \quad (13)$$

Si on appelle,

$K$  = paramètre d'inertie

$$K = \frac{2a^2 \rho_e u_o}{9\mu L} \quad (14)$$

$N_g$  = paramètre de gravité

$$N_g = \frac{gL}{u_o^2} \quad (15)$$

en groupant  $K$  et  $N_g$ , on obtient:

$$K \cdot N_g = \frac{2a^2 \rho_e u_o}{9\mu L} \frac{gL}{u_o^2}$$

$$K \cdot N_g = \frac{2a^2 \rho_e g}{9\mu u_o}$$

Alors, l'équation du mouvement s'écrit sans dimension:

$$K \frac{D\vec{V}_e}{Dt} = -KN_g \vec{j} + \frac{C_d Re}{24} (\vec{V}_a - \vec{V}_e) \quad (16)$$

Où,  $-KN_g \vec{j}$  est le nouveau terme faisant intervenir la gravité ( $\vec{j} = \vec{g}/g$ ). Le frottement,  $\frac{1}{24} C_d Re (\vec{V}_a - \vec{V}_e)$ , entraîne les gouttelettes autour du cylindre pour un vent horizontal. Par contre, sous l'effet de la gravité, elles sont entraînées vers le bas, d'où le signe négatif. On note que si  $N_g \rightarrow 0$ , on retrouve les équations sans le terme gravité.

### 2.1.1 Importance relative de la force de gravité dans l'équation de mouvement d'une gouttelette autour d'un cylindre

On peut évaluer l'importance relative des deux termes apparaissant à droite de l'égalité. En effet, en supposant que la loi de Stokes s'applique dans le cas du frottement des gouttes dans l'air, alors:

$$\frac{C_d Re}{24} = 1$$

On peut définir l'importance relative des deux termes directement par  $(KN_g)^{-1}$ . La figure 2 donne les valeurs numériques pour les conditions de pluies verglaçantes. Puisque leur rayon varie de 220  $\mu\text{m}$  à 520  $\mu\text{m}$ , le terme  $(KN_g)^{-1}$  varie de 0,15 à 2,0. Ainsi, la force de gravité est presque toujours plus importante que la force de traînée. L'importance s'accroît avec l'augmentation de la grosseur des gouttes ou la diminution de la vitesse de l'air.

## 2.2 Conditions aux limites

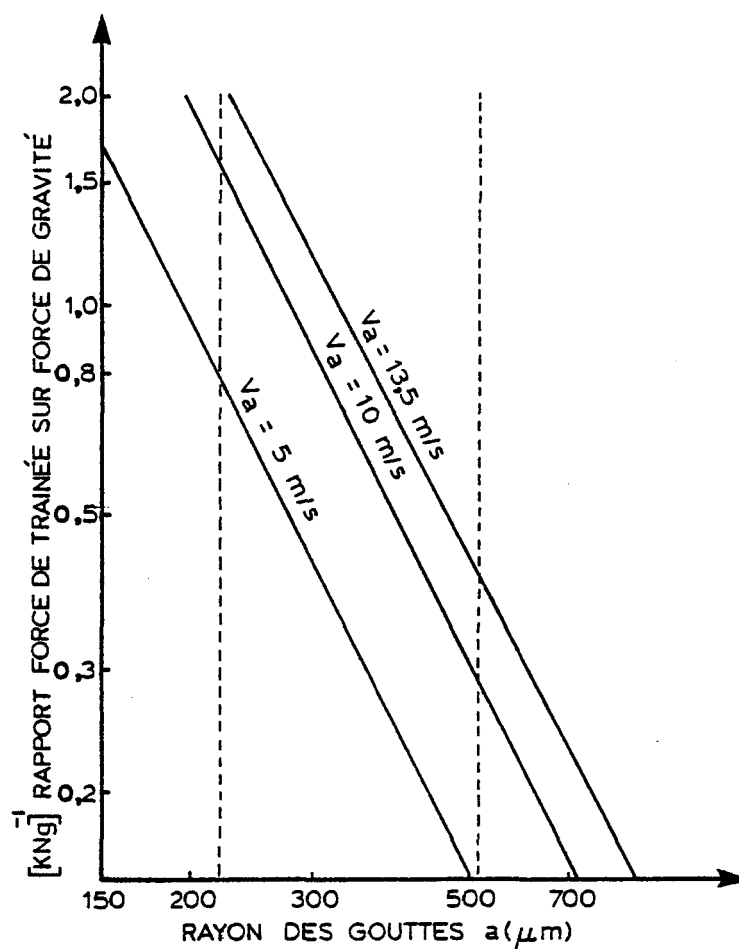
Il est nécessaire de connaître les conditions de vitesse des gouttelettes d'eau aux limites lorsque celles-ci sont loin du cylindre. Comme montré à la figure 4, les vitesses de l'eau en chaque noeud doivent être connues sur le contour extérieur, en amont du cylindre.

En plus d'une composante horizontale dû à la vitesse de l'air, il faut ajouter aux conditions limites, une composante verticale dû à la gravité.

$\vec{v}_g$  : vitesse selon l'axe des Y négatif dû à la force de gravité

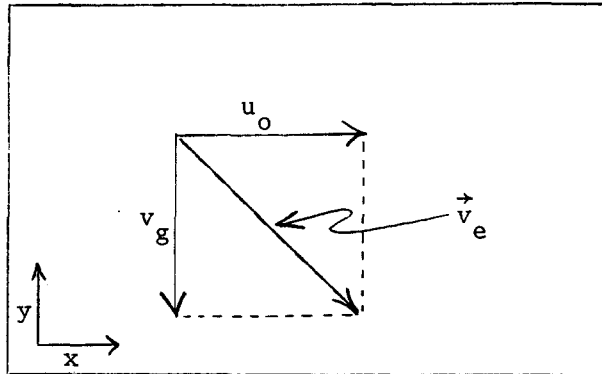
$\vec{u}_0$  : vitesse de l'air loin du cylindre selon l'axe des X

$\vec{v}_e$  : vitesse de la goutte qui est la résultante de  $\vec{v}_g$  et  $\vec{u}_0$ .



Le trait pointillé délimite l'intervalle de la grosseur des gouttes contenues dans les pluies verglaçantes telles que vue au chapitre 1.

Figure 2. Importance relative de la force de traînée par rapport à la gravité en fonction de la grosseur des gouttes et de la vitesse de l'air.



On détermine la vitesse limite par l'égalité entre la force de gravité  $F_g$  et la force de frottement de l'air  $F_d^1$ .

La force de gravité est donnée par:

$$F_g = \frac{4}{3} \pi a^3 \rho_e g \quad (9)$$

où  $\frac{4}{3} \pi a^3$  est le volume d'une sphère.

La force de frottement est donnée par la loi de Stokes:

$$F_d^1 = 6 \pi \mu v_g a \quad (17)$$

L'égalité de 9 et 17 donne:

$$6 \pi \mu v_g a = \frac{4}{3} \pi a^3 \rho_e g$$

$$v_g = \frac{2}{9} \frac{a^2 \rho_e g}{\mu} \quad (18)$$

En réorganisant l'expression (18), on obtient la vitesse limite  $v_g$ :

$$v_g = \underbrace{\left[ \frac{2a^2 \rho_e u_o}{9\mu L} \right]}_K \underbrace{\left[ \frac{gL}{u_o^2} \right]}_{N_g} u_o$$

$$v_g = K N_g u_o \quad (19)$$

Et la vitesse  $|\vec{v}_e|$  de la gouttelette se trouve en additionnant vectoriellement la vitesse de l'air et la vitesse limite:

$$|\vec{v}_e| = \sqrt{v_g^2 + u_o^2}$$

$$|\vec{v}_e| = \sqrt{K^2 N_g^2 u_o^2 + u_o^2}$$

$$|\vec{v}_e| = u_o \sqrt{1 + (KN_g)^2} \quad (20)$$

De façon adimensionnelle la vitesse de l'air devient:

$$U = \frac{u_o}{|\vec{v}_e|} = \frac{1}{\sqrt{1 + (KN_g)^2}} \quad (21)$$

De la même façon, la vitesse limite, équation (19) devient sous forme adimensionnelle:

$$V_g = \frac{v_g}{|\vec{v}_e|} = \frac{KN_g}{\sqrt{1 + (KN_g)^2}} \quad (22)$$

La vitesse  $V_e$  de la goutte d'eau de façon adimensionnelle devient:

$$V_e = 1 \quad (23)$$

(Voir figure 3)

Il est important de noter certains apports distinctifs par rapport à McComber et Touzot (1981) concernant les conditions aux limites avec gravité.

Dans un premier volet, la vitesse verticale provenant de l'équilibre des forces de gravité et de friction est ajoutée vectoriellement à la vitesse horizontale de l'air. Et deuxièmement, les vitesses  $v_g$  et  $u_o$  sont rendues adimensionnelles non pas par  $u_o$ , mais par la vitesse de l'eau elle-même, sinon la captation totale donne des valeurs insensées ( $\eta > 1$ ).

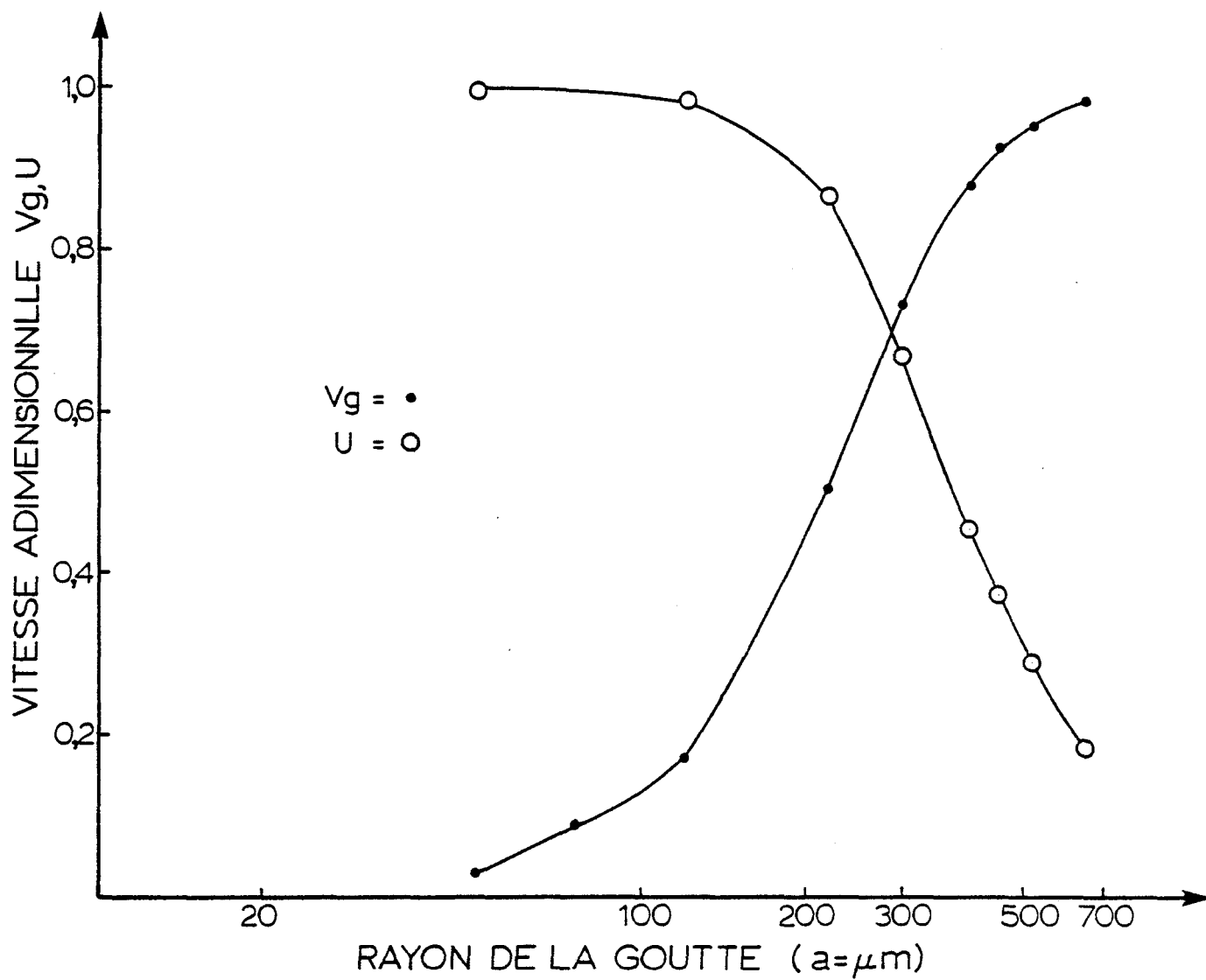


Figure 3. Relation entre les composantes des vitesses aux limites et le rayon de la goutte pour une vitesse de l'air de 10,5 m/s.



Ainsi, d'après la figure 5, les conditions aux limites sont données sur le pourtour extérieur ( $R = 11$ ), par  $V_g$  et  $U$ , équations 21 et 22.

### 2.2.1 Modifications des équations adimensionnelles basées par rapport à $v_e$

Dans les conditions aux limites précédentes, on utilise  $|\vec{v}_e|$  comme vitesse de référence, p. 15 et 16. Cependant, dans l'équation de mouvement p. 11 et 12, on utilise  $|\vec{u}_0|$  comme vitesse de référence. On peut vérifier quels changements auraient les équations p. 11 et 12 si elles étaient basées par rapport à  $|\vec{v}_e|$ .

En effet, en posant  $v_e$  dans  $K$  et  $N_g$ , l'équation de mouvement utilise la même vitesse de référence. De façon générale, presque toutes les équations sont altérées de la manière suivante.

L'équation d'équilibre des forces exercées sur une gouttelette en mouvement dans l'air, vue précédemment, est:

$$\frac{4}{3} \pi a^3 \rho_e \frac{D\vec{v}_e}{Dt} = \frac{4}{3} \pi a^3 \rho_e \vec{g} + \frac{C_d Re}{4} \pi a \mu (\vec{v}_a - \vec{v}_e) \quad (10)$$

En considérant:

$$\begin{aligned}\vec{V}_e &= \frac{\vec{v}_e}{v_e} \\ t &= \frac{\tau v_e}{L} \\ \vec{V}_a &= \frac{\vec{v}_a}{v_e}\end{aligned}$$

l'équation (10) devient:

$$\left(\frac{2}{9} \frac{a^2 \rho_e}{\mu L} v_e\right) \frac{d \vec{V}_e}{dt} = \frac{2a^2 \rho_e g}{9\mu v_e} + \frac{C_d Re}{24} (\vec{V}_a - \vec{V}_e) \quad (13a)$$

où K = paramètre d'inertie, change et devient:

$$K = \frac{2a^2 \rho_e v_e}{9\mu L} \quad (14a)$$

et où  $N_g$  change et devient:

$$N_g = \frac{gL}{v_e^2} \quad (15a)$$

En groupant K et  $N_g$ , on obtient:

$$K \cdot N_g = \frac{2a^2 \rho_e g}{\mu v_e}$$

Finalement, l'équation de mouvement sans dimension demeure inchangée:

$$K \frac{D\vec{V}_e}{Dt} = -K N_g \vec{j} + \frac{C_d Re}{24} (\vec{V}_a - \vec{V}_e) \quad (16)$$

Le fait d'avoir changé  $K$  et  $N_g$  change aussi la vitesse adimensionnelle de l'air et la vitesse adimensionnelle limite. En effet, l'expression 19, p. 16, change et devient:

$$v_g = \frac{2}{9} \frac{a^2 \rho_e g}{\mu}$$

$$v_g = \underbrace{\left[ \frac{2a^2 \rho_e v_e}{9\mu L} \right]}_K \underbrace{\left[ \frac{gL}{v_e^2} \right]}_{N_g} v_e$$

$$v_g = K N_g v_e$$

La vitesse  $|\vec{v}_e|$  se trouve en additionnant la vitesse de l'air et la vitesse limite:

$$|\vec{v}_e| = \sqrt{v_g^2 + u_o^2}$$

$$v_e = \frac{v_g}{K N_g} = \sqrt{v_g^2 + u_o^2}$$

$$v_g = \frac{K N_g u_o}{\sqrt{1 - K^2 N_g^2}} \quad (19a)$$

$$v_e = \frac{u_o}{\sqrt{1 - K^2 N_g^2}} \quad (20a)$$

Finalement,

$$U = \frac{u_0}{|\vec{v}_e|} = \sqrt{1 - K^2 N_g^2} \quad (21a)$$

$$V_g = \frac{v_g}{|\vec{v}_e|} = KN_g \quad (22a)$$

$$V_e = 1$$

On voit ainsi que la formulation des équations de  $U$  et  $V_g$ , équations 21a et 22a, est modifiée et que  $K$  et  $N_g$ , équations 14a et 15a, changent aussi. Cependant, les résultats de captation ne changent peu. C'est ce que l'on verra plus en détail au chapitre cinq (5). Cependant, le mémoire se base par rapport aux équations 14, 15, 21 et 22.

### 2.2.2 Importance de la vitesse horizontale et verticale en rapport avec l'inertie de la gouttelette

La forme sans dimension des équations 21 et 22 permet de juger rapidement de l'importance du rayon des gouttes. En effet, on peut utiliser les équations 14 et 15 afin d'évaluer  $KN_g$  à partir du rayon ( $KN_g = 2a^2\rho_g/9\mu_0$ ). La figure 3, p. 17, donne les valeurs numériques que prend  $V_g$  et  $U$  pour différentes valeurs de  $a$  et pour une vitesse de l'air constante ( $u_0 = 10,5$  m/s). Les courbes montrent bien la non-linéarité de  $V_g$  et  $U$  en fonction de  $a$ . Avec l'augmentation

du rayon des gouttelettes, la composante verticale,  $V_g$ , augmente rapidement, tandis que la composante horizontale,  $U$ , diminue rapidement. D'où l'importance de la vitesse verticale due à la gravité par rapport à la vitesse horizontale, à mesure que l'inertie des gouttes augmente.

### 2.3 Détermination du coefficient de captation totale

#### 2.3.1 Définition du coefficient de captation

Le coefficient de captation totale se définit comme le rapport de la quantité de masse des gouttes d'eau captées par le conducteur sur la quantité de masse des gouttes qui passerait à travers la même surface par unité de temps s'il n'y avait pas eu de conducteur.

#### 2.3.2 Équations

La solution par éléments finis donne la vitesse en chaque noeud du domaine, et par conséquent, aussi à la surface du cylindre. La direction de cette vitesse est utilisée pour déterminer la captation sur la surface d'orientation  $d\vec{\ell}$ .

La direction de la vitesse de la gouttelette autour du cylindre détermine la captation locale,  $\beta$ , par l'équation 24 (voir figure 4) qui s'applique en

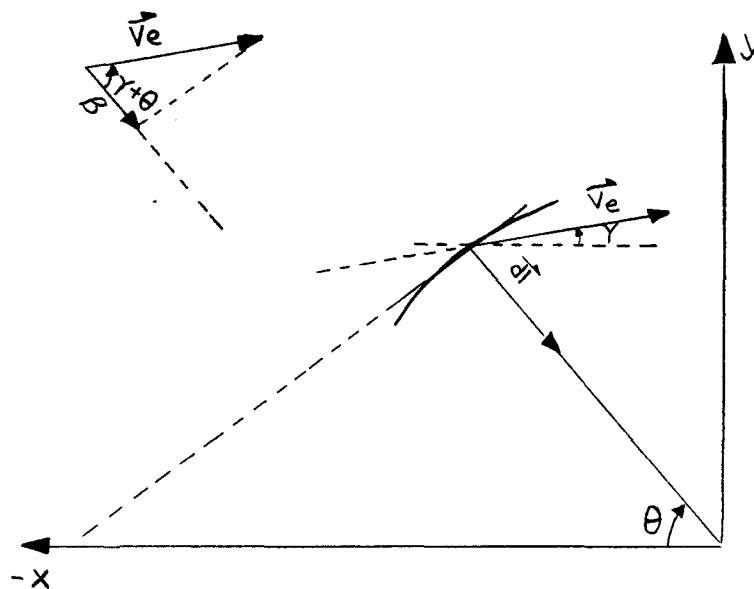


Figure 4. L'angle d'incidence du vecteur vitesse de l'eau  $\vec{v}_e$  par rapport à la surface de captation.

supposant la concentration de masse des gouttes constantes à l'approche du cylindre:

$$\beta = \frac{\vec{V}_e \cdot d\vec{\ell}}{|d\vec{\ell}|} = |\vec{V}_e| \cos(\gamma + \theta) \text{ pour } \beta > 0 \quad (24)$$

Le résultat de la captation locale, lorsqu'elle est multipliée par la teneur en eau et par la vitesse, donne le flux de masse d'eau capté à la surface du cylindre.

La captation totale est trouvée en intégrant la captation locale, sur toute la surface captée:

$$\eta_m = \int_0^{\theta_m} \beta d\ell \quad \text{McComber et Touzot 1981} \quad (25)$$

où:

$\theta_m$  : L'angle maximum mesuré à partir de l'axe X négatif de la normale à la surface au point considéré

$\gamma$  : L'angle du vecteur vitesse de l'eau.

$$\gamma = \text{tg}^{-1} \frac{\dot{V}_g}{U} = \text{tg}^{-1} KN_g \quad (26)$$

La limite de la captation, alors pas de captation, se trouve lorsque:

$$\theta + \gamma > \frac{\pi}{2}$$

Cependant, la vitesse  $\vec{V}_e$  étant connue seulement en certains noeuds à la surface du cylindre, elle doit donc être interpolée en des points situés entre ces noeuds. Voir appendice 1.



CHAPITRE III

SOLUTION NUMERIQUE DES VITESSES DES GOUTTES D'EAU

3.1 MODIFICATIONS DES EQUATIONS DIFFERENTIELLES NON-LINERAIRES  
D'ELEMENTS FINIS, AVEC LE TERME GRAVITE

L'équation de mouvement est:

$$K \left[ U_e \frac{\partial U_e}{\partial X} + V_e \frac{\partial U_e}{\partial Y} \right] = \frac{-C_d R_e}{24} (U_e - U_a) \quad (27)$$

$$K \left[ U_e \frac{\partial V_e}{\partial X} + V_e \frac{\partial V_e}{\partial Y} \right] = -KN_g - \frac{C_d R_e}{24} (V_e - V_a) \quad (28)$$

Il s'agit d'une composante purement verticale vers le bas, la gravité n'affecte donc que l'équation (28).

Les fonctions d'interpolation  $N_i(\xi, \eta)$  sont données en fonction des variables  $\xi$  et  $\eta$  d'un élément de référence. Le passage d'un des 48 éléments à l'élément de référence se fait par l'utilisation du Jacobien  $[J]$ . Les mêmes fonctions d'interpolation sont utilisées pour les vitesses de l'air et les vitesses des gouttelettes. Ainsi, ces vitesses sont:

$$\begin{aligned}
 U_a &= \langle N_i(\xi, \eta) \rangle \{U_{an}\} & ; & & V_a &= \langle N_i(\xi, \eta) \rangle \{V_{an}\} \\
 U_e &= \langle N_i(\xi, \eta) \rangle \{U_{en}\} & ; & & V_e &= \langle N_i(\xi, \eta) \rangle \{V_{en}\}
 \end{aligned}
 \tag{29}$$

Dans ces équations  $\{U_{an}\}$ ,  $\{U_{en}\}$ , etc... représentent les vecteurs des valeurs des vitesses aux noeuds.

On formule les équations élémentaires par la méthode de Galerkinge, c'est-à-dire, par un résidu pondéré à l'aide des fonctions d'interpolation  $N_i$ .

Selon l'axe des X,

$$\iint \{N\} [(KU_e \langle N_x \rangle + KV_e \langle N_y \rangle) \{U_e\} + \frac{1}{24} C_d Re (\langle N \rangle \{U_e\} - U_a)] dXdY = 0$$

ou encore,

$$\underbrace{\iint \{N\} (KV_e \langle N_x \rangle + KV_e \langle N_y \rangle + \frac{1}{24} C_d Re \langle N \rangle) dXdY \{U_e\}}_{k'_{ij}} = \underbrace{\iint \{N\} \frac{C_d Re}{24} U_a dXdY}_{f'_i} \tag{30}$$

Selon l'axe des Y,

$$\iint \{N\} [(KU_e \langle N_x \rangle + KV_e \langle N_y \rangle) \{V_e\} + (\frac{1}{24} C_d Re (\langle N \rangle \{V_e\} - V_a) \langle N \rangle KN_g)] dXdY = 0$$

ou encore,

$$\underbrace{\left\{ \{N\} (K U_e \langle N_x \rangle + K V_e \langle N_y \rangle + \frac{1}{24} C_d \text{Re} \langle N \rangle dX dY \{V_e\}) \right\}}_{k''_{ij}} = \underbrace{\left\{ \{N\} \left[ -\frac{C_d \text{Re}}{24} V_a - K N_g \right] dX dY \right\}}_{f''_{ij}} \quad (31)$$

Les changements de variables s'opèrent en utilisant la relation:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial X} \\ \frac{\partial N_i}{\partial Y} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial X}{\partial \xi} & \frac{\partial X}{\partial \eta} \\ \frac{\partial Y}{\partial \xi} & \frac{\partial Y}{\partial \eta} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \end{Bmatrix} \quad (32)$$

qui permet de trouver  $\frac{\partial N_i}{\partial X}$  et  $\frac{\partial N_i}{\partial Y}$  à partir de  $\frac{\partial N_i}{\partial \xi}$  et de  $\frac{\partial N_i}{\partial \eta}$ . On peut également faire l'intégration sur l'élément de référence en changeant les variables de l'intégration par:

$$dX dY = \det [J] d\xi d\eta \quad (33)$$

Ces deux équations, 30 et 31, peuvent être placées sous forme matricielle, pour donner l'équation élémentaire suivante:

$$\begin{bmatrix} k'_{ij} & | & 0 \\ \hline 0 & | & k''_{ij} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_{ei} \\ \hline V_{ei} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f'_i \\ \hline f''_i \end{Bmatrix} \quad (34)$$

Seulement le terme  $f''_i$  est modifié.

L'équation 34 de la matrice élémentaire est non-linéaire puisque  $k'_{ij}$  et  $k''_{ij}$  sont fonction de  $U_e$  et  $V_e$ . La solution demande en conséquence l'utilisation d'une méthode d'itération.

La méthode d'itération la plus simple consiste à changer à chaque itération les valeurs de  $U_e$  et  $V_e$  par:

$$\begin{Bmatrix} U_{ei}^{m+1} \\ V_{ei}^{m+1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} U_{ei}^m \\ V_{ei}^m \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \Delta U_{ei} \\ \Delta V_{ei} \end{Bmatrix} \quad (35)$$

Le vecteur  $\Delta V_e$ , est obtenu en trouvant d'abord le vecteur résidu:

$$\begin{Bmatrix} R_i^m \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f'_i \\ f''_i \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} k'_{ij} & | & 0 \\ \hline 0 & | & k''_{ij} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_e^m \\ V_e^m \end{Bmatrix} \quad (36)$$

et en solutionnant, le système d'équation de l'équation 34, où le vecteur sollicitation est maintenant  $R_i$  et les déplacements à trouver sont  $V_e$ :

$$\begin{bmatrix} k'_{ij} & | & 0 \\ \hline 0 & | & k''_{ij} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta U_{ei} \\ \Delta V_{ei} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R_i^m \end{Bmatrix} \quad (37)$$

Ceci est la méthode d'itération la plus simple. Cependant, une méthode de Newton-Raphson peut améliorer la convergence. On doit alors additionner à la matrice des coefficients de l'équation 35 une matrice qui provient des dérivées de celle-ci.

$$\left[ \begin{array}{c|c} k'_{ij} & 0 \\ \hline 0 & k''_{ij} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c|c} U \frac{\partial k'_{ij}}{\partial U} & U \frac{\partial k'_{ij}}{\partial V} \\ \hline V \frac{\partial k''_{ij}}{\partial U} & V \frac{\partial k''_{ij}}{\partial V} \end{array} \right] \begin{Bmatrix} \Delta U_{ei} \\ -\Delta V_{ei} \end{Bmatrix} = \{R_i^m\} \quad (38)$$

On note qu'à l'intérieur des termes  $k'_{ij}$  et  $k''_{ij}$ , le terme  $\frac{C_d Re}{24}$  varie peu avec les changements de  $U_e$  et  $V_e$  et ainsi, on peut considérer ce terme comme constant lorsqu'on prend la dérivée. Ceci résulte donc en une méthode intermédiaire entre l'itération simple (équation 37) et la méthode de Newton-Raphson (équation 38) où tous les termes seraient dérivés. On peut réécrire l'équation 38:

$$\left[ \begin{array}{c|c} k_{ij}^{\ell} & k_{ij}^m \\ \hline k_{ij}^n & k_{ij}^o \end{array} \right] \begin{Bmatrix} \Delta U_{ei} \\ -\Delta V_{ei} \end{Bmatrix} = \{R_i\} \quad (39)$$

où les coefficients seront:

$$k_{ij}^{\ell} = k'_{ij} + \iint N_j N_i K \frac{\partial N_k}{\partial X} U_k \det [J] d\xi d\eta \quad (40)$$

$$k_{ij}^m = \iint N_j N_i K \frac{\partial N_k}{\partial Y} U_k \det [J] d\xi d\eta \quad (41)$$

$$k_{ij}^n = \iint N_j N_i K \frac{\partial N_k}{\partial X} V_k \det [J] d\xi d\eta \quad (42)$$

$$k_{ij}^o = k''_{ij} + \iint N_j N_i K \frac{\partial N_i}{\partial Y} V_k \det [J] d\xi d\eta \quad (43)$$

Ces équations sont utilisées pour les itérations successives de la solution numérique.

### 3.2 SOLUTION NUMERIQUE

Une méthode d'élimination de Gauss est utilisée pour résoudre le système d'équations simultanées obtenues après avoir assemblé les 48 éléments. Le maillage utilise donc 48 éléments triangulaires quadratiques isoparamétriques (119 noeuds), pour approcher le profilé de vitesse (figure 5, p. 33). Le choix des éléments et le type de maillage sont les mêmes que ceux utilisés par McComber et Touzot 1981. La grandeur des éléments varie. Elle diminue pour devenir très petite proche du cylindre, là où il est nécessaire d'obtenir une plus grande précision.

Ce problème amène un total de 204 équations à résoudre à chaque itération. La matrice des coefficients comporte une hauteur de bande maximum de 73 et une hauteur de bande moyenne de 41.89. Le résidu de la solution, qui est une indication de l'ordre de grandeur de l'erreur introduite par les calculs au cours de la résolution varie de  $10^{-15}$  et  $10^{-18}$  suivant l'itération.

Dans le but de diminuer le nombre d'itération pour obtenir la convergence, on utilise le résultat d'une solution précédente comme valeur initiale pour  $V_e$ . En effet, on connaît la solution limite lorsque le paramètre d'inertie  $K$  est nul.

$$K = 0 \quad \vec{V}_e = \vec{V}_a$$

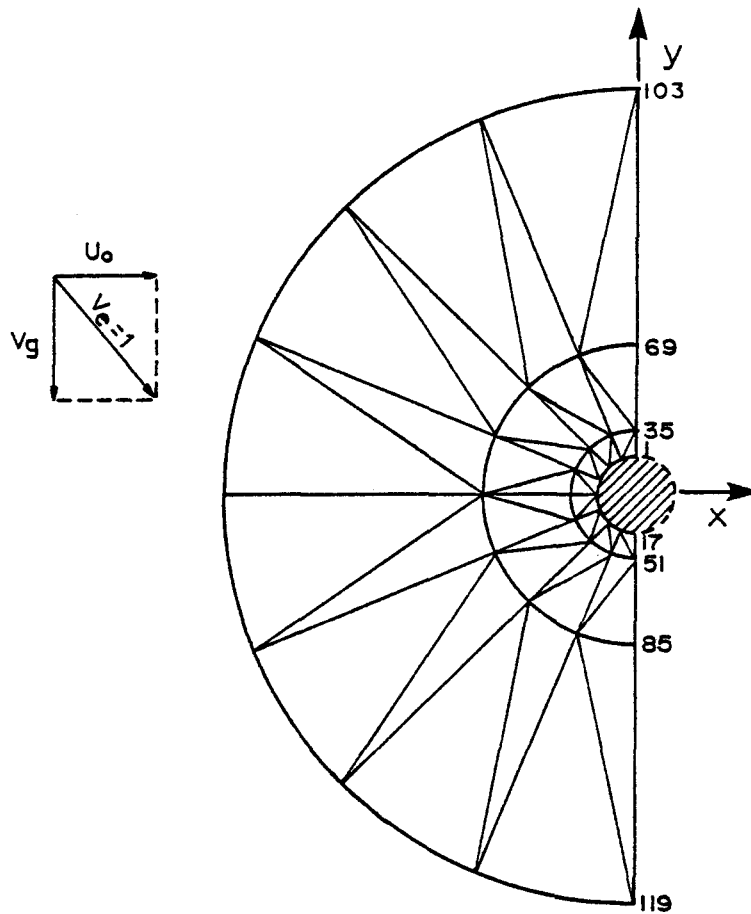


Figure 5. Maillage utilisé par la méthode des éléments finis pour la solution en deux dimensions de la vitesse des gouttes d'eau avec gravité, autour d'un cylindre (119 noeuds et 48 éléments).

Pour la première solution des vitesses des gouttes d'eau, le paramètre d'inertie  $K$  est considéré si petit que la vitesse de la goutte d'eau correspond initialement à la vitesse de l'air  $\vec{V}_e = \vec{U}_a$ . Ensuite la valeur de  $K$  est augmentée légèrement en considérant les résultats obtenus de la solution précédente comme conditions initiales. Les résultats des vitesses sont ainsi obtenus, les uns à la suite des autres, pour une série de  $K$  croissant. Cette méthode permet la convergence rapide de la solution.



## CHAPITRE IV

### RESULTATS NUMERIQUES

Les résultats de la solution numérique furent obtenus pour 18 valeurs différentes du paramètre d'inertie  $K$  et cinq valeurs du paramètre  $\phi$ .

La figure 6 montre les résultats du coefficient de captation totale  $\eta_m$ , en fonction du paramètre  $K$  et  $\phi$  et, les figures 7 et 8 donnent l'angle maximum de captation en fonction de  $K$  et  $\phi$  pour les quadrants II et III. Le tableau 3 donne les valeurs numériques utilisées pour le tracé des figures.

Les résultats de l'angle maximum de captation dans le quadrant II sont différents de ceux obtenus dans le quadrant III parce que le problème est non-symétrique. Contrairement aux nuages givrants, où l'on avait une composante de vitesse horizontale seulement, l'introduction d'une composante de vitesse verticale aux limites, dans le cas de pluies verglaçantes empêche d'avoir une symétrie par rapport à l'axe des  $X$  négatif. C'est pourquoi les angles dans les quadrants II et III sont différents. Ainsi, à mesure que l'inertie augmente, l'angle des vitesses aux limites des gouttelettes d'eau s'accroît vers le bas et le point de stagnation se déplace de l'axe des  $X$  négatifs vers le quadrant II. En effet, dans la figure 7, on remarque que pour des  $K > 110$ , on atteint déjà l'angle de  $90^\circ$  ( $\theta_{II} = 90^\circ$ ) ce qui explique la diminution du coefficient de captation totale dans

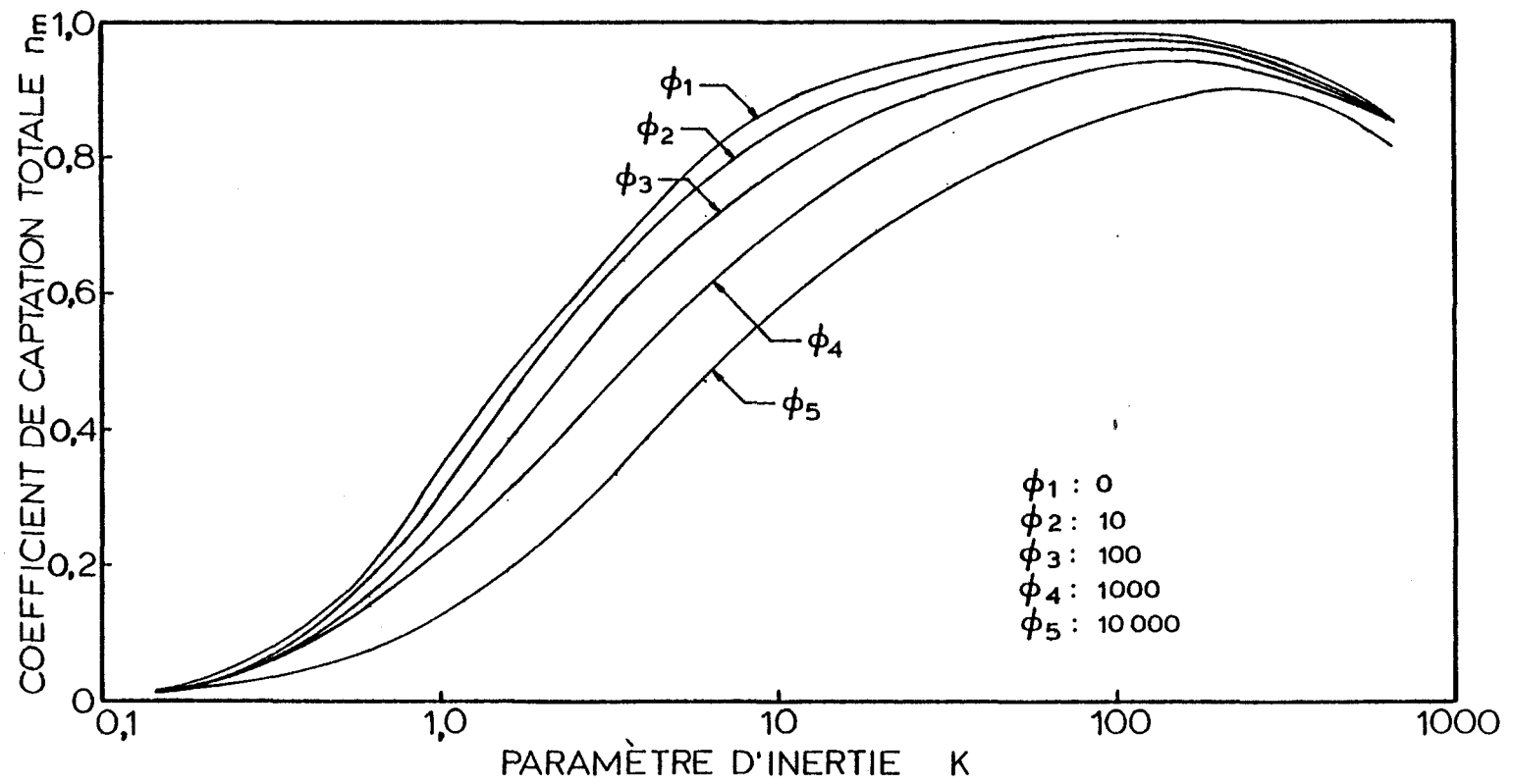


Figure 6. Graphique du coefficient de captation en fonction de  $K$  et  $\phi$ .

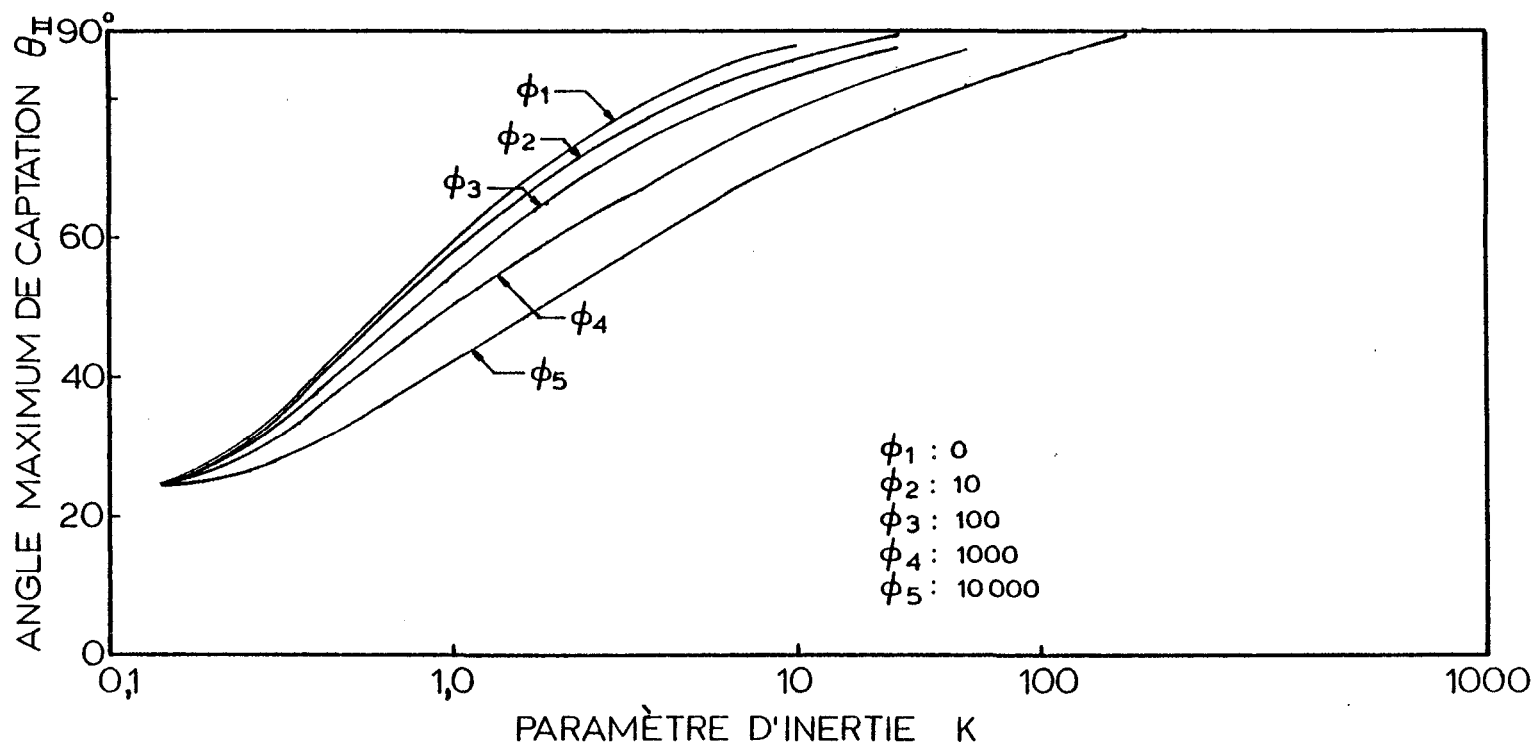


Figure 7. L'angle maximum de captation ( $\theta_{II}$ ) en fonction du paramètre d'inertie (K) et du paramètre ( $\phi$ ).

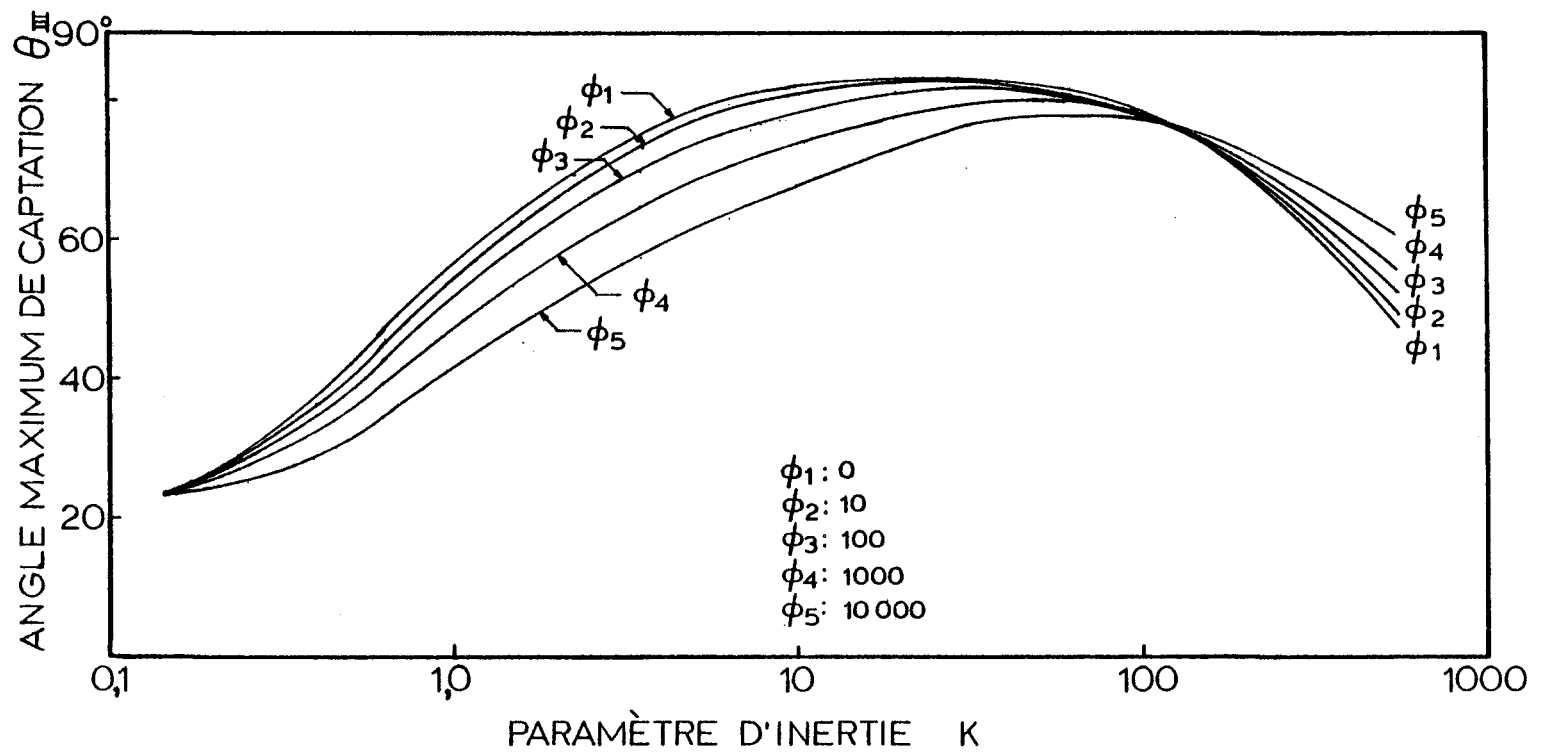


Figure 8. L'angle maximum ( $\theta_{III}$ ) de captation en fonction du paramètre d'inertie (K) et du paramètre ( $\phi$ ).

la figure 6 pour  $K > 110$  et la diminution de l'angle dans le quadrant III ( $\theta_{III}$ ).

Cependant, lorsque l'on compare les résultats du coefficient de captation totale et des angles maximums de captations ( $\eta_m$  et  $\theta_{II}$ ) avec les résultats obtenus sans gravité par McComber et Touzot 1981, on remarque que les valeurs ne diffèrent que de 1,0% pour  $K < 110$ .

## CHAPITRE V

### DISCUSSION

#### 5.1 COEFFICIENT DE CAPTATION TOTALE

Les valeurs numériques du coefficient de captation totale avec gravité obtenues à l'aide de la figure 6, permettent de comparer les résultats avec ceux obtenus sans gravité, pour des valeurs des paramètres d'inertie  $K$  peu élevées.

Ainsi, l'augmentation de l'angle de la vitesse de l'eau aux limites,  $\gamma$ , en fonction de l'augmentation de l'inertie  $K$  de la goutte entraîne de la captation de gouttelettes dans le quadrant I lorsque  $\gamma$  atteint un certain seuil. Ce qui a pour conséquences de changer la position du point de stagnation et par la suite, de diminuer le coefficient de captation totale.

Cependant, les résultats du coefficient de captation totale avec gravité ne diffèrent que de 1,0% de ceux obtenus par McComber et Touzot 1981 sans gravité lorsque  $K < 110$ . A noter qu'à ces valeurs de paramètre d'inertie,  $\eta_m$  est déjà supérieur à 0,9 ( $K \geq 110$ ).

## 5.2 COEFFICIENT DE CAPTATION LOCALE

Lorsque l'on compare les coefficients de captation locale tenant compte de la gravité avec ceux sans gravité, les résultats montrent qu'ils ne diffèrent que de 1,0% pour  $K < 100$ . Mais pour les conditions de pluies verglaçantes, le paramètre d'inertie,  $K$ , est beaucoup plus grand que 110,  $K = 1\ 070$  ( $\phi = 315$ ,  $L = 1,75$  cm,  $u_0 = 10,5$  cm/s,  $a = 370$  micromètres). Une astuce permettant d'obtenir les résultats de coefficient de captation totale est de comparer les coefficients de captation locale.

Le coefficient de captation locale est connu en chaque noeud de la surface du cylindre. On peut donc comparer les  $\eta$  pour  $K > 110$ , lorsque l'on superpose les courbes de  $\eta$  avec ou sans gravité. C'est ce que montre la figure 9 pour deux valeurs du paramètre d'inertie  $K$  ( $K = 360, 560$ ) lorsque  $\phi = 10$ . Le tableau 1 montre les valeurs numériques ayant servi à tracer les courbes.

Ainsi, d'après la figure 9, pour  $K = 560$ , l'allure des courbes avec gravité se superposent très bien avec celles sans gravité dont le coefficient de captation totale correspond à 0,99. Donc, pour les conditions de pluies verglaçantes, lorsque le coefficient de captation locale avec gravité est comparé avec celui sans gravité, le coefficient de captation totale,  $\eta_m$ , est égal à 0,99 ( $K = 560$  et  $\phi = 10$ ). A partir de ces résultats, on peut donc dire que le coefficient de captation totale varie de 0,97 à 0,99 pour  $\phi$  variant de 0 à 10,000,

pour les conditions de pluies verglaçantes.

Il est à remarquer que l'influence de la gravité fait déplacer le point de stagnation. En effet, pour des valeurs  $K$  élevées, l'angle  $\alpha$  de rotation correspond à l'angle des vitesses de l'eau aux limites avec différence de seulement 9% (voir tableau 2). Il y a donc rotation des lignes de courant en fonction de l'inertie des gouttes.



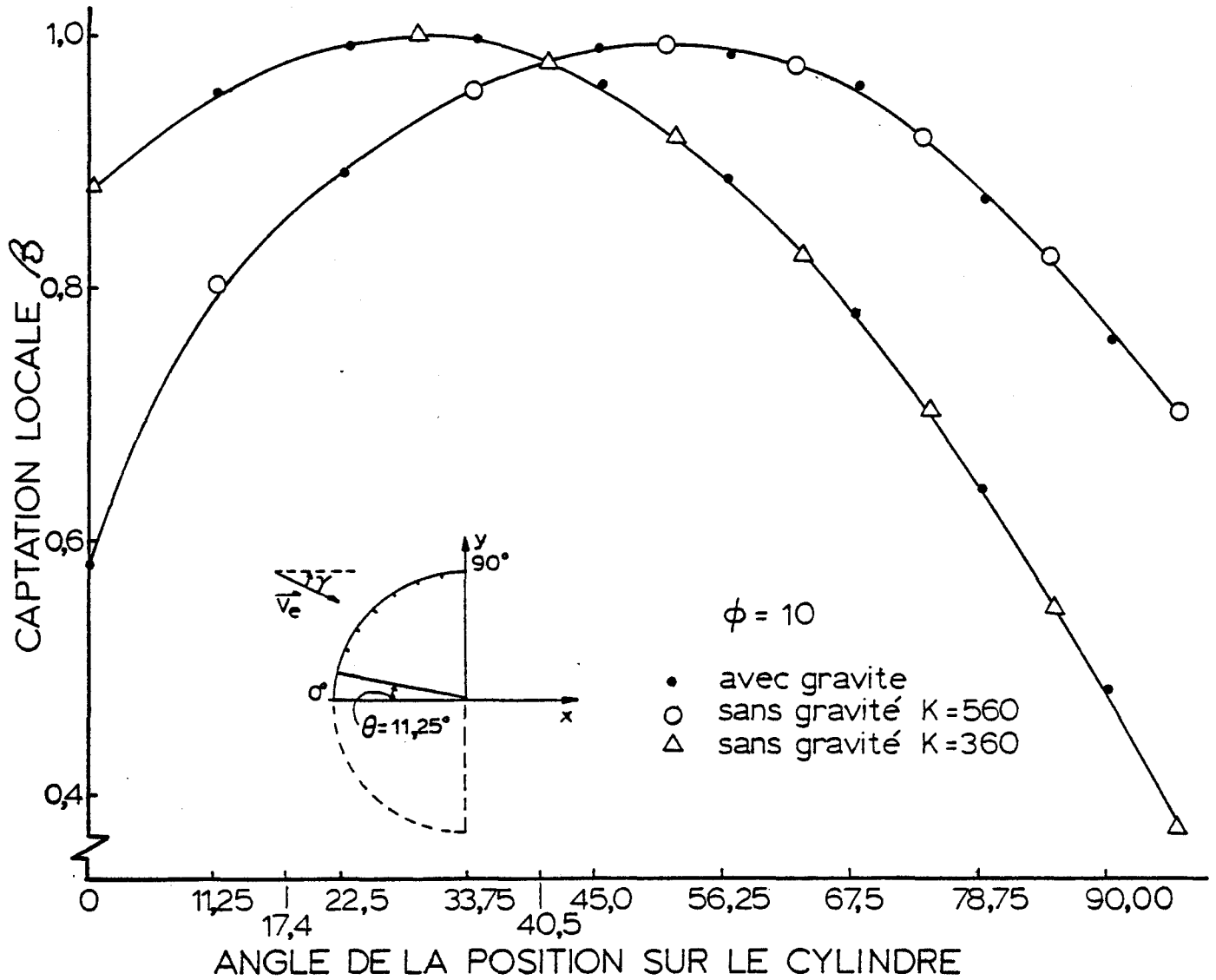


Figure 9. Superposition du coefficient de captation locale avec, et sans gravité.

TABLEAU 1VALEURS NUMERIQUES DE CAPTATION LOCALEEN FONCTION DE L'ANGLE A LA SURFACE LORSQUE  $\phi = 10$ 

|                                   | K = -360        |                 | K = 560         |                 |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                                   | $\beta$         |                 | $\beta$         |                 |
| Angle à<br>la surface<br>$\theta$ | avec<br>gravité | sans<br>gravité | avec<br>gravité | sans<br>gravité |
| 11,25                             | 0,877           | 0,994           | 0,757           | 0,996           |
| 22,50                             | 0,953           | 0,975           | 0,870           | 0,976           |
| 33,75                             | 0,989           | 0,918           | 0,950           | 0,919           |
| 45,00                             | 0,995           | 0,826           | 1,000           | 0,827           |
| 56,25                             | 0,955           | 0,701           | 0,998           | 0,702           |
| 67,50                             | 0,880           | 0,549           | 0,968           | 0,551           |
| 78,75                             | 0,778           | 0,376           | 0,895           | 0,378           |
| 90,00                             | 0,643           | 0,188           | 0,787           | 0,190           |
| 101,25                            | 0,486           | 0,000           | 0,654           | 0,000           |

TABLEAU 2ANGLE AUX LIMITES DE LA GOUTTE ET ANGLE DU POINT DE STAGNATION

| K = 360  |          | K = 560  |          |
|----------|----------|----------|----------|
| $\gamma$ | $\alpha$ | $\gamma$ | $\alpha$ |
| 15,8     | 17,4     | 41,0     | 40,5     |

TABLEAU 3

VALEURS NUMERIQUES DE  $\eta_m$ ,  $\beta_o$  ET  $\theta_m$  EN FONCTION DE K POUR  $\phi = 0, 10, 100$

| K       | $\phi = 0$ |           |            |      | $\phi = 10$ |           |            |      | $\phi = 100$ |           |            |      |
|---------|------------|-----------|------------|------|-------------|-----------|------------|------|--------------|-----------|------------|------|
|         | $\eta_m$   | $\beta_o$ | $\theta_m$ |      | $\eta_m$    | $\beta_o$ | $\theta_m$ |      | $\eta_m$     | $\beta_o$ | $\theta_m$ |      |
|         |            |           | II         | III  |             |           | II         | III  |              |           | II         | III  |
| 0,144   | 0,018      | 0,095     | 24,4       | 23,7 | 0,018       | 0,094     | 24,2       | 23,7 | 0,017        | 0,093     | 23,9       | 23,5 |
| 0,196   | 0,030      | 0,137     | 27,6       | 26,5 | 0,030       | 0,136     | 27,4       | 26,2 | 0,028        | 0,132     | 26,8       | 25,8 |
| 0,256   | 0,048      | 0,186     | 31,6       | 29,8 | 0,046       | 0,183     | 31,2       | 29,5 | 0,043        | 0,176     | 30,3       | 28,9 |
| 0,400   | 0,103      | 0,288     | 40,1       | 37,9 | 0,097       | 0,280     | 39,2       | 37,2 | 0,096        | 0,265     | 37,6       | 35,6 |
| 0,625   | 0,198      | 0,405     | 49,6       | 46,9 | 0,183       | 0,392     | 48,0       | 45,3 | 0,157        | 0,366     | 45,1       | 43,0 |
| 0,900   | 0,302      | 0,503     | 57,5       | 54,5 | 0,276       | 0,485     | 55,8       | 53,0 | 0,237        | 0,452     | 52,7       | 50,1 |
| 1,600   | 0,481      | 0,647     | 68,1       | 64,6 | 0,440       | 0,621     | 65,8       | 62,6 | 0,386        | 0,583     | 62,4       | 59,6 |
| 3,600   | 0,669      | 0,801     | 79,5       | 75,2 | 0,653       | 0,774     | 77,1       | 73,0 | 0,591        | 0,736     | 73,3       | 69,8 |
| 6,400   | 0,810      | 0,875     | 84,8       | 79,6 | 0,767       | 0,851     | 82,6       | 77,9 | 0,709        | 0,815     | 79,5       | 75,2 |
| 10,000  | 0,871      | 0,915     | 87,8       | 82,0 | 0,834       | 0,894     | 85,8       | 80,4 | 0,783        | 0,864     | 83,1       | 77,9 |
| 19,600  | 0,931      | 0,954     | 90         | 83,5 | 0,903       | 0,938     | 89,6       | 82,4 | 0,865        | 0,916     | 87,6       | 81,1 |
| 32,400  | 0,958      | 0,971     | 90         | 83,5 | 0,936       | 0,959     | 90         | 82,8 | 0,908        | 0,942     | 90         | 81,9 |
| 62,500  | 0,977      | 0,981     | 90         | 82,0 | 0,961       | 0,972     | 90         | 81,5 | 0,942        | 0,961     | 90         | 81,0 |
| 90,000  | 0,982      | 0,981     | 90         | 79,7 | 0,969       | 0,974     | 90         | 70,8 | 0,954        | 0,965     | 90         | 79,5 |
| 160,000 | 0,980      | 0,966     | 90         | 74,0 | 0,971       | 0,960     | 90         | 74,5 | 0,960        | 0,955     | 90         | 75,0 |
| 360,000 | 0,938      | 0,875     | 90         | 59,0 | 0,931       | 0,877     | 90         | 60,0 | 0,923        | 0,879     | 90         | 61,0 |
| 560,000 | 0,885      | 0,753     | 90         | 47,8 | 0,885       | 0,757     | 90         | 49,8 | 0,885        | 0,768     | 90         | 52,8 |
| 660,000 | 0,855      | 0,687     | 90         | 42,6 | ---         | ---       | --         | --   | ---          | ---       | --         | --   |

TABLEAU 3 (suite)

| K       | $\phi = 1\ 000$ |           |            |      | $\phi = 10\ 000$ |           |            |      |
|---------|-----------------|-----------|------------|------|------------------|-----------|------------|------|
|         | $\eta_m$        | $\beta_o$ | $\theta_m$ |      | $\eta_m$         | $\beta_o$ | $\theta_m$ |      |
|         |                 |           | II         | III  |                  |           | II         | III  |
| 0,144   | 0,016           | 0,088     | 23,5       | 23,0 | 0,013            | 0,077     | 22,6       | 22,6 |
| 0,196   | 0,024           | 0,122     | 25,8       | 24,9 | 0,019            | 0,104     | 24,2       | 23,5 |
| 0,256   | 0,035           | 0,158     | 28,5       | 27,3 | 0,026            | 0,131     | 26,0       | 25,1 |
| 0,400   | 0,066           | 0,233     | 35,5       | 32,9 | 0,045            | 0,191     | 30,1       | 29,1 |
| 0,625   | 0,119           | 0,322     | 41,5       | 39,7 | 0,074            | 0,255     | 35,6       | 34,3 |
| 0,900   | 0,177           | 0,395     | 46,7       | 44,8 | 0,108            | 0,309     | 39,9       | 38,6 |
| 1,600   | 0,293           | 0,510     | 56,6       | 54,1 | 0,189            | 0,411     | 47,8       | 45,5 |
| 3,600   | 0,483           | 0,661     | 67,4       | 64,6 | 0,346            | 0,559     | 60,0       | 57,4 |
| 6,400   | 0,610           | 0,753     | 73,4       | 70,6 | 0,471            | 0,657     | 66,7       | 63,6 |
| 10,000  | 0,696           | 0,810     | 78,8       | 74,5 | 0,565            | 0,724     | 72,0       | 68,3 |
| 19,600  | 0,799           | 0,877     | 84,2       | 78,6 | 0,690            | 0,809     | 78,5       | 74,0 |
| 32,400  | 0,856           | 0,912     | 87,6       | 80,1 | 0,760            | 0,857     | 82,0       | 76,8 |
| 62,500  | 0,906           | 0,939     | 90         | 80,1 | 0,826            | 0,894     | 86,7       | 78,0 |
| 90,000  | 0,925           | 0,947     | 90         | 79,1 | 0,857            | 0,910     | 89,4       | 77,7 |
| 160,000 | 0,940           | 0,943     | 90         | 75,5 | 0,886            | 0,915     | 90         | 75,7 |
| 360,000 | 0,906           | 0,880     | 90         | 63,0 | 0,884            | 0,869     | 90         | 70,1 |
| 560,000 | 0,875           | 0,803     | 90         | 56,1 | 0,835            | 0,842     | 90         | 61,2 |
| 660,000 | 0,847           | 0,721     | 90         | 44,4 | 0,818            | 0,824     | 90         | 58,3 |

### 5.3 DIRECTIONS DES VITESSES DE L'EAU

Le tracé des vecteurs des vitesses de l'eau à chaque noeud du maillage étudié, permet de visualiser l'effet de la gravité. Ainsi, en comparant la direction des vecteurs vitesses avec gravité (figure 11) et sans gravité (figure 10), on remarque que la direction générale du vecteur vitesse de l'eau est vers le bas dans le cas de la gravité, pour les mêmes conditions du paramètre d'inertie  $K$  et du paramètre  $\phi$  ( $K = 610$  et  $\phi = 10\ 000$ ). De même, on peut remarquer à la figure 11, qu'à la surface du cylindre, il y a une zone où les gouttes d'eau frappent le cylindre et une zone où les gouttes s'en éloignent; elles correspondent à la limite de la captation et détermine aussi l'angle maximum de captation ( $\theta_m$ ).

On peut mettre aussi en évidence l'effet de l'augmentation de l'inertie des gouttes. Les figures 12, 13 et 14 montrent le vecteur vitesse des gouttes d'eau pour  $\phi = 1\ 000$  lorsque  $K$  prend les valeurs de 3,6, 61,0 et 610. On remarque que pour  $K = 3,6$  et 61,5, les gouttes se comportent comme des petites gouttes où l'effet de la gravité est négligée (conditions de nuages givrants). En effet, les gouttes étant encore petites, l'effet de la gravité se fait moins sentir. Ce qui n'est pas le cas lorsque  $K = 610$  puisque dans la figure 14, l'influence de la gravité est observable par l'angle que fait avec l'horizontal, les vecteurs vitesses de l'eau aux limites.

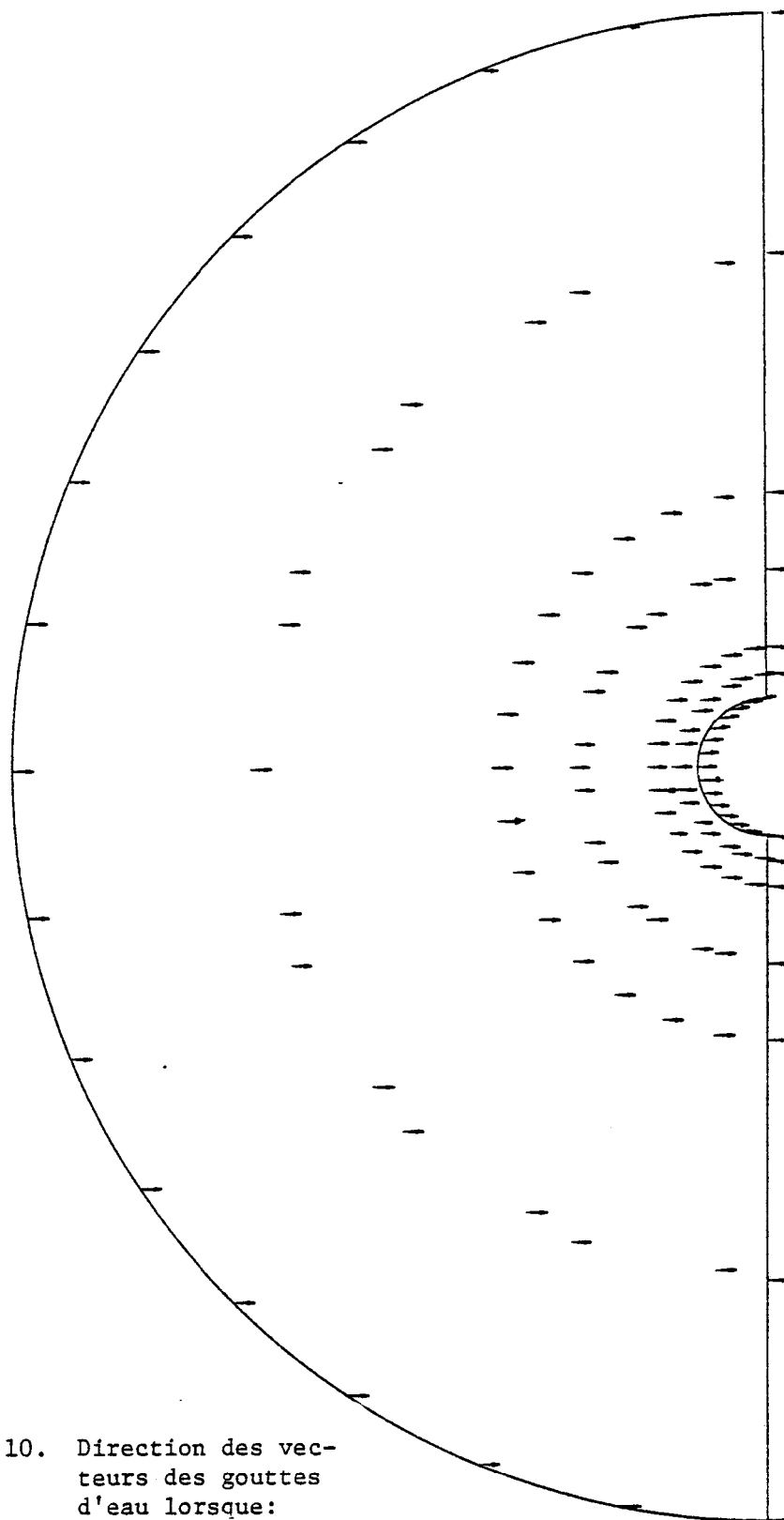


Figure 10. Direction des vecteurs des gouttes d'eau lorsque:

$K = 610$

$\phi = 10\ 000$

\* pas de gravité

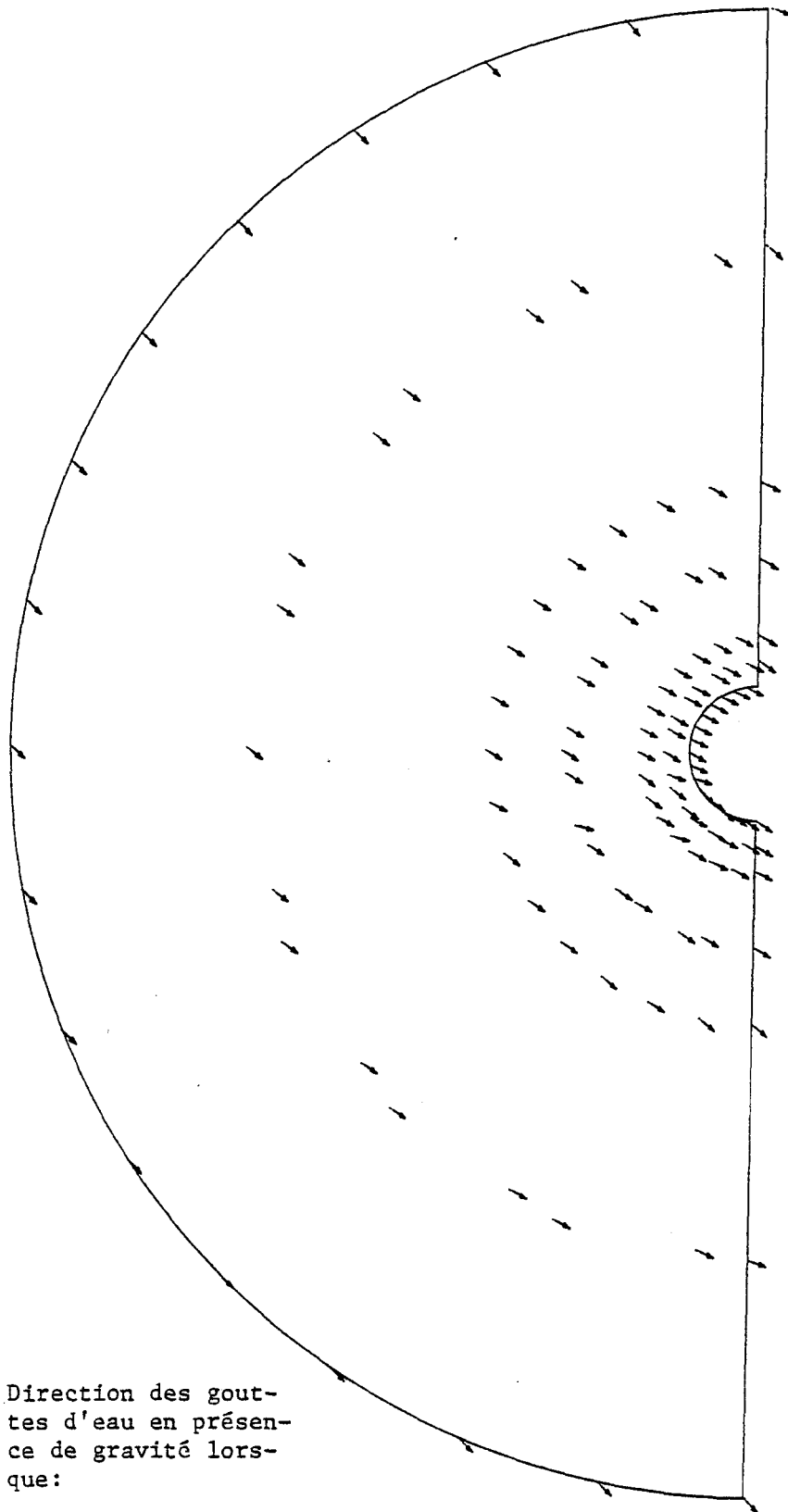


Figure 11. Direction des gouttes d'eau en présence de gravité lorsque:

$\phi = 10\ 000$   
 $K = 610$

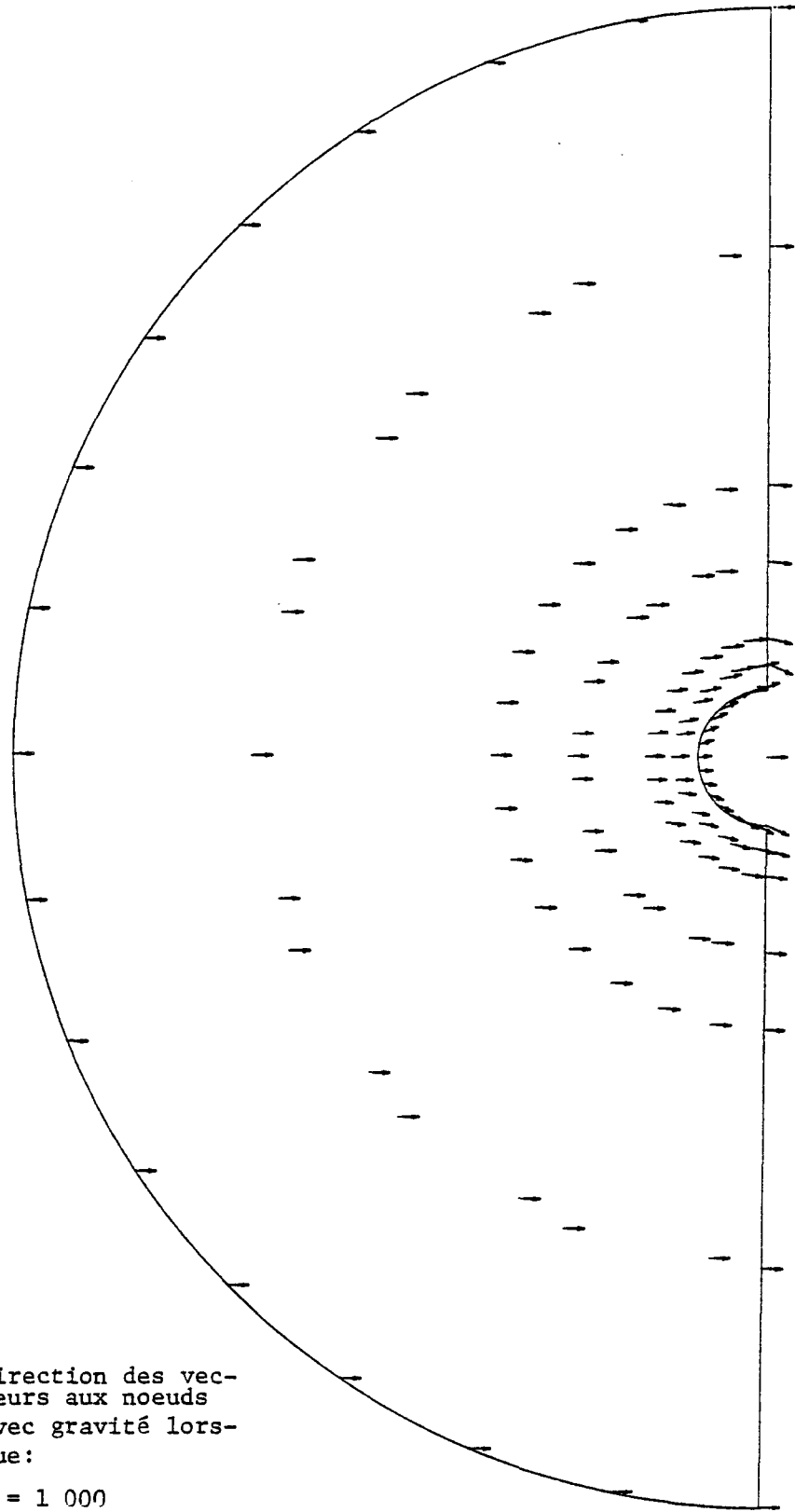


Figure 12. Direction des vecteurs aux noeuds avec gravité lorsque:

$$\phi = 1\,000$$

$$K = 3,6$$



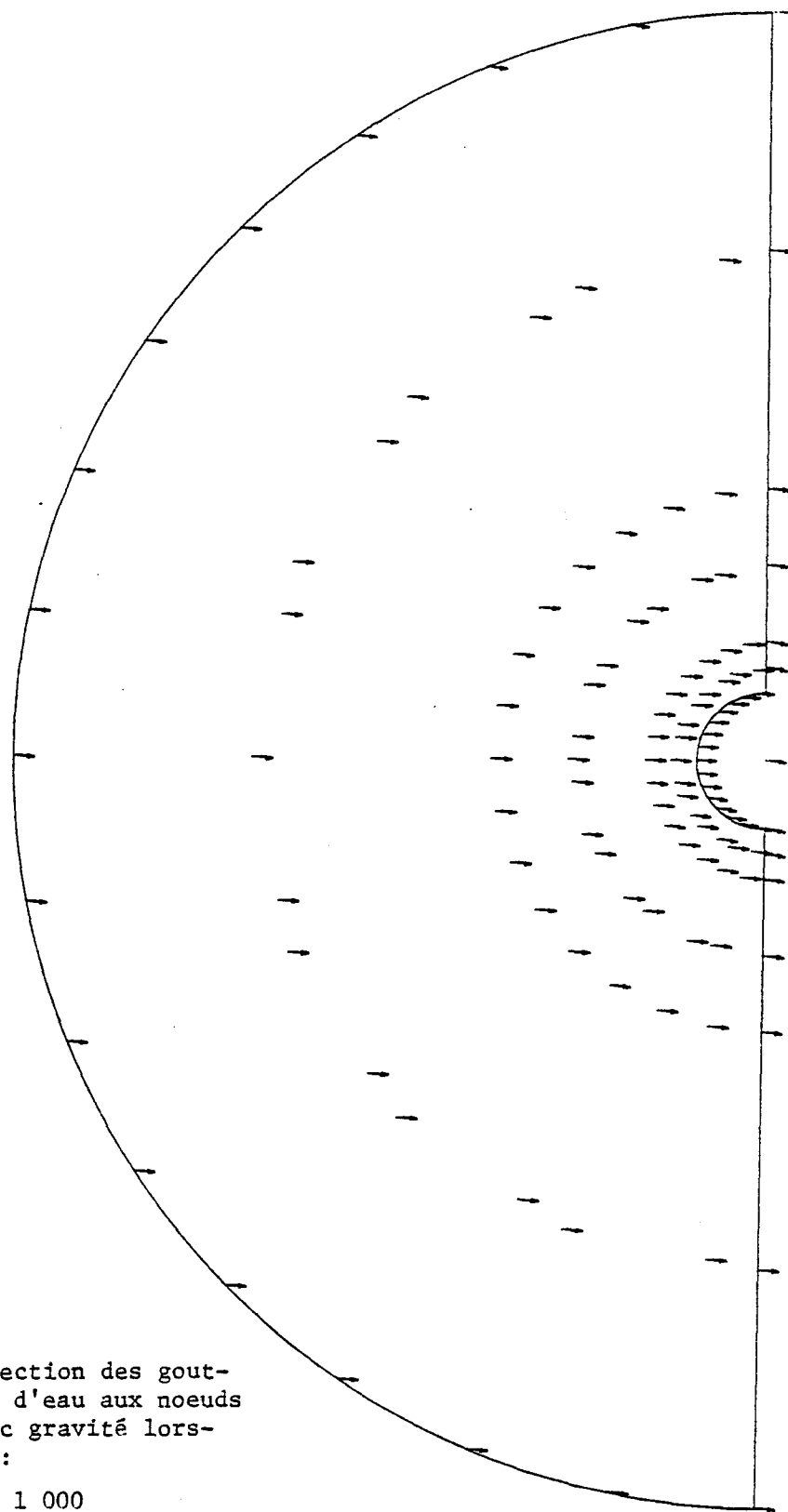


Figure 13. Direction des gouttes d'eau aux noeuds avec gravité lorsque:

$$\begin{aligned}\phi &= 1\,000 \\ K &= 62,5\end{aligned}$$

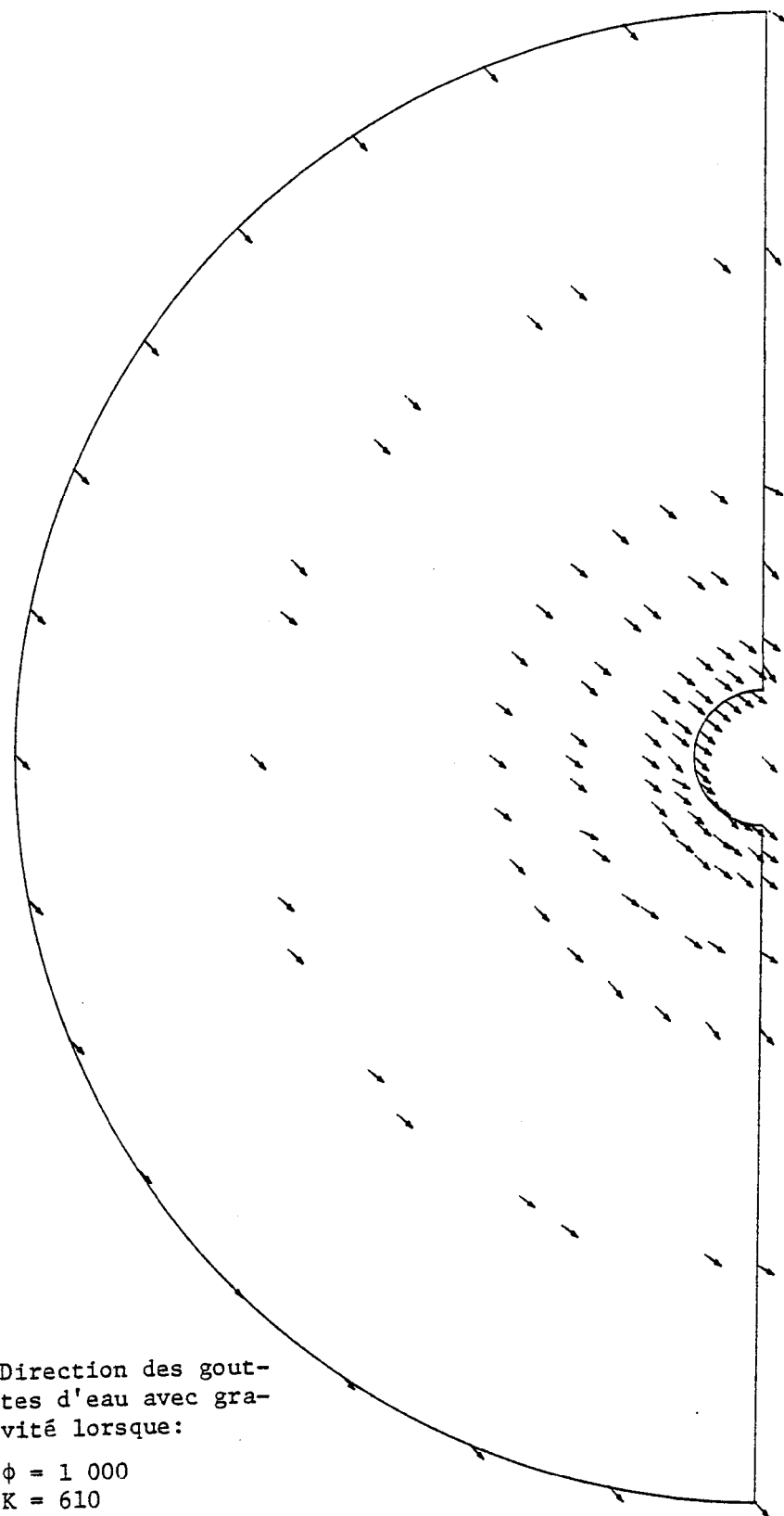


Figure 14. Direction des gouttes d'eau avec gravité lorsque:

$\phi = 1\ 000$   
 $K = 610$

#### 5.4 VITESSE DE L'EAU COMPARE A LA VITESSE DE L'AIR

Dans les conditions de pluies verglaçantes, les gouttelettes d'eau ne vont pas à la même vitesse que l'air. C'est pourquoi il est important de distinguer entre vitesse de l'eau et vitesse de l'air lors des calculs.

Le problème des gouttelettes subissant l'effet de la gravité est général parce qu'il englobe et les petites gouttes (nuage givrant) et le cas des grosses gouttes (pluies verglaçantes). Lorsque les gouttes sont petites, l'importance de la gravité est faible, ce qui tend à augmenter l'importance de la vitesse de l'air. Cependant, lorsque les gouttes sont grosses, l'influence de la vitesse de l'air est faible et les gouttes tendent vers la même vitesse. C'est ce que montrent les figures 15 et 16.

La figure 15 montre les valeurs de la vitesse de l'eau,  $v_e$ , pour différentes vitesses de l'air,  $u_0$  ( $u_0 = 5, 10, 15$  m/s), en fonction du rayon des gouttes "a", compris dans l'intervalle de pluies verglaçantes ( $220 < a < 520$ ). La figure 16, s'étend au-delà des limites de pluies verglaçantes, où le rayon "a" est adimensionné sous la forme du paramètre d'inertie K. En effet, pour le cas des petites gouttes, négliger l'effet de la gravité semble valide puisqu'à ces conditions, la vitesse des gouttelettes d'eau semble être la même que celle de l'air (figure 16 où  $u_0 \approx v_e \approx 10$  m/s pour  $K = 150$ ). Cependant, dans le cas de grosses gouttes, l'effet de la gravité ajoute une vitesse verticale importante

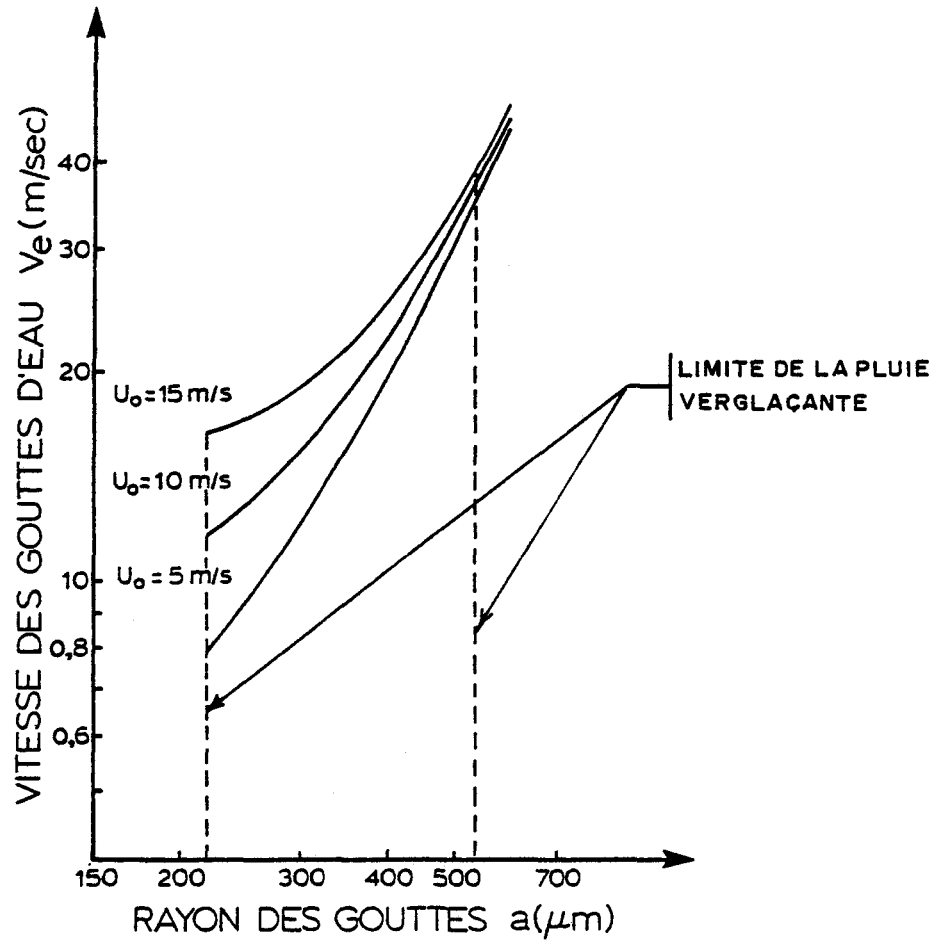


Figure 15. Relation entre le rayon des gouttes et la vitesse de la goutte d'eau par rapport à différentes vitesses de l'air.

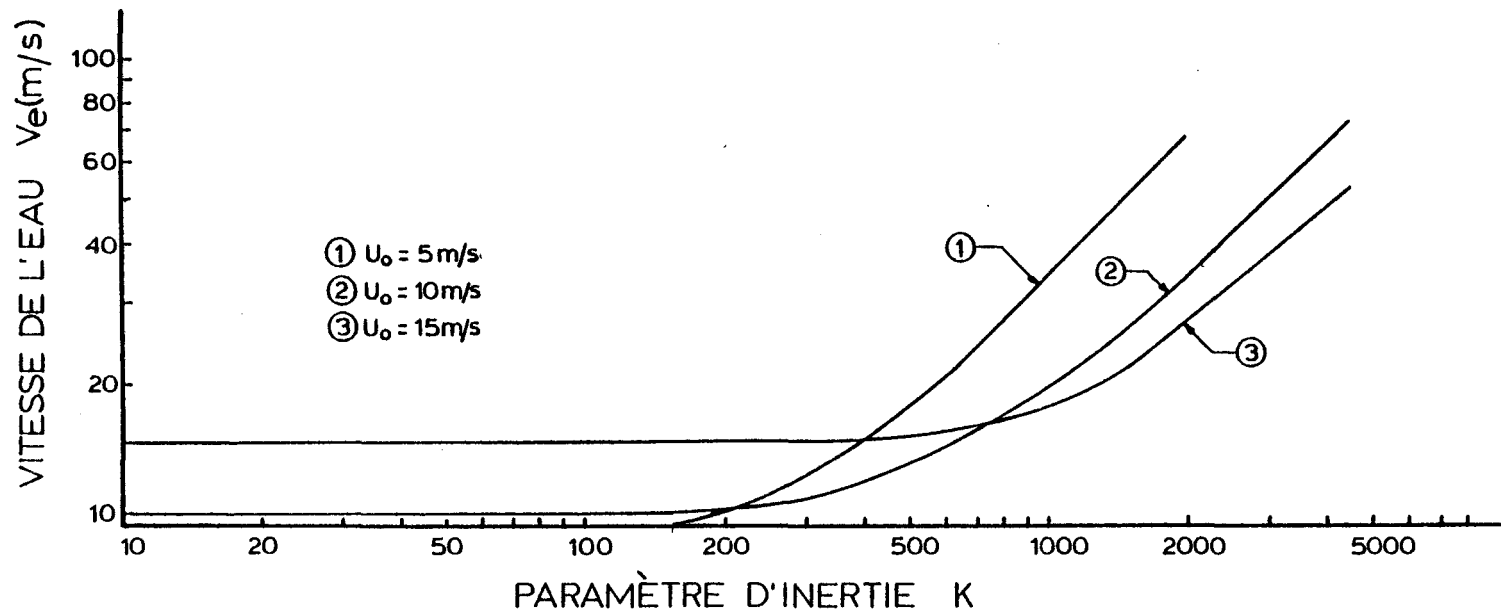


Figure 16. Relation entre la vitesse de l'eau,  $V_e$ , et le paramètre d'inertie,  $K$ , pour une vitesse de l'air initiale  $u_0$  (m/s).

qui modifie la résultante  $v_e$ , dont la norme est grandement supérieure à la vitesse de l'air. Par exemple, à la figure 15,  $v_e = 45$  m/s lorsque  $u_o = 5$  m/s pour  $a = 600$   $\mu\text{m}$ . A ces grosseurs de gouttelettes, la vitesse de l'eau varie peu avec l'augmentation de la vitesse de l'air ( $45 < v_e < 48$  m/s pour  $5 < u_o < 15$  m/s). Donc les figures 15 et 16 montrent bien la différence entre les valeurs de la vitesse de l'air et celles de la vitesse de l'eau en fonction de la grosseur des gouttelettes.

On peut donc comparer les valeurs du coefficient de captation totale obtenues à partir de  $u_o$  et de  $v_e$ .

##### 5.5 VALEURS DE CAPTATION DANS LE CAS DE PLUIES VERGLACANTES

A partir des résultats numériques de captation obtenus au tableau 3, p. 17, il n'est pas possible de déterminer les valeurs de captation totale dans le cas de pluies verglaçantes, dû à un problème de rotation d'axes qu'il faudrait effectuer. Cependant, il a été démontré que les valeurs de captation locale avec gravité coïncident avec celles sans gravité. On peut donc extrapoler les valeurs de captation totale dans le cas de pluies verglaçantes à partir des valeurs de captation totale lors de nuage givrant. La figure 17 montre les valeurs de captation totale pour différentes valeurs de  $a$ , obtenues à partir de  $u_o$  ou de  $v_e$ .

Les résultats du coefficient de captation totale avec gravité semblent montrer une très faible différence avec ceux sans gravité. On peut donc se servir directement des courbes du coefficient de captation totale obtenues par McComber et Touzot 1981 pour le cas sans gravité afin de conclure les observations suivantes. Les résultats du paramètre d'inertie  $K$ , et du paramètre  $\phi$ , varient beaucoup lorsqu'ils sont considérés soit en fonction de la vitesse de l'eau ( $K(v_e) = 2\ 069$ ,  $\phi(v_e) = 627$  pour  $a = 370\ \mu\text{m}$  et  $u_o = 10,5\ \text{m/s}$ ) ou soit en fonction de la vitesse de l'air ( $K(u_o) = 1\ 070$  et  $\phi = 324$  pour  $a = 370\ \mu\text{m}$  et  $u_o = 10,5\ \text{m/s}$ ). Cependant, les valeurs du coefficient de captation totale obtenues à partir de  $K(v_e)$  et  $\phi(v_e)$  ne diffèrent guère de celles obtenues à partir de  $K(u_o)$  et  $\phi(u_o)$ . La figure 17 montre les résultats du coefficient de captation pour les quatre possibilités mentionnées ci-haut et quatre valeurs du rayon des gouttelettes,  $a$  ( $u_o = 10,5\ \text{m/s}$ ).

Donc, pour les conditions de pluies verglaçantes, la captation totale varie de 0,98 à 0,99. Elle ne varie donc pas beaucoup même pour une grande variation de  $K$  et  $\phi$  évalués soit à partir de  $u_o$  ou  $v_e$ .

## 5.6 CONVERGENCE NUMERIQUE

Au cours de la simulation, certaines difficultés ont été rencontrées, notamment en ce qui a trait aux problèmes de non-convergence. Elle se situe à

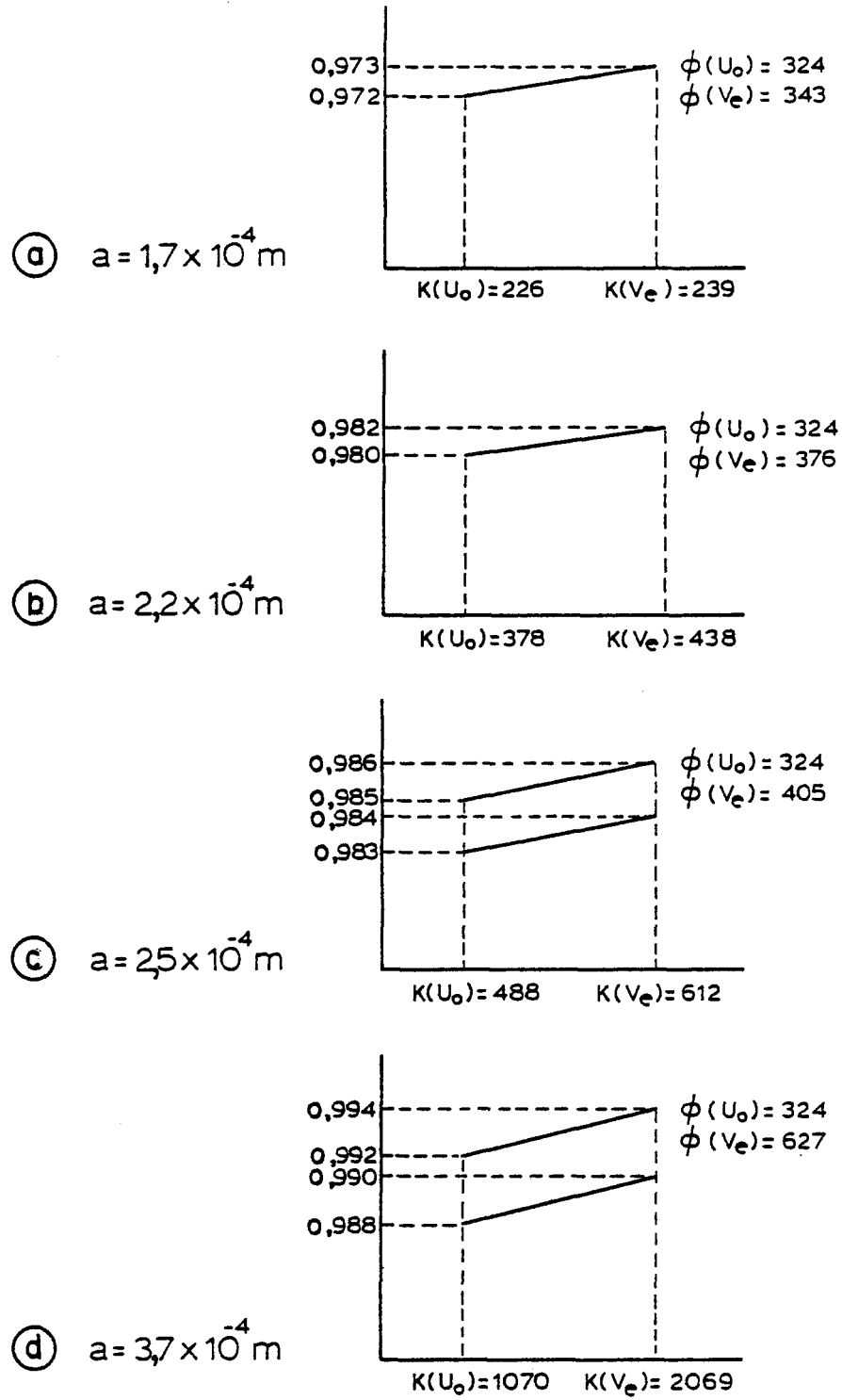


Figure 17. Comparaison des valeurs de captation évaluées à partir de  $u_o$  et  $v_e$  pour  $u_o = 10,5 \text{ m/s}$ .



TABLEAU 4

VALEURS NUMERIQUES CORRESPONDANT A LA FIGURE 15 MONTRANT LA  
RELATION POUR UN RAYON,  $a$ , DE GOUTTELETTES, AVEC LE RAPPORT DE  
LA VITESSE DE L'AIR,  $u_o$ , SUR LA VITESSE DE LA GOUTTE D'EAU,  $v_e$

Formules utilisées:

$$v_e = \sqrt{\left(\frac{2}{9} \frac{a^2 \rho_e g}{\mu}\right)^2 + u_o^2}$$

$$v_e = \sqrt{\left(\frac{2 \times 10^{+3} \text{ kg/m}^3 \times 9.8 \text{ m/s}^2}{9 \times 1.71 \times 10^{-5} \text{ Pa s}} a^2\right)^2 + (u_o)^2}$$

$$v_g = \frac{2}{9} \frac{a^2 \rho_e g}{\mu}$$

| $a$<br>( $\mu\text{m}$ ) | $u_o$<br>(m/s) | $v_e$<br>(m/s) | $\frac{u_o}{v_e}$ | $v_g$<br>(m/s) |
|--------------------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|
| 220                      | 5              | 7,93           | 0,630             | 6,16           |
|                          | 10             | 11,75          | 0,851             | 6,16           |
|                          | 15             | 16,20          | 0,925             | 6,16           |
| 270                      | 5              | 10,50          | 0,474             | 9,28           |
|                          | 10             | 13,60          | 0,733             | 9,28           |
|                          | 15             | 17,64          | 0,850             | 9,28           |

TABLEAU 4 (suite)

| a<br>( $\mu\text{m}$ ) | $u_o$<br>(m/s) | $v_e$<br>(m/s) | $\frac{u_o}{v_e}$ | $v_g$<br>(m/s) |
|------------------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|
| 350                    | 5              | 16,38          | 0,30              | 15,60          |
|                        | 10             | 18,53          | 0,54              | 15,60          |
|                        | 15             | 21,60          | 0,69              | 15,60          |
| 520                    | 5              | 34,80          | 0,14              | 34,43          |
|                        | 10             | 35,86          | 0,29              | 34,43          |
|                        | 15             | 37,56          | 0,40              | 34,43          |
| 600                    | 5              | 46,12          | 0,11              | 45,84          |
|                        | 10             | 46,91          | 0,21              | 45,84          |
|                        | 15             | 48,20          | 0,31              | 45,84          |

TABLEAU 5VALEURS NUMERIQUES DE K EVALUEES A L'AIDE DE  $v_e$ a = 220

| $u_o$<br>m/s | $v_e$<br>m/s | $K(v_e)$ |
|--------------|--------------|----------|
| 2            | 6,48         | 234,0    |
| 5            | 7,93         | 286,0    |
| 10,5         | 11,75        | 423,6    |
| 15           | 16,20        | 584,0    |

a = 350

| $u_o$<br>m/s | $v_e$<br>m/s | $K(v_e)$ |
|--------------|--------------|----------|
| 2            | 15,70        | 1 433,0  |
| 5            | 16,40        | 1 496,7  |
| 10,5         | 18,50        | 1 688,3  |
| 15           | 21,60        | 1 917,3  |

a = 550

| $u_o$<br>m/s | $v_e$<br>m/s | $K(v_e)$ |
|--------------|--------------|----------|
| 2            | 38,56        | 8690     |
| 5            | 38,83        | 8750     |
| 10,5         | 40,22        | 9064     |
| 15           | 41,63        | 9382     |

deux endroits.

La première a déjà été mentionnée auparavant. Lorsque le paramètre d'inertie  $K$  devient de l'ordre de 560 et plus, la solution ne converge plus. Cela semble être dû à une zone indéterminée en-dessous du cylindre lorsque  $\gamma$  atteint un certain niveau.

La deuxième est la non-convergence de la solution lorsque la vitesse de l'air  $u_0$ , introduite dans les conditions limites, diminue. En effet, à mesure que  $u_0$  diminue,  $K$  devient de l'ordre de plus en plus petit lorsque la limite de convergence est atteinte. Pour cette raison, il est impossible de prédire les résultats de captation lorsque  $u_0 \rightarrow 0$ .

#### 5.7 IMPORTANCE RELATIVE DE LA FACON DE RENDRE LES EQUATIONS ADIMENSIONNELLES

Par principe mathématique, il eut été préférable de mettre toutes les équations par rapport à une même vitesse de référence, en l'occurrence  $v_e$ . Les deux possibilités ont été vérifiées. C'est-à-dire que la première façon a été d'utiliser  $u_0$  comme vitesse de référence des équations 12 et 16, p. 10 et 12 et  $v_e$  dans les conditions limites. La deuxième a été d'utiliser  $v_e$  comme vitesse de référence dans les équations 13 et 16, p. 20, et dans les conditions limites. Les résultats de la simulation numérique n'ont montré aucune différence quant à  $\eta$  et

$\beta$ ,  $\theta_{II}$  et  $\theta_{III}$  par rapport à l'une ou l'autre méthode. Cependant, il serait beaucoup plus facile à l'utilisateur éventuel des figures 6, 7 et 8, p. 36, 37 et 38, d'employer la première méthode puisque la vitesse de l'air est beaucoup plus aisément connue que la vitesse de l'eau où l'on doit passer par un artifice de calcul pour la trouver.

## CHAPITRE VI

### RECOMMANDATIONS

La diminution de coefficient de captation totale,  $\eta_m$ , pour  $K$  plus grand que 110 et la non-convergence de la solution numérique lorsque le paramètre d'inertie  $K$  devient de l'ordre de 560 et plus, ont été les deux principales difficultés rencontrées. La raison expliquant la diminution de  $\eta_m$  est dû à de la captation de gouttelettes dans le quadrant I (voir figure 18) lorsque l'angle de la vitesse des gouttelettes d'eau,  $\gamma$  atteint un certain seuil. Quant à la non-convergence, cela semble être dû à une zone indéterminée en-dessous du cylindre lorsque  $\gamma$  atteint un certain niveau.

Pour ces deux raisons, l'amélioration à apporter au modèle serait de faire une rotation des axes, d'angle  $\gamma$ , à mesure que l'inertie des gouttes augmente. Cela pourrait se faire en introduisant dans les équations, une matrice de rotation.

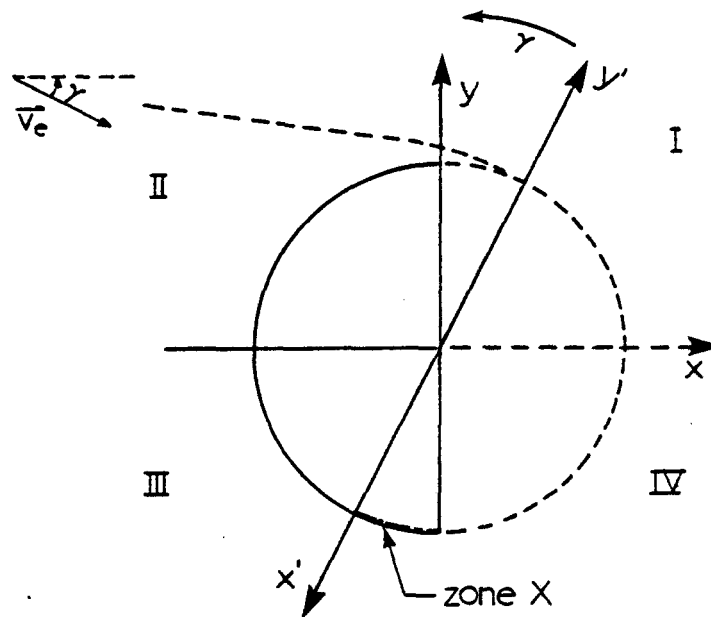


Figure 18. Direction de l'angle de rotation.

## CHAPITRE VII

### CONCLUSION

Les résultats montrent l'importance, surtout pour les grosses gouttes, d'ajouter un terme relié à la gravité aux équations de mouvement. Ainsi, l'équilibre des forces de gravité et de friction permet de trouver la vitesse de la goutte d'eau. La grande différence, existant dans certains cas, entre la vitesse de l'eau et celle de l'air permet de juger de l'importance de considérer la vitesse de l'eau elle-même et non celle de l'air. A partir des courbes de  $\eta_m$  en fonction de  $K$  et  $\phi$ , la lecture de  $\eta_m$  ne change pas beaucoup en fonction de  $K$  évalué soit à partir de  $v_e$  ou soit à partir de  $u_o$ . En effet, aux conditions de pluies verglaçantes,  $\eta_m$  est asymptotique à 1,0.

Les résultats de coefficient de captation totale avec gravité, ont montré qu'elles ne diffèrent que de 1% de celles sans gravité obtenues par McComber et Touzot 1981 (cas de nuages givrants) lorsque  $K < 110$ . A ce stade ( $K \approx 110$ ),  $\eta_m$  vaut déjà 0,9. Les valeurs du coefficient de captation totale avec gravité, semble être de même ordre que celle sans gravité ( $K > 110$ ). Donc pour les conditions de pluies verglaçantes mentionnées auparavant, le coefficient total de captation ne varie que de 0,97 à 0,99.



Ainsi on peut dire que le modèle proposé est un modèle général puisqu'il est valide lors de conditions de nuage givrant (cas des petites gouttes) et lors de conditions de pluies verglaçantes (cas de grosses gouttes), lorsque  $u_0 = 10,5 \text{ m/s}$ .

BIBLIOGRAPHIE

1. ACKLEY, S.F., TEMPLETON, M.K., "Computer Modeling of Atmospheric Ice Accretion", Hanover-New Hampshire, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Creel Report 79-4, Mars 1979, 22 pages.
2. BEARD, K.V., PRUPPACHER, H.R., "A Determination of the Terminal Velocity and Drag of Small Water Dropp by Means of a Wind Tunnel", Journal of Atmospheric Science, 26, 1066-1077.
3. BRUN, R.J., LEWIS, W., PERKINS, P.J., SERAFINI, J.S., "Impingement of Cloud Droplets on a Cylindre and Procedure for Measuring Liquid-Water Content and Droplet sizes in Supercooled Clouds by Rotating Multicylinder Method", Cleveland Ohio, Lewis Flight Propulsion Laboratory, Report 1215, 1955, 41 pages.
4. DHATT, G., TOUZOT, G., "Une présentation de la méthode des éléments finis", Québec, Les Presses de l'Université Laval, 1981, 543 pages.
5. FLETCHER, R., "The Physics of Rain Clouds", Cambridge University Press, 1962, 360 pages.
6. GOLDSTEIN, S., "Modern Developments in Fluid Dynamics", vol. 1, Dover, 1965, 330 pages.

7. KUROIWA, D., "Icing and Snow Accretion; Monograph series of the Research Institute of Applied Electricity", no 6, 1958, 30 pages.
8. LANGMUIR, I., BLODGETT, K.B., "A Mathematical Investigation of Water Droplet Trajectories", Collected work of I, Langmuir, Pergamon Press, 1946, 348-393 p.
9. LEECH, M., "Freezing Rain in Montreal area", Thèse McGill, Mars 1978, 80 pages.
10. LOZOWSKI, E.P., STALLABRAS, J.R., HEARTY, P.F., "The Icing of an Unheated non-rotating Cylinder in Liquid Water Droplet-ice Cristal Clouds", Canada, Conseil National de Recherche, Rapport LTR-LT-96, Février 1979, 63 pages.
11. MASON, B.J., "The Physics of Clouds", Oxford, Clarendon Press, 1971, 421 pages.
12. McCOMBER, P., TOUZOT, G., "Calculations of the Impingement of Cloud Droplets in a Cylinder by the Finite-Element Method", U.S.A., Journal of the Atmospheric Sciences, vol. 38, no 5, mai 1981, 1027-1036 p.
13. PRUPPACHER, H.R., KLETT, J.D., "Microphysics of Clouds and Precipitation", Boston, Reidel P.C., 1978, 714 pages.

14. RUSH, C.K., WARDLOW, R.L., "Icing Measurment with a Single Rotating Cylinder", Canada Ottawa, National Aeronautical Establishment, Report LR-206, septembre 1957, 8 pages.
15. STALLABRASS, J.R., HEARTY, P.F., "The icing of cylinders in conditions of simulated freezing sea spray", Ottawa Canada, Conseil national de Recherche, Rapport MD-50, juillet 1967, 11 pages.
16. STALLABRASS, J.R., "Aspects of freezing rain simulation and testing", Ottawa Canada, Conseil national de Recherche, juin 1982, p. 67-74.
17. SHAMES, I.H., "Mechanics of fluids", United States, McGraw-Hill inc., 1982, 692 pages.
18. SCLAMP, R.J., PRUPPACHER, H.R., "A Numerical Investigation of the Efficiency with which Sample Columnar Ice Crystals Collide with Supercooled Water Drops", Journal Atmospheric Sciences, 32, 1975, 2330-2337.
19. WERNER, J.B., "The Development of Advanced anti-icing/de-icing capability for U.S. Army Helicopters", U.S. Army Air Mobility Research and Development Laboratory, rept. no USAAMRDL-TR-75-34A, 1975, 253 pages.

CONSTANTES NUMERIQUES UTILISEES

|          |                      |   |  |
|----------|----------------------|---|--|
| L        | rayon du cylindre    | = | 0,01745 m  |
| $u_0$    | vitesse de l'air     | = | 10,5 m/s   |
| $\mu$    | viscosité dynamique  | = | $1,171 \times 10^{-5}$ Pas (à $-5^\circ\text{C}$ ) |
| $\rho_e$ | densité de l'eau     | = | 1 000 kg/m <sup>3</sup>                            |
| $\rho_a$ | densité de l'air     | = | 1,297 kg/m <sup>3</sup>                            |
| $N_g$    | paramètre de gravité | = | 0,001551 (à $u_0 = 10,5$ m/s)                      |

APPENDICE 1INTERPOLATION DE LA VITESSE DE L'EAU ENTRE DEUX NOEUDS

La vitesse  $\vec{V}_e$  est connue seulement en un certain nombre de noeuds à la surface du cylindre et doit être interpolée entre ces noeuds. La géométrie est connue par les coordonnées de ces noeuds. On utilise par conséquent une interpolation quadratique pour conserver la même précision que celle de la solution:

$$\begin{aligned} U_e &= \langle N(\zeta) \rangle \{U_{en}\}; & V_e &= \langle N(\zeta) \rangle \{V_{en}\} \\ X &= \langle N(\zeta) \rangle \{X_n\}; & Y &= \langle N(\zeta) \rangle \{Y_n\} \end{aligned} \quad (45)$$

$$\frac{dx}{d\zeta} = \left\langle \frac{dN}{d\zeta} \right\rangle \{x_n\}; \quad \frac{dY}{d\zeta} = \left\langle \frac{dN}{d\zeta} \right\rangle \{y_n\}$$

d'où on obtient:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{dX/d\zeta}{dY/d\zeta} \quad (\text{voir figure 5}) \quad (46)$$

et

$$|\vec{d\ell}| = \left[ \left( \frac{dX}{d\zeta} \right)^2 + \left( \frac{dY}{d\zeta} \right)^2 \right]^{1/2} d\zeta \quad (47)$$

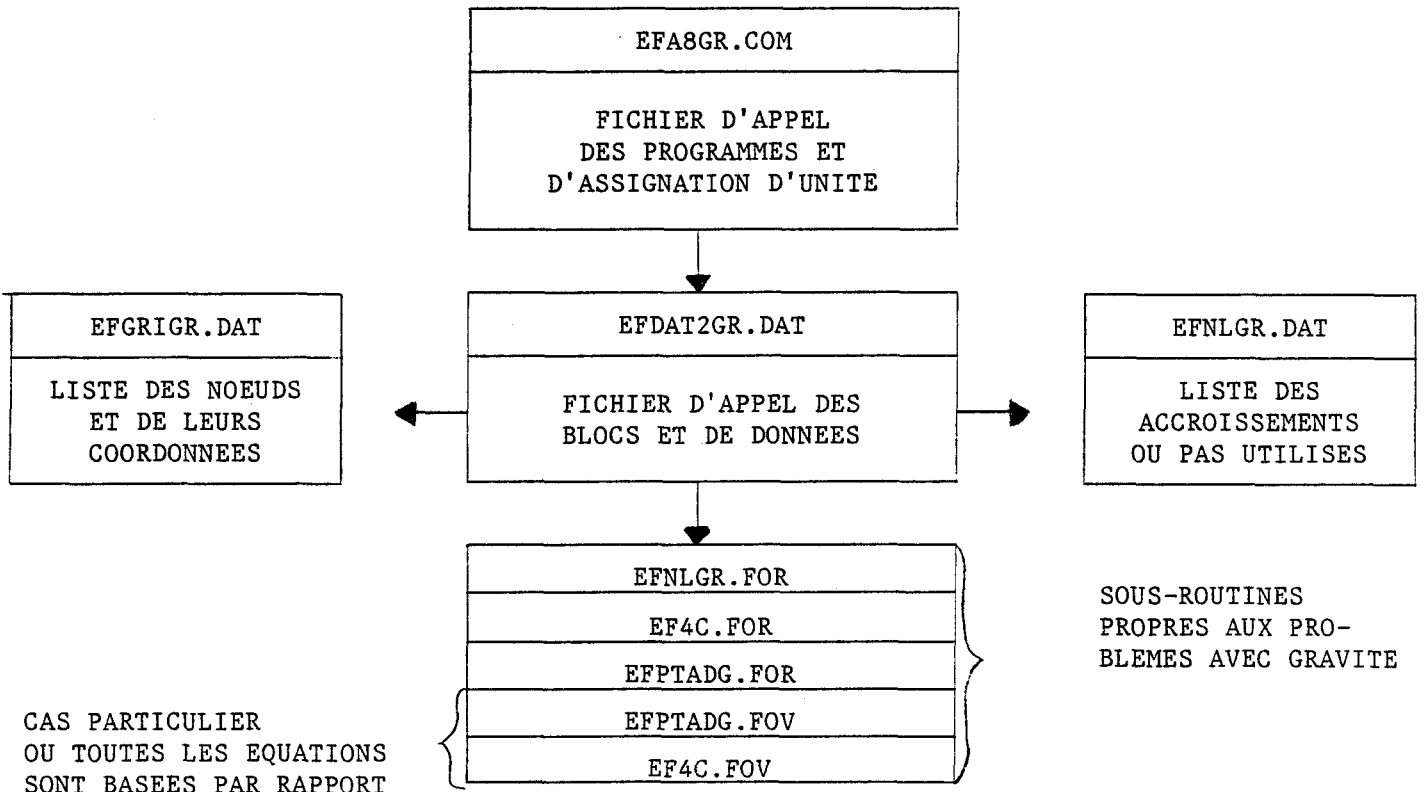
L'intégration sur la limite a été faite de façon numérique en divisant l'intervalle entre deux noeuds en 50 division. Ceci correspond à 800 intervalles pour la surface supérieure avant du cylindre.

APPENDICE 2

PROGRAMMES UTILISES

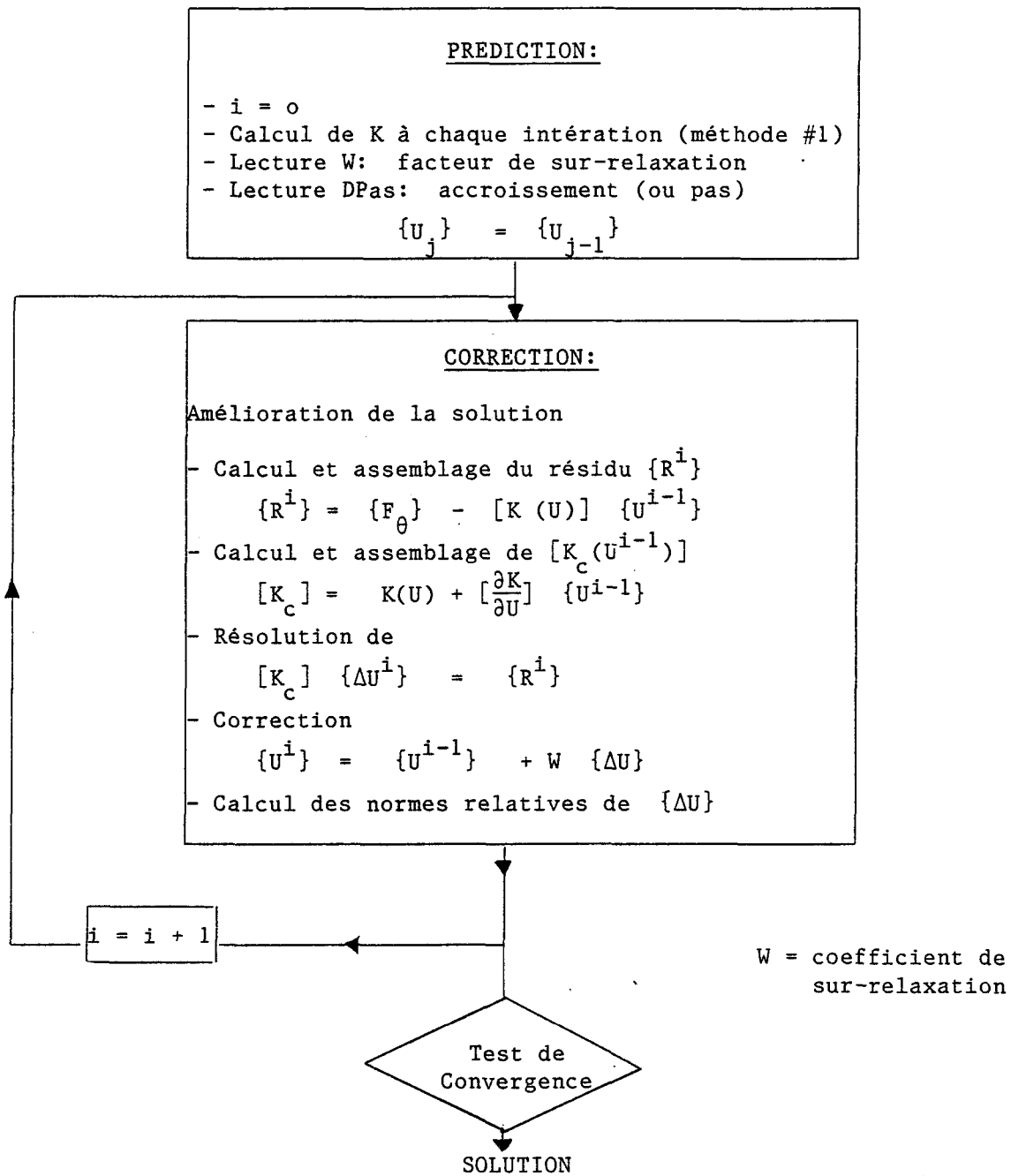
|              |       |          |
|--------------|-------|----------|
| EF4C.FOV     | ..... | page 111 |
| EFNLGR.FOV   | ..... | page 105 |
| EFPTADG.FOR  | ..... | page 100 |
| EF4C.FOR     | ..... | page 92  |
| EFNLGR.FOR   | ..... | page 86  |
| EFGRIGR.DAT  | ..... | page 83  |
| EFNLGR.DAT   | ..... | page 82  |
| EFDAT2GR.DAT | ..... | page 79  |
| EF4C.COM     | ..... | page 78  |

AGENCEMENT DES PROGRAMMES



CAS PARTICULIER  
OU TOUTES LES EQUATIONS  
SONT BASEES PAR RAPPORT  
A v<sub>e</sub>

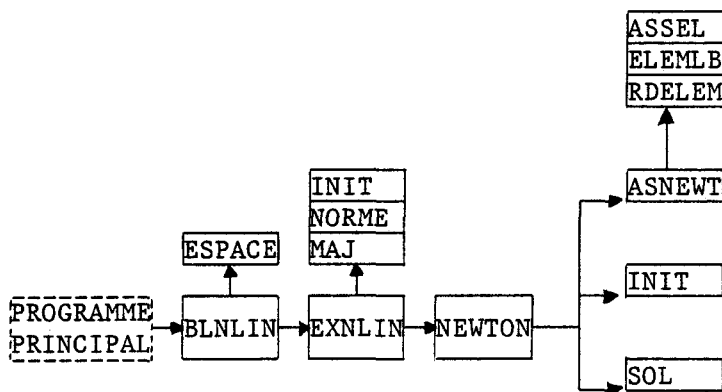


ALGORITHME DE NEWTON-RAPHSON\*

\* Voir la référence 4.

EFNLGR.FOR

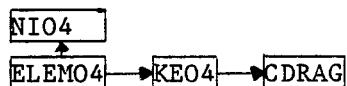
RESOLUTION D'UN PROBLEME  
STATIONNAIRE NON-LINEAIRE\*



\* Voir référence 4.

EFAC.FOR

CALCUL DE LA MATRICE ELEMENTAIRE TRIANGULAIRE  
A SIX NOEUDS, DEUX DEGRES DE LIBERTE PAR NOEUD



ELEMO4 : Icode = 1      Retour des paramètres  
           Icode = 2      Appel NIO4: calcul des fonctions d'interpolation

          Icode = 4 ou 6 Appel de KEO4

KEO4 : Icode = 4      Calcul de rigidité K(U) de Newton-Raphson  
           Icode = 6      Calcul du résidu  $R = K(U) \cdot U - F$

NIO4 : Calcul des fonctions d'interpolation pour un triangle quadratique isoparamétrique.

CDRAG : Calcul du coefficient de traînée.

EFPTADG.FORPOST-TRAITEMENT POUR LE CALCULDU COEFFICIENT DE CAPTATION, EN FONCTION  
DES VITESSES DE L'EAU, A LA SURFACE DE L'OBJET

BLPOST : Appel du sous-programme EXPOST

EXPOST : Permet de prendre trois noeuds de la surface de l'objet à la fois et d'associer les vitesses respectives à chaque noeud.

PTING : Détermination de la captation locale et ensuite, de la captation totale.

La captation totale est trouvée en intégrant numériquement, c'est-à-dire en faisant la sommation de la captation locale trouvée par interpolation quadratique entre les noeuds.

```
1  $SET DEF [P001.BOUCHARD]
2  $SET VERIFY
3  $ASSIGN UMA1:[P001.BOUCHARD]EFABGR.LOG SYS*OUTPUT
4  $!CE PROGRAMME TROUVE A L'AIDE DES ELEMENTS FINIS
5  $!LA VITESSE DES GOUTTES D'EAU AUTOUR D'UN CYLINDRE
6  $!AYANT 48 ELEMENTS ET 119 NOEUDS.
7  $!LES GOUTTELETTES SONT SOUMISES A LA FORCE DE GRAVITE
8  $!IL TROUVE AUSSI LA CAPTATION AUTOUR DU CYLINDRE
9  $!POUR 18 CHARGEMENTS,PUIS INTERPOLE POUR UNE
10 $!DISTRIBUTION DE GOUTTELETTES.
11 $ASSIGN EFDAT2GR.DAT FOR005  !FICHER DE CONTROLE DES SOUS-ROUTINES PRINCIPALES
12 $ASSIGN EFGRIGR.DAT FOR007  !FICHER DE COORDONNEES DES NOEUDS
13 $ASSIGN TEMP1.ZZZ FOR001
14 $ASSIGN TEMP2.ZZZ FOR002
15 $ASSIGN EFNLGR.DAT FOR003  !LECTURE DE DONNEES DU BLOC NLIN ET LECTURE DU BLOC POST POUR BPPK
16 $ASSIGN TEMP4.ZZZ FOR004  !PTING:ECRITURE DE LA CAPTATION#INTCAP:LECTURE DE CE BBN
17 $ASSIGN TEMP9.ZZZ FOR009  !POST:ECRITURE DE CCAPT:LA CAPTATION LOCALE
18 $ASSIGN TEMP10.XXX FOR010  !VITESSES DE L'EAU ,ECRITURE POUR NLIN ET LECTURE POUR POST
19 $ASSIGN TEMP12.XXX FOR012  !VIT.EAU POUR POSTMEF
20 $ASSIGN TEMP11.XXX FOR011  !ELEMENTS POUR POSTMEF
21 $ASSIGN SORTIGR.DAT FOR006  !LA SORTIE SE FAIT SUR SORTIE.DAT ET NON SUR TERMINAL
22 $ASSIGN TEMP08.XXX FOR008  !SAUVEGARDE DES COMMONS ET TABLES DE MEF
23 $ASSIGN EFNLCOP FOR013  !PAS DE CHARGEMENTS A DEVELOPPER
24 $ASSIGN TEMP14.XXX FOR014  !RESULTATS DES VIT. DE L'EAU 2IEME PARTIE
25 $!LINK 4EFP,EFNLGR,EF4C,EFPTADG,[P001.MEF4]MEF4/LIB
26 $RUN 4EFP
27 $PURGE *.ZZZ
28 $PURGE *.XXX
```

```

1  IMAG
2  COMT
3  MEF 3.0 ECOULEMENT AUTOUR D'UN CYLINDRE 48 ELEM. TRIANG. 6 NOEUDS
4  PAR TRIANGLE ET 119 NOEUDS.LA FORCE DE GRAVITE EST INCLUSE.
6  COOR  -1  7
7  COND  2
8  Z2      1.0    -0.001551
9  103 104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115
10 Z2      1.0    -0.001551
11 116 117 118 119
13 PRND
14  2
15  2.00000  0.00000  1.92388  0.38268  1.70711  0.70711  1.38268  0.92388
16  1.00000  1.00000  0.61732  0.92388  0.29289  0.70711  0.07612  0.38268
17  0.00000  0.00000  0.07612 -0.38268  0.29289 -0.70711  0.61732 -0.92388
18  1.00000 -1.00000  1.38268 -0.92388  1.70711 -0.70711  1.92388 -0.38268
19  2.00000  0.00000  1.52893  0.00000  1.52623  0.15378  1.37401  0.37401
20  1.26337  0.48084  1.00000  0.52893  0.84622  0.52623  0.62599  0.37401
21  0.51916  0.26336  0.47107  0.00000  0.51916 -0.26336  0.62599 -0.37401
22  0.84622 -0.52623  1.00000 -0.52893  1.26337 -0.48084  1.37401 -0.37401
23  1.52623 -0.15378  1.52893  0.00000  1.32653  0.00000  1.30168  0.12496
24  1.23089  0.23089  1.12496  0.30167  1.00000  0.32653  0.87504  0.30167
25  0.76911  0.23089  0.69832  0.12496  0.67347  0.00000  0.69832 -0.12496
26  0.76911 -0.23089  0.87504 -0.30167  1.00000 -0.32653  1.12496 -0.30167
27  1.23089 -0.23089  1.30168 -0.12496  1.32653  0.00000  1.12098  0.00000
28  1.10670  0.06514  1.08555  0.08555  1.02939  0.12151  1.00000  0.12098
29  0.93486  0.10670  0.91445  0.08555  0.87849  0.02939  0.87902  0.00000
30  0.87849 -0.02939  0.91445 -0.08555  0.93486 -0.10670  1.00000 -0.12098
31  1.02939 -0.12151  1.08555 -0.08555  1.10670 -0.06514  1.12098  0.00000
32  1.06250  0.00000  1.05774  0.02392  1.04419  0.04419  1.02392  0.05774
33  1.00000  0.06250  0.97608  0.05774  0.95581  0.04419  0.94226  0.02392
34  0.93750  0.00000  0.94226 -0.02392  0.95581 -0.04419  0.97608 -0.05774
35  1.00000 -0.06250  1.02392 -0.05774  1.04419 -0.04419  1.05774 -0.02392
36  1.06250  0.00000  1.01778  0.00000  1.01793  0.00378  1.01257  0.01257
37  1.01001  0.01535  1.00000  0.01778  0.99622  0.01793  0.98743  0.01257
38  0.98465  0.01001  0.98222  0.00000  0.98465 -0.01001  0.98743 -0.01257
39  0.99622 -0.01793  1.00000 -0.01778  1.01001 -0.01535  1.01257 -0.01257
40  1.01793 -0.00378  1.01778  0.00000  1.00826  0.00000  1.00764  0.00316
41  1.00584  0.00584  1.00316  0.00764  1.00000  0.00826  0.99684  0.00764
42  0.99416  0.00584  0.99236  0.00316  0.99174  0.00000  0.99236 -0.00316
43  0.99416 -0.00584  0.99684 -0.00764  1.00000 -0.00826  1.00316 -0.00764
44  1.00584 -0.00584  1.00764 -0.00316  1.00826  0.00000
45 PREL  -1
46  1  3
47  1 1000. 627.00 0.000000
48  0
49 ELEM  -1  11
50  48  6  4  1  1
51  1  4  119 102 85 84 83 101
52  2  4  119 101 83 100 117 118
53  3  4  117 100 83 82 81 99
54  4  4  117 99 81 98 115 116
55  5  4  115 98 81 80 79 97

```

|     |               |    |     |    |    |    |     |     |
|-----|---------------|----|-----|----|----|----|-----|-----|
| 56  | 6             | 4  | 115 | 97 | 79 | 96 | 113 | 114 |
| 57  | 7             | 4  | 113 | 96 | 79 | 78 | 77  | 95  |
| 58  | 8             | 4  | 113 | 95 | 77 | 94 | 111 | 112 |
| 59  | 9             | 4  | 111 | 94 | 77 | 93 | 109 | 110 |
| 60  | 10            | 4  | 109 | 93 | 77 | 76 | 75  | 92  |
| 61  | 11            | 4  | 109 | 92 | 75 | 91 | 107 | 108 |
| 62  | 12            | 4  | 107 | 91 | 75 | 74 | 73  | 90  |
| 63  | 13            | 4  | 107 | 90 | 73 | 89 | 105 | 106 |
| 64  | 14            | 4  | 105 | 89 | 73 | 72 | 71  | 88  |
| 65  | 15            | 4  | 105 | 88 | 71 | 87 | 103 | 104 |
| 66  | 16            | 4  | 103 | 87 | 71 | 70 | 69  | 86  |
| 67  | 17            | 4  | 83  | 84 | 85 | 68 | 51  | 67  |
| 68  | 18            | 4  | 83  | 67 | 51 | 50 | 49  | 66  |
| 69  | 19            | 4  | 81  | 82 | 83 | 66 | 49  | 65  |
| 70  | 20            | 4  | 81  | 65 | 49 | 48 | 47  | 64  |
| 71  | 21            | 4  | 79  | 80 | 81 | 64 | 47  | 63  |
| 72  | 22            | 4  | 79  | 63 | 47 | 46 | 45  | 62  |
| 73  | 23            | 4  | 77  | 78 | 79 | 62 | 45  | 61  |
| 74  | 24            | 4  | 77  | 61 | 45 | 44 | 43  | 60  |
| 75  | 25            | 4  | 77  | 60 | 43 | 42 | 41  | 59  |
| 76  | 26            | 4  | 77  | 59 | 41 | 58 | 75  | 76  |
| 77  | 27            | 4  | 75  | 58 | 41 | 40 | 39  | 57  |
| 78  | 28            | 4  | 75  | 57 | 39 | 56 | 73  | 74  |
| 79  | 29            | 4  | 73  | 56 | 39 | 38 | 37  | 55  |
| 80  | 30            | 4  | 73  | 55 | 37 | 54 | 71  | 72  |
| 81  | 31            | 4  | 71  | 54 | 37 | 36 | 35  | 53  |
| 82  | 32            | 4  | 71  | 53 | 35 | 52 | 69  | 70  |
| 83  | 33            | 4  | 51  | 34 | 17 | 16 | 15  | 33  |
| 84  | 34            | 4  | 49  | 50 | 51 | 33 | 15  | 32  |
| 85  | 35            | 4  | 49  | 32 | 15 | 14 | 13  | 31  |
| 86  | 36            | 4  | 47  | 48 | 49 | 31 | 13  | 30  |
| 87  | 37            | 4  | 47  | 30 | 13 | 12 | 11  | 29  |
| 88  | 38            | 4  | 45  | 46 | 47 | 29 | 11  | 28  |
| 89  | 39            | 4  | 45  | 28 | 11 | 10 | 9   | 27  |
| 90  | 40            | 4  | 43  | 44 | 45 | 27 | 9   | 26  |
| 91  | 41            | 4  | 43  | 26 | 9  | 25 | 41  | 42  |
| 92  | 42            | 4  | 41  | 25 | 9  | 8  | 7   | 24  |
| 93  | 43            | 4  | 41  | 24 | 7  | 23 | 39  | 40  |
| 94  | 44            | 4  | 39  | 23 | 7  | 6  | 5   | 22  |
| 95  | 45            | 4  | 39  | 22 | 5  | 21 | 37  | 38  |
| 96  | 46            | 4  | 37  | 21 | 5  | 4  | 3   | 20  |
| 97  | 47            | 4  | 37  | 20 | 3  | 19 | 35  | 36  |
| 98  | 48            | 4  | 35  | 19 | 3  | 2  | 1   | 18  |
| 99  | -1            |    |     |    |    |    |     |     |
| 100 | NLIN          | -1 | 3   | 10 | 12 |    |     |     |
| 101 | POST          | 1  | 4   | 3  | 10 |    |     |     |
| 102 | 2             |    |     |    |    |    |     |     |
| 103 | 5.1E-6,945.   |    |     |    |    |    |     |     |
| 104 | 15.2E-6,1093. |    |     |    |    |    |     |     |
| 105 | 1200.0        |    |     |    |    |    |     |     |
| 106 | STOP          |    |     |    |    |    |     |     |
| 107 | 25.5E-6,481.  |    |     |    |    |    |     |     |
| 108 | 35.7E-6,211.  |    |     |    |    |    |     |     |
| 109 | 45.9E-6,74.   |    |     |    |    |    |     |     |
| 110 | 56.1E-6,38.   |    |     |    |    |    |     |     |

|     |              |
|-----|--------------|
| 111 | 66.3E-6,30.  |
| 112 | 76.5E-6,13.  |
| 113 | 86.7E-6,19.  |
| 114 | 96.9E-6,11.  |
| 115 | 107.1E-6,10. |
| 116 | 117.3E-6,3.  |
| 117 | 127.5E-6,1.  |
| 118 | 137.7E-6,1.  |
| 119 | 1200.0       |
| 120 | STOP         |

|    |        |   |   |
|----|--------|---|---|
| 1  | 0.014  | 1 | 8 |
| 2  | .03    |   |   |
| 3  | .03    |   |   |
| 4  | .02    |   |   |
| 5  | .01    |   |   |
| 6  | .04    |   |   |
| 7  | .052   | 1 |   |
| 8  | .06    | 1 |   |
| 9  | .144   | 1 |   |
| 10 | .225   |   |   |
| 11 | .275   |   |   |
| 12 | .7     |   |   |
| 13 | 2.0    |   |   |
| 14 | 2.8    |   |   |
| 15 | 3.6    |   |   |
| 16 | 9.6    |   |   |
| 17 | 13.0   |   |   |
| 18 | 15.65  |   |   |
| 19 | 14.00  |   |   |
| 20 | 13.1   |   |   |
| 21 | 7.0    |   |   |
| 22 | 7.5    |   |   |
| 23 | 35.0   |   |   |
| 24 | 35.0   |   |   |
| 25 | 66.15  |   |   |
| 26 | 13.4   |   |   |
| 27 | 75.    |   |   |
| 28 | 64.1   |   |   |
| 29 | 60.1   |   |   |
| 30 | 50.0   |   |   |
| 31 | 122.85 |   |   |
| 32 | 232.   |   |   |
| 33 | 225.   |   |   |
| 34 | 500.   |   |   |
| 35 | 500.   |   |   |
| 36 | 0.0    |   |   |
| 37 | 50.0   |   |   |
| 38 | 50.0   |   |   |
| 39 | 50.0   |   |   |
| 40 | 50.0   |   |   |
| 41 | 50.0   |   |   |
| 42 | 50.0   |   |   |
| 43 | 50.0   |   |   |
| 44 | 50.0   |   |   |
| 45 | 50.0   |   |   |
| 46 | 50.0   |   |   |
| 47 | 50.0   |   |   |
| 48 | 50.0   |   |   |
| 49 | 50.0   |   |   |
| 50 | 0.0    |   |   |



|    |         |           |           |
|----|---------|-----------|-----------|
| 1  | 119.2,2 |           |           |
| 2  | 1       | 0.000000  | 1.000000  |
| 3  | 2       | -0.195090 | 0.980785  |
| 4  | 3       | -0.382683 | 0.923880  |
| 5  | 4       | -0.555570 | 0.831470  |
| 6  | 5       | -0.707107 | 0.707107  |
| 7  | 6       | -0.831470 | 0.555570  |
| 8  | 7       | -0.923880 | 0.382683  |
| 9  | 8       | -0.980785 | 0.195090  |
| 10 | 9       | -1.000000 | 0.000000  |
| 11 | 10      | -0.980785 | -0.195090 |
| 12 | 11      | -0.923880 | -0.382683 |
| 13 | 12      | -0.831470 | -0.555570 |
| 14 | 13      | -0.707107 | -0.707107 |
| 15 | 14      | -0.555570 | -0.831470 |
| 16 | 15      | -0.382683 | -0.923880 |
| 17 | 16      | -0.195090 | -0.980785 |
| 18 | 17      | 0.000000  | -1.000000 |
| 19 | 18      | 0.000000  | 1.375000  |
| 20 | 19      | -0.191342 | 1.336940  |
| 21 | 20      | -0.526190 | 1.270334  |
| 22 | 21      | -0.668401 | 1.161948  |
| 23 | 22      | -0.972272 | 0.972272  |
| 24 | 23      | -1.080658 | 0.810060  |
| 25 | 24      | -1.270334 | 0.526190  |
| 26 | 25      | -1.308395 | 0.334848  |
| 27 | 26      | -1.375000 | 0.000000  |
| 28 | 27      | -1.308395 | -0.334848 |
| 29 | 28      | -1.270334 | -0.526190 |
| 30 | 29      | -1.080658 | -0.810060 |
| 31 | 30      | -0.972272 | -0.972272 |
| 32 | 31      | -0.668401 | -1.161948 |
| 33 | 32      | -0.526190 | -1.270334 |
| 34 | 33      | -0.191342 | -1.336940 |
| 35 | 34      | 0.000000  | -1.375000 |
| 36 | 35      | 0.000000  | 1.750000  |
| 37 | 36      | -0.341408 | 1.716374  |
| 38 | 37      | -0.669696 | 1.616789  |
| 39 | 38      | -0.972248 | 1.455072  |
| 40 | 39      | -1.237437 | 1.237437  |
| 41 | 40      | -1.455072 | 0.972248  |
| 42 | 41      | -1.616789 | 0.669696  |
| 43 | 42      | -1.716374 | 0.341408  |
| 44 | 43      | -1.750000 | 0.000000  |
| 45 | 44      | -1.716374 | -0.341408 |
| 46 | 45      | -1.616789 | -0.669696 |
| 47 | 46      | -1.455072 | -0.972248 |
| 48 | 47      | -1.237437 | -1.237437 |
| 49 | 48      | -0.972248 | -1.455072 |
| 50 | 49      | -0.669696 | -1.616789 |
| 51 | 50      | -0.341408 | -1.716374 |
| 52 | 51      | 0.000000  | -1.750000 |
| 53 | 52      | 0.000000  | 2.875000  |
| 54 | 53      | -0.765367 | 2.722759  |
| 55 | 54      | -1.100215 | 2.656154  |

|     |     |            |           |
|-----|-----|------------|-----------|
| 56  | 55  | -1.749062  | 2.222608  |
| 57  | 56  | -2.032932  | 2.032932  |
| 58  | 57  | -2.466477  | 1.384085  |
| 59  | 58  | -2.656154  | 1.100215  |
| 60  | 59  | -2.808395  | 0.334848  |
| 61  | 60  | -2.875000  | 0.000000  |
| 62  | 61  | -2.808395  | -0.334848 |
| 63  | 62  | -2.656154  | -1.100215 |
| 64  | 63  | -2.466477  | -1.384085 |
| 65  | 64  | -2.032932  | -2.032932 |
| 66  | 65  | -1.749062  | -2.222608 |
| 67  | 66  | -1.100215  | -2.656154 |
| 68  | 67  | -0.765367  | -2.722759 |
| 69  | 68  | 0.000000   | -2.875000 |
| 70  | 69  | 0.000000   | 4.000000  |
| 71  | 70  | -0.780361  | 3.923141  |
| 72  | 71  | -1.530734  | 3.695518  |
| 73  | 72  | -2.222281  | 3.325878  |
| 74  | 73  | -2.828427  | 2.828427  |
| 75  | 74  | -3.325878  | 2.222281  |
| 76  | 75  | -3.695518  | 1.530734  |
| 77  | 76  | -3.923141  | 0.780361  |
| 78  | 77  | -4.000000  | 0.000000  |
| 79  | 78  | -3.923141  | -0.780361 |
| 80  | 79  | -3.695518  | -1.530734 |
| 81  | 80  | -3.325878  | -2.222281 |
| 82  | 81  | -2.828427  | -2.828427 |
| 83  | 82  | -2.222281  | -3.325878 |
| 84  | 83  | -1.530734  | -3.695518 |
| 85  | 84  | -0.780361  | -3.923141 |
| 86  | 85  | 0.000000   | -4.000000 |
| 87  | 86  | 0.000000   | 7.500000  |
| 88  | 87  | -0.765367  | 7.347759  |
| 89  | 88  | -2.870126  | 6.929096  |
| 90  | 89  | -3.518972  | 6.495551  |
| 91  | 90  | -5.303301  | 5.303301  |
| 92  | 91  | -5.736846  | 4.654454  |
| 93  | 92  | -6.929096  | 2.870126  |
| 94  | 93  | -7.081337  | 2.104759  |
| 95  | 94  | -7.500000  | 0.000000  |
| 96  | 95  | -7.081337  | -2.104759 |
| 97  | 96  | -6.929096  | -2.870126 |
| 98  | 97  | -5.736846  | -4.654454 |
| 99  | 98  | -5.303301  | -5.303301 |
| 100 | 99  | -3.518972  | -6.495551 |
| 101 | 100 | -2.870126  | -6.929096 |
| 102 | 101 | -0.765367  | -7.347759 |
| 103 | 102 | 0.000000   | -7.500000 |
| 104 | 103 | 0.000000   | 11.000000 |
| 105 | 104 | -2.145994  | 10.788638 |
| 106 | 105 | -4.209518  | 10.162675 |
| 107 | 106 | -6.111273  | 9.146166  |
| 108 | 107 | -7.778175  | 7.778175  |
| 109 | 108 | -9.146166  | 6.111273  |
| 110 | 109 | -10.162675 | 4.209518  |

|     |                         |           |
|-----|-------------------------|-----------|
| 111 | 110-10.788638           | 2.145994  |
| 112 | 111-11.000000           | 0.000000  |
| 113 | 112-10.788638           | -2.145994 |
| 114 | 113-10.162675           | -4.209518 |
| 115 | 114 -9.146166           | -6.111273 |
| 116 | 115 -7.778175           | -7.778175 |
| 117 | 116 -6.111273           | -9.146166 |
| 118 | 117 -4.209518-10.162675 |           |
| 119 | 118 -2.145994-10.788638 |           |
| 120 | 119 0.000000-11.000000  |           |
| 121 | -1                      |           |



|     |  |         |
|-----|--|---------|
| 56  | COMMON/ES/M,MR,MP,M1,M2,M3,M4,M5,M6  | EXNL 13 |
| 57  | DIMENSION VCORG(1),KDLNC(1),VDIMP(1),KNEG(1),KLD(1),KLOCE(1),                                | EXNL 14 |
| 58  | 1 VCORE(1),VPRNE(1),VPRNE(1),VPRNE(1),VPRNE(1),VPRNE(1),VPRNE(1),VPRNE(1),VPRNE(1),VPRNE(1), | EXNL 15 |
| 59  | 2 VKGS(1),VKGD(1),VKGI(1),VFG(1),VRES(1),VDLG(1)   | EXNL 16 |
| 60  | DIMENSION VDIMM(60)  |         |
| 61  | DIMENSION V(2)   |         |
| 62  | DATA ZERO/0.00/  | EXNL 17 |
| 63  | C-----   | EXNL 18 |
| 64  | DPAS=ZERO  | EXNL 19 |
| 65  | XPAS=ZERO  | EXNL 20 |
| 66  | IPAS=0   | EXNL 21 |
| 67  | C----- LECTURE DES DEGRES DE LIBERTE INITIAUX SUR LE FICHER M3                               | EXNL 22 |
| 68  | IF(M3.EB.0) GO TO 10   | EXNL 23 |
| 69  | REWIND M3  | EXNL 24 |
| 70  | C READ(M3)(VDLG(I),I=1,NEB)  | EXNL 25 |
| 71  | C----- LIRE UNE CARTE DEFINISSANT UN ENSEMBLE DE PAS IDENTIQUES                              | EXNL 26 |
| 72  | 10 READ(M1,1000) DPAS,I1,I2,I3,X1,X2   | EXNL 27 |
| 73  | 1000 FORMAT(F10.0,3I5,2F10.0)  | EXNL 28 |
| 74  | IF(DPAS.EB.ZERO) GO TO 140   | EXNL 29 |
| 75  | IF(I1.GT.0) NPAS=I1  | EXNL 30 |
| 76  | IF(I2.GT.0) NITER=I2   | EXNL 31 |
| 77  | IF(I3.GT.0) IMETH=I3   | EXNL 32 |
| 78  | IF(X1.GT.ZERO) EPSDL=X1  | EXNL 33 |
| 79  | IF(X2.GT.ZERO) OMEGA=X2  | EXNL 34 |
| 80  | C  | EXNL 35 |
| 81  | C----- BOUCLE SUR LES PAS  | EXNL 36 |
| 82  | C  | EXNL 37 |
| 83  | DO 130 IP=1,NPAS   | EXNL 38 |
| 84  | IPAS=IPAS+1  | EXNL 39 |
| 85  | XPAS=XPAS+DPAS   | EXNL 40 |
| 86  | C  |         |
| 87  | C A CHAQUE CHARGEMENT,VARIATIONS DES CONDITIONS LIMITES                                      |         |
| 88  | C POUR LA VITESSE SELON Y,QUI EST AFFECTE PAR LA GRAVITE                                     |         |
| 89  | C  |         |
| 90  | DO 99 II=2,NCLT,2  |         |
| 91  | IF(IPAS.NE.1)GO TO 98  |         |
| 92  | VDIMM(II)=VDIMP(II)  |         |
| 93  | VDIMM(II-1)=VDIMP(II-1)  |         |
| 94  | 98 VDIMP(II)=VDIMM(II)*XPAS  |         |
| 95  | VDIMP(II-1)=VDIMM(II-1)/DSGRT(VDIMP(II)**2+1.000)  |         |
| 96  | VDIMP(II)=VDIMP(II)/DSGRT(VDIMP(II)**2+1.000)  |         |
| 97  | 99 CONTINUE  |         |
| 98  | C  |         |
| 99  | C  |         |
| 100 | WRITE(MP,2000) IPAS,DPAS,XPAS,NITER,IMETH,EPSDL,OMEGA  | EXNL 41 |
| 101 | 2000 FORMAT(/1X,13('-', 'PAS NUMERO (IPAS):',15//  | EXNL 42 |
| 102 | 1 14X,'ACCROISSEMENT (DPAS)=' ,E12.5/  | EXNL 43 |
| 103 | 2 14X,'NIVEAU TOTAL (XPAS)=' ,E12.5/   | EXNL 44 |
| 104 | 3 14X,'NOMBRE D ITERATIONS (NITER)=' ,I12/   | EXNL 45 |
| 105 | 4 14X,'METHODE NUMERO (IMETH):',I12/   | EXNL 46 |
| 106 | 5 14X,'PRECISION (EPSDL)=' ,E12.5/   | EXNL 47 |
| 107 | 6 14X,'FACTEUR DE SUR-RELAXATION (OMEGA)=' ,E12.5/)  | EXNL 48 |
| 108 | C  | EXNL 49 |
| 109 | C----- BOUCLE SUR LES ITERATIONS D'EQUILIBRE   | EXNL 50 |
| 110 | C  | EXNL 51 |

```

111      DO 110 ITER=1,NITER                                EXNL 52
112      C----- CHOIX DE LA METHODE                      EXNL 53
113      IF(IMETH.GT.3) GO TO 20                            EXNL 54
114      C----- METHODES DE TYPE NEWTON                  EXNL 55
115      CALL NEWTON(VCORG,KDLNC,VDIMP,KNEB,KLD,KLOCE,VCORE,VPRNE,VPREE, EXNL 56
116      1 KNE,VKE,VME,VFE,VDLE,VKGS,VKGD,VKGI,VFG,VRES,VDLG) EXNL 57
117      GO TO 100                                          EXNL 58
118      C----- AUTRES METHODES .....                   EXNL 59
119      20 CONTINUE                                       EXNL 60
120      WRITE(MP,2010) IMETH                               EXNL 61
121      2010 FORMAT(' ** ERREUR, METHODE:',I3,' INCONNUE') EXNL 62
122      STOP                                              EXNL 63
123      C----- CALCUL DE LA NORME                       EXNL 64
124      100 CALL NORME(NEB,VRES,VDLG,XNORM)                EXNL 65
125      IF(M.GT.0) WRITE(MP,2020) ITER,XNORM              EXNL 66
126      2020 FORMAT(5X,' ITERATION (ITER):',I3,' NORME (XNORM)=' ,E12.5) EXNL 67
127      IF(M.GE.2) CALL PRSOL(KDLNC,VCORG,VDIMP,KNEB,VDLG) EXNL 68
128      IF(XNORM.LE.EPSDL) GO TO 120                     EXNL 69
129      110 CONTINUE                                       EXNL 70
130      ITER=NITER                                        EXNL 71
131      C----- FIN DU PAS                                EXNL 72
132      120 DPAS=DPAS                                       EXNL 73
133      WRITE(MP,2030) ITER,NITER                          EXNL 74
134      2030 FORMAT(/10X,I4,' ITERATIONS EFFECTUEES SUR',I4/) EXNL 75
135      IF(M.GT.2) CALL PRSOL(KDLNC,VCORG,VDIMP,KNEB,VDLG) EXNL 76
136      130 CONTINUE                                       EXNL 77
137      C----- SAUVEGARDE DE LA SOLUTION SUR FICHER M4  EXNL 79
138      26 J=1
139      WRITE(M5,28) IPAS,DPAS,XPAS,ITER
140      28 FORMAT(I5,2F10.5,I5)
141      DO 8 I=1,NNT
142      K=1
143      GO TO 11
144      12 K=2
145      11 JJ=KNEB(J)
146      IF(JJ)13,14,15
147      13 V(K)=VDIMP(-JJ)
148      GO TO 16
149      14 V(K)=ZERO
150      GO TO 16
151      15 V(K)=VDLG(JJ)
152      16 J=J+1
153      IF(K.EQ.2)GO TO 9
154      GO TO 12
155      9 PHI=SGRT(V(K-1)**2+V(K)**2)
156      8 WRITE(M5,17)I,V(K-1),V(K),PHI
157      17 FORMAT(I5,3E12.5)
158      IF(M4.NE.0) WRITE(M4) (VDLG(I),I=1,NEB)           EXNL 80
159      GO TO 10                                          EXNL 78
160      140 RETURN                                       EXNL 81
161      END                                              EXNL 82
162      SUBROUTINE NEWTON(VCORG,KDLNC,VDIMP,KNEB,KLD,KLOCE,VCORE,VPRNE, NEWT 1
163      1 VPREE,KNE,VKE,VME,VFE,VDLE,VKGS,VKGD,VKGI,VFG,VRES,VDLG) NEWT 2
164      C-----=NEWT 3
165      C ALGORITHME DES METHODES DE TYPE NEWTON-RAPHSON NEWT 4

```

```

166 C      IMETH.EB.1- CALCUL DE K A CHAGUE ITERATION          NEWT  5
167 C      IMETH.EB.2 K CONSTANTE                            NEWT  6
168 C      IMETH.EB.3 K RECALCULEE AU DEBUT DE CHAGUE PAS    NEWT  7
169 C=====NEWT  8
170      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)                            NEWT  9
171      COMMON/ASSE/NSYM,NKG                                NEWT 10
172      COMMON/RESO/NEG                                       NEWT 11
173      COMMON/NLIN/EPDDL,XNORM,OMEGA,XPAS,DPAS,DPASO,NPAS,IPAS,NITER, NEWT 12
174      1 ITER,IMETH                                          NEWT 13
175      COMMON/ES/M,MR,MP                                     NEWT 14
176      DIMENSION VCOERG(1),KDLNC(1),VDIMP(1),KNEB(1),KLD(1),KLOCE(1), NEWT 15
177      1 VCORE(1),VPRNE(1),VPREE(1),KNE(1),VKE(1),VME(1),VFE(1),VDLE(1), NEWT 16
178      2 VKGS(1),VKGD(1),VKGI(1),VFG(1),VRES(1),VDLG(1)   NEWT 17
179      DATA ZERO/0.DO/,UN/1.DO/                           NEWT 18
180 C-----NEWT 19
181 C----- DECISION DE REASSEMBLAGE DE LA MATRICE GLOBALE NEWT 20
182      IKT=0                                                 NEWT 21
183      IF(IMETH.EB.1) GO TO 10                               NEWT 22
184      IF(IPAS.EB.1.AND.ITER.EB.1) GO TO 10                 NEWT 23
185      IF(IMETH.EB.3.AND.ITER.EB.1) GO TO 10                 NEWT 24
186      GO TO 20                                             NEWT 25
187      10 IKT=1                                             NEWT 26
188 C----- INITIALISER A ZERO LA MATRICE GLOBALE SI ON DOIT L'ASSEMBLER NEWT 27
189      20 IF(IKT.EB.0)GO TO 30                               NEWT 28
190      CALL INIT(ZERO,NKG,VKGS)                             NEWT 29
191      CALL INIT(ZERO,NEG,VKGD)                             NEWT 30
192      IF(NSYM.EB.1) CALL INIT(ZERO,NKG,VKGI)               NEWT 31
193 C----- PLACER LES SOLLICITATIONS DANS LE RESIDU        NEWT 32
194      30 CALL MAJ(XPAS,ZERO,NEG,VFG,VRES)                  NEWT 33
195 C----- ASSEMBLER LE RESIDU ET,EVENTUELLEMENT LA MATRICE GLOBALE NEWT 34
196      CALL ASNEWT(IKT,KLD,VDIMP,KLOCE,VCORE,VPRNE,VPREE,KNE,VKE,VFE, NEWT 35
197      1 VKGS,VKGD,VKGI,VDLG,VDLE,VRES)                    NEWT 36
198 C----- RESOLUTION                                       NEWT 37
199      CALL SOL(VKGS,VKGD,VKGI,VRES,KLD,NEG,MP,IKT,1,NSYM,ENERG) NEWT 38
200      IF(IKT.EB.1.AND.M.GT.1) CALL PRPUTS(VKGD)           NEWT 39
201 C----- MISE A JOUR DE LA SOLUTION                        NEWT 40
202      CALL MAJ(OMEGA,UN,NEG,VRES,VDLG)                     NEWT 41
203      RETURN                                               NEWT 42
204      END                                                  NEWT 43
205      SUBROUTINE ASNEWT(IKT,KLD,VDIMP,KLOCE,VCORE,VPRNE,VPREE, ASNE  1
206      1 KNE,VKE,VFE,VKGS,VKGD,VKGI,VFG,VDLE,VRES)        ASNE  2
207 C=====ASNE  3
208 C      ASSEMBLAGE DES RESIDUS ET DE LA MATRICE GLOBALE (SI IKT.EB.1) ASNE  4
209 C      DANS LA MEME BOUCLE SUR LES ELEMENTS (POUR LA METHODE DE NEWTON- ASNE  5
210 C      RAPHSON)                                           ASNE  6
211 C=====ASNE  7
212      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)                             ASNE  8
213      COMMON/ELEM/NELT,NNEL,NTPE,NGRE,ME,NIDENT           ASNE  9
214      COMMON/ASSE/NSYM                                     ASNE 10
215      COMMON/RESO/NEG                                       ASNE 11
216      COMMON/RGDT/IEL,ITPE,ITPE1,IGRE,IDLE,ICE,IPRNE,IPREE,INEL,IDEG,IPGASNE 12
217      1 ,ICOD                                               ASNE 13
218      COMMON/ES/M,MR,MP,M1,M2                               ASNE 14
219      DIMENSION KLD(1),VDIMP(1),KLOCE(1),VCORE(1),VPRNE(1),VPREE(1), ASNE 15
220      1 KNE(1),VKE(1),VFE(1),VKGS(1),VKGD(1),VKGI(1),VFG(1),VDLE(1), ASNE 16

```

```

221      2 VRES(1) ASNE 17
222 C-----ASNE 18
223 C----- POSITIONNER AU DEBUT LE FICHIER DES ELEMENTS (M2) ASNE 19
224      REWIND M2 ASNE 20
225 C----- BOUCLE SUR LES ELEMENTS ASNE 21
226      DO 40 IE=1,NELT ASNE 22
227 C----- LIRE UN ELEMENT ASNE 23
228      CALL RDELEM(M2,KLOCE,VCORE,VPRNE,VPREE,KNE) ASNE 24
229 C----- CALCUL DES FONCTIONS D'INTERPOLATION SI NECESSAIRE ASNE 25
230      IF(ITPE.EQ.ITPE1) GO TO 10 ASNE 26
231      ICOD=2 ASNE 27
232      CALL ELEMLB(VCORE,VPRNE,VPREE,VDLE,VKE,VFE) ASNE 28
233 C----- EXTRAIRE LES D.L. DE L'ELEMENT DE VFG ASNE 29
234      10 CALL DLELM(KLOCE,VFG,VDIMP,VDLE) ASNE 30
235 C----- CALCULER LES RESIDUS ELEMENTAIRES ET CHANGER LEURS SIGNES ASNE 31
236      ICOD=6 ASNE 32
237      CALL ELEMLB(VCORE,VPRNE,VPREE,VDLE,VKE,VFE) ASNE 33
238      DO 20 I=1,IDLE ASNE 34
239      20 VFE(I)=-VFE(I) ASNE 35
240 C----- CALCUL DE LA MATRICE GLOBALE ASNE 36
241      IF(IKT.EQ.0) GO TO 30 ASNE 37
242      ICOD=4 ASNE 38
243      CALL ELEMLB(VCORE,VPRNE,VPREE,VDLE,VKE,VFE) ASNE 39
244 C----- ASSEMBLAGE DES RESIDUS ET DE LA MATRICE GLOBALE ASNE 40
245      30 CALL ASSEL(IKT,1,IDLE,NSYM,KLOCE,KLD,VKE,VFE,VKGS,VKGD,VKGI,VRES) ASNE 41
246      40 ITPE1=ITPE ASNE 42
247      RETURN ASNE 43
248      END ASNE 44
249      SUBROUTINE INIT(X,N,V) INIT 1
250 C-----INIT 2
251 C INITIALISATION DU VECTEUR V A LA VALEUR X INIT 3
252 C-----INIT 4
253      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z) INIT 5
254      DIMENSION V(1) INIT 6
255 C-----INIT 7
256      DO 10 I=1,N INIT 8
257      10 V(I)=X INIT 9
258      RETURN INIT 10
259      END INIT 11
260      SUBROUTINE MAJ(X1,X2,N,V1,V2) MAJ 1
261 C-----MAJ 2
262 C EXECUTION DE L'OPERATION VECTORIELLE: V2=X1*V1 + X2*V2 MAJ 3
263 C X1,X2:SCALAIRES V1,V2:VECTEURS MAJ 4
264 C-----MAJ 5
265      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z) MAJ 6
266      DIMENSION V1(1),V2(1) MAJ 7
267 C-----MAJ 8
268      DO 10 I=1,N MAJ 9
269      10 V2(I)=X1*V1(I)+X2*V2(I) MAJ 10
270      RETURN MAJ 11
271      END MAJ 12
272      SUBROUTINE NORME(N,VDLE,V,XNORM) NORM 1
273 C-----NORM 2
274 C CALCUL DU RAPPORT DES LONGUEURS DES VECTEURS VDLE ET V NORM 3
275 C-----NORM 4

```



|     |                                     |      |    |
|-----|-------------------------------------|------|----|
| 276 | IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)            | NORM | 5  |
| 277 | DIMENSION VDEL(1),V(1)              | NORM | 6  |
| 278 | DATA ZERO/0.D0/,UN/1.D0/,FAC/1.D-3/ | NORM | 7  |
| 279 | SGRT(X)=DSGRT(X)                    | NORM | 8  |
| 280 | C-----                              | NORM | 9  |
| 281 | C1=ZERO                             | NORM | 10 |
| 282 | C2=ZERO                             | NORM | 11 |
| 283 | DO 10 I=1,N                         | NORM | 12 |
| 284 | C1=C1+VDEL(I)*VDEL(I)               | NORM | 13 |
| 285 | 10  C2=C2+V(I)*V(I)                 | NORM | 14 |
| 286 | C=C1*FAC                            | NORM | 15 |
| 287 | IF(C2.LE.C) C2=UN                   | NORM | 16 |
| 288 | XNORM=SGRT(C1/C2)                   | NORM | 17 |
| 289 | RETURN                              | NORM | 18 |
| 290 | END                                 | NORM | 19 |

```

1      SUBROUTINE ELEM04(VCORE, VPRNE, VPREE, VDLE, VKE, VFE)
2      C=====
3      C    SOUS-ROUTINE DU CALCUL DE LA MATRICE ELEMENTAIRE
4      C    ELEMENT TRIANGULAIRE A SIX NOEUDS
5      C    DEUX DEGRES DE LIBERTE PAR NOEUD , UE ET VE
6      C    LES FONCTIONS D'INTERPOLATIONS ET LEURS DERIVEES SONT
7      C    CALCULES AUX TROIS POINTS DE GAUSS
8      C
9      C=====
10     IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
11     COMMON/COORD/NDIM,NNT,NDLN,NDLT,FAC(3)
12     COMMON/ASSE/NSYM,NKG,NKE,NDLE
13     COMMON/RGDT/IEL,ITPE,ITPE1,IGRE,IDLE,ICE,IPRNE,IPREE,INEL,IDEG,
14     1IPG,ICODE,IDLE0,INELO,IPGO
15     COMMON/RGD/INEU,INEP,INEG
16     COMMON/ES/M,MR,MP,MLUN(10)
17     DIMENSION VKE(1),VFE(1),VCORE(1),VPRNE(1),VPREE(1),VDLE(1)
18     DIMENSION VKPG( 6),VCPG(3)
19     DIMENSION KORG(24)
20     DIMENSION VXNEU(12)
21     C..... DEFINITION DE L ELEMENT
22     DIMENSION VMIU(18),VNIKU(18),VNIEU(18)
23     C----- ENTREE DES DONNEES POUR LE VECTEUR KORG
24     DATA KORG/1,3,5,7,9,11,2,4,6,8,10,12,12*0/
25     DATA INEU0/6/,INEG0/6/
26     C--- ICON EST UN DRAPEAU INDICANT S'IL Y A DES C.L. A CALCULER
27     C    COORDONNEES DES P.G.
28     DATA VKPG/+0.1666666666666666D0,+0.1666666666666666D0,
29     1      +0.6666666666666666D0,+0.1666666666666666D0,
30     2      +0.1666666666666666D0,+0.6666666666666666D0/
31     C    POIDS DES P.G.
32     DATAVCPG/.1666666666666666D0,.1666666666666666D0,.1666666666666666D0/
33     C
34     GO TO (100,200,300,300,300,300)ICODE
35     C-----RETOUR DES PARAMETRES
36     100  IDLE0=12
37         INELO=6
38         IPGO=3
39         INEU=INEU0
40         INEG=INEG0
41         RETURN
42     C--- CALCUL DES FONCTIONS D'INTERPOLATION
43     200  IPG=IPGO
44         I1=1
45         DO 101 IG=1,IPG
46             JG=NDIM*(IG-1)+1
47             CALL NIO4(VKPG(JG),0,VNIU(I1))
48             CALL NIO4(VKPG(JG),1,VNIKU(I1))
49             CALL NIO4(VKPG(JG),2,VNIEU(I1))
50             IF(M.GE.3)WRITE(MP,2062)(VNIU(I),I=1,6),(VNIKU(I),I=1,6),(VNIEU(I)
51             1,I=1,6)
52     2062 FORMAT(' VNIU',5X,6E12.5/,' VNIKU',5X,6E12.5/,' VNIEU',5X,6E12.5/)
53     101  I1=I1+INEU
54         RETURN
55     C-----CALCUL DU RESIDU SI ICODE=6(INAV=1)

```

```

56 C-----CALCUL DE RIGIDITE SI ICODE=4(INAV=2)
57 300 CALL KE04(VCORE,VCPG,VPRNE,VPREE,UNIU,UNIP,UNIKU,UNIKP,UNIEU,
58 1VNIEP,VKE,VFE,KORG,VDLE)
59 RETURN
60 END
61 SUBROUTINE KE04(VCORE,VCPG,VPRNE,VPREE,UNIU,UNIP,UNIKU,UNIKP,UNIEU
62 1,VNIEP,VKE01,VFE01,KORG,VDLE)
63 C=====
64 C SOUS-PROGRAMME DE CALCUL DE LA RIGIDITE D'UN ELEMENT TRIANGULAIRE
65 C QUADRATIQUE , POUR UN PROBLEME D'ECOULEMENT BIPHASIQUE AIR-EAU
66 C
67 C--- ICODE.EQ.6 , LE CALCUL DU RESIDU ; R = K(U).U - F
68 C LE SIGNE DU RESIDU EST CHANGE DANS NLIN
69 C--- ICODE.EQ.4 , LE CALCUL DE K(U) DE NEWTON-RAPHSON
70 C
71 C=====
72 IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
73 COMMON/COORD/NDIM,NNT,NDLN,NDLT,FAC(3)
74 COMMON/RGDT/IEL,ITPE,ITPE1,IGRE,IDLE,ICE,IPRNE,IPREE,INEL,IDEG,
75 1 IPG,ICODE,IDLE0,INEL0,IPG0
76 COMMON/RGD/INEU,INEP,INEG
77 COMMON/NLIN/EPDL,XNORM,OMEGA,XPAS,DPAS
78 COMMON/ES/M,MR,MP,MLUN(10)
79 DIMENSION K1(3),K2(3),K3(3),V1(3)
80 DIMENSION VCPG(1),VDLE(1)
81 DIMENSION VJ(2,2),VKE01(IDLE, IDLE) ,VFE01(1),VKE(30,30),VFE(30)
82 DIMENSION VKINV(6,6)
83 DIMENSION UNIXU(12),UNIYU(12),UNIXP(12),UNIYP(12)
84 DIMENSION UNIU(1),UNIKU(1),UNIEU(1)
85 DIMENSION VCORE(1),VPRNE(1),VPREE(1),KORG(1)
86 DIMENSION VUE(11), VVE(11)
87 DIMENSION VNIK(6),VNIE(6)
88 DIMENSION VXNEU(12)
89 DIMENSION ILIM(16)
90 DATA VXNEU/0.00 ,0.00,0.500,0.000,1.000,0.000,0.500,0.500,0.000,
91 1 1.000,0.000,0.500/
92 DATA ILIM/16*0/
93 DATA ZERO/0.00/
94 DATA IEL1/1/
95 IF(IEL.NE.IEL1) GO TO 20
96 IEL1=IEL1+1
97 14 CONTINUE
98 C--- CALCUL DES VITESSES AUX NOEUDS
99 IF(M.GE.3) WRITE(MP,2014)
100 2014 FORMAT( ' VITESSES DE L AIR AUX NOEUDS'/)
101 DO 15 IN=1,INEU
102 INE=2*IN-1
103 VUE(IN)=VPRNE(INE)
104 VVE(IN)=VPRNE(INE+1)
105 IF(M.GE.3)WRITE(MP,2013)VUE(IN),VVE(IN)
106 2013 FORMAT(4X,' U=',F10.3,4X,' V=',F10.3)
107 15 CONTINUE
108 DO 16 I=1,INEU
109 I1=I+INEU
110 I1=KORG(I)

```

```

111      III=KORG(I1)
112      VDLE(II)=VUE(I)
113  16   VDLE(III)=VUE(I)
114      GO TO 35
115  C---- CALCUL DES VITESSES A CHAQUE ITERATION
116  20   DO 33 I=1,INEU
117      II=I+INEU
118      II=KORG(I)
119      III=KORG(II)
120      VUE(I)=VDLE(II)
121  33   VVE(I)=VDLE(III)
122      IF(M.EB.3)WRITE(MP,2060)((VUE(I),I=1,INEU),(VVE(I),I=1,INEU)
123  2060  FORMAT('/ VITESSES AUX NOEUDS DE L ELEMENO'/(1X,10E12.4))
124  35   CONTINUE
125  C---- VERIFICATION DES NOEUDS OU UN TERME DE SOLLICITATION DOIT ETRE CAL.
126      DO 10 I=1,IDLEO
127      VFE(I)=ZERO
128  10   CONTINUE
129  32   CONTINUE
130  C----- INITIALISER LA RIGIDITE
131      DO 30 I=1,IDLEO
132      DO 30 J=1,IDLEO
133  30   VKE(I,J)=ZERO
134  C---- BOUCLE SUR LES POINTS DE GAUSS
135      DO 100 IG=1,IPG
136  C----- INITIALISATION DES COEFFICIENTS NON-LINEAIRES
137      COEFU=ZERO
138      COEFV=ZERO
139      COEFXU=ZERO
140      COEFYU=ZERO
141      COEFXV=ZERO
142      COEFYV=ZERO
143  C---- CALCUL DU JACOBIEN- EN DEUX DIMENSIONS
144      DO 40 I=1,2
145      DO 40 J=1,2
146  40   VJ(I,J)=ZERO
147      DO 50 IN=1,INEG
148      ING=(IG-1)*INEG+IN
149      VJ(1,1)=VJ(1,1)+VNIKU(ING)*VCORE(2*IN-1)
150      VJ(1,2)=VJ(1,2)+VNIKU(ING)*VCORE(2*IN)
151      VJ(2,1)=VJ(2,1)+VNIEU(ING)*VCORE(2*IN-1)
152  50   VJ(2,2)=VJ(2,2)+VNIEU(ING)*VCORE(2*IN)
153  C---- INVERSION DU JACOBIEN
154      DETJ=VJ(1,1)*VJ(2,2)-VJ(1,2)*VJ(2,1)
155      IF(DETJ.EB.ZERO)WRITE(MP,2015)
156  2015  FORMAT('*** ERREUR, JACOBIEN SINGULIER')
157      A1=VJ(1,1)
158      VJ(1,1)=VJ(2,2)/DETJ
159      VJ(1,2)=-VJ(1,2)/DETJ
160      VJ(2,1)=-VJ(2,1)/DETJ
161      VJ(2,2)=A1/DETJ
162  C---- COEFFICIENTS NECESSAIRES AU CALCUL DES TERMES DE CONVECTION
163      DO 63 IN=1,INEU
164      INU=(IG-1)*INEU+IN
165      COEFU=COEFU+VNIU(INU)*VUE(IN)

```

```

166 63 COEFV=COEFV+VNIU(INU)*VVE(IN)
167 66 CONTINUE
168 C----- CALCUL DES D(NI)/D(X)
169 DO 61 IN=1,INEU
170 INU=(IG-1)*INEU+IN
171 VNIXU(IN)=VJ(1,1)*VNIKU(INU)+VJ(1,2)*VNIEU(INU)
172 61 VNIYU(IN)=VJ(2,1)*VNIKU(INU)+VJ(2,2)*VNIEU(INU)
173 IF(M.GE.3) WRITE(MP,2050) (VNIXU(I),I=1,6),(VNIYU(I),I=1,6)
174 2050 FORMAT(' VNIXP',5X,6E12.5/' VNIYP',5X,6E12.5/)
175 C----- CALCUL DE UA ET VA
176 UA=ZERO
177 VA=ZERO
178 DO 60 IN=1,INEG
179 INE=(2*IN-1)
180 INU=(IG-1)*INEG+IN
181 UA=UA+VNIU(INU)*VPRNE(INE)
182 60 VA=VA+VNIU(INU)*VPRNE(INE+1)
183 IF(M.GE.3)WRITE(MP,2012)UA,VA
184 2012 FORMAT(' VITESSES AIR-PTS DE GAUSS', 'UA=',F10.3,4X, 'VA=',F10.3)
185 C--- CALCUL DE LA DISTANDE RADIALE DU PT DE GAUSS,S'IL Y A
186 C CALCUL DES FORCES ELECTRIQUES(IVO=1)
187 IVO=0
188 IF(IVO.EQ.0)GO TO 82
189 C-- INITIALISATION
190 XX=ZERO
191 YY=ZERO
192 C-- CALCUL DE X ET Y
193 DO 81 IN=1,INEG
194 ING=(IG-1)*INEG+IN
195 XX=XX+VNIU(ING)*VCORE(2*IN-1)
196 81 YY=YY+VNIU(ING)*VCORE(2*IN)
197 C-- CALCUL DE LA DISTANCE RADIALE
198 THETA=DATAN2(YY,XX)
199 RA=DSQRT(XX**2+YY**2)
200 82 CONTINUE
201 IF(ICODE.NE.4) GO TO 62
202 C--- COEFFICIENTS NECESSAIRES A LA MATRICE DE NEWTON RAPHSON
203 DO 64 I=1,INEU
204 COEFXU=COEFXU+VNIXU(I)*VUE(I)
205 COEFYU=COEFYU+VNIYU(I)*VUE(I)
206 COEFXV=COEFXV+VNIXU(I)*VVE(I)
207 64 COEFYV=COEFYV+VNIYU(I)*VVE(I)
208 62 CONTINUE
209 IF(M.GE.3)WRITE(MP,2051)COEFU,COEFV,COEFXU,COEFYU,COEFXV,COEFYV
210 2051 FORMAT(5X,' COEFFICIENT N.S.',6E12.4)
211 C----- COEFFICIENT MULTIPLICATIF
212 DO 65 I=1,3
213 65 V1(I)=VPREE(I)
214 C--- LA TROISIEME PROPRIETE ELEMENTAIRE VPREE(I) EST
215 C LE PARAMETRE POUR LA GRAVITE (LG/UO**2)
216 C
217 XNG=V1(3)
218 C-- LE PARAMETRE K EST DONNE PAR LE PARAMETRE DE CHARGEMENT XPAS
219 XK=XPAS
220 XPHI=V1(2)

```

```

221      XR=DSQRT(XPHI*XK)
222      RR=XR*DSQRT((COEFU-UA)**2+(COEFV-VA)**2)
223      CALL CDRAG(RR,XR,XK,XPHI,CDX,CDY,COEFU,UA,COEFV,VA)
224  C--- ON UTILISE LES PROPRIETES K,RU,PHI DE L'EQUATION 25
225      IF(M.GE.3)WRITE(MP,2037)XK,XPHI,XR,RR,CDX
226 2037  FORMAT(1X,' XK=',E14.3,' XPHI=',E14.3,' XR',E14.3,' RR=',E14.3,' CD',
227      1 E14.3)
228      COEF1=DETJ*VCPG(IG)*XK
229      COEF2X=DETJ*VCPG(IG)*CDX
230      COEF2Y=DETJ*VCPG(IG)*CDY
231      COEF3X=DETJ*VCPG(IG)*XNE*DCOS(THETA)
232      COEF3Y=DETJ*VCPG(IG)*XNE*DSIN(THETA)
233  C----- CALCUL DE LA FORCE ELECTRIQUE S'IL Y A LIEU
234      IF(IVG.EB.1)CALL MELEC(VPREE(4),XK,XPHI,XNE)
235  C
236  C----- TERMES DE RIGIDITE
237      DO 90 I=1,INEU
238      IU=(IG-1)*INEU+I
239      II=KORG(I)
240      I1=I+INEU
241      I11=KORG(I1)
242      I2=I1+INEU
243      I12=KORG(I2)
244      IF(ICODE.EB.4) GO TO 71
245      VFE(II)=VFE(II)+(COEF2X*UA+COEF3X)*VNIU(IU)
246      VFE(I11)=VFE(I11)+(-XNG*XK+COEF2Y*VA+COEF3Y)*VNIU(IU)
247      IF(I.EB.1.AND.IEL.EB.17)WRITE(MP,2040)XNG,XK
248 2040  FORMAT(2F10.5)
249 71    CONTINUE
250      DO 70 J=1,INEU
251      JU=(IG-1)*INEU+J
252      JJ=KORG(J)
253      J1=J+INEU
254      JJ1=KORG(J1)
255      VKE(II,JJ)=VKE(II,JJ)
256      1 + COEF2X*VNIU(IU)*VNIU(JJ)
257      2+(VNIU(IU)*VNIU(JJ)*COEFU+VNIU(IU)*VNIU(JJ)*COEFV)*COEF1
258      3 +VNIU(IU)*VNIU(JJ)*COEFX*COEF1
259      VKE(I11,JJ1)=VKE(I11,JJ1)
260      1 + COEF2Y*VNIU(IU)*VNIU(JJ)
261      2+(VNIU(IU)*VNIU(JJ)*COEFU+VNIU(IU)*VNIU(JJ)*COEFV)*COEF1
262      3 +VNIU(IU)*VNIU(JJ)*COEFY*COEF1
263      VKE(II,JJ1)=VKE(II,JJ1)+VNIU(IU)*VNIU(JJ)*COEFY*COEF1
264      VKE(I11,JJ)=VKE(I11,JJ)+VNIU(IU)*VNIU(JJ)*COEFX*COEF1
265 70    CONTINUE
266 90    CONTINUE
267 100   CONTINUE
268  C--- APRES LE CALCUL DE VFE ON INCLUS
269      IF(ICODE.EB.4)GO TO 131
270  C---- CALCUL DU RESIDU
271      DO 78 I=1,IDLE
272      C=ZERO
273      DO 79 J=1,IDLE
274 79    C=C+VKE(I,J)*VDLE(J)
275 78    VFE(I)=C-VFE(I)

```

```

276         IF(M.EB.3)WRITE(MP,2030)(VFE(I),I=1,IDLE)
277 2030  FORMAT('/ VECTEUR RESIDU'/(1X,10 E12.5))
278 C--- POUR LA METHODE D'ITERATIONS (INAV.EB.3) ON NE CALCULE PAS LES
279 C-- TERMES DE NEWTON-RAPHSON
280         DO 130 I=1,IDLE
281 130    VFE01(I)=VFE(I)
282         RETURN
283 131    DO 120 I=1,IDLE
284         DO 120 J=1,IDLE
285 120    VKE01(I,J)=VKE(I,J)
286         RETURN
287         END
288         SUBROUTINE CDRAG(RR,XR,XK,XPHI,CDX,CDY,COEFU,UA,COEFV,VA)
289 C=====
290 C     SOUS-ROUTINE QUI EVALUE LE COEFFICIENT DE TRAINEE
291 C     D'APRES DIFFERENTS MODELE ..
292 C
293 C     ICDRAG = 0  MODELE DE LANGMUIR GOLDSTEIN
294 C     ICDRAG = 1  MODELE DE BEARD ET PRUPPACHER
295 C
296 C     ENTREES :  RR = NB DE REYNOLDS POUR LES GOUTTELETTES
297 C                XR = NB DE REYNOLDS POUR L'ECOULEMENT D'AIR
298 C                XK = PARAMETRE D'INERTIE
299 C                XPHI = PARAMETRE PHI ,FONCTION DE XK ET XR
300 C
301 C     SORTIES ;  CDX,CDY = LES COMPOSANTES DU COEFFICIENT DE TRAINEE
302 C                CES COMPOSANTES SONT SCALAIRES , DONC EGALES
303 C
304 C     UA ET VA SONT LES COMPOSANTES DE LA VITESSE DE L'AIR
305 C     COEFU ET COEFV SONT LES COMPOSANTES DE LA VITESSE DE LA
306 C     GOUTTELETTE
307 C
308 C=====
309         IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
310         COMMON/ES/M,MR,MP
311         DATA ZERO/0.DO/
312 C--- ON CHANGE ICDRAG POUR LE CHANGEMENT DE MODELE DE FROTTEMENT
313 C
314         ICDRAG=1
315 C
316 C     AIGUILLAGE SELON LE CHOIX DE MODELE
317         IF(ICDRAG)20,20,30
318 20    CONTINUE
319 C     EQUATION POUR LE MODELE DE LANGMUIR-GOLDSTEIN
320         CD=1.DO+0.197DO*RR**0.63DO+2.6D-04*RR**1.38DO
321         CDX=CD
322         CDY=CD
323         GO TO 40
324 30    CONTINUE
325 C     MODELE DE BEARD ET PRUPPACHER
326         IF(RR.LT.1.5DO) GO TO 50
327         IF(RR.GE.1.5DO.AND.RR.LE.20.DO) GO TO 60
328         IF(RR.GT.20.DO.AND.RR.LT.400.DO) GO TO 70
329         IF(M.GT.3) WRITE(MP,1000)
330 1000  FORMAT(' NO DE REYNOLDS DES GOUTTELETTES SUPERIEUR A 400')

```

```

331      GO TO 20
332  50   CDX=1.D0+0.102D0*RR**0.995D0
333      CDY=CDX
334      GO TO 90
335  60   CDX=1.D0+0.115D0*RR**0.802D0
336      CDY=CDX
337      GO TO 90
338  70   CDX=1.0D0+0.189D0*RR**0.632D0
339      CDY=CDX
340  90   CONTINUE
341  40   IF(INITCD.EB.1) GO TO 80
342      DATA INITCD/0/
343      INITCD=1
344      WRITE(MP,2000)ICDRAG,XR,XK,XPHI
345  2000 FORMAT( ' NO MODELE =',I5,'NB REYNOLDS=',F10.3,'NB K=',F10.3,
346      1 'NB PHI=',F10.3/)
347  80   CONTINUE
348      RETURN
349      END
350      SUBROUTINE NELEC(VELEC,XK,XPHI,XNE)
351  C=====
352  C
353  C   SOUS-PROGRAMME POUR LE CALCUL DE LA FORCE SUR
354  C   LA GOUTTELETTE DUE A UN CHAMPS ELECTRIQUE E
355  C
356  C   VELEC = V0/C0
357  C   XK = K ; PARAMETRE D'INERTIE
358  C   XPHI = PHI PARAMETRE SANS DIMENSION ,IND. DE A
359  C
360  C=====
361      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
362      COMMON/XINT/VVIT,VB,VRR,VM,VDSTE,VDSTG,VTEMP,PHI
363      DIMENSION VB(17)
364      VVISA=1.7152D-5+5.0343D-8*VTEMP
365  C   RAYON D'UNE GOUTTELETES RAYA
366      RAYA=DSQRT(9*VVISA*VRR*XK/(2*VDSTE*VVIT))
367  C--  CONSTANTES POUR LA FORCE ELECTRIQUE
368      PERMR=1.
369      PERMO=1.
370      VELEC=0.
371  C--  CALCUL DE LA FORCE ELECTRIQUE
372      XPER=2*PERMR*PERMO/(2+PERMR)
373      XNE=RAYA*VELEC**2/(VVISA*VVIT*VRR**2)
374      RETURN
375      END
376      SUBROUTINE NI04(VX,IDER,UNI)
377  C=====
378  C   SOUS-PROGRAMME DE CALCUL DES FONCTIONS D'INTERPOLATION, POUR
379  C   UN TRIANGLE QUADRATIQUE ISOPARAMETRIQUE
380  C
381  C   IDER = 0  CALCUL DES FONCTIONS
382  C   IDER = 1  CALCUL DE LA DERIVEE SELON XSI
383  C   IDER = 2  CALCUL DE LA DERIVEE SELON ETA
384  C
385  C=====

```



```
386      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
387      DIMENSION VX(1),VNI(6)
388      DATA ZERO/0.000/,UN/1.000/,TROIS/3.000/,QUATRE/4.000/,HUIT/8.000/
389      DATA DEUX/2.000/
390      X=VX(1)
391      Y=VX(2)
392      I=IDER+1
393      GO TO (10,20,30),I
394  10    VNI(1)=UN-TROIS*(X+Y)+DEUX*(X*X+DEUX*X*Y+Y*Y)
395      VNI(2)=QUATRE*X*(UN-X-Y)
396      VNI(3)=X*(DEUX*X-UN)
397      VNI(4)=QUATRE*X*Y
398      VNI(5)=Y*(DEUX*Y-UN)
399      VNI(6)=QUATRE*Y*(UN-X-Y)
400      RETURN
401  20    VNI(1)=-TROIS+QUATRE*(X+Y)
402      VNI(2)=QUATRE-HUIT*X-QUATRE*Y
403      VNI(3)=-UN+QUATRE*X
404      VNI(4)=QUATRE*Y
405      VNI(5)=ZERO
406      VNI(6)=-QUATRE*Y
407      RETURN
408  30    VNI(1)=-TROIS+QUATRE*(X+Y)
409      VNI(2)=-QUATRE*X
410      VNI(3)=ZERO
411      VNI(4)=QUATRE*X
412      VNI(5)=-UN+QUATRE*Y
413      VNI(6)=QUATRE-HUIT*Y-QUATRE*X
414      RETURN
415      END
```

## EEPTADG.FOR

```

1      SUBROUTINE BLPOST
2      C=====
3      C   SOUS-PROGRAMME D'APPEL DU BLOC 'POST'
4      C=====
5      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
6      COMMON/ES/M,MR,MP,M1,M2,M3,M4,M5
7      COMMON/ALLOC/NVA,IVA,IVAMAX,NREEL,NTBL          BLOC 20
8      COMMON/LOC/LCORG,LDLNC,LNEQ,LDIMP,LPRNG,LPREG,LLD,LLOCE,LCORE,LNE,BLOC 21
9      1  LPRNE,LPREE,LDLE,LKE,LFE,LKGS,LKGD,LKGI,LEG,LRES,LDLG,LME,    BLOC 22
10     2  LDLEO,LDLGO,LEGO          BLOC 23
11     COMMON/NLIN/EPDDL,XNORM,OMEGA,XPAS,DPAS,DPASO,NPAS,IPAS,NITER,    BLOC 16
12     1  ITER,IMETH          BLOC 17
13     COMMON VA(1)
14     WRITE(MP,2000)
15     2000 FORMAT ('/' BLOC POST-TRAITEMENT '/' ' ',20('=')/)
16     WRITE(MP,2001)XPAS
17     2001 FORMAT('/',' K= ',F10.3)
18     CALL EXPOST(VA(LDLNC),VA(LCORG),VA(LDIMP),VA(LDLG),VA(LNEQ))
19     RETURN
20     END
21     SUBROUTINE EXPOST(KDLNC,VCORG,VDIMP,VEG,KNEQ)
22     C=====
23     C
24     C   SOUS-PROGRAMME POST-TRAITEMENT
25     C   POUR LE PROBLEME DU CALCUL DE COEFFICIENT DE CAPTATION
26     C   CALCULE LA CAPTATION A LA SURFACE DE L'OBJET
27     C   EN FONCTION DES VITESSES DE L'EAU A LA SURFACE DE L'OBJET
28     C
29     C=====
30     IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
31     COMMON/COOR/NDIM,NNT,NDLN,NDLT,FAC(3)
32     COMMON/ES/M,MR,MP,M1,M2,M3,M4,M5
33     COMMON/ALLOC/NVA,IVA,IVAMAX,NREEL,NTBL          BLOC 20
34     COMMON/LOC/LCORG,LDLNC,LNEQ,LDIMP,LPRNG,LPREG,LLD,LLOCE,LCORE,LNE,BLOC 21
35     1  LPRNE,LPREE,LDLE,LKE,LFE,LKGS,LKGD,LKGI,LEG,LRES,LDLG,LME,    BLOC 22
36     2  LDLEO,LDLGO,LEGO          BLOC 23
37     COMMON/NLIN/EPDDL,XNORM,OMEGA,XPAS,DPAS,DPASO,NPAS,IPAS,NITER,    BLOC 16
38     1  ITER,IMETH          BLOC 17
39     COMMON/COND/NCLT,NCLZ,NCLNZ
40     COMMON VA(1)
41     DIMENSION KDLNC(1),VCORG(1),VDIMP(1),VEG(1),KNEQ(1),KLIM(24)
42     DIMENSION K1(3),X(3),Y(3),U(3),V(3),BBN(17),VDLG(34)
43     DATA ZERO/0.D0/,DEUX/2.D0/
44     C----- SUR M4 LECTURE DES VITESSES DE L'EAU A CHAQUE NOEUDS ET POUR TOUS LES CHARGEMENTS
45     C--- NPLIM = NOMBRE DE POINTS AUX LIMITES- IMPAIR
46     C*****BOUCLE SUR CHAQUE CHARGEMENT DONT LES VITESSES DE L'EAU
47     C   SONT TOUTES CALCULEES DANS EXNLIN
48     REWIND M4
49     DO 90 KKK=1,IPAS
50     IF(NNT.EQ.63)NPLIM=9
51     IF(NNT.EQ.119)NPLIM=17
52     READ(M4) (VDLG(I), I=1,(NPLIM*2))
53     DO 50 I=1,NPLIM
54     50  BBN(I)=ZERO
55     C   DEBUT DU CALCUL PAR QUADRAN

```

```

56 C 'IA' CONTROLE LE QUADRANT
57 C IA=0 QUADRANT 111
58 C IA=1 QUADRANT 1111
59 IA=0
60 100 CONTINUE
61 IM=0
62 C--- DATA NO DES POINTS AUX LIMITES
63 C---- CETTE BOUCLE EST DECCROISSANTE
64 IK=0
65 IF(IA.EQ.0)THEN
66 B=9
67 C=1
68 D=-1
69 ENDIF
70 IF(IA.EQ.1)THEN
71 B=9
72 C=17
73 D=1
74 ENDIF
75 DO 47 I=B,C,D
76 IK=IK+1
77 KLIM(IK)=I
78 47 CONTINUE
79 C III=(NPLIM-1)/2
80 III=4
81 C--- BOUCLE POUR PRENDRE TROIS POINTS DE LA LIMITE A LA FOIS
82 C--- INITIATION:CCAPT=COEFFICIENT DE CAPTATION
83 CCAPT=ZERO
84 IF(M.GE.1)WRITE(MP,2000)
85 DO 10 I2=1,III
86 2000 FORMAT(/15X,' **SOUS PROGRAMME COEFFICIENT DE CAPTATION**'/)
87 C--- K1(1),K1(2) ETC SONT LES NUMEROS DES NOEUDS
88 I4=2*I2-2
89 C---- BOUCLE POUR IDENTIFIER LES 3 NOEUDS UTILISES.EX:(9,8,7),(7,6,5),(5,...)
90 DO 20 I3=1,3
91 20 K1(I3)=KLIM(I4+I3)
92 DO 30 I5=1,3
93 I6=K1(I5)*2
94 X(I5)=VCORG(I6-1)
95 Y(I5)=VCORG(I6 )
96 30 IF(M.GE.3)WRITE(MP,2100)K1(I5),X(I5),Y(I5)
97 2100 FORMAT(' NO NOEUD=',I5,'X=',F10.3,'Y=',F10.3)
98 C--- PARTIE APPLICABLE AUX PROBLEMES A 2 D.L. PAR NOEUD
99 DO 40 I7=1,3
100 J=K1(I7)*2-1
101 JJ=KNEB(J)
102 IF(JJ.GT.ZERO)GO TO 51
103 IF(JJ.GT.-NCLNZ)GO TO 31
104 U(I7)=ZERO
105 GO TO 61
106 31 U(I7)=VDIMP(-JJ)
107 GO TO 61
108 51 U(I7)=VDLG(JJ)
109 GO TO 61
110 61 J=J+1

```

```

111      JJ=KNEQ(J)
112      IF(JJ.GT.ZERO) GO TO 52
113      IF(JJ.GT.-NCLNZ)GO TO 32
114      V(I7)=ZERO
115      GO TO 62
116  32   V(I7)=VDIMP(-JJ)
117      GO TO 62
118  52   V(I7)=VDLG(JJ)
119      GO TO 62
120  62   CONTINUE
121      WRITE(MP,3027)K1(I7),X(I7),Y(I7),U(I7),V(I7)
122  3027  FORMAT(1X,'NO=',I5,2X,'X=',F10.3,2X,'Y=',F10.3,2X,'U=',F10.3,2X,'V
123      1=',F10.3)
124  C---LA BOUCLE 40 COMPLETE UN TRIANGLE
125  40   CONTINUE
126  C--- APPEL DU SOUS PROGRAMME POUR L'INTEGRATION DE LA CAPTATION LOCALE
127      CALL PTING(X,Y,U,V,K1,XTHE,CCAPT,BB,IM,BBN,NPLIM,IA)
128      IF(IM.EQ.1) GO TO 84
129  C--- LA BOUCLE 10 COMPLETE LES ELEMENTS LIMITES
130  10   CONTINUE
131  84   CONTINUE
132  C-----SOMMER DEUX FOIS LE DERNIER BETA POUR LA DIVISION PAR DEUX
133      II=K1(3)
134      BBN(II)=BBN(II)+BB
135  C--- ECRITURE DE LA CAPTATION AUX NOEUDS
136      DO 60 I=B,C,D
137  C--- DIVISION DE TOUTES LES DOUBLES VALEURS DE BETA PAR DEUX
138      BBN(I)=BBN(I)/DEUX
139      IF(BBN(I).LT.ZERO) BBN(I)=ZERO
140  60   CONTINUE
141      IF (IA.EQ.1)THEN
142      CCAPT=(CCAPTO+CCAPT)/DEUX
143      WRITE(MP,2599)CCAPT
144  2599  FORMAT(F10.5)
145      WRITE(MP,2600)(BBN(I),I=1,NPLIM)
146  2600  FORMAT(9(F12.5))
147      WRITE(MP,2200)DPAS,(BBN(I),I=1,NPLIM)
148  2200  FORMAT(1X,F10.3,9(E13.5))
149      WRITE(M2,2210)(BBN(I),I=1,NPLIM)
150  2210  FORMAT(<NPLIM>F7.4)
151      ENDIF
152      IF(IA.EQ.0)THEN
153      IA=1
154      CCAPTO=CCAPT
155      GO TO 100
156      ENDIF
157      WRITE(M5,2433)CCAPT
158  2433  FORMAT(F14.5)
159      WRITE(MP,2435)XTHE,CCAPT
160  2435  FORMAT(4X,'ANGLE DU DERNIER POINT CALCULE= ',E14.5/,
161      1 'COEF. TOTAL DE CAPTATION = ',E14.5/)
162  90   CONTINUE
163  C***FIN DE LA BOUCLE SUR LES CHARGEMENTS***
164      REWIND M2
165      DD 2701 IJ=1,IPAS

```

```

166      READ(M2,2702)(BBN(J),J=1,NPLIM)
167      WRITE(MP,2702)(BBN(J),J=1,NPLIM)
168      2702 FORMAT(<NPLIM>E7.4)
169      2701 CONTINUE
170      RETURN
171      END
172      SUBROUTINE PTING(X,Y,U,V,K1,XTHE,CCAPT,BB,IM,BBN,NPLIM,IA)
173      C=====
174      C
175      C      SOUS-PROGRAMME D'INTEGRATION DE LA CAPTATION LOCALE
176      C      POUR OBTENIR LE COEFFICIENT DE CAPTATION TOTAL
177      C
178      C=====
179      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
180      COMMON/ES/M,MR,MP,M1,M2,M3,M4,M5
181      DIMENSION X(1),Y(1),U(1),V(1),K1(1),BBN(1)
182      DIMENSION VNI(3),VNIE(3)
183      DATA ZERO/0.D0/,UN/1.D0/,DEUX/2.D0/
184      DATA PTDEUX/.02D0/,PTNEUF/-.99D0/,IPT/100/
185      DATA PI/3.141592653589793D0/
186      C--- INITIALISATION
187      INITB=1
188      XX=PTNEUF
189      DE=PTDEUX
190      C--  INITIALISATION DU DRAPEAU POUR L'ANGLE MAXIMUM
191      IM1=0
192      C--- DEBUT DE LA BOUCLE D'INTEGRATION
193      DO 70 I5=1,IPT
194      C--- FONCTIONS D'INTERPOLATION
195      VNI(1)=XX*(XX-UN)/DEUX
196      VNI(2)=(UN+XX)*(UN-XX)
197      VNI(3)=XX*(XX+UN)/DEUX
198      VNIE(1)=XX-UN/DEUX
199      VNIE(2)=-DEUX*XX
200      VNIE(3)=XX+UN/DEUX
201      C--- EVALUATION DES VITESSES AUX POINTS D'INTEGRATION
202      UU=ZERO
203      VV=ZERO
204      DO 71 I1=1,3
205      UU=UU+VNI(I1)*U(I1)
206      71  VV=VV+VNI(I1)*V(I1)
207      VNORM=DSQRT(UU**2+VV**2)
208      IF(UU.EQ.ZERO)WRITE(MP,3100)
209      3100 FORMAT( ' ERREUR. DIVISION PAR ZERO ARCTAN' )
210      VANG=DATAN2(VV,UU)
211      IF(IA.EQ.1)THEN
212      VANG=ABS(VANG)
213      ENDIF
214      IF(M.GE.3)WRITE(MP,2410)UU,VV,VNORM,VANG
215      2410 FORMAT( ' VITESSES -',4E14.3)
216      C---- EVALUATION ELEMENT DE SURFACE ET ANGLE
217      XXX=ZERO
218      YYY=ZERO
219      DXDE=ZERO
220      DYDE=ZERO

```

```

221      DO 72 I1=1.3
222      XXX=XXX+VNI(I1)*X(I1)
223      YYY=YYY+VNI(I1)*Y(I1)
224      DXDE=DXDE+VNI(I1)*X(I1)
225  72   DYDE=DYDE+VNI(I1)*Y(I1)
226      DLE=DSQRT(DXDE**2+DYDE**2)*DE
227      IF(DXDE.EQ.ZERO)WRITE(MP,3100)
228      XTHE=PI-ABS(DATAN2(YYY,XXX))
229      DTHE=DATAN2(DYDE,DXDE)
230      DTHE=ABS(DTHE)
231      PTHE=PI/DEUX-DTHE
232      IF(M.GE.3) WRITE(MP,2415)DXDE,DYDE,DLE,XTHE,DTHE,PTHE
233  2415  FORMAT( ' LONG.ET ANGLES :',6E12.6)
234  C---- VERIFICATION SI ON A ATTEINT L'ANGLE MAX. DE CAPTATION
235      IF(VANG.GE.DTHE)THEN
236      IM=1
237      IF(IM1.EQ.0)WRITE(MP,1000)XTHE
238  1000  FORMAT(4X,'ANGLE MAX. DE CAPTATION= ',E14.5/)
239      IM1=1
240      ENDIF
241      BB=VNORMADCOS(PTHE+VANG)
242  C---- SI BETA EST A L'INTERIEUR DES LIMITES;INTEGRATION POUR
243  C---- CALCULER CCAPT
244      IF(BB.GE.0.)CCAPT=CCAPT+BBADLE
245  C      IF(VANG.LT.DTHE)CCAPT=CCAPT+BBADLE
246  C--- LE CALCUL DE LA CAPTATION LOCALES AUX NOEUDS
247      IF(I5.EQ.1)II=K1(1)
248      IF(I5.EQ.1)BBN(II)=BBN(II)+BB
249      IF(I5.EQ.50.OR.I5.EQ.51)II=K1(2)
250      IF(I5.EQ.50.OR.I5.EQ.51)BBN(II)=BBN(II)+BB
251      IF(I5.EQ.100)II=K1(3)
252      IF(I5.EQ.100)BBN(II)=BBN(II)+BB
253      IF(M.GE.3)WRITE(MP,2025)XTHE,BB,CCAPT
254  2025  FORMAT(4X,'T=',F10.3,4X,'DEDT=',E14.3,'E=',F10.3)
255  C---- ECRIRE BETA INITIAL AU PREMIER PASSAGE
256      IF(IM.NE.0.OR.IA.EQ.1) GO TO 83
257      IM=2
258  C---- SOMMER DEUX FOIS LE PREMIER BETA POUR LA DIVISION PAR DEUX
259      BBN(II)=BBN(II)+BB
260      WRITE(MP,2027)BB
261  2027  FORMAT(1X,/' BETA INITIAL = ',E14.5/)
262  83    XX=XX+DE
263      IF(M.GE.3)WRITE(MP,2420)CCAPT
264  2420  FORMAT( ' CCAPT=',1F10.3)
265  70    CONTINUE
266      IF(M.GE.3)WRITE(MP,2430)XTHE,CCAPT,BB
267  2430  FORMAT( 1X,3E14.3)
268      RETURN
269      END

```

## EFNLGR.FOV

30 Mars 1985 14:19:24

```

1      SUBROUTINE BLNLIN                                BLNL  1
2      C-----BLNL  2
3      C  APPEL DU BLOC 'NLIN'                          BLNL  3
4      C  RESOLUTION D'UN PROBLEME STATIONNAIRE NON LINEAIRE  BLNL  4
5      C-----BLNL  5
6      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)                        BLNL  6
7      REAL*4 TBL                                       BLNL  7
8      COMMON/ELEM/NUL(4),ME                            BLNL  8
9      COMMON/ASSE/NSYM,NKG,NKE,NDLE                   BLNL  9
10     COMMON/RESO/NEQ                                  BLNL 10
11     COMMON/NLIN/EPDDL,XNORM,OMEGA,XPAS,DPAS,DPASO,NPAS,IPAS,NITER, BLNL 11
12     1 ITER,IMETH                                     BLNL 12
13     COMMON/ES/M,MR,MP,M1,M2,M3,M4,M5,M6              BLNL 13
14     COMMON/LOC/LCORG,LDLNC,LNEG,LDIMP,LPRNG,LPREG,LLD,LLOCE,LCORE,LNE, BLNL 14
15     1 LPRNE,LFREE,LDLE,LKE,LFE,LKGS,LKGD,LKGI,LFG,LRES,LDLG,LME  BLNL 15
16     COMMON VA(1)                                     BLNL 16
17     DIMENSION TBL(10),IN(2),XIN(3)                  BLNL 17
18     DATA TBL/4HKGS,4HKGD,4HKGI,4HEG,4HKE,          BLNL 18
19     1 4HFE,4HRES,4HDLE,4HDLG,4HME /                BLNL 19
20     C-----BLNL 20
21     IF(M1.EQ.0) M1=MR                                BLNL 21
22     IF(M2.EQ.0) M2=ME                                BLNL 22
23     WRITE(MP,2000) M                                  BLNL 23
24     2000 FORMAT('' RESOLUTION NON LINEAIRE (M=' ,I2,')'/1X,23('=')) BLNL 24
25     C----- ALLOCATION D'ESPACE                       BLNL 25
26     IF(LKGS.EQ.1) CALL ESPACE(NKG,1,TBL(1),LKGS)    BLNL 26
27     IF(LKGD.EQ.1) CALL ESPACE(NEQ,1,TBL(2),LKGD)    BLNL 27
28     IF(NSYM.EQ.1.AND.LKGI.EQ.1) CALL ESPACE(NKG,1,TBL(3),LKGI)    BLNL 28
29     IF(LFG.EQ.1) CALL ESPACE(NEQ,1,TBL(4),LFG)      BLNL 29
30     IF(LKE.EQ.1) CALL ESPACE(NKE,1,TBL(5),LKE)      BLNL 30
31     IF(LFE.EQ.1) CALL ESPACE(NDLE,1,TBL(6),LFE)     BLNL 31
32     IF(LRES.EQ.1) CALL ESPACE(NEQ,1,TBL(7),LRES)    BLNL 32
33     IF(LDLE.EQ.1) CALL ESPACE(NDLE,1,TBL(8),LDLE)   BLNL 33
34     IF(LDLG.EQ.1) CALL ESPACE(NEQ,1,TBL(9),LDLG)    BLNL 34
35     IF(LME.EQ.1) CALL ESPACE(NKE,1,TBL(10),LME)     BLNL 35
36     C----- EXECUTION DU BLOC                       BLNL 36
37     CALL EXNLIN(VA(LCORG),VA(LDLNC),VA(LDIMP),VA(LNEG),VA(LLD),  BLNL 37
38     1 VA(LLOCE),VA(LCORE),VA(LPRNE),VA(LFREE),VA(LNE),VA(LKE),VA(LME), BLNL 38
39     2 VA(LFE),VA(LDLE),VA(LKGS),VA(LKGD),VA(LKGI),VA(LFG),VA(LRES),  BLNL 39
40     3 VA(LDLG))                                       BLNL 40
41     RETURN                                           BLNL 41
42     END                                              BLNL 42
43     SUBROUTINE EXNLIN(VCORG,KDLNC,VDIMP,KNEQ,KLD,KLOCE,VCORE,VPRNE,  EXNL  1
44     1 VFREE,KNE,VKE,VME,VFE,VDLE,VKGS,VKGD,VKGI,VFG,VRES,VDLG)    EXNL  2
45     C-----EXNL  3
46     C  EXECUTION DU BLOC 'NLIN'                      EXNL  4
47     C  RESOLUTION D'UN PROBLEME STATIONNAIRE NON LINEAIRE  EXNL  5
48     C-----EXNL  6
49     IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)                        EXNL  7
50     COMMON/COORD/NDIM,NNT,NDLN,NDLT
51     COMMON/RESO/NEQ                                  EXNL  8
52     COMMON/COND/NCLT,NCLZ,NCLNZ                      EXNL  9
53     COMMON/ASSE/NSYM                                EXNL 10
54     COMMON/NLIN/EPDDL,XNORM,OMEGA,XPAS,DPAS,DPASO,NPAS,IPAS,NITER,  EXNL 11
55     1 ITER,IMETH                                     EXNL 12

```

```

56      COMMON/ES/M,MR,MP,M1,M2,M3,M4,M5,M6      EXNL 13
57      DIMENSION VCOBG(1),KDLNC(1),VDIMP(1),KNEQ(1),KLD(1),KLOCE(1),      EXNL 14
58      1 VCORE(1),VPRNE(1),VFREE(1),LNE(1),LKE(1),LME(1),LFE(1),LDLE(1),      EXNL 15
59      2 VKGS(1),VKGD(1),VKGI(1),VEG(1),VRES(1),VDLG(1)      EXNL 16
60      DIMENSION VDIMP(60)
61      DIMENSION V(2)
62      DATA ZERO/0.00/      EXNL 17
63      C-----EXNL 18
64      DPAS=ZERO      EXNL 19
65      XPAS=ZERO      EXNL 20
66      IPAS=0      EXNL 21
67      C----- LECTURE DES DEGRES DE LIBERTE INITIAUX SUR LE FICHER M3      EXNL 22
68      IF(M3.EQ.0) GO TO 10      EXNL 23
69      REWIND M3      EXNL 24
70      C READ(M3)(VDLG(I),I=1,NEQ)      EXNL 25
71      C----- LIRE UNE CARTE DEFINISSANT UN ENSEMBLE DE PAS IDENTIQUES      EXNL 26
72      10 READ(M1,1000) DPAS,I1,I2,I3,X1,X2      EXNL 27
73      1000 FORMAT(F10.0,3I5,2F10.0)      EXNL 28
74      IF(DPAS.EQ.ZERO) GO TO 140      EXNL 29
75      IF(I1.GT.0) NPAS=I1      EXNL 30
76      IF(I2.GT.0) NITER=I2      EXNL 31
77      IF(I3.GT.0) IMETH=I3      EXNL 32
78      IF(X1.GT.ZERO) EPSDL=X1      EXNL 33
79      IF(X2.GT.ZERO) OMEGA=X2      EXNL 34
80      C      EXNL 35
81      C----- BOUCLE SUR LES PAS      EXNL 36
82      C      EXNL 37
83      DO 130 IF=1,NPAS      EXNL 38
84      IPAS=IPAS+1      EXNL 39
85      XPAS=XPAS+DPAS      EXNL 40
86      C
87      C A CHAQUE CHARGEMENT,VARIATIONS DES CONDITIONS LIMITES
88      C POUR LA VITESSE SELON Y,QUI EST AFFECTE PAR LA GRAVITE
89      C
90      DO 99 II=2,NCLI.2
91      IF(IPAS.NE.1)GO TO 98
92      VDIMP(II)=VDIMP(II)
93      VDIMP(II-1)=VDIMP(II-1)
94      C VDIMP=U**2/L*G ET VDIMP=K*NG ET NG=GL/VE**2
95      98 VDIMP(II)=(DSQRT(VDIMP(II)**2.000+4.000*XPAS**2.000)-VDIMP(II))/(2.000*XPAS
96      1.000*XPAS)
97      VDIMP(II)=VDIMP(II)*-1.000
98      C VDIMP=K*NG
99      C
100     VDIMP(II-1)=DSQRT(-1.000*(VDIMP(II)**2.000+1.000)
101     VDIMP(II-1)=VDIMP(II-1)*VDIMP(II-1)
102     99 CONTINUE
103     C
104     C
105     WRITE(MP,2000) IPAS,DPAS,XPAS,NITER,IMETH,EPSDL,OMEGA      EXNL 41
106     2000 FORMAT(/IX,13('-'),'PAS NUMERO (IPAS):',I5//      EXNL 42
107     1 14X,'ACCROISSEMENT (DPAS)=' ,E12.5/      EXNL 43
108     2 14X,'NIVEAU TOTAL (XPAS)=' ,E12.5/      EXNL 44
109     3 14X,'NOMBRE D ITERATIONS (NITER)=' ,I12/      EXNL 45
110     4 14X,'METHODE NUMERO (IMETH):',I12/      EXNL 46

```



```

111      5          14X,'PRECISION          (EPSDL)=' ,E12.5/ EXNL 47
112      6          14X,'FACTEUR DE SUR-RELAXATION (OMEGA)=' ,E12.5/ EXNL 48
113      C EXNL 49
114      C----- BOUCLE SUR LES ITERATIONS D'EQUILIBRE EXNL 50
115      C EXNL 51
116      DO 110 ITER=1,NITER EXNL 52
117      C----- CHOIX DE LA METHODE EXNL 53
118      IF(IMETH.GT.3) GO TO 20 EXNL 54
119      C----- METHODES DE TYPE NEWTON EXNL 55
120      CALL NEWTON(VCORG,KDLNC,VDIMP,KNEQ,KLD,KLOCE,VCORE,VPRNE,VPREE, EXNL 56
121      1 KNE,VKE,VME,VFE,VDLE,VKGS,VKGB,VKGI,VEG,VRES,VDLG) EXNL 57
122      GO TO 100 EXNL 58
123      C----- AUTRES METHODES ..... EXNL 59
124      20 CONTINUE EXNL 60
125      WRITE(MP,2010) IMETH EXNL 61
126      2010 FORMAT(' ** ERREUR, METHODE:',I3,' INCONNUE') EXNL 62
127      STOP EXNL 63
128      C----- CALCUL DE LA NORME EXNL 64
129      100 CALL NORME(NEQ,VRES,VDLG,XNORM) EXNL 65
130      IF(M.GT.0) WRITE(MP,2020) ITER,XNORM EXNL 66
131      2020 FORMAT(5X,' ITERATION (ITER):',I3,' NORME (XNORM)=' ,E12.5) EXNL 67
132      IF(M.GE.2) CALL PRSOL(KDLNC,VCORG,VDIMP,KNEQ,VDLG) EXNL 68
133      IF(XNORM.LE.EPSDL) GO TO 120 EXNL 69
134      110 CONTINUE EXNL 70
135      ITER=NITER EXNL 71
136      C----- FIN DU PAS EXNL 72
137      120 DPAS=DPAS EXNL 73
138      WRITE(MP,2030) ITER,NITER EXNL 74
139      2030 FORMAT(/10X,I4,' ITERATIONS EFFECTUEES SUR',I4/) EXNL 75
140      IF(M.GT.2) CALL PRSOL(KDLNC,VCORG,VDIMP,KNEQ,VDLG) EXNL 76
141      130 CONTINUE EXNL 77
142      C----- SAUVEGARDE DE LA SOLUTION SUR FICHIER M4 EXNL 79
143      26 J=1
144      WRITE(M5,28) IPAS,DPAS,XPAS,ITER
145      28 FORMAT(15,2F10.5,15)
146      DO 8 I=1,NNT
147      K=1
148      GO TO 11
149      12 K=2
150      11 JJ=KNEQ(J)
151      IF(JJ)13,14,15
152      13 V(K)=VDIMP(-JJ)
153      GO TO 16
154      14 V(K)=ZERO
155      GO TO 16
156      15 V(K)=VDLG(JJ)
157      16 J=J+1
158      IF(K.EQ.2)GO TO 9
159      GO TO 12
160      9 PHI=SQRT(V(K-1)**2+V(K)**2)
161      8 WRITE(M5,17)I,V(K-1),V(K),PHI
162      17 FORMAT(15,3E12.5)
163      IF(M4.NE.0) WRITE(M4) (VDLG(I),I=1,NEQ) EXNL 80
164      GO TO 10 EXNL 78
165      140 RETURN EXNL 81

```

```

166      END                                                    EXNL 82
167      SUBROUTINE NEWTON(VCORG,KDLNC,VDIMP,KNEQ,KLD,KLOCE,VCORE,VPRNE,
168      1  VPREE,KNE,VKE,VME,VFE,VDLE,VKGS,VKGD,VKGI,VFG,VRES,VDLG)
169      C=====NEWT 3
170      C  ALGORITHME DES METHODES DE TYPE NEWTON-RAPHSON      NEWT 4
171      C  IMETH.EQ.1  CALCUL DE K A CHAQUE ITERATION          NEWT 5
172      C  IMETH.EQ.2  K CONSTANTE                             NEWT 6
173      C  IMETH.EQ.3  K RECALCULEE AU DEBUT DE CHAQUE PAS    NEWT 7
174      C=====NEWT 8
175      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)                                NEWT 9
176      COMMON/ASSE/NSYM,NKG                                    NEWT 10
177      COMMON/RESO/NEQ                                         NEWT 11
178      COMMON/NLIN/EPSDL,XNORM,OMEGA,XPAS,DPAS,DPASO,NPAS,IPAS,NITER,
179      1  ITER,IMETH                                           NEWT 13
180      COMMON/ES/M,MR,MP                                       NEWT 14
181      DIMENSION VCORG(1),KDLNC(1),VDIMP(1),KNEQ(1),KLD(1),KLOCE(1),
182      1  VCORE(1),VPRNE(1),VPREE(1),KNE(1),VKE(1),VME(1),VFE(1),VDLE(1),
183      2  VKGS(1),VKGD(1),VKGI(1),VFG(1),VRES(1),VDLG(1)     NEWT 17
184      DATA ZERO/0.DO/,UN/1.DO/                               NEWT 18
185      C-----NEWT 19
186      C----- DECISION DE REASSEMBLAGE DE LA MATRICE GLOBALE NEWT 20
187      IKT=0                                                    NEWT 21
188      IF(IMETH.EQ.1) GO TO 10                                  NEWT 22
189      IF(IPAS.EQ.1.AND.ITER.EQ.1) GO TO 10                    NEWT 23
190      IF(IMETH.EQ.3.AND.ITER.EQ.1) GO TO 10                  NEWT 24
191      GO TO 20                                                 NEWT 25
192      10  IKT=1                                                NEWT 26
193      C----- INITIALISER A ZERO LA MATRICE GLOBALE SI ON DOIT L'ASSEMBLER NEWT 27
194      20  IF(IKT.EQ.0)GO TO 30                                  NEWT 28
195      CALL INIT(ZERO,NKG,VKGS)                                  NEWT 29
196      CALL INIT(ZERO,NEQ,VKGD)                                  NEWT 30
197      IF(NSYM.EQ.1) CALL INIT(ZERO,NKG,VKGI)                   NEWT 31
198      C----- PLACER LES SOLLICITATIONS DANS LE RESIDU      NEWT 32
199      30  CALL MAJ(XPAS,ZERO,NEQ,VFG,VRES)                      NEWT 33
200      C----- ASSEMBLER LE RESIDU ET,EVENTUELLEMENT LA MATRICE GLOBALE NEWT 34
201      CALL ASNEWT(IKT,KLD,VDIMP,KLOCE,VCORE,VPRNE,VPREE,KNE,VKE,VFE,
202      1  VKGS,VKGD,VKGI,VDLG,VDLE,VRES)                       NEWT 36
203      C----- RESOLUTION                                     NEWT 37
204      CALL SOL(VKGS,VKGD,VKGI,VRES,KLD,NEQ,MP,IKT,1,NSYM,ENERG) NEWT 38
205      IF(IKT.EQ.1.AND.M.GT.1) CALL PRPVT(VKGD)                 NEWT 39
206      C----- MISE A JOUR DE LA SOLUTION                     NEWT 40
207      CALL MAJ(OMEGA,UN,NEQ,VRES,VDLG)                         NEWT 41
208      RETURN                                                  NEWT 42
209      END                                                    NEWT 43
210      SUBROUTINE ASNEWT(IKT,KLD,VDIMP,KLOCE,VCORE,VPRNE,VPREE,
211      1  KNE,VKE,VFE,VKGS,VKGD,VKGI,VFG,VDLE,VRES)           ASNE 2
212      C=====ASNE 3
213      C  ASSEMBLAGE DES RESIDUS ET DE LA MATRICE GLOBALE (SI IKT.EQ.1) ASNE 4
214      C  DANS LA MEME BOUCLE SUR LES ELEMENTS (POUR LA METHODE DE NEWTON-
215      C  RAPHSON)                                             ASNE 5
216      C=====ASNE 7
217      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)                                ASNE 8
218      COMMON/ELEM/NELT,NNEL,NTPE,NGRE,ME,NIDENT              ASNE 9
219      COMMON/ASSE/NSYM                                       ASNE 10
220      COMMON/RESO/NEQ                                         ASNE 11

```

```

221      COMMON/RGDT/IEL,ITPE,ITPE1,IGRE,IDLE,ICE,IPRNE,IPREE,INEL,IDEG,IPGASME 12
222      1 ,ICOD ASNE 13
223      COMMON/ES/M,MR,MP,M1,M2 ASNE 14
224      DIMENSION KLD(1),VDIMP(1),KLOCE(1),VCORE(1),VPRNE(1),VPREE(1), ASNE 15
225      1 KNE(1),VKE(1),VEE(1),VKGS(1),VKGD(1),VKGI(1),VFG(1),VDLE(1), ASNE 16
226      2 VRES(1) ASNE 17
227      C-----ASNE 18
228      C----- POSITIONNER AU DEBUT LE FICHIER DES ELEMENTS (M2) ASNE 19
229      REWIND M2 ASNE 20
230      C----- BOUCLE SUR LES ELEMENTS ASNE 21
231      DO 40 IE=1,NELT ASNE 22
232      C----- LIRE UN ELEMENT ASNE 23
233      CALL RDELEM(M2,KLOCE,VCORE,VPRNE,VPREE,KNE) ASNE 24
234      C----- CALCUL DES FONCTIONS D'INTERPOLATION SI NECESSAIRE ASNE 25
235      IF(ITPE.EQ.ITPE1) GO TO 10 ASNE 26
236      ICOD=2 ASNE 27
237      CALL ELEMLB(VCORE,VPRNE,VPREE,VDLE,VKE,VEE) ASNE 28
238      C----- EXTRAIRE LES D.L. DE L'ELEMENT DE VFG ASNE 29
239      10 CALL BLELM(KLOCE,VFG,VDIMP,VDLE) ASNE 30
240      C----- CALCULER LES RESIDUS ELEMENTAIRES ET CHANGER LEURS SIGNES ASNE 31
241      ICOD=6 ASNE 32
242      CALL ELEMLB(VCORE,VPRNE,VPREE,VDLE,VKE,VEE) ASNE 33
243      DO 20 I=1,IDLE ASNE 34
244      20 VEE(I)=-VEE(I) ASNE 35
245      C----- CALCUL DE LA MATRICE GLOBALE ASNE 36
246      IF(IKT.EQ.0) GO TO 30 ASNE 37
247      ICOD=4 ASNE 38
248      CALL ELEMLB(VCORE,VPRNE,VPREE,VDLE,VKE,VEE) ASNE 39
249      C----- ASSEMBLAGE DES RESIDUS ET DE LA MATRICE GLOBALE ASNE 40
250      30 CALL ASSEL(IKT,1,IDLE,NSYM,KLOCE,KLD,VKE,VEE,VKGS,VKGD,VKGI,VRES) ASNE 41
251      40 ITPE1=ITPE ASNE 42
252      RETURN ASNE 43
253      END ASNE 44
254      SUBROUTINE INIT(X,N,V) INIT 1
255      C=====INIT 2
256      C INITIALISATION DU VECTEUR V A LA VALEUR X INIT 3
257      C=====INIT 4
258      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z) INIT 5
259      DIMENSION V(1) INIT 6
260      C-----INIT 7
261      DO 10 I=1,N INIT 8
262      10 V(I)=X INIT 9
263      RETURN INIT 10
264      END INIT 11
265      SUBROUTINE MAJ(X1,X2,N,V1,V2) MAJ 1
266      C=====MAJ 2
267      C EXECUTION DE L'OPERATION VECTORIELLE: V2=X1*V1 + X2*V2 MAJ 3
268      C X1,X2:SCALAIRES V1,V2:VECTEURS MAJ 4
269      C=====MAJ 5
270      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z) MAJ 6
271      DIMENSION V1(1),V2(1) MAJ 7
272      C-----MAJ 8
273      DO 10 I=1,N MAJ 9
274      10 V2(I)=X1*V1(I)+X2*V2(I) MAJ 10
275      RETURN MAJ 11

```

|     |  |      |    |
|-----|--|------|----|
| 276 | END  | MAJ  | 12 |
| 277 | SUBROUTINE NORME(N,VDEL,V,XNORM)                         | NORM | 1  |
| 278 | C=====   | NORM | 2  |
| 279 | C CALCUL DU RAPPORT DES LONGUEURS DES VECTEURS VDEL ET V | NORM | 3  |
| 280 | C=====   | NORM | 4  |
| 281 | IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)                                 | NORM | 5  |
| 282 | DIMENSION VDEL(1),V(1)                                   | NORM | 6  |
| 283 | DATA ZERO/0.DO/,UN/1.DO/,FAC/1.D-3/                      | NORM | 7  |
| 284 | SQRT(X)=DSQRT(X)   | NORM | 8  |
| 285 | C-----   | NORM | 9  |
| 286 | C1=ZERO  | NORM | 10 |
| 287 | C2=ZERO  | NORM | 11 |
| 288 | DO 10 I=1,N  | NORM | 12 |
| 289 | C1=C1+VDEL(I)*VDEL(I)                                    | NORM | 13 |
| 290 | 10 C2=C2+V(I)*V(I)                                       | NORM | 14 |
| 291 | C=C1*FAC   | NORM | 15 |
| 292 | IF(C2.LE.C) C2=UN  | NORM | 16 |
| 293 | XNORM=SQRT(C1/C2)  | NORM | 17 |
| 294 | RETURN   | NORM | 18 |
| 295 | END  | NORM | 19 |

## EF4C.FOV

30 Mars 1985

14:21:45

```

1      SUBROUTINE ELEM04(VCORE,VPRNE,VPREE,VDLE,VKE,VEE)
2      C=====
3      C    SOUS-ROUTINE DU CALCUL DE LA MATRICE ELEMENTAIRE
4      C    ELEMENT TRIANGULAIRE A SIX NOEUDS
5      C    DEUX DEGRES DE LIBERTE PAR NOEUD , UE ET VE
6      C    LES FONCTIONS D'INTERPOLATIONS ET LEURS DERIVEES SONT
7      C    CALCULES AUX TROIS POINTS DE GAUSS
8      C
9      C=====
10     IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
11     COMMON/COORD/NDIM,NNT,NBLN,NBLI,FAC(3)
12     COMMON/ASSE/NSYM,NKG,NKE,NDLE
13     COMMON/RGDT/IEL,ITPE,ITPE1,IGRE,IDLE,ICE,IPRNE,IPREE,INEL,IDEG,
14     1IPG,ICODE,IDLE0,INELO,IPGO
15     COMMON/RGD/INEU,INEP,INEG
16     COMMON/ES/M,MR,MP,MLUN(10)
17     DIMENSION VKE(1),VEE(1),VCORE(1),VPRNE(1),VPREE(1),VDLE(1)
18     DIMENSION VKPG( 6),VCPG(3)
19     DIMENSION KORG(24)
20     DIMENSION VXNEU(12)
21     C..... DEFINITION DE L ELEMENT
22     DIMENSION VNIU(18),VNIKU(18),VNIEU(18)
23     C----- ENTREE DES DONNEES POUR LE VECTEUR KORG
24     DATA KORG/1,3,5,7,9,11,2,4,6,8,10,12,12*0/
25     DATA INEU/6/,INEGO/6/
26     C--- ICON EST UN DRAPEAU INDICANT S'IL Y A DES C.L. A CALCULER
27     C    COORDONNEES DES P.G.
28     DATA VKPG/+0.1666666666666666D0,+0.1666666666666666D0,
29     1      +0.6666666666666666D0,+0.1666666666666666D0,
30     2      +0.1666666666666666D0,+0.6666666666666666D0/
31     C    POIDS DES P.G.
32     DATAVCPG/.1666666666666666D0,.1666666666666666D0,.1666666666666666D0/
33     C
34     GO TO (100,200,300,300,300,300)ICODE
35     C-----RETOUR DES PARAMETRES
36     100  IDLE0=12
37         INELO=6
38         IPGO=3
39         INEU=INEU
40         INEG=INEGO
41         RETURN
42     C----- CALCUL DES FONCTIONS D'INTERPOLATION
43     200  IPG=IPGO
44         I1=1
45         DO 101 IG=1,IPG
46             JG=NDIM*(IG-1)+1
47             CALL N104(VKPG(JG),0,VNIU(I1))
48             CALL N104(VKPG(JG),1,VNIKU(I1))
49             CALL N104(VKPG(JG),2,VNIEU(I1))
50             IF(M.GE.3)WRITE(MP,2062)(VNIU(I),I=1,6),(VNIKU(I),I=1,6),(VNIEU(I)
51     1,I=1,6)
52     2062 FORMAT(' VNIU',5X,6E12.5/,'VNIKU',5X,6E12.5/,'VNIEU',5X,6E12.5/)
53     101  I1=I1+INEU
54         RETURN
55     C-----CALCUL DU RESIDU SI ICODE=6(INAV=1)

```

```

56 C-----CALCUL DE RIGIDITE SI ICODE=4(INAV=2)
57 300 CALL KE04(VCORE,VCPG,VPRNE,VPREE,VNIU,VNIP,VNIKU,VNIKP,VNIEU,
58 1VNIEP,VKE,VFE,KORG,VDLE)
59 RETURN
60 END
61 SUBROUTINE KE04(VCORE,VCPG,VPRNE,VPREE,VNIU,VNIP,VNIKU,VNIKP,VNIEU
62 1,VNIEP,VKE01,VFE01,KORG,VDLE)
63 C=====
64 C SOUS-PROGRAMME DE CALCUL DE LA RIGIDITE D'UN ELEMENT TRIANGULAIRE
65 C QUADRATIQUE , POUR UN PROBLEME D'ECOULEMENT BIPHASIQUE AIR-EAU
66 C
67 C--- ICODE.EQ.6 , LE CALCUL DU RESIDU ; R = K(U).U - F
68 C LE SIGNE DU RESIDU EST CHANGE DANS NLIN
69 C--- ICODE.EQ.4 , LE CALCUL DE K(U) DE NEWTON-RAPHSON
70 C
71 C=====
72 IMPLICIT REAL8(A-H,O-Z)
73 COMMON/COORD/NDIM,NNT,NDLN,NDLT,EAC(3)
74 COMMON/RGDT/IEL,ITPE,ITPE1,IGRE,IDLE,ICE,IPRNE,IPREE,INEL,IDEG,
75 1 IPG,ICODE,IDLE0,INELO,IPGO
76 COMMON/RGD/INEU,INEP,INEG
77 COMMON/NLIN/EPSDL,XNORM,OMEGA,XPAS,DPAS
78 COMMON/ES/M,MR,MP,MLUN(10)
79 DIMENSION K1(3),K2(3),K3(3),VI(3)
80 DIMENSION VCPG(1),VDLE(1)
81 DIMENSION VJ(2,2),VKE01(IDLE, IDLE) ,VFE01(1),VKE(30,30),VFE(30)
82 DIMENSION VKINV(6,6)
83 DIMENSION VNIXU(12),VNIYU(12),VNIXP(12),VNIYP(12)
84 DIMENSION VNIU(1),VNIKU(1),VNIEU(1)
85 DIMENSION VCORE(1),VPRNE(1),VPREE(1),KORG(1)
86 DIMENSION VUE(11), VVE(11)
87 DIMENSION VNIK(6),VNIE(6)
88 DIMENSION VXNEU(12)
89 DIMENSION ILIM(16)
90 DATA VXNEU/0.00 ,0.00,0.500,0.000,1.000,0.000,0.500,0.500,0.000,
91 1 1.000,0.000,0.500/
92 DATA ILIM/16*0/
93 DATA ZERO/0.00/
94 DATA IEL1/1/
95 IF( IEL.NE.IEL1) GO TO 20
96 IEL1=IEL1+1
97 14 CONTINUE
98 C--- CALCUL DES VITESSES AUX NOEUDS
99 IF(M.GE.3) WRITE(MP,2014)
100 2014 FORMAT( ' VITESSES DE L AIR AUX NOEUDS'/)
101 DO 15 IN=1, INEU
102 INE=2*IN-1
103 VUE(IN)=VPRNE(INE)
104 VVE(IN)=VPRNE(INE+1)
105 IF(M.GE.3)WRITE(MP,2013)VUE(IN),VVE(IN)
106 2013 FORMAT(4X,' U=',F10.3,4X,' V=',F10.3)
107 15 CONTINUE
108 DO 16 I=1, INEU
109 II=I+INEU
110 II=KORG(I)

```

```

111      III=KORG(II)
112      VDLE(II)=VUE(I)
113      16  VDLE(III)=VVE(I)
114      GO TO 35
115      C---- CALCUL DES VITESSES A CHAQUE ITERATION
116      20  DO 33 I=1,INEU
117          II=I+INEU
118          II=KORG(I)
119          III=KORG(II)
120          VUE(I)=VDLE(II)
121      33  VVE(I)=VDLE(III)
122          IF(M.EQ.3)WRITE(MP,2060)(VUE(I),I=1,INEU),(VVE(I),I=1,INEU)
123      2060 FORMAT(/' VITESSES AUX NOEUDS DE L ELEMENO'/(1X,10E12.4))
124      35  CONTINUE
125      C---- VERIFICATION DES NOEUDS OU UN TERME DE SOLLICITATION DOIT ETRE CAL.
126      DO 10 I=1,IDLE0
127          VEE(I)=ZERO
128      10  CONTINUE
129      32  CONTINUE
130      C----- INITIALISER LA RIGIDITE
131      DO 30 I=1,IDLE0
132          DO 30 J=1,IDLE0
133      30  VKE(I,J)=ZERO
134      C---- BOUCLE SUR LES POINTS DE GAUSS
135      DO 100 IG=1,IPG
136      C----- INITIALISATION DES COEFFICIENTS NON-LINEAIRES
137          COEFU=ZERO
138          COEFV=ZERO
139          COEFXU=ZERO
140          COEFYU=ZERO
141          COEFXV=ZERO
142          COEFYV=ZERO
143      C----- CALCUL DU JACOBIEN- EN DEUX DIMENSIONS
144      DO 40 I=1,2
145          DO 40 J=1,2
146      40  VJ(I,J)=ZERO
147          DO 50 IN=1,INEG
148          ING=(IG-1)*INEG+IN
149          VJ(1,1)=VJ(1,1)+VNIKU(ING)*VSCORE(2*IN-1)
150          VJ(1,2)=VJ(1,2)+VNIKU(ING)*VSCORE(2*IN)
151          VJ(2,1)=VJ(2,1)+VNIUEU(ING)*VSCORE(2*IN-1)
152      50  VJ(2,2)=VJ(2,2)+VNIUEU(ING)*VSCORE(2*IN)
153      C----- INVERSION DU JACOBIEN
154          DETJ=VJ(1,1)*VJ(2,2)-VJ(1,2)*VJ(2,1)
155          IF(DETJ.EQ.ZERO)WRITE(MP,2015)
156      2015 FORMAT('*** ERREUR, JACOBIEN SINGULIER')
157          A1=VJ(1,1)
158          VJ(1,1)=VJ(2,2)/DETJ
159          VJ(1,2)=-VJ(1,2)/DETJ
160          VJ(2,1)=-VJ(2,1)/DETJ
161          VJ(2,2)=A1/DETJ
162      C---- COEFFICIENTS NECESSAIRES AU CALCUL DES TERMES DE CONVECTION
163      DO 63 IN=1,INEU
164          INU=(IG-1)*INEU+IN
165          COEFU=COEFU+VNIU(INU)*VUE(IN)

```

```

166 63 COEFV=COEFV+VNIU(INU)*VVE(IN)
167 66 CONTINUE
168 C----- CALCUL DES D(NI)/D(X)
169 DO 61 IN=1,INEU
170 INU=(IG-1)*INEU+IN
171 VNIU(IN)=VJ(1,1)*VNIKU(INU)+VJ(1,2)*VNIU(INU)
172 61 VNIYU(IN)=VJ(2,1)*VNIKU(INU)+VJ(2,2)*VNIU(INU)
173 IF(M.GE.3) WRITE(MP,2050) (VNIU(I),I=1,6),(VNIYU(I),I=1,6)
174 2050 FORMAT(' VNIU',5X,6E12.5/' VNIYU',5X,6E12.5/)
175 C----- CALCUL DE UA ET VA
176 UA=ZERO
177 VA=ZERO
178 DO 60 IN=1,INEG
179 INE=(2*IN-1)
180 INU=(IG-1)*INEG+IN
181 UA=UA+VNIU(INU)*VPRNE(INE)
182 60 VA=VA+VNIU(INU)*VPRNE(INE+1)
183 IF(M.GE.3)WRITE(MP,2012)UA,VA
184 2012 FORMAT(' VITESSES AIR-PTS DE GAUSS', 'UA=',F10.3,4X, 'VA=',F10.3)
185 C--- CALCUL DE LA DISTANCE RADIALE DU PT DE GAUSS,S' IL Y A
186 IVO=0
187 IF(IVO.EQ.0)GO TO 82
188 C-- INITIALISATION
189 XX=ZERO
190 YY=ZERO
191 C-- CALCUL DE X ET Y
192 DO 81 IN=1,INEG
193 ING=(IG-1)*INEG+IN
194 XX=XX+VNIU(ING)*VSCORE(2*IN-1)
195 81 YY=YY+VNIU(ING)*VSCORE(2*IN)
196 C-- CALCUL DE LA DISTANCE RADIALE
197 THETA=DATAN2(YY,XX)
198 RA=DSQRT(XX**2+YY**2)
199 82 CONTINUE
200 IF(ICODE.NE.4) GO TO 62
201 C--- COEFFICIENTS NECESSAIRES A LA MATRICE DE NEWTON RAPHSON
202 DO 64 I=1,INEU
203 COEFXU=COEFXU+VNIU(I)*VUE(I)
204 COEFYU=COEFYU+VNIYU(I)*VUE(I)
205 COEFXV=COEFXV+VNIU(I)*VVE(I)
206 64 COEFYV=COEFYV+VNIYU(I)*VVE(I)
207 62 CONTINUE
208 IF(M.GE.3)WRITE(MP,2051)COEFU,COEFV,COEFXU,COEFYU,COEFXV,COEFYV
209 2051 FORMAT(5X,' COEFFICIENT N.S.',6E12.4)
210 C----- COEFFICIENT MULTIPLICATIF
211 DO 65 I=1,3
212 65 V1(I)=VPREE(I)
213 C--- LA TROISIEME PROPRIETE ELEMENTAIRE VPREE(I) EST
214 C LE PARAMETRE POUR LA GRAVITE (UO**2/LG)
215 C
216 XNG=V1(3)
217 C-- LE PARAMETRE K EST DONNE PAR LE PARAMETRE DE CHARGEMENT XPAS
218 XK=XPAS
219 XPHI=V1(2)
220 XR=DSQRT(XPHI*XK)

```



```

221      RR=XRADSQRT((COEFU-UA)**2+(COEFV-VA)**2)
222      CALL CDRAG(RR,XR,XK,XPHI,CDX,CDY,COEFU,UA,COEFV,VA)
223      C--- ON UTILISE LES PROPRIETES K,RU,PHI DE L'EQUATION 25
224      IF(M.GE.3)WRITE(MP,2037)XK,XPHI,XR,RR,CDX
225      2037  FORMAT(1X,'XK=',E14.3,'XPHI=',E14.3,'XR',E14.3,'RR=',E14.3,'CD',
226            1 E14.3)
227      COEF1=DETJ*VCPG(IG)*XK
228      COEF2X=DETJ*VCPG(IG)*CDX
229      COEF2Y=DETJ*VCPG(IG)*CDY
230      COEF3X=DETJ*VCPG(IG)*XNE*DCOS(THETA)
231      COEF3Y=DETJ*VCPG(IG)*XNE*DSIN(THETA)
232      C
233      C----- TERMES DE RIGIDITE
234      DO 90 I=1,INEU
235      IU=(IG-1)*INEU+I
236      II=KORG(I)
237      I1=I+INEU
238      I11=KORG(I1)
239      I2=I1+INEU
240      I12=KORG(I2)
241      IF(ICODE.EQ.4) GO TO 71
242      VFE(I1)=VFE(I1)+(COEF2X*UA+COEF3X)*VNUI(IU)
243      XNG=(DSQRT(VPRE(3)**2.0D0+4.0D0*(XPAS)**2.0D0)-VPRE(3))/(2.0D0*(XPAS**2.0D0
244            1XPAS**2.0D0))
245      C      XNG=NG
246      VFE(I11)=VFE(I11)+(-XNG*XK+COEF2Y*UA+COEF3Y)*VNUI(IU)
247      IF(I.EQ.1.AND.IEL.EQ.17)WRITE(MP,2040)XNG,XK
248      2040  FORMAT(2E10.5)
249      71  CONTINUE
250      DO 70 J=1,INEU
251      JU=(IG-1)*INEU+J
252      JJ=KORG(J)
253      J1=J+INEU
254      J11=KORG(J1)
255      VKE(II,JJ)=VKE(II,JJ)
256      1 + COEF2X*VNUI(IU)*VNUI(JU)
257      2+(VNUI(IU)*VNIXU(J)*COEFU+VNUI(IU)*VNIIYU(J)*COEFV)*COEF1
258      3 +VNUI(IU)*VNUI(JU)*COEFXU*COEF1
259      VKE(I11,J11)=VKE(I11,J11)
260      1 + COEF2Y*VNUI(IU)*VNUI(JU)
261      2+(VNUI(IU)*VNIXU(J)*COEFU+VNUI(IU)*VNIIYU(J)*COEFV)*COEF1
262      3 +VNUI(IU)*VNUI(JU)*COEFYU*COEF1
263      VKE(II,J11)=VKE(II,J11)+VNUI(IU)*VNUI(JU)*COEFYU*COEF1
264      VKE(I11,JJ)=VKE(I11,JJ)+VNUI(IU)*VNUI(JU)*COEFXU*COEF1
265      70  CONTINUE
266      90  CONTINUE
267      100 CONTINUE
268      C--- APRES LE CALCUL DE VFE ON INCLUS
269      IF(ICODE.EQ.4)GO TO 131
270      C---- CALCUL DU RESIDU
271      DO 78 I=1,IBLE
272      C=ZERO
273      DO 79 J=1,IBLE
274      79  C=C+VKE(I,J)*VBLE(J)
275      78  VFE(I)=C-VFE(I)

```

```

276      IF(M.EQ.3)WRITE(MP,2030)(VFE(I),I=1,IDLE)
277      FORMAT('/' VECTEUR RESIDU'/(1X,10 E12.5))
278      C--- POUR LA METHODE D'ITERATIONS (INAV.EQ.3) ON NE CALCULE PAS LES
279      C-- TERMES DE NEWTON-RAPHSON
280      DO 130 I=1,IDLE
281      130 VFE01(I)=VFE(I)
282      RETURN
283      131 DO 120 I=1,IDLE
284      DO 120 J=1,IDLE
285      120 VKE01(I,J)=VKE(I,J)
286      RETURN
287      END
288      SUBROUTINE CDRAG(RR,XR,XK,XPHI,CDX,CDY,COEFU,UA,COEFV,VA)
289      C=====
290      C      SOUS-ROUTINE QUI EVALUE LE COEFFICIENT DE TRAINEE
291      C      D'APRES DIFFERENTS MODELE ..
292      C
293      C      ICDRAG = 0  MODELE DE LANGMUIR GOLDSTEIN
294      C      ICDRAG = 1  MODELE DE BEARD ET PRUPPACHER
295      C
296      C      ENTREES :  RR = NB DE REYNOLDS POUR LES GOUTTELETTES
297      C                  XR = NB DE REYNOLDS POUR L'ECOULEMENT D'AIR
298      C                  XK = PARAMETRE D'INERTIE
299      C                  XPHI = PARAMETRE PHI ,FONCTION DE XK ET XR
300      C
301      C      SORTIES ;  CDX,CDY = LES COMPOSANTES DU COEFFICIENT DE TRAINEE
302      C                  CES COMPOSANTES SONT SCALAIRES . DONC EGALES
303      C
304      C      UA ET VA SONT LES COMPOSANTES DE LA VITESSE DE L'AIR
305      C      COEFU ET COEFV SONT LES COMPOSANTES DE LA VITESSE DE LA
306      C      GOUTTELETTE
307      C
308      C=====
309      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
310      COMMON/ES/M,NR,MP
311      DATA ZERO/0.D0/
312      C--- ON CHANGE ICDRAG POUR LE CHANGEMENT DE MODELE DE FROTTEMENT
313      C
314      ICDRAG=1
315      C
316      C      AIGUILLAGE SELON LE CHOIX DE MODELE
317      IF(ICDRAG)20,20,30
318      20  CONTINUE
319      C      EQUATION POUR LE MODELE DE LANGMUIR-GOLDSTEIN
320      CD=1.D0+0.197D0*RR**0.63D0+2.6D-04*RR**1.38D0
321      CDX=CD
322      CDY=CD
323      GO TO 40
324      30  CONTINUE
325      C      MODELE DE BEARD ET PRUPPACHER
326      IF(RR.LT.1.5D0) GO TO 50
327      IF(RR.GE.1.5D0.AND.RR.LE.20.D0) GO TO 60
328      IF(RR.GT.20.D0.AND.RR.LT.400.D0) GO TO 70
329      IF(M.GT.3) WRITE(MP,1000)
330      1000 FORMAT(' NO DE REYNOLDS DES GOUTTELETTES SUPERIEUR A 400')

```

```

331      GO TO 20
332 50    CDX=1.D0+0.102D0*ARR**0.995D0
333      CDY=CDX
334      GO TO 90
335 60    CDX=1.D0+0.115D0*ARR**0.802D0
336      CDY=CDX
337      GO TO 90
338 70    CDX=1.0D0+0.189D0*ARR**0.632D0
339      CDY=CDX
340 90    CONTINUE
341 40    IF(INITCD.EQ.1) GO TO 80
342      DATA INITCD/0/
343      INITCD=1
344      WRITE(MP,2000)ICDRAG,XR,XK,XPHI
345 2000  FORMAT( ' NO MODELE =',I5,'NB REYNOLDS=',F10.3,'NB K=',F10.3,
346 1 'NB PHI=',F10.3/)
347 80    CONTINUE
348      RETURN
349      END
350      SUBROUTINE NIO4(VX,IDER,VNI)
351  C=====
352  C   SOUS-PROGRAMME DE CALCUL DES FONCTIONS D'INTERPOLATION. POUR
353  C   UN TRIANGLE QUADRATIQUE ISOPARAMETRIQUE
354  C
355  C   IDER = 0  CALCUL DES FONCTIONS
356  C   IDER = 1  CALCUL DE LA DERIVEE SELON XSI
357  C   IDER = 2  CALCUL DE LA DERIVEE SELON ETA
358  C
359  C=====
360      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
361      DIMENSION VX(1),VNI(6)
362      DATA ZERO/0.0D0/,UN/1.0D0/,TROIS/3.0D0/,QUATRE/4.0D0/,HUIT/8.0D0/
363      DATA DEUX/2.0D0/
364      X=VX(1)
365      Y=VX(2)
366      I=IDER+1
367      GO TO (10,20,30).I
368 10    VNI(1)=UN-TROIS*(X+Y)+DEUX*(X*X+DEUX*X*Y+Y*Y)
369      VNI(2)=QUATRE*X*(UN-X-Y)
370      VNI(3)=X*(DEUX*X-UN)
371      VNI(4)=QUATRE*X*Y
372      VNI(5)=Y*(DEUX*Y-UN)
373      VNI(6)=QUATRE*Y*(UN-X-Y)
374      RETURN
375 20    VNI(1)=-TROIS+QUATRE*(X+Y)
376      VNI(2)=QUATRE-HUIT*X-QUATRE*Y
377      VNI(3)=-UN+QUATRE*X
378      VNI(4)=QUATRE*Y
379      VNI(5)=ZERO
380      VNI(6)=-QUATRE*Y
381      RETURN
382 30    VNI(1)=-TROIS+QUATRE*(X+Y)
383      VNI(2)=-QUATRE*X
384      VNI(3)=ZERO
385      VNI(4)=QUATRE*X

```

```
386      VNI(5)=-UN+QUATRE*Y
387      VNI(6)=QUATRE-HUIT*Y-QUATRE*X
388      RETURN
389      END
```