

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR

NICHET ALEXANDRE ZOUZOU

MODÉLISATION DE LA CONGÉLATION D'UN FILM FLUIDE

SOU MIS À UNE PRÉCIPITATION SURFONDUE

SEPTEMBRE 1996



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.

Résumé

Lorsque les avions sont au sol pendant les temps froids, ils sont soumis aux intempéries telles que la neige, le vent, la pluie verglaçante. Ces intempéries peuvent provoquer une formation de glace qui peut entraîner des accidents lors du décollage. Pour remédier à ce problème, on utilise des liquides antigivre qui permettent de protéger l'avion contre l'apparition de glace. Cette protection est obtenue par retard de la congélation due à l'absorption et la dilution de la précipitation.

Afin de prédire les temps de protections disponibles pour chaque fluide, il faut étudier la congélation d'un film fluide soumis à une précipitation surfondue. Pour cela, le laboratoire international des matériaux antigivre (LIMA), en collaboration avec des compagnies fabriquant de produits commerciaux, a développé une méthode normalisée appelée WSET (Water Spray Endurance Test) pour mesurer le temps de protection du fluide antigivre. Cette méthode consiste à appliquer un fluide antigivre sur une plaque inclinée refroidie et à le soumettre à un brouillard givrant afin de mesurer le temps s'écoulant avant l'apparition de la glace. Les expériences effectuées au laboratoire sont longues, coûteuses et limitées dans leurs paramètres. D'autre part, elles ne permettent pas une description détaillée du fluide au cours du phénomène de drainage et de dilution.

L'objectif principal de ce mémoire est de réaliser une simulation numérique de la méthode normalisée. Pour réaliser cette simulation, on a développé un modèle mathématique reproduisant les phénomènes physiques. Tout d'abord, on a modélisé les phénomènes physiques décrivant l'écoulement visqueux, la dilution et la congélation du film fluide antigivre. Puis, on a conçu une simulation numérique, basée sur la modélisation, qui est capable de prédire le temps de protection du fluide antigivre, tout en donnant des informations sur la vitesse, la concentration en eau, la température en chaque point du fluide.

Le code de simulation du phénomène a été validé en comparant ses résultats avec ceux qui sont issus de la méthode normalisée. Il permet de déterminer rapidement le temps de congélation du film fluide en fonction des caractéristiques physiques du fluide (viscosité, concentration en eau, dilution) et des conditions micro-météorologiques (température, tension de surface, taux de précipitation). Le code peut être directement utilisé par l'industrie pour étudier et prédire les performances des fluides.

Remerciements

L'accomplissement d'un mémoire demande plusieurs mois de travail acharné pendant lesquels les obstacles et les lassitudes ne sont pas étrangers. C'est pourquoi je voudrais apporter des remerciements aux personnes qui m'ont soutenu sur le plan technique et moral.

Tout d'abord, je remercie particulièrement mon directeur de recherche M. Patrick R. Louchez qui m'a assisté durant toute la durée de ma maîtrise et m'a donné la ferveur pour la modélisation et la simulation. Je remercie également toute l'équipe du LIMA qui m'a fourni tous les équipements et données nécessaires aux simulations.

Finalement, je remercie mes parents et ami(e)s qui m'ont encouragé durant la durée de ma recherche. Merci infiniment!

Nomenclature

Symboles

f	forces extérieures	(N)
g	accélération gravitationnelle	(m ² /s)
h	hauteur ou épaisseur du fluide	(mm)
m''	intensité de précipitation	(g/dm ² h)
n _x	nombre de cellules dans la direction x	(-)
n _y	nombre de cellules dans la direction y	(-)
Pa	pression atmosphérique	(Pa)
Pe	pression extérieure	(Pa)
Pi	pression intérieure	(Pa)
t	temps	(s)
u	vitesse horizontale dans la direction de l'écoulement	(m/s)
v	vitesse verticale dans la direction perpendiculaire à la plaque	(m/s)
w	vitesse dans la direction z	(m/s)
x	distance horizontale dans le sens de l'écoulement	(mm)
y	distance dans le sens perpendiculaire à la plaque	(mm)
z	distance dans la direction de la profondeur, z	(mm)
C	concentration en volume fluide	(-)

D	coefficient de diffusivité	(cm ² /s)
L	longueur de la plaque	(m)
\vec{V}	vecteur vitesse	(m/s)
Z ₀	paramètre adimensionnel pour calculer la diffusivité	(-)
$\dot{\gamma}$	taux de cisaillement	(1/s)
μ	viscosité dynamique	(Pa.s)
θ	angle d'inclinaison de la plaque	(deg)
ρ	densité	(kg/m ³)
σ	tension de surface	(N/m)
τ	cisaillement	(Pa)

Indices

e	eau
p	centre
r	référence
0	condition initiale
N	nord
S	sud
∞	asymptote, régime établi

Acronymes

FFT	First Freezing Time : temps de première congélation
FPET	Flat Plate Elimination Test : test d'élimination aérodynamique
HHET	High Humidity Endurance Test : test d'humidité (faible précipitation)
HOT	Holdover Time : temps de protection du fluide
LIMA	Laboratoire International des Matériaux Antigivre
WSET	Water Spray Endurance Test : test à l'eau pulvérisée

Table des matières

<i>Résumé</i>	<i>i</i>
<i>Remerciements</i>	<i>iii</i>
<i>Nomenclature</i>	<i>iv</i>
<i>Table des matières</i>	<i>vii</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>xi</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>xii</i>
<i>Avant-propos</i>	<i>1</i>
1. Introduction	3
1.1. Historique	3
1.2. Problématique	10
1.3. État des connaissances	11
1.4. Objectifs	13
1.5. Méthodologie	13
2. Modélisation analytique et numérique	16
2.1. Description du WSET	16

2.2. Définition des paramètres physiques	21
2.2.1. Viscosité	21
2.2.2. Diffusivité	23
2.2.3. Tension de surface	24
2.3. Modélisation du WSET	26
2.3.1. Introduction	26
2.3.2. Etude de l'écoulement du fluide	28
2.3.3. Etude de la diffusion de la précipitation dans le fluide	31
2.3.4. Etude de l'épaisseur du fluide	33
2.4. Discrétisation des équations de base	34
2.4.1. Équation de vitesse	34
2.4.2. Équation de concentration	36
2.4.3. Équation d'épaisseur	37
2.5. Interpolation des paramètres	39
2.6. Description de l'algorithme	42
3. Interface graphique pour la simulation	45
3.1. Introduction	45
3.2. Description des données pour la simulation	48
3.2.1. Les données d'entrée de la simulation	48
3.2.2. Les données pendant la simulation	55
3.2.3. Les données de sortie de la simulation	56
4. Validation du modèle	60

4.1. Validation avec une solution analytique	60
4.2. Validation avec des résultats expérimentaux	62
4.2.1. Données expérimentales nécessaires pour la simulation	62
4.2.2. Comparaison basée sur les épaisseurs	65
4.2.3. Comparaison basée sur HOT	69
4.2.4. Comparaison avec un logiciel numérique de l'industrie	70
5. Analyse des résultats	73
5.1. Influence des paramètres sur le temps de calcul	73
5.1.1. Sensibilité de la précision du calcul	73
5.1.2. Sensibilité du maillage	75
5.2. Influence des paramètres sur le HOT	76
5.2.1. Sensibilité du maillage	76
5.2.2. Sensibilité de la diffusivité	77
5.2.3. Sensibilité de l'épaisseur initiale du fluide	78
5.2.4. Sensibilité de l'angle de la plaque	79
5.2.5. Sensibilité de la longueur de la plaque	80
5.2.6. Sensibilité de la vitesse du vent	81
5.2.7. Sensibilité de la précipitation	82
5.3. Analyses des processus physiques	84
5.3.1. Analyse de l'écoulement du fluide	84
5.3.2. Analyse de la dilution	86
Conclusion	89

<i>Recommandations</i>	<u>91</u>
<i>Références</i>	<u>92</u>
<i>Annexe 1 : Liste des fluides certifiés par le LIMA</i>	<u>96</u>
<i>Annexe 2 : Guide de l'utilisateur du SIMWSET</i>	<u>99</u>

Liste des tableaux

<i>Tableau 1: Caractéristiques du WSET</i>	20
<i>Tableau 2: Validation analytique de l'épaisseur asymptotique</i>	61
<i>Tableau 3: Fluides utilisés pour la validation</i>	62
<i>Tableau 4: Densité des fluides à différentes concentrations (kg/m^3)</i>	63
<i>Tableau 5: Paramètres de viscosité des fluides à différentes concentrations (Pa)</i>	64
<i>Tableau 6: Diffusivité des fluides à différentes concentrations (cm^2/s)</i>	65
<i>Tableau 7: Validation expérimentale du HOT</i>	70

Liste des figures

<i>Figure 1 : Application du fluide sur un avion</i>	5
<i>Figure 2: Chambre froide</i>	18
<i>Figure 3: Essai normalisé : WSET</i>	19
<i>Figure 4: Profil de vitesses</i>	21
<i>Figure 5: Représentation de différents fluides</i>	22
<i>Figure 6: Mélange de deux fluides</i>	23
<i>Figure 7: Fluide en tension</i>	24
<i>Figure 8: Coupe du fluide</i>	25
<i>Figure 9: Domaine de simulation</i>	27
<i>Figure 10: Représentation discrète d'une colonne de fluide pour les vitesses</i>	35
<i>Figure 11: Représentation discrète d'une colonne de fluide pour les concentrations</i>	36
<i>Figure 12: Contrôle de volume pour le calcul de l'épaisseur</i>	38
<i>Figure 13 : Extrapolation pour le calcul des épaisseurs</i>	41
<i>Figure 14: Organigramme de la congélation</i>	43
<i>Figure 15: Organigramme de la simulation</i>	44
<i>Figure 16: Proportions dans le fluide</i>	49
<i>Figure 17: Paramètres de la viscosité</i>	50
<i>Figure 18: Propriétés dynamiques</i>	51
<i>Figure 19: Paramètres du WSET</i>	52
<i>Figure 20: Paramètres numériques</i>	53
<i>Figure 21: Courbes de viscosité</i>	54
<i>Figure 22: Courbes de diffusivité</i>	54
<i>Figure 23: Informations pendant la simulation</i>	56

<i>Figure 24: Données à la fin de la simulation</i>	57
<i>Figure 25: Choix des courbes</i>	58
<i>Figure 26: Exemple de courbes 1</i>	59
<i>Figure 27: Exemple de courbes 2</i>	59
<i>Figure 28: Évolution de l'épaisseur sans précipitation (F2A à 75%)</i>	66
<i>Figure 29: Évolution de l'épaisseur sans précipitation (F2B)</i>	66
<i>Figure 30: Évolution de l'épaisseur sans précipitation (F2B à 50%)</i>	67
<i>Figure 31: Évolution de l'épaisseur sans précipitation (F2C à 50%)</i>	67
<i>Figure 32: Évolution de l'épaisseur avec la précipitation (F2B)</i>	68
<i>Figure 33: Évolution de l'épaisseur avec la précipitation (F1C)</i>	69
<i>Figure 34: Validation avec le logiciel PHOENIX</i>	71
<i>Figure 35: Sensibilité du résidu sur le temps de calcul</i>	75
<i>Figure 36: Sensibilité du maillage sur le temps de calcul</i>	76
<i>Figure 37: Sensibilité du maillage sur le HOT</i>	77
<i>Figure 38: Sensibilité de la diffusivité sur le HOT</i>	78
<i>Figure 39: Sensibilité de l'épaisseur initiale du fluide sur le HOT</i>	79
<i>Figure 40: Sensibilité de l'angle de la plaque sur le HOT</i>	80
<i>Figure 41: Sensibilité de la longueur de la plaque sur le HOT</i>	81
<i>Figure 42: Sensibilité de la vitesse du vent sur le HOT</i>	82
<i>Figure 43: Sensibilité de la précipitation sur le HOT</i>	83
<i>Figure 44: Profil de l'épaisseur au HOT</i>	84
<i>Figure 45: Profil des vitesses le long de l'épaisseur</i>	85
<i>Figure 46: Profil de concentration le long de l'épaisseur au HOT</i>	86
<i>Figure 47: Profil de concentration le long de la plaque</i>	87
<i>Figure 48: Stratification des concentrations sur tout le domaine</i>	88

Avant-propos

Depuis plusieurs siècles, l'être humain, toujours curieux, s'intéresse au fonctionnement du milieu dans lequel il évolue, afin non seulement de mieux le comprendre, mais aussi d'améliorer sa façon d'y vivre. Pour ce faire, il utilise des modèles analytiques, expérimentaux ou graphiques pour représenter le système qu'il étudie. Le modèle est un système formel construit, c'est-à-dire une image plus ou moins fidèle du système réel. On peut la qualifier de reproduction imparfaite mais toutefois suffisante du système. Ce modèle, représentatif du système, permet ainsi de prédire les réactions de celui-ci, dans les conditions envisagées, dans le cas où la comparaison de ses résultats avec ceux du système est satisfaisante. Lorsque le modèle est valide, il peut devenir un excellent outil d'analyse et de jugement. Mais parfois, son utilisation unique ne suffit pas pour résoudre le problème et il faut généralement lui donner « vie » en utilisant la simulation.

La simulation est la manipulation du modèle, il peut prendre le relais d'autres techniques impuissantes à résoudre les problèmes. Étymologiquement, le mot simulation provient du mot Latin « simulare » ce qui signifie copier, feindre, faire paraître comme réelle une chose qui ne l'est point.

L'arrivée de l'informatique ayant permis la conception d'un ensemble de procédures assez rapidement, c'est donc à la suite de sa naissance qu'ont été développées des méthodes numériques et algorithmiques afin de résoudre au mieux les problèmes. Implicitement la simulation constitue un essor important apparu durant ces dernières décennies. Grâce à l'ordinateur, elle reproduit à une vitesse accélérée l'évolution temporelle d'un système en

tenant généralement compte des aléas qui s'y rapportent, et ce, afin de fournir des renseignements sur le comportement du système, que d'autres méthodes ne seraient pas à même de fournir.

Au vu de la diversité des problèmes auquel le monde fait face, la simulation permet aujourd'hui de couvrir tous les secteurs d'activités. En effet, elle est couramment utilisée avec succès, dans les secteurs tels que l'industrie, l'économie et les affaires, les forces armées et les laboratoires; en avant-garde et avec certaines difficultés dans les domaines de la psychologie, sociale, politique et humaine, du fait de leurs formalismes très complexes.

CHAPITRE 1

1. Introduction

1.1. Historique

Dans la plupart des grands aéroports situés dans les pays froids (Etats-Unis, Canada, Allemagne, France, Russie), les avions au sol sont fréquemment sujets au givrage résultant des conditions hivernales locales très rudes. Le givrage sur les avions pose des problèmes financiers et sécuritaires. En effet, lorsque les conditions atmosphériques sont mauvaises (neige, pluie verglaçante, bruine) sur un aéroport et qu'il faut le fermer, cela représente une perte que l'on peut chiffrer en millions de dollars par heure. De plus, à cause des intempéries qui favorisent le givrage, la glace peut modifier la forme de fuselage et des ailes. En effet, cette présence d'aspérités affecte le comportement de la couche limite et tend à diminuer la portance à l'angle d'attaque de l'avion. Cette modification aérodynamique peut entraîner parfois des accidents mortels lors du décollage car la force qui soutient l'avion se réduit. Généralement le givrage sur les avions a lieu quand la température ambiante au sol est froide et pendant les situations suivantes :

- entre deux vols (30 minutes à 1 heure) ;
- en parking de nuit (8 heures au sol) ;
- pendant le roulage ;
- en bout de piste ;
- à l'arrêt aux portes ;
- quand la température du carburant est très basse.

La dernière situation précitée peut paraître insolite car la glace peut se former bien que la température ambiante soit au dessus de 0°C. Ce phénomène est dû à la température basse des ailes refroidies par le masse thermique du carburant (jusqu'à -40°C).

Afin de combattre le givrage, des fabricants de produits chimiques ont développé des fluides dégivrants et antigivrants qui permettent d'enlever la glace et de la prévenir. Le dégivrage se fait grâce à des jets soit d'eau chaude, de mélange eau/glycol chaud ou froid. L'antigivrage est obtenu par l'application de mélange eau/glycol, le glycol pouvant être de l'éthylène, du diéthylène ou du propylène. Dans la plupart des aéroports, le matériel utilisé pour les jets est mobile, similaire à celui utilisé par les services de lutte contre les incendies (Figure 1). Il existe aussi des installations dites centralisées où l'avion passe sous une douche de jets de fluide similaire à ceux d'un « lave-auto » (Munich, Paris, Louisville, etc.). Les produits dégivrants ont un rôle curatif, tandis que les antigivrants ont un rôle préventif et permettent par conséquent aux avions de rester au sol plus longtemps sans que le givre ne se forme.



Figure 1 : Application du fluide sur un avion

Étant donné l'accroissement du trafic aérien au cours des vingt dernières années, les temps d'attente des avions, aux portes et en bout de piste, ont augmenté. Cette situation a été directement ou indirectement liée à divers accidents notoires :

- 13 janvier 1982, Boeing 737, 78 morts;
- 12 Décembre 1985, DC-8, 256 morts;
- 15 Novembre 1987, DC-9, 28 morts;
- 17 Février 1991, DC-9, 2 morts;
- 22 Mars 1992, Fokker 28, 27 morts.

Pour remédier à cette situation alarmante, un vaste programme a été amorcé vers la fin des années 80 aux États-Unis par la Federation Aviation Administration (FAA) dans le but de susciter la mise au point de produits de dégivrage et antigivrage, la définition de méthode d'évaluation de performance, la mise en place d'une infrastructure d'utilisation sur les

aéroports et l'établissement de procédures et de recommandations pour les opérations au sol. Ces politiques ont été décrites dans la presse internationale :

- le Monde , (7 mars 1996), « Le danger du givre pour les avions impose une réglementation internationale très stricte » ;
- New York Times, (28 février 1995), « Experts critical of flight standards for ice ».

Aujourd'hui, il existe quatre types de fluides pour lutter contre le givre. Leurs différentes appellations sont fonction de leurs propriétés.

- i) Fluides de Type I : ils contiennent environ 80% de glycol dans leur forme concentrée et sont considérés comme « non épais » à cause de leur faible viscosité. Ils sont utilisés pour le dégivrage et l'antigivrage à court terme. Ils sont généralement appelés « fluides dégivrants ».
- ii) Fluides de Type II : ils possèdent au moins 50% de glycol et ont la propriété d'abaisser le point de congélation à des températures voisinant -32°C. On les considère comme des fluides épais à cause de l'ajout d'agents visqueux. En réalité, cela leur permet de former une pellicule épaisse sur l'avion pouvant résister au givre jusqu'au décollage. Ces fluides sont pseudo-plastiques. Cela signifie que lorsqu'ils sont soumis à des cisaillements importants, leur viscosité diminue énormément, ce qui entraîne leur écoulement rapide afin de ne pas nuire aux performances aérodynamiques de l'avion au moment du décollage.
- iii) Fluides de Type III : Initialement appelés « fluides 1 ½ », ils ont des propriétés se situant entre les fluides de Type I et II. Ils ont une protection contre la formation de

givre supérieure aux fluides de Type I mais inférieure aux fluides de Type II. Leur propriété pseudo-plastique est amplifiée de façon à permettre leur utilisation sur des avions moyens courriers qui décollent à plus basse vitesse et plus rapidement. Ces fluides nouvellement développés ne sont pas couramment utilisés, car ils sont pour la plupart en période de test pour connaître leurs conditions d'application et d'utilisation.

iv) Fluides de Type IV : ils sont les plus épais, donc permettent une protection contre le givre beaucoup plus longue que les autres. Du fait leurs agents fortement épaississants, les manufacturiers ont fait en sorte qu'ils soient plus pseudo-plastiques afin qu'ils puissent s'écouler lors du décollage comme les Types II.

En ce qui touche le coût moyen pour l'antigivrage d'un avion de grande ligne (Boeing 747, Airbus A320), il est de 1800 dollars canadiens (2600 litres de fluide). Tandis que pour le dégivrage il est de 950 dollars canadiens (1300 litres de fluide) parce qu'on dilue le fluide avec de l'eau (50%/50%). Ces montants varient parce qu'ils dépendent des conditions atmosphériques et de la taille de l'avion. Les fluides commerciaux, certifiés, sont les suivants :

- Type I : Arcoplus (Arco Chemical), Octaflo (Octagon Process Inc.), ADF (Union Carbide);
- Type II : Forty-Below (Octagon Process Inc.), AD-104 (SPCA), ABC3 (Kilfrost);
- Type III : 75/25 AAF Ultra+ (Union Carbide);
- Type IV : AAF Ultra+ (Union Carbide), Safewing MP IV (Hoechst).

Les autorités aériennes ont rapidement vu la nécessité d'évaluer l'efficacité de la protection des fluides, plus précisément la quantification de l'effet antigivre. Pour ce faire, ils ont confié la tâche à différents manufacturiers de produits chimiques. C'est ainsi qu'en Europe, sous l'impulsion de l'AEA (Association Européenne d'Aviation), au début des années 80, des sociétés chimiques telle que KILFROST en Grande Bretagne et HOECHST en Allemagne ont élaboré des méthodes afin d'évaluer les performances en protection. Par la suite des laboratoires de recherche tel que le LIMA ont établi les normes SAE (Society of Automotive Engineering) et coordonné avec l'AEA les normes internationales ISO. Le laboratoire LIMA est aujourd'hui le premier laboratoire pour la certification des fluides dégivrants et antigivrants, voir en annexe 1 la liste des fluides qui ont été certifiés par le LIMA.

Il existe trois tests principaux pour la certification d'un fluide. Deux tests reliés à la protection contre le givre WSET (Water Spray Endurance Test) et HHET (High Humidity Endurance Test) et un test aérodynamique FPET (Flat Plat Elimination Test). Le travail présenté ici étant lié au test du WSET, on s'intéressera plus particulièrement à celui-ci. Le WSET est une reproduction en laboratoire du processus de protection contre la formation de glace en situation de précipitation verglaçante. Un examen rapide des conditions d'opération du WSET va mettre en évidence les limitations de cette simulation expérimentale. Le test du WSET qui sera décrit en détail au chapitre 2, nécessite une chambre froide, des substrats réfrigérés en aluminium et un système de génération de précipitation. La calibration des conditions de précipitation (uniformité, intensité),

notoirement difficile, doit être répétée périodiquement. Un test dure de 30 minutes à 4 heures et requiert une surveillance constante pour juger de la formation de glace. D'autre part, il devient de plus en plus nécessaire de simuler diverses situations proches de celles endurées par les avions dans les aéroports. Cependant, la quantité d'information disponible concernant le comportement de fluides est réduite à seulement deux types de données : l'épaisseur du fluide et le temps de congélation. En plus, il est parfois très long, avec le WSET, de changer certains paramètres tels que l'intensité de précipitation, la température dans la chambre, l'angle d'inclinaison de la plaque, la taille des gouttelettes, le type de précipitation (neige, pluie verglaçante, grésil). Étant donné les considérations concernant la calibration, la maintenance du matériel et la multiplicité des tests, on peut s'apercevoir que construire plusieurs chambres froides pour accroître les séries de tests n'est pas la solution envisageable à long terme. Une meilleure solution est donc de développer un outil numérique simulant le test du WSET. La simulation numérique du WSET permettra d'avoir les atouts suivants :

- réduction des tests en chambre froide;
- modification rapide de certains paramètres du test (intensités, angle, température, etc.) ;
- instrument de développement pour les manufacturiers de fluides ;
- connaissance détaillée des valeurs des concentrations eau/fluide, vitesses, cisaillements, diffusivités, viscosités, dans le but de mieux comprendre les différents phénomènes qui ont lieu durant l'écoulement et la dilution ;
- instrument d'analyse pour le développement des normes ;

- minimisation de la période nécessaire pour connaître le temps de protection d'un fluide.

1.2. Problématique

Quand on applique du fluide sur l'avion, le fluide s'étale puis forme une fine pellicule sur l'avion qui draine lentement vers le bas. Lorsqu'il pleut, il y a une dilution du fluide par l'eau de la précipitation. Plus l'intensité de pluie est forte, plus le fluide sera dilué, ce qui favorisera la formation de glace à condition que la température ambiante soit basse. Dans la méthode de mesure en laboratoire (WSET), les différents phénomènes précités sont reproduits plus au moins fidèlement. En effet, le drainage est représenté par l'écoulement du fluide sur la plaque inclinée, la pluie par l'eau sortant du gicleur et la dilution par l'eau pulvérisée sur la surface du fluide.

Le premier problème est de modéliser les différents phénomènes qui se déroulent durant le test du WSET. À cet effet, il faut établir la nature de l'écoulement du fluide sur la plaque et, donc, les équations gouvernant l'écoulement. Il faut aussi définir la manière par laquelle l'eau se dilue à travers le fluide dans le cas où il y a une précipitation, ainsi que l'interaction entre l'air en mouvement et le fluide. Enfin, il faut déterminer comment la solidification du mélange eau/fluide se manifeste. Le second problème est de mettre au point une simulation numérique qui reproduise le modèle mathématique obtenu. Pour cela, il faut définir une méthode de discrétisation, un choix de maillage, des algorithmes de calculs, des méthodes d'interpolation de propriétés et enfin des outils de communication de données avec entrées et sorties.

1.3. État des connaissances

Les domaines pertinent du travail sont les suivants :

- équations gouvernant l'écoulement et la diffusion des fluides;
- méthodes numériques pour résoudre les équations aux dérivées partielles;
- lois et propriétés physiques des fluides.

Les équations qui régissent les fluides sont les équations de Navier-Stokes qui ont été développées par un Français M. Navier (1785-1836) et un Anglais G. Stokes (1819-1903).

Le cas des écoulements de films minces visqueux a été étudié par : I. B. Ivanov (Référence 1). Pour l'air on peut utiliser les corrélations de L. Prandtl (Référence 2). Pour ce qui est des équations de diffusion, elles proviennent de la théorie sur la conduction de la chaleur dans les solides. Cette théorie a été mise au point par Fourier (Référence 3) puis transformée par Fick (Référence 4) pour l'appliquer aux fluides. La diffusion dans les glycols a fait l'objet d'études par Byers et King (Référence 5), le cas de précipitation sur fluide a été peu étudié, voir Référence 19.

Dans le but de résoudre numériquement ces équations, un éventail de méthodes et de techniques sont disponibles. Chacune présente des avantages et des inconvénients, en choisir une plutôt qu'une autre dépend du problème que l'on a à résoudre, de la précision que l'on veut atteindre et du niveau d'efficacité que l'on veut avoir. Les méthodes des différences finies (Référence 6) permettent le plus souvent une formulation simple mais deviennent compliquées lorsque le domaine à étudier a des formes non-linéaires. Pour travailler dans des domaines complexes, on utilise la méthodes des éléments finis

(Référence 7). À cause de la faiblesse des méthodes en ce qui touche les formes irrégulières, des techniques de maillage fixes ou mobiles ont été développées afin de « discrétiser » le domaine (Référence 8).

En ce qui concerne les travaux qui ont été fait sur les fluides dégivrant et antigivrant, il existe une documentation réduite sur les propriétés physiques : viscosité (Références 9 et 10), et densité (Référence 11). Dans le cas de la mesure du coefficient de diffusion des fluides dégivrant et antigivrant, une méthode a été élaborée au sein du laboratoire LIMA (voir les références 12, 13 et 14). En ce qui concerne les méthodes d'évaluation des performances des fluides, deux travaux existent. Le premier (Référence 15) décrit les procédures et les caractéristiques en accord avec l'AEA des mesures du temps de protection du fluide soumis à un brouillard givrant (WSET). Le deuxième (Référence 16), expose la méthode de mesure du temps de protection du fluide dans un environnement très humide (HHET). Pour ce qui est des mesures expérimentales des fluides proprement dit, les rapports de certification sont régulièrement produits par le LIMA, par exemple les Références 17 (WSET et HHET) et 18 (FPET). En ce qui concerne la modélisation et la simulation de ces fluides, on peut énumérer entre autres, les références : 20, 21, 22 et 23. La référence 20 propose les résultats des simulations numériques obtenues avec un modèle isotherme du WSET. La référence 21 traite également de la simulation numérique du WSET et permet de constater les influences sur le HOT du coefficient de diffusion, de l'épaisseur initiale du fluide, de la viscosité, de la température, grâce aux résultats. Dans les simulations, les valeurs de viscosité et de diffusion ont été corrélées. La référence 23

provenant du IHS (Institute for Hypersonic Studies) présente les résultats des simulations faites sur le WSET. À travers cet article, on peut voir la validation de leur modèle par rapport aux mesures du HOT réalisées au LIMA. La référence 22 propose une stratégie de calcul afin de résoudre les problèmes de conduction de chaleur avec les changements de phase, en utilisant la méthode des éléments finis (MEF) et la « method of assumed states». De plus pour diminuer le temps de calcul causé par les FEM, elle fait usage de la formulation des algorithmes parallèles.

1.4. Objectifs

L'objectif principal de ce travail est de réaliser une simulation numérique du WSET appliquée aux fluides de Type I et II. Pour réaliser cette simulation, il faut développer un modèle mathématique reproduisant les différents phénomènes physiques observables en laboratoire. Tout d'abord, il faut modéliser l'écoulement visqueux, la dilution et la congélation du film fluide antigivrant. Puis, il faut concevoir une simulation numérique basée sur cette modélisation, qui sera capable de prédire le temps de protection du fluide antigivrant, tout en donnant des informations sur la vitesse d'écoulement, la concentration en eau du fluide, le cisaillement, la viscosité et la diffusivité en chaque point du fluide.

1.5. Méthodologie

Afin de réaliser ces objectifs, on a tout d'abord étudié les différentes équations qui régissent les phénomènes physiques, à savoir les équations de diffusivité, de vitesse

d'écoulement et d'épaisseur. En complément, on a déterminé les conditions initiales et limites de ces équations. La sélection du modèle a été faite en retenant uniquement les termes significatifs et en utilisant les simplifications d'écoulement mince à faible nombre de Reynolds pour le fluide. La méthode de simulation numérique retenue est celle par volume fini et bidimensionnelle. Le maillage rectangulaire utilise des mailles allongées dans le sens de l'écoulement pour tenir compte du fait que les variations des termes sont plus faibles dans le sens de l'écoulement que dans le sens orthogonal. Les dérivées ont été calculées de façon implicites de façon à obtenir des schémas de calcul stables. On a utilisé un pas de temps adapté basé sur un critère de convergence des équations. Le code a été écrit en langage C++.

Après avoir fait cette étude, on a développé une interface graphique à l'aide de Visual C++ sur l'environnement Windows pour PC. Celle-ci a été conçue de façon à permettre à un utilisateur ne connaissant pas forcément la modélisation, d'utiliser la simulation numérique du WSET. Pour ce faire, l'utilisateur doit fournir au logiciel de traitement numérique les données reliées au fluide antigivrant et aux conditions micro-météologiques. Les variables essentielles d'entrées sont les paramètres physiques du fluide et du milieu : la viscosité pseudo-plastique, le coefficient de diffusion de l'eau dans le fluide, la température de l'air, le taux de précipitation de la pluie. Les variables principales de sorties sont : la vitesse du fluide, la température, la concentration en eau, le cisaillement, le temps de protection.

En ce qui concerne la validité de la modélisation, implicitement de la simulation numérique, on a utilisé deux démarches. La première a été de comparer les résultats issus de la simulation numérique avec ceux d'une solution analytique, ce qui indiquerait que la simulation numérique est conforme avec les modèles concernés. La deuxième s'est faite en observant le degré de ressemblance entre les résultats de la simulation numérique et les mesures expérimentales du HOT faites au LIMA.

CHAPITRE 2

2. Modélisation analytique et numérique

2.1. Description du WSET

Le LIMA avec d'autres collaborateurs tels que Transport Canada et des manufacturiers (Kilfrost, Union Carbide, Texaco Lubrifiant, Octagon, Chevron Research Chemical) ont mis en place un essai normalisé appelé le WSET (Water Spray Endurance Test). Cette méthode de mesure permet de déterminer le temps de protection (HOT) des fluides dégivrant et antigivre. En fait, le WSET est une simulation du givrage des fluides dégivrant et antigivre dû aux conditions météorologiques (température et pluie verglaçante) qui se produit avant le décollage de l'avion. La surface de l'aile de l'avion est représentée, dans le WSET, par une plaque en aluminium dont les dimensions sont 30cm par 10cm. Six plaques identiques sont utilisées pour le test. Ces plaques sont placées sur un support réfrigéré permettant ainsi de maintenir les plaques à une température constante (-5°C). Le support a une inclinaison de 10° afin de reproduire l'angle moyen qu'ont les ailes d'avion près du bord d'attaque. Les plaques, durant le test, sont placées dans une chambre froide

maintenue généralement à une température de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (voir Figure 2). Dans la chambre froide, il y a un gicleur (Figure 3) qui permet de reproduire un brouillard givrant de $5\text{ g/dm}^2\text{h}$ avec des gouttelettes d'eau de $25\text{ }\mu\text{m}$ de diamètre moyen.

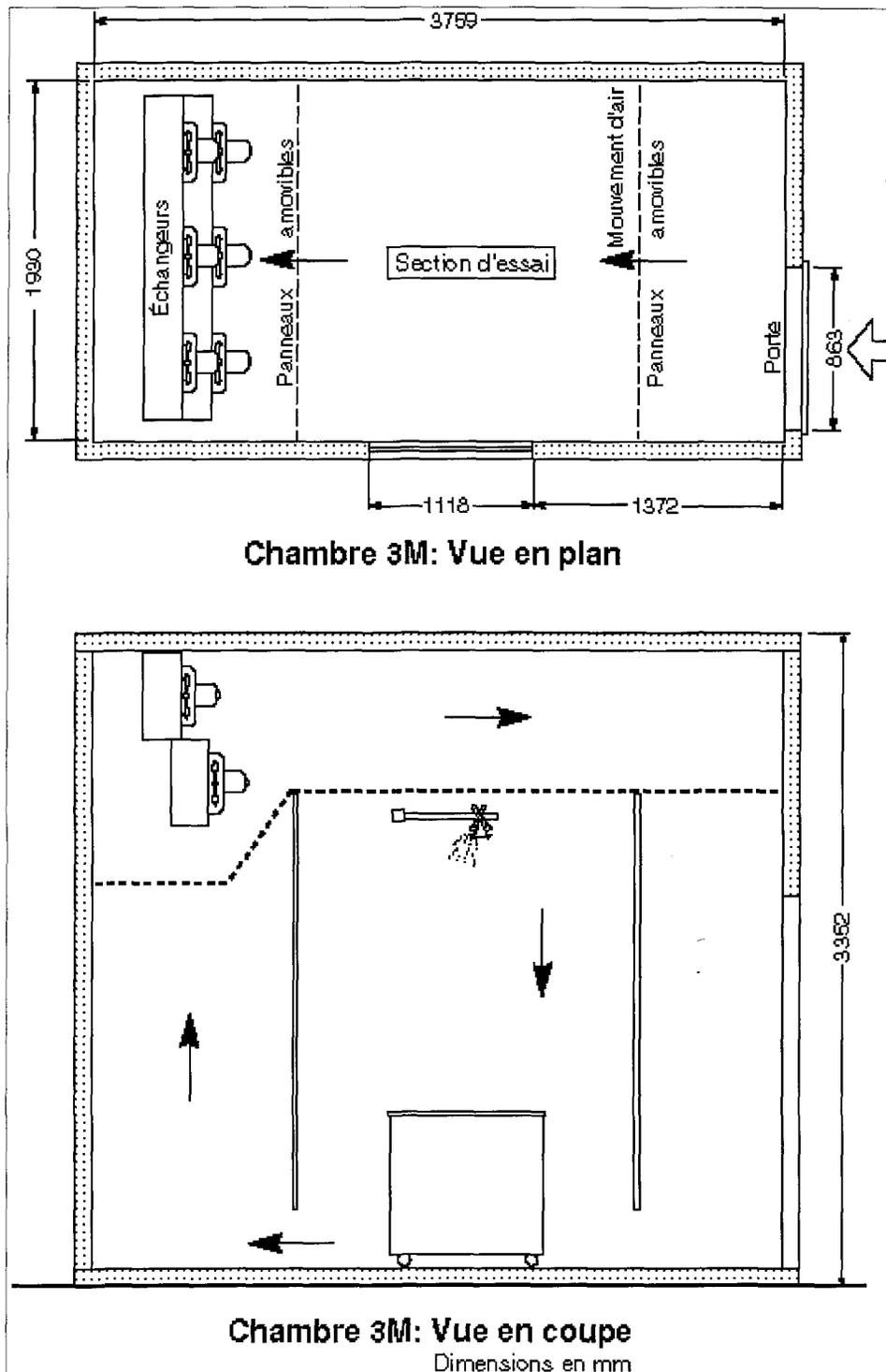


Figure 2: Chambre froide

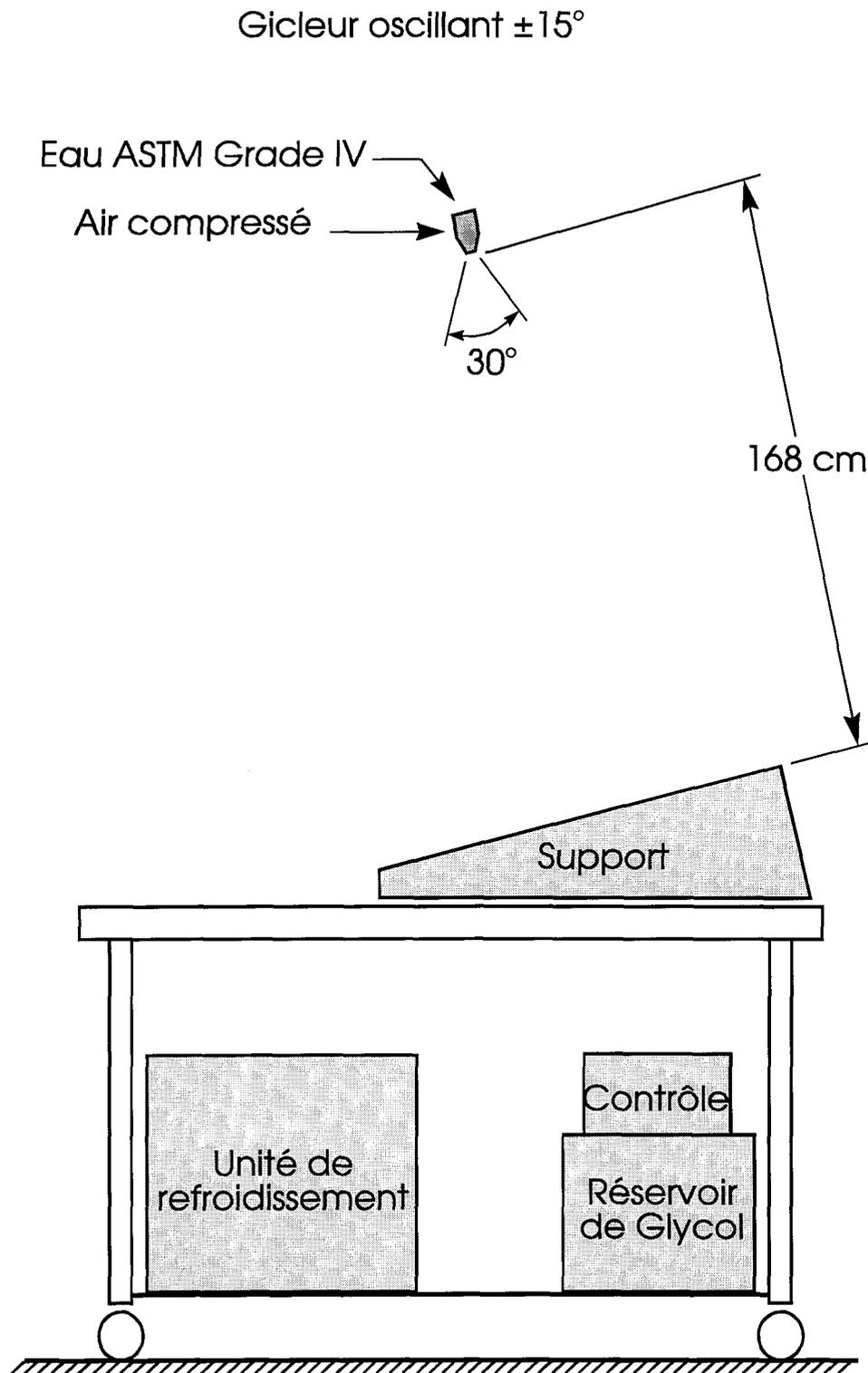


Figure 3: Essai normalisé : WSET

Pour faire une simulation expérimentale, on applique le fluide à tester sur trois plaques, les trois autres servant à mesurer le taux de précipitation généré pendant l'expérience. Une fois l'application du fluide terminée, on attend cinq minutes avant de commencer la précipitation à l'aide du gicleur. Ce délai est nécessaire pour avoir un fluide d'épaisseur stable sur la plaque inclinée. Puis la précipitation est produite au dessus des plaques. Au cours de l'expérience, le fluide s'écoule peu à peu et se dilue sous l'action de la précipitation. Lorsque la dilution est telle que le point de congélation est atteint la glace commence à se former. Lorsque le givre a atteint le premier 2.54cm (pouce) de la plaque (compté en partant du haut de la plaque), le temps correspondant est mesuré, il s'agit du temps normalisé de protection appelé HOT (Holdover Time). Un résumé des caractéristiques du WSET est donné au Tableau 1.

Taux de précipitation (g/dm ² h)	5 ± 0.2
Diamètre des gouttes (µm)	25
Température de l'air (°C)	-5 ± 0.5
Température de surface (°C)	-5 ± 0.5
Précision du HOT (min)	± 1.5

Tableau 1: Caractéristiques du WSET

2.2. Définition des paramètres physiques

2.2.1. Viscosité

La contrainte de cisaillement dans un fluide en mouvement est liée aux composantes du gradient de vitesse. Si l'on considère un écoulement parallèle à une paroi (Figure 4), la contrainte de cisaillement en un point quelconque de l'écoulement, τ , est proportionnelle au gradient de vitesse. La constante, μ , est la viscosité dynamique.

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

Equation 1

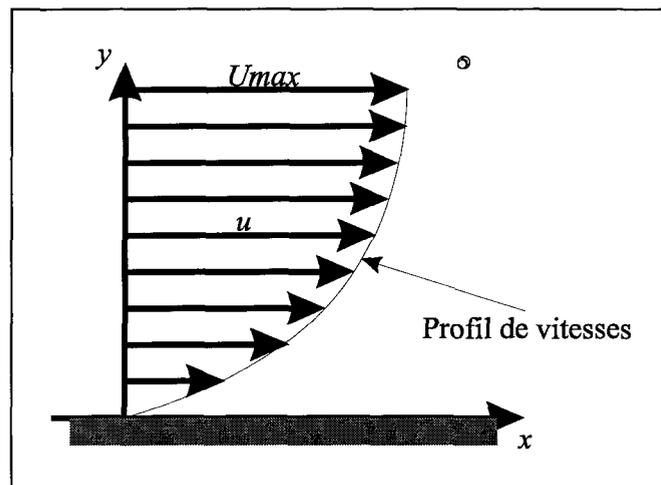


Figure 4: Profil de vitesses

La viscosité dynamique est effectivement constante pour les fluides dits newtoniens dans lesquels μ est le coefficient de viscosité du fluide dont l'unité est kg/(m.s) ou Pa.s (Référence 24 p. 21). Cependant, quelques fluides, en particulier certaines émulsions et

suspensions colloïdales, ne présentent pas cette proportionnalité simple entre le taux de déformation et les gradients de vitesse. Ces fluides sont appelés non-newtoniens. Les fluides non-newtoniens sont subdivisés en plusieurs groupes selon la représentation graphique contrainte de cisaillement, τ , en fonction du taux de cisaillement, $\dot{\gamma}$, $\tau = f(\dot{\gamma})$ (voir Figure 5). Dans le cas auquel on s'intéresse, les fluides de Type I sont newtoniens tandis que les fluides de Type II sont appelés fluides pseudo-plastiques et obéissent aux relations suivantes :

$$\tau = k\dot{\gamma}^n$$

$$\mu = k\dot{\gamma}^{n-1}$$

Equation 2

Où k , n sont des constantes positives et $0 < n < 1$.

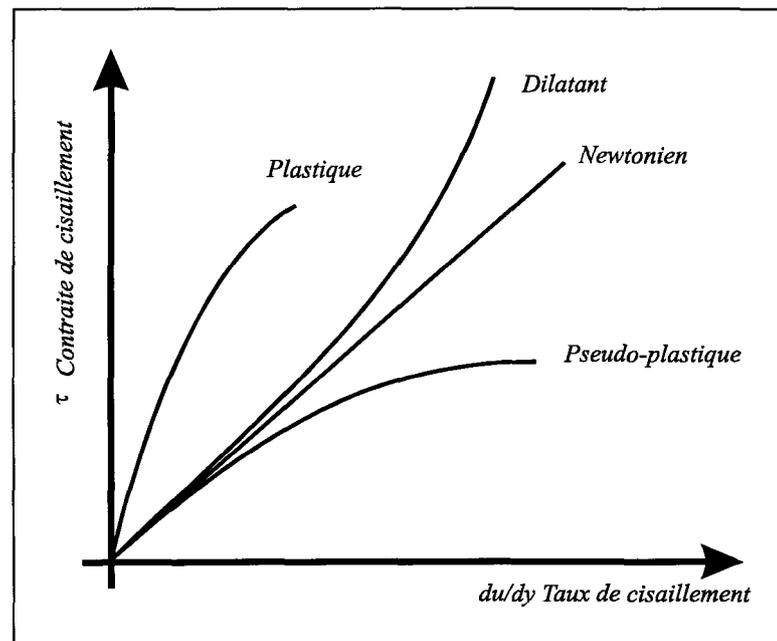


Figure 5: Représentation de différents fluides

2.2.2. Diffusivité

Lorsque deux fluides différents se mélangent, un mécanisme de mouvement moléculaire provoque une transmission de masse par diffusion (Figure 6). En considérant le cas d'un système unidimensionnel, on aboutit à la relation suivante :

$$m'' = -D \frac{dC}{dy}$$

Equation 3

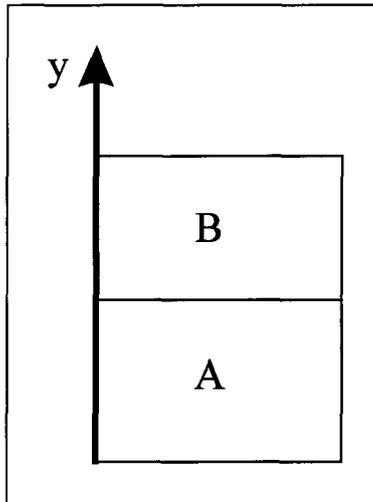


Figure 6: Mélange de deux fluides

Cette relation est en fait la loi de Fick (Référence 25), où m'' est le flux de masse par unité de surface et de temps, $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$, C la concentration de masse par unité de volume, kg/m^3 , et D le coefficient de diffusivité, m^2/s .

2.2.3. Tension de surface

Lorsqu'un liquide est en contact avec un gaz, c'est-à-dire une interface air/liquide, le liquide peut s'étendre librement dans l'air (Figure 7). Cette extension est due au fait que les molécules à la surface sont moins denses que les autres. Implicitement, elles s'attirent ; cette attraction provient du fait que les molécules voisines de chaque constituant sont manquantes ; on dit alors que la surface est en tension (Référence 24).

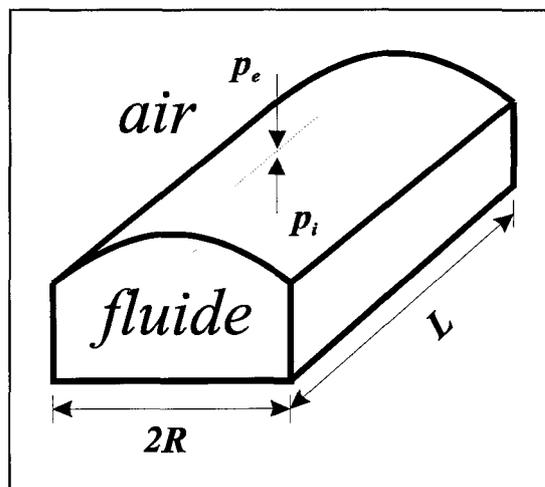


Figure 7: Fluide en tension

P_i et P_e représentent respectivement les pressions intérieure et extérieure.

En faisant une coupe au niveau de l'interface (Figure 8), par le principe de l'équilibre des forces, on obtient le résultat suivant :

$$2RL\Delta p = 2\sigma L$$

$$\Delta p = p_i - p_e = \frac{\sigma}{R}$$

Equation 4

Où σ est la tension de surface (N/m) et R le rayon de courbure bidimensionnel de la surface.

Considérant l'équation de surface $h=h(x)$, le rayon de courbure est l'inverse de la dérivée seconde de cette fonction. On a donc :

$$\Delta p = \sigma \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}$$

Equation 5

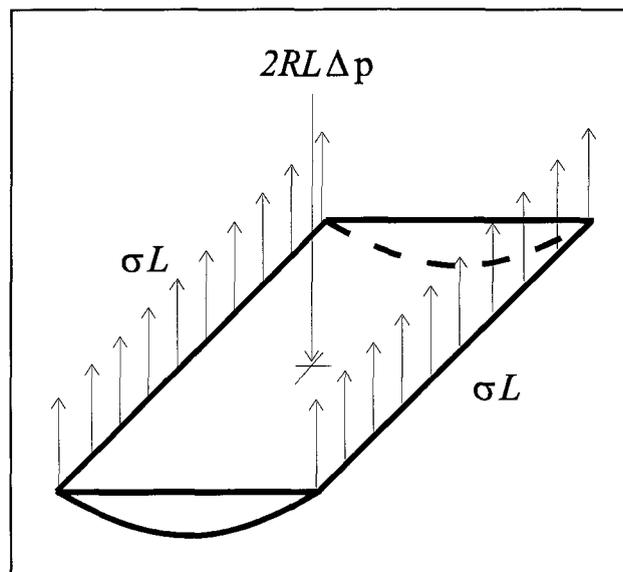


Figure 8: Coupe du fluide

2.3. Modélisation du WSET

2.3.1. Introduction

Dans l'étude, on a considéré un écoulement bidimensionnel. On définit comme « axe x » le sens de l'écoulement ou la direction parallèle à la plaque, comme « axe y » le sens de l'épaisseur du fluide ou la direction perpendiculaire à la plaque (Figure 9a). Le domaine étudié est représenté à la Figure 9b. Ainsi, pour les vitesses et les diffusions, on a fait les suppositions suivantes :

- la vitesse initiale du fluide est nulle ;
- la vitesse du fluide au bas de la plaque est nulle ;
- la vitesse du vent est uniforme ;
- la concentration initiale du fluide est uniforme et fonction des concentrations en glycol du fluide ;
- la diffusion du fluide dans la plaque est inexistante.

Grâce à ces hypothèses, il est possible maintenant de modéliser le WSET en utilisant des équations mathématiques. Dans ce chapitre, on va déterminer les équations de base du système, faire la discrétisation de celle-ci et finalement décrire l'algorithme permettant de faire la simulation numérique du WSET.

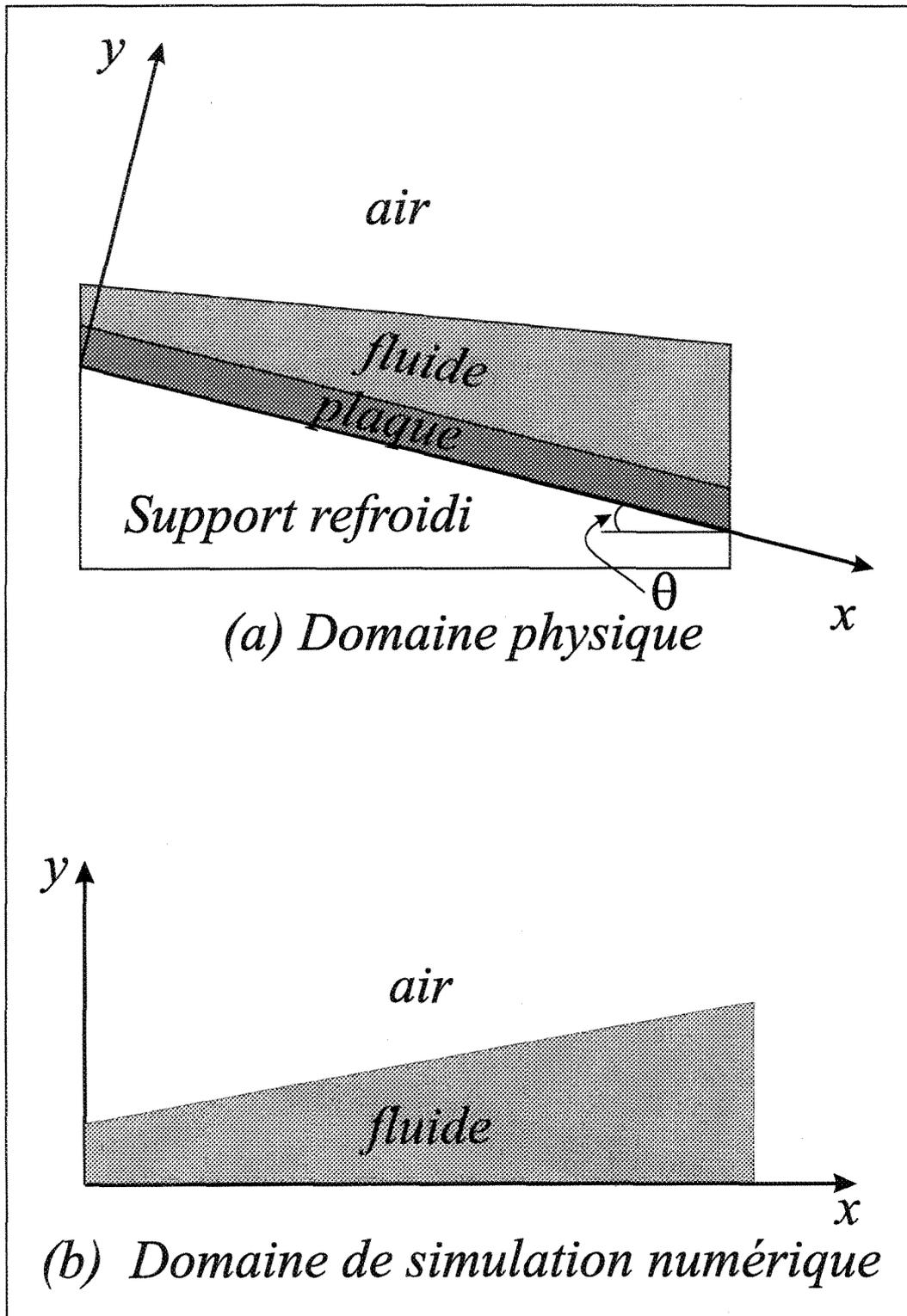


Figure 9: Domaine de simulation

2.3.2. Etude de l'écoulement du fluide

Les équations complètes du mouvement ou équations de Navier-Stokes, selon John

D. Anderson JR. (Référence 29 p.76) s'écrivent :

$$\begin{aligned}\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho u \vec{V}) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho f_x + \vec{\nabla} \cdot (\mu \vec{\nabla} u) + \frac{1}{3} \frac{\partial(\mu \vec{\nabla} \vec{V})}{\partial x} \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho v \vec{V}) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho f_y + \vec{\nabla} \cdot (\mu \vec{\nabla} v) + \frac{1}{3} \frac{\partial(\mu \vec{\nabla} \vec{V})}{\partial y} \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho w \vec{V}) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho f_z + \vec{\nabla} \cdot (\mu \vec{\nabla} w) + \frac{1}{3} \frac{\partial(\mu \vec{\nabla} \vec{V})}{\partial z}\end{aligned}$$

Equation 6 ◦

Où $\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$, $\vec{f} = f_x\vec{i} + f_y\vec{j} + f_z\vec{k} = g \sin(\theta)\vec{i} - g \cos(\theta)\vec{j}$ et ρ représentent respectivement le vecteur de vitesse, les forces extérieures par unité de masse et la densité.

Dans l'étude, on suppose que l'écoulement du fluide est bidimensionnel (Figure 9), cela signifie que la composante z est inexistante. Cela constitue la première hypothèse basée sur la géométrie imposée. La seconde hypothèse est que la vitesse perpendiculaire à la plaque, v, est négligeable par rapport à la vitesse horizontale à cause de la déclivité de la plaque. Cette hypothèse est justifiée, car l'angle d'inclinaison de la plaque est de 10 degrés pour le WSET. Par conséquent, le système d'équations se réduit en une seule qui est :

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho f_x + \vec{\nabla} \cdot (\mu \vec{\nabla} u) + \frac{1}{3} \frac{\partial(\mu \vec{\nabla} \vec{V})}{\partial x}$$

Equation 7

Comme la variation de densité dans le temps est faible, la troisième hypothèse est de considérer que le fluide est incompressible. Partant de ce fait, le terme $\vec{\nabla} \cdot \vec{V}$ devient nul. De plus, on a constaté que le rapport des forces d'inertie aux forces de viscosité (nombre de Reynolds) est petit. De ce fait, la quatrième hypothèse est de considérer que le terme de convection $\vec{\nabla} \cdot (\rho u \vec{V})$ est également nul. L'Equation 7 devient :

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho f_x + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

Equation 8

ou encore,

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + f_x + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu}{\rho} \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

Equation 9

Car on peut considérer que la densité ρ est constante.

De plus, en utilisant la deuxième équation du système initial (Equation 6) on obtient l'Equation 10 car on considère que la vitesse perpendiculaire à la plaque « v » est nulle.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho g \cos \theta$$

Equation 10

Puis en supposant que la pression à la surface du fluide est $P_s = P_a - \sigma \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}$ et en développant le terme de pression, on trouve :

$$p = \rho g(h - y) \cos \theta + P_a - \sigma \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}$$

Equation 11

Où P_a est la pression atmosphérique et h l'épaisseur locale du fluide.

Finalement l'Equation 9 devient :

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu}{\rho} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + g \sin \theta - g \cos \theta \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\sigma}{\rho} \frac{\partial^3 h}{\partial x^3}$$

Equation 12

En ce qui concerne les conditions initiales pour l'équation du mouvement, on suppose que le fluide est au repos au départ. Par conséquent, on n'aura qu'une seule condition initiale qui est la suivante:

$$u(x, y, 0) = 0$$

Equation 13

Il y a deux conditions aux limites. La première est que le fluide en contact avec la plaque a une vitesse nulle en tout temps. La deuxième provient du vent au dessus de l'interface air/fluide, cette condition limite est basée sur la couche limite qui dépend du nombre de Reynolds local (Référence 26). Les conditions limites s'écrivent alors :

$$u(x,0,t) = 0$$

Equation 14

$$\frac{\partial u}{\partial y}(x,h,t) = \left(\frac{\rho_a u_a^2}{\mu} \right) C_f$$

Equation 15

Où $C_f = f(\text{Re})$ et l'indice a désigne l'air.

En fait, le paramètre C_f dépend de la vitesse du vent au dessus du fluide :

$$\text{Laminaire} : C_f = 0.664 R_{ex}^{-1/2}$$

$$\text{Turbulent} : C_f = 0.0577 R_{ex}^{-1/5}$$

$$\text{avec } R_{ex} = \frac{U_\infty x}{\nu}$$

Equation 16

2.3.3. Etude de la diffusion de la précipitation dans le fluide

L'équation de diffusion selon Jost W. (Référence 30) s'écrit :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} c + c \vec{\nabla} \cdot \vec{V} = \vec{\nabla} \cdot (D \vec{\nabla} c)$$

Equation 17

Où \vec{V} représente le vecteur de vitesse $\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$.

Comme il s'agit d'un écoulement bidimensionnel, la composante z est inexistante. De plus, dans ce phénomène physique la densité est à peu près constante. De ce fait, le fluide est incompressible, d'où, le terme $\vec{\nabla} \cdot \vec{V}$ devient nul. De plus, en évaluant les rapports de similitude, on a constaté qu'une partie du terme de convection $v \frac{\partial c}{\partial y}$ peut être omise à cause de sa faible amplitude par rapport aux autres termes. Cette simplification n'est pas étonnante, car on a considéré dans l'étude des équations du mouvement (section 2.2.1) que la vitesse perpendiculaire à la plaque v était négligeable par rapport à la vitesse horizontale à la plaque u. En tenant compte de ces simplifications l'Equation 17 se présente comme suit :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial c}{\partial y} \right)$$

Equation 18

Les conditions initiales pour l'équation de diffusion, correspond à une concentration c_0 uniforme au début. Cette concentration c_0 dépend de la concentration en eau qu'il y a dans le fluide à l'état initiale.

$$c(x, y, 0) = c_0$$

Equation 19

Il existe deux conditions limites. La première est le fait qu'il n'y ait pas de diffusion du fluide dans la plaque. La deuxième a trait à la pluie verglaçante qui tombe sur la surface

supérieure du film fluide avec une intensité m'' (kg/m²s). Les conditions limites sous forme d'équations sont

donc :

$$\frac{\partial c}{\partial y}(x, 0, t) = 0$$

Equation 20

$$\frac{\partial c}{\partial y}(x, h, t) = -\frac{m''}{\rho_e D} c$$

Equation 21

Où h désigne l'épaisseur du fluide et ρ_e la densité de l'eau.

2.3.4. Etude de l'épaisseur du fluide

L'équation d'épaisseur dans le fluide, correspond au bilan de masse, c'est-à-dire la différence entre la quantité de masse qui rentre et la quantité de masse qui sort. L'équation pour le calcul de l'épaisseur local est donc :

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{m''}{\rho} - \int_0^h \frac{\partial u}{\partial x} dy$$

Equation 22

2.4. Discrétisation des équations de base

Pour la discrétisation des équations, on a choisi d'utiliser la méthode des volumes finis car elle s'applique bien au cas d'étude. De plus, on a donné une forme implicite à nos équations afin d'avoir une plus grande précision dans nos calculs. Pour ce qui est du maillage, il est mobile et adapté de façon à permettre d'avoir des cellules rectangulaires et de conserver le même nombre de cellules en y pendant toute la simulation. En fait, la hauteur des cellules devient de plus en plus petite au fur et à mesure que l'épaisseur diminue dans le temps, ce qui donne une meilleure précision dans les calculs simulant des tests du WSET de longue durée (deux heures).

2.4.1. Équation de vitesse

Sur la figure ci-dessous on a représenté la discrétisation d'une colonne de fluide afin de mieux comprendre l'équation discrète (Equation 23).

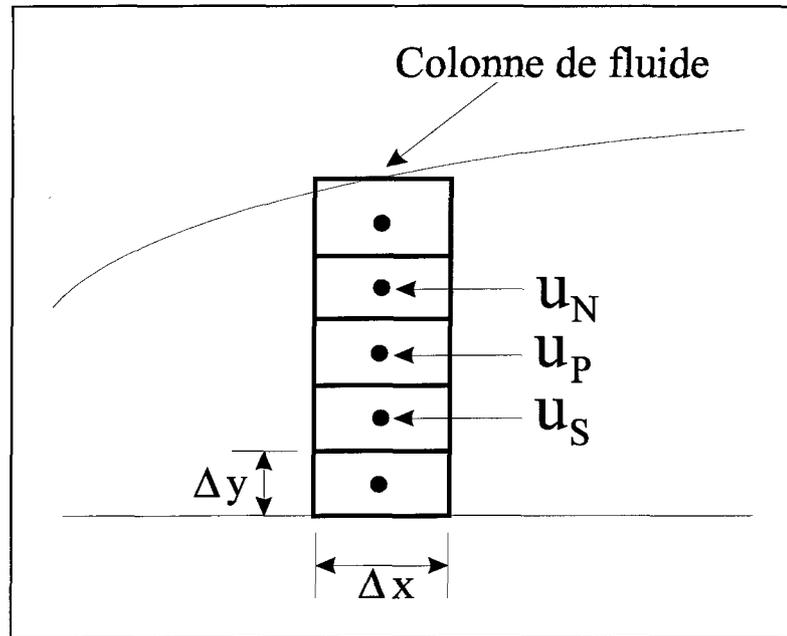


Figure 10: Représentation discrète d'une colonne de fluides pour les vitesses

Finalement en rendant discret et en utilisant la méthode de volume fini, l'équation de mouvement (Equation 12) se réduit en un système tridiagonal qui a comme équation de base :

$$-(a_S u_S)^{n+1} + (a_P u_P)^{n+1} - (a_N u_N)^{n+1} = (a_{p0} u_P)^n + (A)^n$$

où $a_S = \frac{\Delta x}{\Delta y} \mu_S$, $a_N = \frac{\Delta x}{\Delta y} \mu_N$, $a_P = \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t} \rho$, $a_P = a_N + a_{p0} + a_S$ et

$$A = \left(g \sin(\theta) - g \cos(\theta) \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\sigma}{\rho} \frac{\partial^3 h}{\partial x^3} \right) \Delta x \Delta y$$

Equation 23

Dans cette équation, N et S désignent respectivement le Nord et le Sud (voir Figure 10), n et $n+1$ en exposant représentent le temps présent et le temps suivant et A symbolise la discrétisation des termes de pression et gravité. Cette notation qui utilise les points

cardinaux peut servir à simplifier les algorithmes lorsqu'on a plusieurs équations à résoudre (concentration, mouvement, énergie). Ainsi, leur équation de base se réduira à des flux qui ont des poids différents (Référence 27). On verra lors d'une prochaine section, que le fait d'avoir réduit le système de l'équation de mouvement en un système tridiagonal est un gain pour la rapidité d'exécution de l'algorithme parce que l'on utilisera une méthode de résolution efficace spécialement conçue pour les systèmes tridiagonaux (Référence 28).

2.4.2. Équation de concentration

Dans le souci de mieux expliquer l'équation discrète de concentration, on a fait une représentation (Figure 11) d'une colonne de fluide.

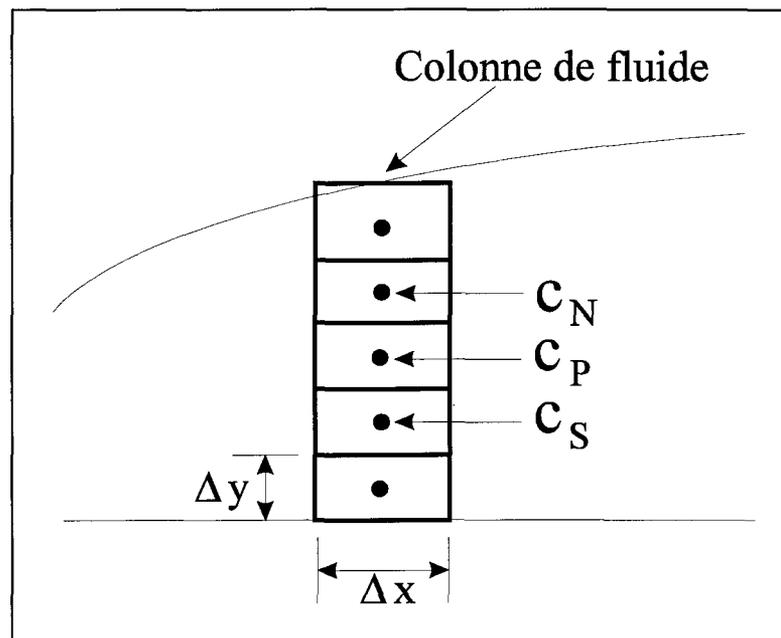


Figure 11: Représentation discrète d'une colonne de fluide pour les concentrations

Comme pour l'équation de mouvement, on obtient la forme discrète de l'équation de diffusion (Equation 24) en utilisant la méthode de volume fini. De plus, comme on veut que l'algorithme soit efficace par rapport à la rapidité d'exécution, on a tenté de faire apparaître une structure tridiagonale. L'équation de base s'écrit donc comme suit:

$$-(a_S c_S)^{n+1} + (a_P c_P)^{n+1} - (a_N c_N)^{n+1} = (a_{p0} c_P)^n + (A)^n$$

où $a_S = \frac{\Delta x}{\Delta y} D_S$, $a_N = \frac{\Delta x}{\Delta y} D_N$, $a_P = \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t}$, $ap = a_N + a_{p0} + a_S$ et

$$A = \left(u \frac{\partial c}{\partial x} \right) \Delta x \Delta y$$

Equation 24

Dans cette équation, N et S désignent respectivement le Nord et le Sud (voir Figure 11), n et $n+1$ en exposant représentent le temps présent et le temps suivant et A symbolise la discrétisation du terme de convection. On peut remarquer que les formes discrètes des équations du mouvement et de diffusion sont assez similaires. En effet, il n'y a que les valeurs des poids associés à la vitesse et la concentration qui diffèrent. Le fait d'avoir utiliser la notation de Patankar (Référence 27), permet d'avoir une similarité qui représente un atout pour l'écriture du programme informatique. En effet, elle permet l'emploi d'un même algorithme pour la résolution des deux équations.

2.4.3. Équation d'épaisseur

En rendant l'équation de l'épaisseur (Equation 22) discrète et conformément au contrôle de volume choisi (Figure 12), elle devient :

$$(h_i)^{n+1} = (h_i)^n + \frac{m'' \Delta t}{\rho_e} + \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \sum_0^{h_{i-1}} u_{i-1} \Delta y_{i-1} \right)^{n+1} - \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \sum_0^{h_i} u_i \Delta y_i \right)^{n+1}$$

Equation 25

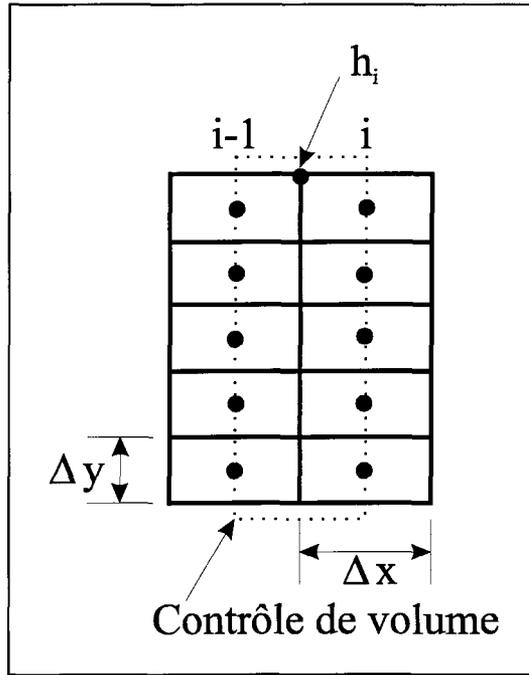


Figure 12: Contrôle de volume pour le calcul de l'épaisseur

Dans l'Equation 25, n et $n+1$ désignent le temps présent et le temps suivant, m'' représente le taux de précipitation et h_i indique l'épaisseur du fluide à gauche de la colonne i . Dans l'équation discrète on peut voir que la quantité de masse qui rentre dans le volume de contrôle est représentée par le terme qui contient la précipitation $\frac{m'' \Delta t}{\rho_e}$ et la somme des

vitesse de gauche $\frac{\Delta t}{\Delta x} \sum_0^{h_{i-1}} u_{i-1} \Delta y_{i-1}$. D'autre part, la quantité de masse qui sort est

représentée par le terme qui contient la somme des vitesses de droite $\frac{\Delta t}{\Delta x} \sum_0^{h_i} u_i \Delta y_i$.

2.5. Interpolation des paramètres

Les paramètres nécessaires à la simulation et reliés au fluide (densité, diffusivité, tension de surface, viscosité) ont une forme discrète parce qu'ils sont issus d'expériences faites en laboratoire. Or dans le programme de simulation on a besoin de connaître ces paramètres sous une forme continue. Ce fait oblige à faire des interpolations basées sur les données expérimentales disponibles. Partant de ce fait, on a choisi de faire des interpolations polynomiales, plus précisément, un polynôme passant par tous les points liés au paramètre. En réalité, on a quatre types d'interpolations. La première concerne une partie des paramètres physiques du fluide (densité, diffusivité, tension de surface) et sont connus pour les concentrations en fluide suivantes : 100%, 75%, 50% et 25%. En utilisant la méthode d'interpolation de Lagrange et en développant le polynôme obtenu, on obtient l'équation suivante :

$$\begin{aligned}
 f(c) &= a_3c^3 + a_2c^2 + a_1c + a_0 \\
 a_3 &= \frac{32}{3}d_{100} - 32d_{75} + 32d_{50} - \frac{32}{3}d_{25} \\
 a_2 &= -16d_{100} + 56d_{75} - 64d_{50} + 24d_{25} \\
 a_1 &= \frac{22}{3}d_{100} - 28d_{75} + 38d_{50} - \frac{52}{3}d_{25} \\
 a_0 &= -d_{100} + 4d_{75} - 6d_{50} + 4d_{25}
 \end{aligned}$$

Equation 26

Dans cette équation « c » désigne la concentration ($c \in [0,1]$), d_{100} la donnée mesurée en laboratoire avec une concentration en fluide de 100% et f la donnée interpolée.

La deuxième sert à calculer la viscosité en utilisant trois paramètres (μ_0 , k , n) issus des mesures faites au laboratoire. Comme pour la première interpolation, on va donner la forme polynomiale de l'équation d'interpolation. On peut signaler qu'il y a une légère différence dans les concentrations prises pour les mesures de la viscosité (100%, 75%, 50% 0%).

$$\begin{aligned}
 f(c) &= a_3c^3 + a_2c^2 + a_1c + a_0 \\
 a_3 &= \frac{8}{3}d_{100} - 16d_{75} - \frac{64}{3}d_{50} - 8d_0 \\
 a_2 &= -2d_{100} + 20d_{75} - 32d_{50} + 14d_0 \\
 a_1 &= \frac{1}{3}d_{100} - 4d_{75} + \frac{32}{3}d_{50} - 7d_0 \\
 a_0 &= d_0
 \end{aligned}$$

Equation 27

La troisième interpolation permet de connaître la concentration en fluide que doit avoir une cellule pour qu'elle soit gelée. Ici elle est basée sur des courbes de « point de congélation » en fonction de la concentration en eau/glycol et de la température. Comme on a considéré que le modèle est isotherme, l'interpolation est valable pour une seule température (-5°C) et s'écrit comme suit :

$$c_{FP} = \frac{1}{900} \left(\frac{120c_{EG} + 192c_{DG} + 130c_{PG}}{c_{EG} + c_{DG} + c_{PG}} \right)$$

C_{FP}: concentration du point de congélation (Freezing Point)
C_{EG}: concentration initiale en éthylène glycol dans le fluide
C_{DG}: concentration initiale en diéthylène glycol dans le fluide
C_{PG}: concentration initiale en propylène glycol dans le fluide

Equation 28

Enfin la quatrième interpolation qui est en fait une extrapolation (Equation 29) aide à connaître l'épaisseur de la prochaine colonne du fluide après avoir calculé les vitesses dans ses cellules (voir Figure 13).

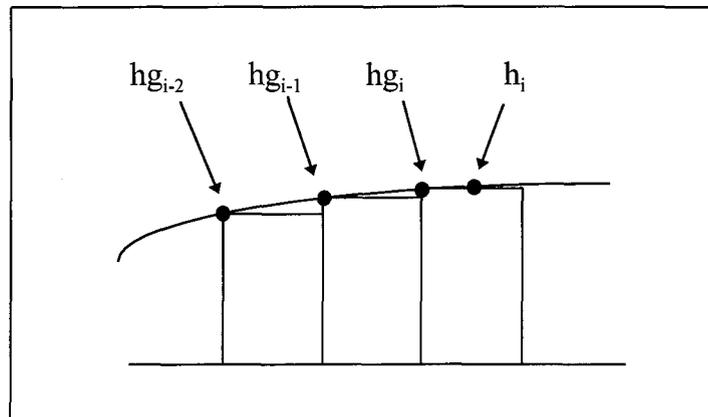


Figure 13 : Extrapolation pour le calcul des épaisseurs

$$h_i = \frac{15}{8}hg_i - \frac{5}{4}hg_{i-1} + \frac{3}{8}hg_{i-2}$$

Equation 29

En fait, c'est à partir de la troisième colonne que cette extrapolation est utilisée. Pour les autres on utilise des extrapolations toujours polynomiales mais moins précises.

2.6. Description de l'algorithme

Après avoir étudié le mouvement du fluide, la diffusion de l'eau dans le fluide et le calcul de l'épaisseur du fluide, on va combiner toutes ces études afin de décrire l'algorithme de simulation du WSET. Tout d'abord, à l'état initial, on va considérer que le fluide n'est pas en mouvement (vitesses nulles), que l'épaisseur du fluide h_0 sur la plaque est uniforme (constante), mais aussi que la concentration du fluide c_0 est uniforme (constante) à travers tout le film fluide. Ensuite, on va résoudre dans l'ordre et pour chaque colonne de fluide à un instant donné, l'équation du mouvement suivi de l'équation de l'épaisseur et finalement l'équation de diffusion. Les différentes résolutions se feront jusqu'à ce que le premier pouce du film fluide en partant du haut de la plaque ait atteint le point de congélation. Pour pouvoir simuler la congélation, plusieurs stratégies peuvent être appliquées. Dans le cas de cette étude, on va considérer qu'il y a une surfusion. Par conséquent, les cellules d'une colonne deviennent immobiles lorsque la cellule collée à la plaque a atteint le point de congélation. Cette stratégie est illustrée par un organigramme sur la Figure 14. En définitive, on a considéré que le temps pour lequel le premier pouce est congelé correspond

au temps de protection du fluide antigivre (Référence 31). Il est à noter que, afin de pouvoir mieux comprendre tout le processus de la simulation du WSET, on a également joint un organigramme (Figure 10) qui met en évidence, selon un ordre chronologique tout ce qui a été précisé ci-dessus.

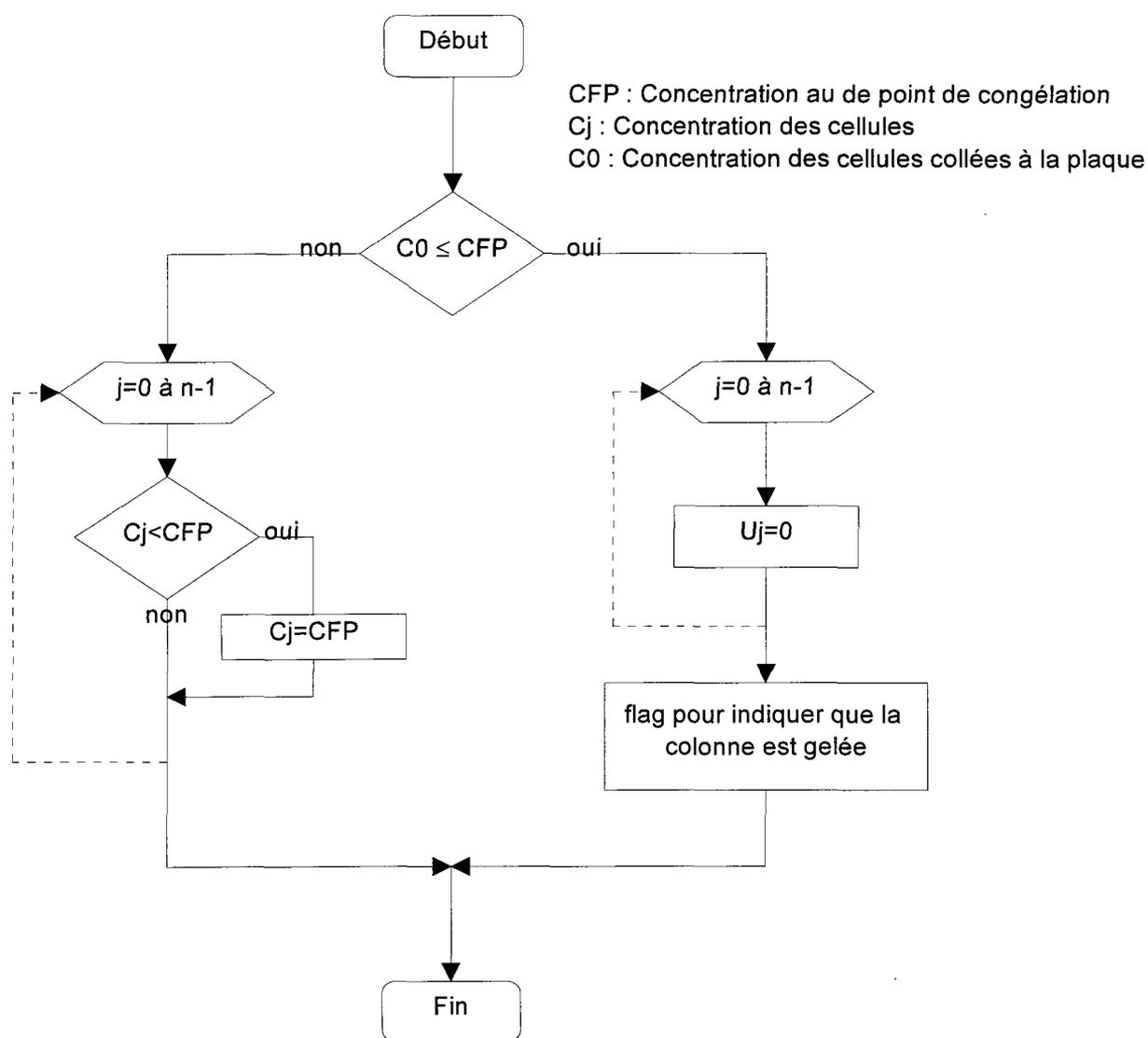


Figure 14: Organigramme de la congélation

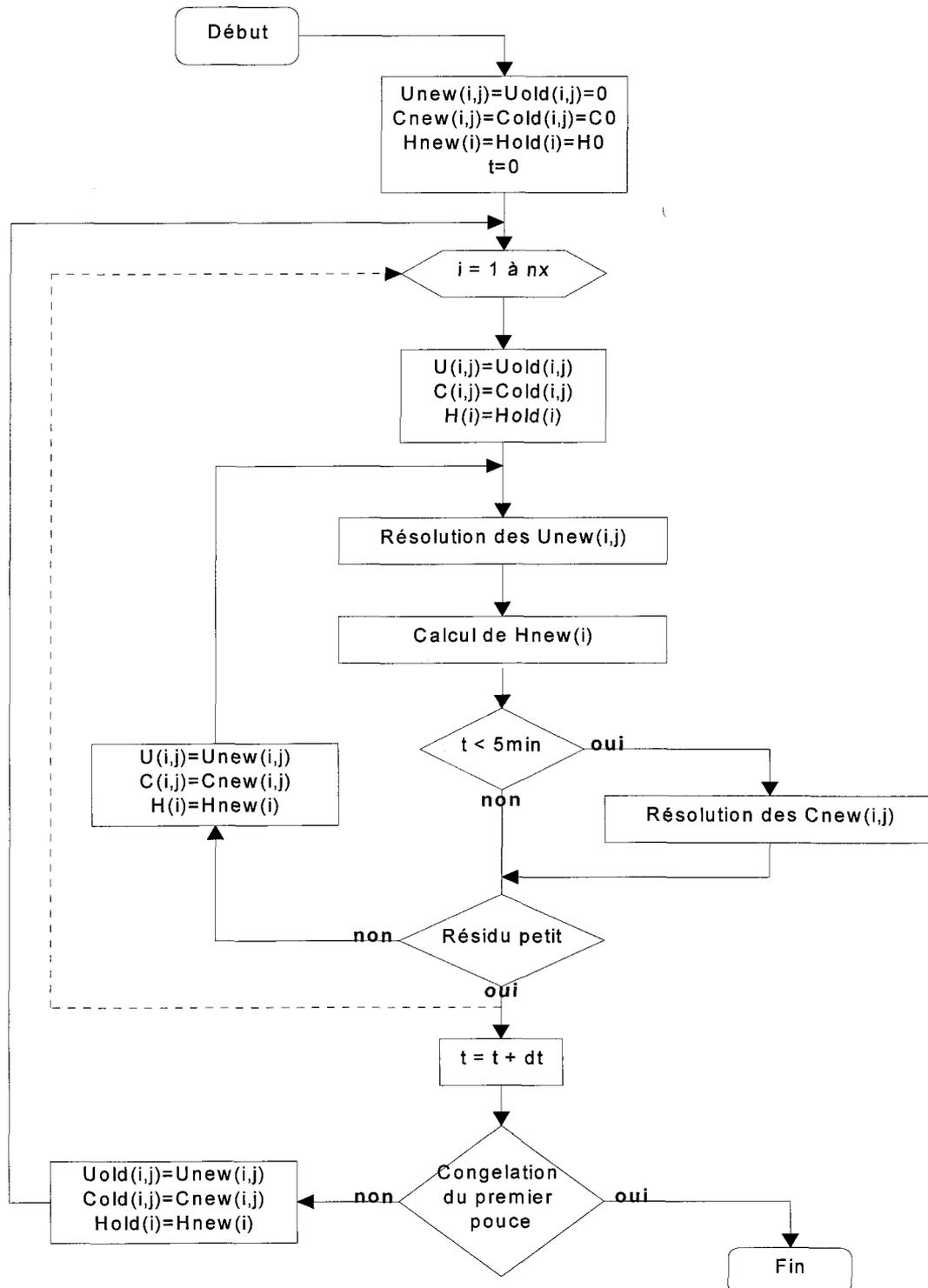


Figure 15: Organigramme de la simulation

CHAPITRE 3

3. Interface graphique pour la simulation

3.1. Introduction

Après avoir construit l'organigramme qui décrit la simulation du modèle, on a traduit ce dernier dans un langage orienté-objet (C++). Le choix s'est porté sur ce langage car la modélisation s'y prête bien du fait de l'évolution que peut subir un modèle. Ainsi, lorsque le modèle subira une transformation, on pourra facilement d'apporter des changements au programme, sans fournir trop d'efforts. De plus, on a voulu constituer un outil informatique assez simple d'utilisation permettant à une personne qui ne serait pas familière à la modélisation (opérateur) de pouvoir l'utiliser aisément. Pour cela, on a réalisé une interface graphique qui comporte un menu de sélection, des boutons et des boîtes de dialogue. Grâce à cette interface graphique munie de plusieurs éléments précités, il est possible de définir un problème, d'en faire la simulation mais aussi d'en observer les résultats. Pour réaliser cet interface graphique, on a utilisé un logiciel de développement sous l'environnement WINDOWS 3.1 (Microsoft Visual C++ version 1.0). En conséquence, le programme de simulation fonctionne avec un matériel peu dispendieux. De fait, un ordinateur PC muni d'un microprocesseur 80386, d'une mémoire de 4Mo et du

logiciel WINDOWS 3.1 est suffisant. De plus, la taille du programme exécutable est d'environ 350 kilo-octets, pouvant facilement s'inclure dans n'importe quelle disquette. Ainsi afin d'exécuter le programme, il suffira de taper SIMWSET.EXE pour le mettre en marche.

Pour faire une simulation avec le programme, on doit tout d'abord définir le problème en entrant premièrement les données dans les boîtes de dialogue prévues à cet effet. Puisque la simulation a besoin d'un nombre non-négligeable de données d'entrées. On a choisi de la diviser en trois groupes. Le premier groupe est constitué des données reliées aux propriétés physiques du fluide antigivre ou dégivrant. Le deuxième groupe comporte les données attachées aux conditions climatiques et à d'autres paramètres reliés au WSET et le troisième groupe comporte essentiellement les données reliées aux calculs numériques. Dans la section suivante, on abordera précisément les trois groupes des données d'entrées. A l'instar du nombre de données d'entrées non-négligeables, on a ajouté une option qui permet de mémoriser toutes les données d'entrée dans un fichier ayant comme extension « .in ». Ainsi, lors de la réalisation d'un problème qui a presque les mêmes données qu'un fichier déjà mémorisé, il suffira :

- a) d'aller lire l'ancien fichier d'entrée;
- b) de modifier les paramètres qui diffèrent;
- c) de lancer la simulation.

Cette option constitue un atout considérable pour la définition d'un problème représentant des similitudes avec un autre. Toujours en accord avec les données d'entrée, une autre

option permet de vérifier sous forme d'un graphique les propriétés physiques reliées au fluide, c'est-à-dire les lois de viscosité et de diffusivité.

Après avoir défini le problème dans le logiciel de simulation, on peut maintenant lancer la simulation. Une fois la simulation commencée, il y a une boîte de dialogue qui apparaît et fournit des informations sur le temps réel de la simulation WSET, la plus petite concentration en fluide à 2.5 cm en partant du haut de la plaque ainsi que sur la concentration en fluide pour qu'une cellule soit gelée (point de congélation). Le programme continuera à tourner jusqu'à ce que la plus petite concentration en fluide à 2.5 cm atteigne le point de congélation. Le fait d'avoir choisi la distance 2.5 cm n'est pas un hasard car le temps de protection (Hold Over Time) du fluide antigivre ou dégivrant correspond au temps lorsque le premier pouce (2.5 cm) de la plaque est complètement gelé. Une fois la simulation terminée, une autre boîte de dialogue apparaît donnant des renseignements sur le temps de protection du fluide, le temps de calcul mis par l'ordinateur etc... . Lorsque simulation est terminée, les résultats peuvent apparaître sous forme de graphiques. A cet effet, il est possible de visualiser des paramètres tels que la vitesse horizontale, la concentration en fluide, l'épaisseur, la diffusivité, la viscosité, le taux de cisaillement, le cisaillement, la densité en fonction des paramètres spatiaux et temporels (x,y,t). Plus de mille courbes peuvent ainsi être visualisées dans le cadre d'une simulation. Toute cette panoplie de visualisation de courbes est possible parce qu'on a mémorisé dans un fichier tous les paramètres calculés pendant le processus de simulation. Pour plus

d'informations sur l'utilisation et les possibilités du logiciel de simulation un manuel de l'utilisateur est fourni en annexe 2.

3.2. Description des données pour la simulation

3.2.1. Les données d'entrée de la simulation

On a vu précédemment que les données d'entrée sont divisées en trois groupes: celles reliées au fluide, à l'environnement et au calcul numérique. Les paramètres reliés au fluide sont eux mêmes subdivisés en trois sous-groupes. Dans le premier sous-groupe (Figure 16), on doit donner les différentes proportions en glycol dans le fluide, plus précisément la proportion d'eau, d'éthylène glycol, de diéthylène glycol et de propylène glycol. Ces données proviennent du fabricant du fluide. De plus, on doit fournir la proportion en volume d'eau qu'on a ajoutée au fluide. Ainsi la proportion « 0 » correspond au fluide pur (celui du manufacturier). En connaissant les composants en glycol du fluide, il est possible de déterminer le point de congélation du fluide, c'est à dire la concentration minimale pour que le fluide soit gelé. La boîte de dialogue du premier sous-groupe se présente comme suit :

Fluid properties

(All data are at T=-5°C)

Weight concentration in neat fluid

water : 38. %

ethylene glycol : 62. %

diethylene glycol : 0. %

propylene glycol : 0. %

other : 0. %

Volume concentration of water added to neat fluid : 0. %

OK Cancel

Figure 16: Proportions dans le fluide

Dans le deuxième sous-groupe, on doit entrer les paramètres de la loi de viscosité (Equation 1) du fluide pour les différentes concentrations (Figure 17).

$$\mu = \mu_{ls} \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_{ls}} \right)^{n-1}$$

Equation 30

Fluid Properties

Pseudo-plastic dynamic viscosity

Fluid volume concentration	low shear μ_{ls} (Pa.s)	high shear constant $\mu = \mu_{ls} [\dot{\gamma} / \dot{\gamma}_h]^{n-1}$	
		$\dot{\gamma}_h$	n
100 %	4.3865	1.7248	0.6457
75 %	4.0252	1.4674	0.5834
50 %	2.5033	0.7913	0.5874
0 %	2.e-003	2.e-003	1.

OK Cancel

Figure 17: Paramètres de la viscosité

Ainsi, lorsque le $\dot{\gamma}$ est inférieur à $\dot{\gamma}_{ls}$, la viscosité est μ_{ls} et lorsque $\dot{\gamma}$ est supérieur à $\dot{\gamma}_{ls}$, la viscosité est calculée en utilisant l'équation 1. Les paramètres de la loi de viscosité sont issues d'expériences à l'aide d'un viscosimètre cylindrique rotatif de la compagnie Brookfield (Références 32 et 33). Dans le troisième sous-groupe, on doit donner la densité, la diffusivité et la tension de surface à différentes concentrations (Figure 18). La densité peut être obtenue en utilisant par exemple un hydromètre en verre Fisherband séries 11-555 qui a une résolution de 0.5 kg/m³ (Références 34, 35 et 36). La diffusivité peut être obtenue par une méthode de mesure élaborée dans le laboratoire LIMA de l'UQAC (Références 12 et 13). La tension de surface peut être trouvée en utilisant par exemple un tensiomètre (Fisher modèle 20) en forme d'anneau. Comme dans le modèle on ne fait pas intervenir

l'équation de température alors le modèle est isotherme. Par conséquent toutes les mesures sont prises à une même température -5°C .

The screenshot shows a dialog box titled "Fluid Properties" with a close button (X) in the top right corner. The main title inside the box is "Diffusivity, Density, Surface Tension properties". Below this title is a table with four columns: "Fluid volume concentration", "Diffusivity $10^{-6} \text{ (cm}^2/\text{s)}$ ", "Density kg/dm^3 ", and "Surface Tension dynes/cm ". The table contains four rows of data corresponding to concentrations of 100%, 75%, 50%, and 25%. Each cell in the table contains a numerical value inside a small rectangular input field. At the bottom of the dialog box, there are two buttons: "OK" and "Cancel".

Fluid volume concentration	Diffusivity $10^{-6} \text{ (cm}^2/\text{s)}$	Density kg/dm^3	Surface Tension dynes/cm
100 %	3.28	1.0725	35.4
75 %	4.67	1.0565	33.
50 %	5.72	1.0375	30.7
25 %	6.83	1.0275	28.

Figure 18: Propriétés dynamiques

Dans le deuxième groupe, appelé paramètres de l'environnement, les données que l'on doit entrer sont essentiellement liées au WSET et aux conditions climatiques (Figure 19). Pour les données attachées au WSET, on a l'épaisseur initiale du fluide sur la plaque, généralement elle est de un millimètre pour le WSET. L'inclinaison de la plaque (10 degrés pour le WSET), la longueur de la plaque (3 dm pour le WSET) et le temps du début de la précipitation (5 minutes pour le WSET). Pour ce qui est des données reliées aux conditions climatiques on a l'intensité de précipitation et la vitesse de l'air au dessus du fluide. Il faut signaler qu'une vitesse positive de l'air correspond à une vitesse dans le sens de l'écoulement du fluide sur la plaque inclinée.

Environment Parameters

(All data are at T=-5°C)

Supercooled precipitation intensity 5 g/(dm².h)

Fluid film initial thickness 1 mm

Plate slope 10 deg

Plate length 3 dm

Initial draining time without precipitation 5 min

Downstream wind velocity 1 m/s

OK Cancel

Figure 19: Paramètres du WSET

Dans le troisième groupe, appelé paramètres numériques, les données y sont attachées au calcul numérique (Figure 20). Celles-ci incluent le nombre de cellules en x et en y, qui est proportionnel à la précision du calcul et au temps de calcul. On a également le pas de temps du début de la simulation numérique, le temps maximum de simulation, la précision du calcul numérique et le choix entre l'arrêt au HOT et le temps maximum de simulation. Si dernier choix est positif, le programme s'arrêtera au HOT. Dans le cas contraire, il s'arrêtera au temps maximum de simulation. Le fait de choisir le temps maximum de simulation sert à faire stopper la simulation avant ou après le HOT. Ainsi, il peut être possible d'observer les différents phénomènes se produisant après le HOT.

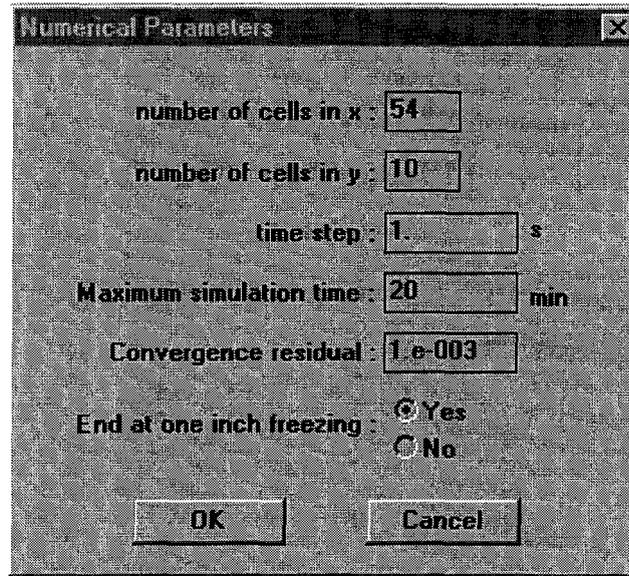


Figure 20: Paramètres numériques

Par ailleurs, grâce au menu, on peut faire le choix de tracer les courbes de viscosité en fonction du taux de cisaillement à différentes concentrations (Figure 21). Ainsi, il est possible de vérifier si le fluide est du Type I (newtonien) ou de Type II (pseudo-plastique). D'autre part, le menu permet de visualiser l'allure des courbes de diffusivité en fonction du taux de cisaillement à différentes concentrations (Figure 22). Comme on l'a dit au début du chapitre 3, ces différents graphiques sont uniquement un moyen d'inspection des données qu'on a entrées.

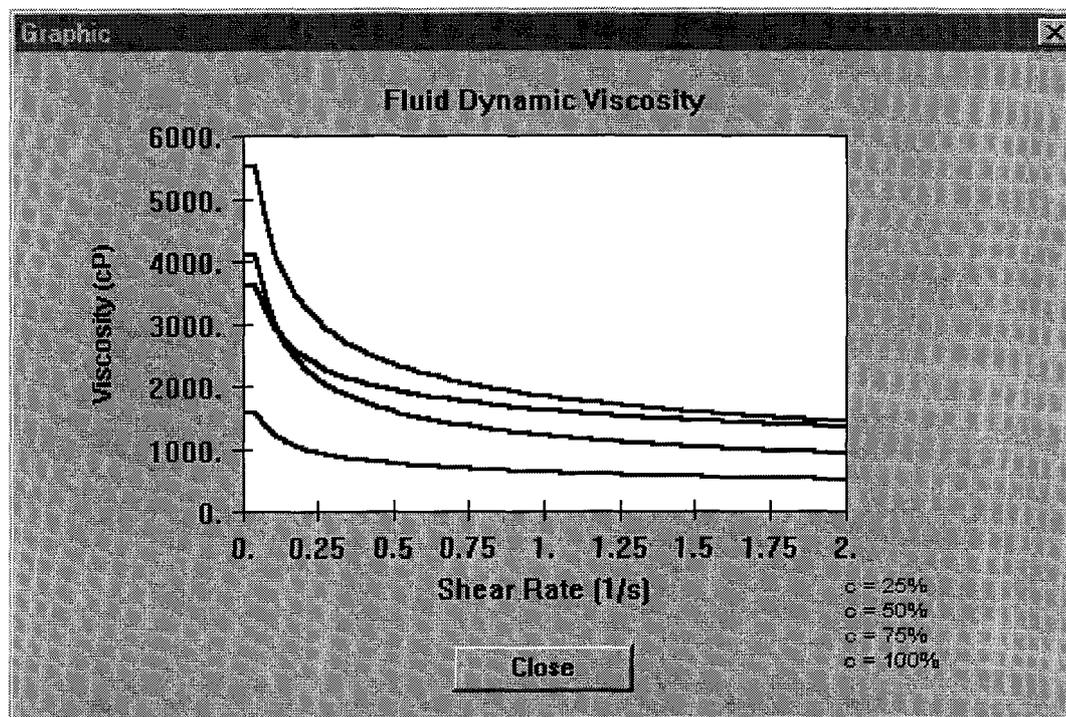


Figure 21: Courbes de viscosité

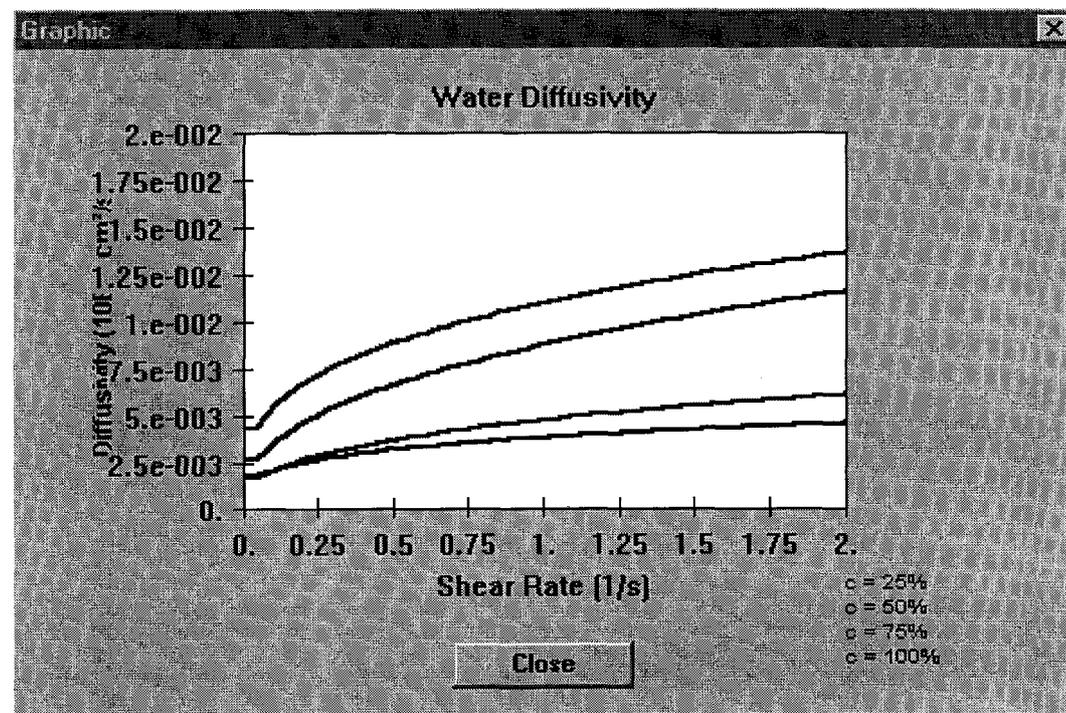


Figure 22: Courbes de diffusivité

3.2.2. Les données pendant la simulation

Lorsque la simulation est en cours, une boîte de dialogue (Figure 23) indique le temps écoulé depuis le début de la simulation numérique. En fait, ce temps est équivalent au temps de la méthode expérimentale (WSET). Sur la boîte, on peut aussi y observer le pas de temps en cours. Celui-ci permet d'avoir une estimation de la durée du temps de calcul. Grâce à cette information, on a pu constater qu'en début de simulation le pas de temps pour les fluides de Type I et II était différent. En effet, celui-ci était petit au début pour les fluides de Type I (1 milli-seconde) et plus grand (2 secondes) pour les fluides de Type II. Cela s'explique par le fait que les fluides de Type I sont moins visqueux que les fluides du Type II et donc s'écoulent plus rapidement. Comme les critères de convergence du programme dépendent des vitesses à l'intérieur du fluide, il est normal que les pas de temps pour les fluides de Type I soient plus petits que ceux de Type II. Toujours au cours de la simulation, on peut observer la plus petite concentration du fluide à 2.5 cm en partant du haut de la plaque. Cette information fournit une idée de l'endroit où l'on se trouve dans la simulation. Plus précisément, elle permet de savoir si la simulation est presque terminée ou pas. Comme précédemment signalé (voir l'introduction de ce chapitre), lorsque cette valeur aura atteint le point de congélation le programme s'arrêtera si l'on a choisi de faire une simulation jusqu'au temps de protection du fluide (HOT). Enfin, on a aussi un bouton « cancel » qu'on peut sélectionner pour arrêter la simulation ; due à des données entrée erronées. Il est alors possible de stopper celle-ci, de corriger les erreurs et d'en recommencer une nouvelle.

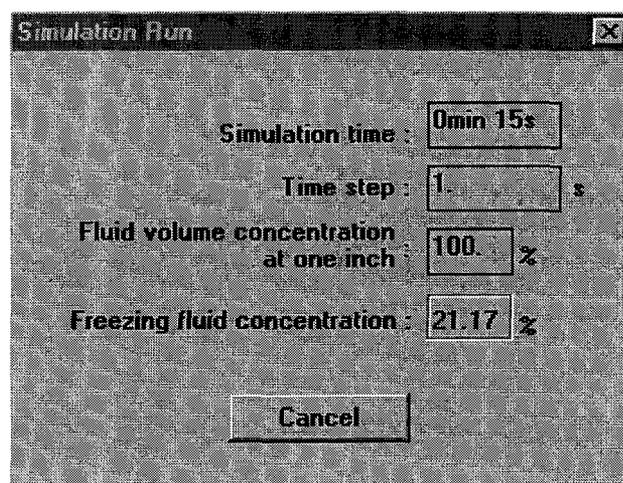


Figure 23: Informations pendant la simulation

3.2.3. Les données de sortie de la simulation

Lorsque la simulation est terminée, une boîte de dialogue apparaît pour indiquer la fin des calculs. Dans celle-ci (Figure 24), on a les informations concernant le temps de première congélation (FFT : First Freezing Point), de protection du fluide (HOT : Hold Over Time), la durée des calculs, l'épaisseur du fluide à 2.5 cm (premier pouce) et la longueur de la glace sur la plaque. Par la suite, grâce au temps de protection du fluide obtenu par la simulation numérique, on peut faire des comparaisons avec les mesures expérimentales du WSET. En fait, elles serviront à valider le modèle et seront présentées dans le prochain chapitre.

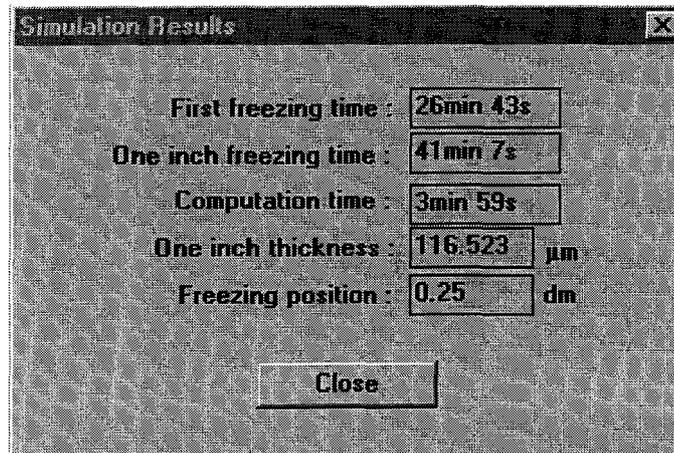


Figure 24: Données à la fin de la simulation

De plus, afin de connaître les caractéristiques intrinsèques du film fluide lors de l'écoulement, on a mémorisé certaines données (épaisseur, vitesse, viscosité, taux de cisaillement, densité, cisaillement, diffusivité) dans un fichier. Il s'agit de mieux connaître le phénomène physique à une échelle plus petite. Ces fichiers de sorties portant l'extension « .out », peuvent être lus par le logiciel en vue de tracer de multiples courbes. À cet effet, une boîte de dialogue a été conçue pour choisir les courbes (Figure 25) que l'on veut tracer. Ainsi, il est possible d'avoir une représentation graphique des données mémorisées en fonction des paramètres spatiaux et temporels (x,y,t) (exemple : Figure 26 et Figure 27). Implicitement, plus de mille courbes peuvent être obtenues à l'aide de ce menu graphique.

Variables Choisir les courbes

Choice a	Choice b	Choice c	Choice d		
<input checked="" type="radio"/> Concentration c	<input type="radio"/> x	<input checked="" type="radio"/> x	x/L	y/h	t/t_{max}
<input type="radio"/> Velocity u	<input checked="" type="radio"/> y	<input type="radio"/> y	<input type="radio"/> 0	<input type="radio"/> 0	<input checked="" type="radio"/> 0
<input type="radio"/> Shear Rate $\dot{\gamma}$	<input type="radio"/> t	<input type="radio"/> t	<input type="radio"/> 0.25	<input type="radio"/> 0.25	<input type="radio"/> 0.25
<input type="radio"/> Shear Stress τ	<p>Example</p> 		<input type="radio"/> 0.5	<input type="radio"/> 0.5	<input type="radio"/> 0.5
<input type="radio"/> Density ρ			<input type="radio"/> 0.75	<input type="radio"/> 0.75	<input type="radio"/> 0.75
<input type="radio"/> Diffusivity D			<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 1
<input type="radio"/> Viscosity μ					
<input type="radio"/> Thickness h					

Draw Cancel

Figure 25: Choix des courbes

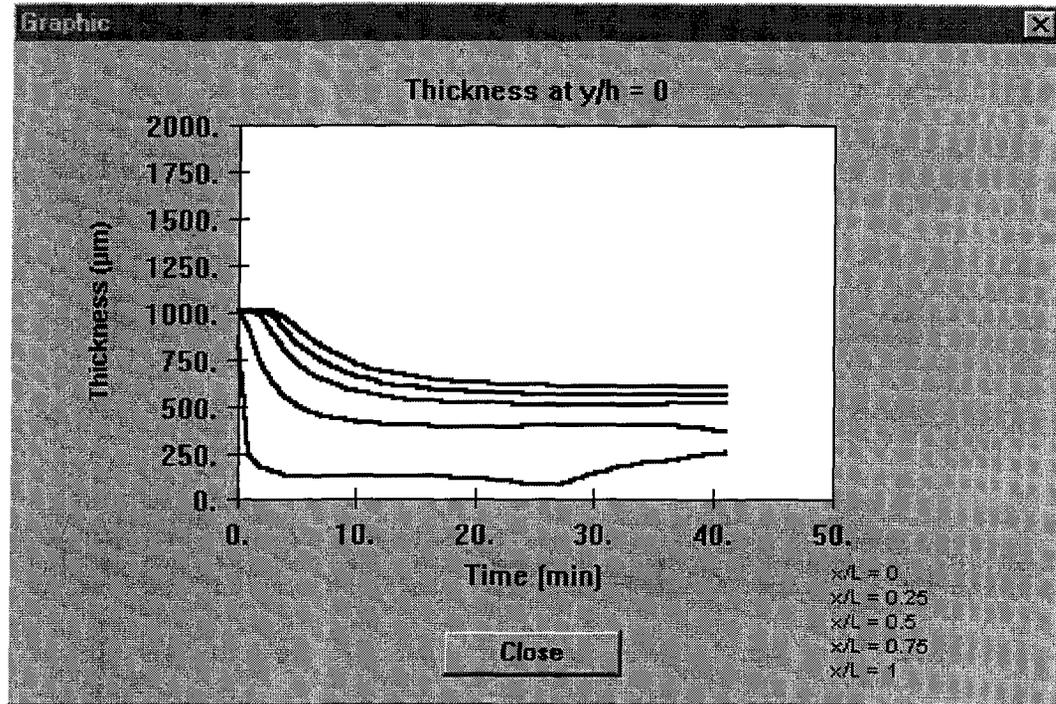


Figure 26: Exemple de courbes 1

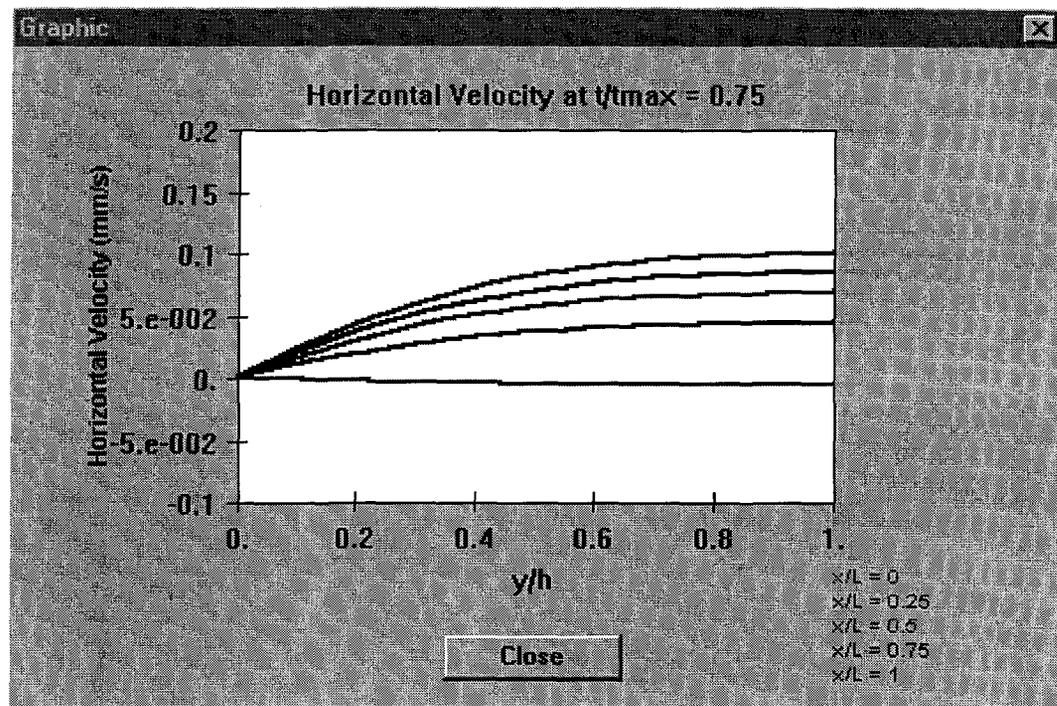


Figure 27: Exemple de courbes 2

CHAPITRE 4

4. Validation du modèle

Dans ce chapitre, il s'agira de valider le modèle à l'aide de deux méthodes comparatives. La première est la comparaison des résultats de la simulation numérique avec un résultat analytique basé sur l'épaisseur du fluide en régime établi. La deuxième est la comparaison des résultats issus de la simulation numérique avec des résultats expérimentaux reposant sur le HOT (temps de protection du fluide antigivre). À l'aide de ces deux validations, on pourra affirmer que le modèle choisi est représentatif du phénomène physique (WSET).

4.1. Validation avec une solution analytique

À l'aide de l'équation d'épaisseur décrite au chapitre 2, on a essayé de trouver une solution analytique en régime établi en ajoutant une condition $h(0,t)=0$ (à tout instant l'épaisseur en haut de la plaque est nulle). On a ajouté cette condition pour avoir une solution analytique simple. De plus, pour des raisons de commodités de calcul, on a négligé le gradient de l'épaisseur et supposé que la viscosité est constante. Finalement, en

considérant toutes ces hypothèses, la solution analytique de l'épaisseur asymptotique en régime établi s'écrit :

$$\frac{h_{\infty}}{L} = \left(\frac{3m''\mu}{\rho^2 g L^2 \sin \theta} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{x}{L} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Equation 31

Cette solution analytique asymptotique de l'épaisseur a été comparée avec des résultats de simulation numérique de modèle. Dans cette comparaison, on a essayé de faire varier la viscosité, l'intensité de précipitation, l'angle d'inclinaison de la plaque et la position de telle sorte qu'on obtienne les mêmes épaisseurs (Tableau 2).

μ	m''	θ	x	h_{∞} anal.	h_{∞} num.
cP	g/m² h	deg.	cm	μm	μm
1000	5	10	15	332	330
500	10	10	15	332	330
1000	10	20.3	15	332	330
1000	5	10	30	419	425
500	10	20.3	30	419	418
1000	10	20.3	30	419	418

Tableau 2: Validation analytique de l'épaisseur asymptotique

En comparant les deux dernières colonnes, on peut voir que les résultats sont assez similaires et que les petites différences sont dues à la condition ajoutée $h(0,t)=0$, qui est en fait inexistante dans la simulation du modèle.

4.2. Validation avec des résultats expérimentaux

Dans cette section, on va essayer de valider le programme en utilisant cette fois-ci, des mesures prises en laboratoire. Celles-ci sont essentiellement basées sur le HOT et l'épaisseur du fluide au premier pouce. Toutes ces mesures proviennent du laboratoire de recherche LIMA basé à l'UQAC.

4.2.1. Données expérimentales nécessaires pour la simulation

Pour faire la validation, on a choisi de travailler avec six fluides commerciaux de l'industrie disponibles en 1994 et 1995: trois fluides de Type I (F1A, F1B, F1C) et trois fluides de Type II (F2A, F2B, F2C).

Fluides	Nom	Manufacturier
Type I	Arcoplus	Arco Chemicals
	Octaflo	Octagon Process
	ADF Concentrate	Union Carbide
Type II	Forty Below	Octagon Process
	AD-104	SPCA
	Ultra II	Union Carbide

Tableau 3: Fluides utilisés pour la validation

Pour des raisons de confidentialité on a choisi de donner une étiquette à chaque fluide. Ainsi, les fluides de Type I commenceront par les caractères alphanumériques « F1 » suivi des lettres A, B ou C et « F2 » pour les fluides de Type II suivi des lettres A, B ou C.

4.2.1.1. Mesures de densité

Les mesures de densité des fluides (Tableau 4) ont été faites à l'aide d'un hydromètre : FISHERBAND séries 11-555 (Référence 34), qui a une résolution de 0.5 kg/m³.

Concentration	F1A	F1B	F1C	F2A	F2B	F2C
0.25		1024.0	1025.5	1018	1046.5	
0.50	1077.5	1050.5	1051.5	1037.5	1058.5	1051.5
0.75	1106.5	1061.0	1062.5	1056.5	1060.5	1105.5
1.00	1126.5	1059.5	1059.5	1072.5	1024	1114.5

Tableau 4: Densité des fluides à différentes concentrations (kg/m³)

Toutes les mesures ont été réalisées à une température de -5 °C parce que la simulation tient compte du cas isotherme.

4.2.1.2. Mesures des viscosités

Les mesures de viscosités (Tableau 5) ont été faites pour différentes concentrations (eau / fluide) et on a aussi déterminé les paramètres de la loi de viscosité μ_{ls} et n provenant de la loi de puissance. Toutes les mesures sont faites à une température de -5 °C et à l'aide d'un viscosimètre cylindrique. Les valeurs de viscosité des fluides étant connues publiquement, les fluides ne sont pas identifiés par leur code dans le Tableau 5.

Paramètres	Concentration	X	X	X	X	X	X
μ_0 (Pa)	100%	0.395	0.06	0.198	13.72	3.541	1.854
	75%	0.07	0.04	0.06	9.454	4.267	8.733
	50%	0.047	0.014	0.03	3.813	3.675	7.446
k	100%	0.234	0.056	0.206	4.123	1.599	0.881
	75%	0.07	0.023	0.063	3.813	1.82	2.472
	50%	0.022	0.1	0.022	1.437	1.196	2.233
n	100%	0.987	1	0.987	0.25	0.731	0.71
	75%	0.995	0.995	0.995	0.166	0.632	0.52
	50%	1.07	1.044	1.07	0.258	0.598	0.419

Tableau 5: Paramètres de viscosité des fluides à différentes concentrations (Pa)

4.2.1.3. Mesures des diffusivités

Les mesures de diffusivité ont été réalisées à l'aide d'une méthode de mesure élaborée au laboratoire de recherche LIMA. Toutes ces mesures ont été effectuées à une température de 22 °C. Ainsi, grâce à une loi de corrélation basée sur l'éthylène glycol (Référence 5) et en introduisant un paramètre adimensionnel Z_0 , on a pu trouver les diffusivités à -5 °C, voir Tableau 6.

$$Z_0 = \frac{D\mu T_r}{F_r T}, \text{ où } T_r = 0 \text{ °C et } F_r = 10^4 \text{ N}$$

Equation 32

Diffusivité (cm ² /s)	Concentrations	F1A	F1B	F1C	F2A	F2B	F2C
	100%	3.42	8.09	6.85	3.28	3.3	5.07
	75%	5.28	3.02	2.91	4.67	5.09	7.01
	50%	5.72	4.42	3.88	5.72	5.75	12.21
	25%	6.67	7.15	9.58	3.63	8.06	8.64

Tableau 6: Diffusivité des fluides à différentes concentrations (cm²/s)

4.2.2. Comparaison basée sur les épaisseurs

On a essayé de valider le modèle en faisant une étude comparative des épaisseurs du film fluide à 2.5 cm en partant du haut de la plaque. Les mesures ont été réalisées au laboratoire de recherche LIMA dans une chambre froide maintenue à une température de -5°C. Celles-ci ont été accomplies sans précipitation et avec précipitation de 5 g/dm²h. Pour les mesures sans précipitation, on a choisi d'utiliser les fluides de Type II car ceux de Type I s'écoulent très rapidement et de plus, l'épaisseur peut être atteindre 20 µm seulement. Or la jauge qu'on a utilisée est seulement graduée de 25 à 2000 µm avec une tolérance supérieure à 25 µm. Par contre, pour les mesures avec précipitation, on a choisi des fluides de Type I et II car les épaisseurs étaient mesurables dans les deux cas. Pour faire la comparaison entre les simulations numérique et expérimentale, on a opté pour des graphiques représentant l'épaisseur en fonction du temps. Ainsi, sur les figures, on a les mesures expérimentales qui sont représentées par des carrés noirs tandis que les résultats de la simulation numérique sont représentés par des courbes continues. Les mesures

expérimentales et les simulations numériques sans précipitation sont illustrées par les quatre figures suivantes (Figure 28, Figure 29, Figure 30 et Figure 31).

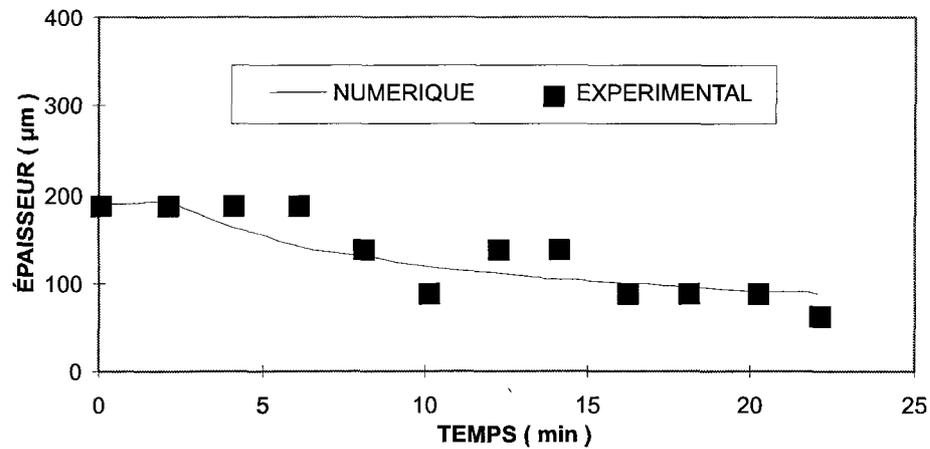


Figure 28: Évolution de l'épaisseur sans précipitation (F2A à 75%)

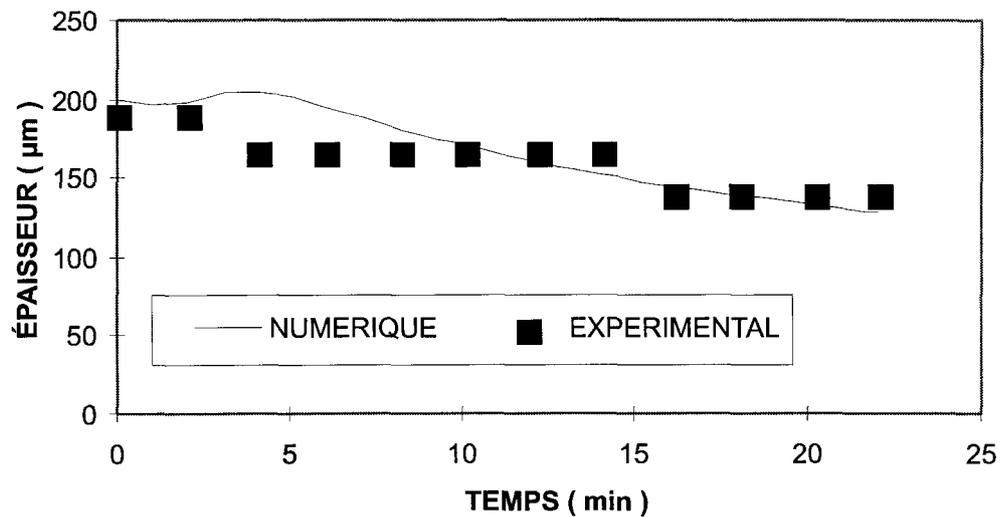


Figure 29: Évolution de l'épaisseur sans précipitation (F2B)

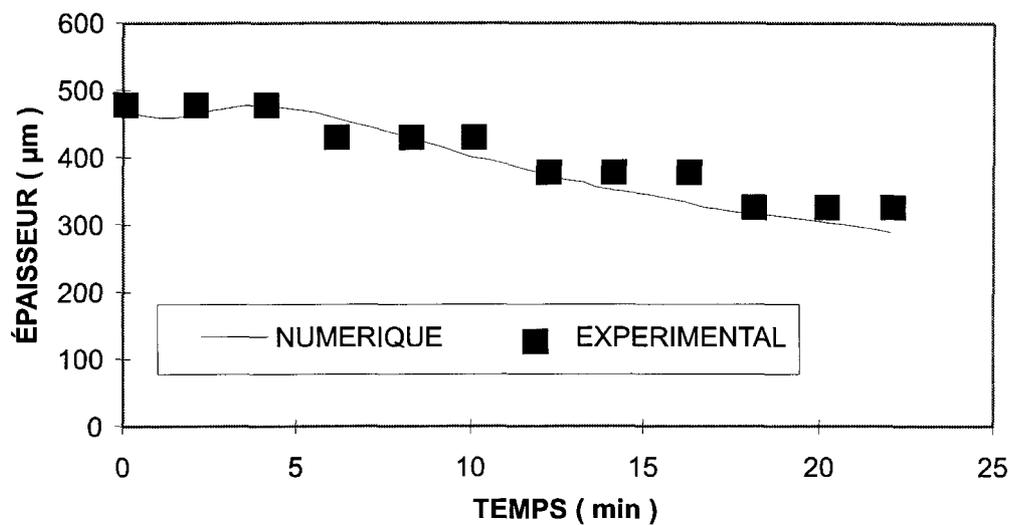


Figure 30: Évolution de l'épaisseur sans précipitation (F2B à 50%)

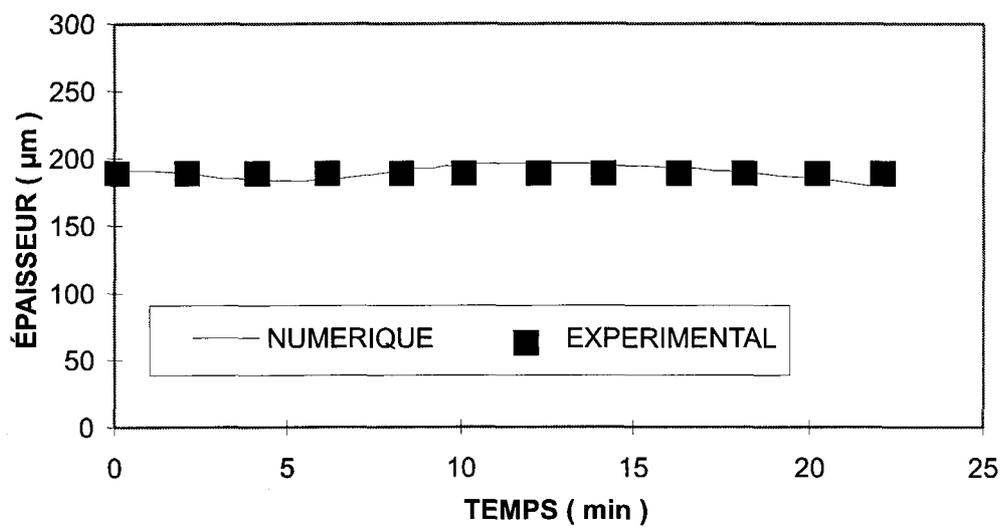


Figure 31: Évolution de l'épaisseur sans précipitation (F2C à 50%)

En observant ces graphiques, on peut constater qu'il y a une grande similarité entre le calcul numérique et les mesures expérimentales de l'épaisseur. Comme l'évolution de l'épaisseur est bien représentée par le calcul numérique, cela indique que les équations de mouvement et d'épaisseur représentent bien le phénomène. En particulier pour la Figure 31, on a une évolution quasi-constante de l'épaisseur qui est bien représentée par la simulation. Pour les figures (Figure 28, Figure 29 et Figure 30), on a quasiment le même phénomène. L'épaisseur est constante pendant les trois premières minutes puis on assiste à une décroissance progressive de celle-ci.

D'autre part, on a aussi fait une comparaison entre le numérique et l'expérimental, (Figure 32 et Figure 33), mais cette fois-ci avec une précipitation de $5 \text{ g/dm}^2\text{h}$.

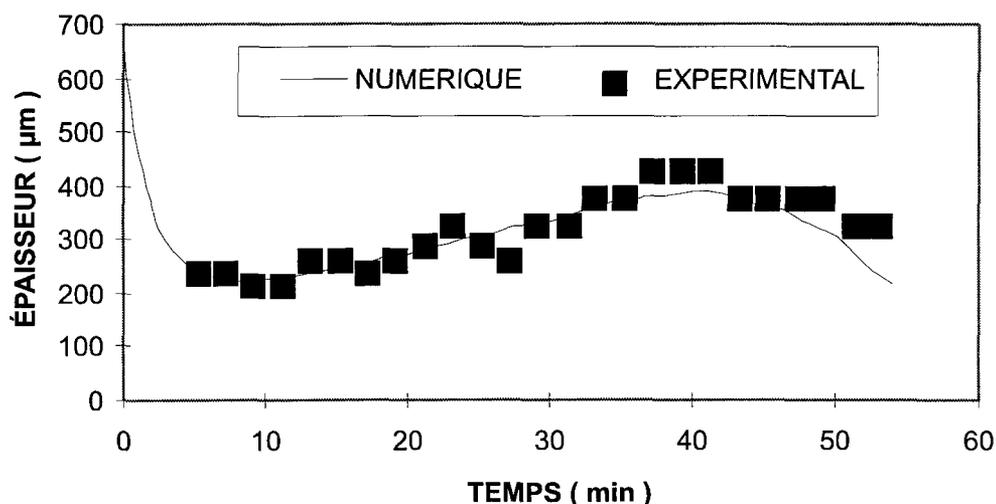


Figure 32: Évolution de l'épaisseur avec la précipitation (F2B)

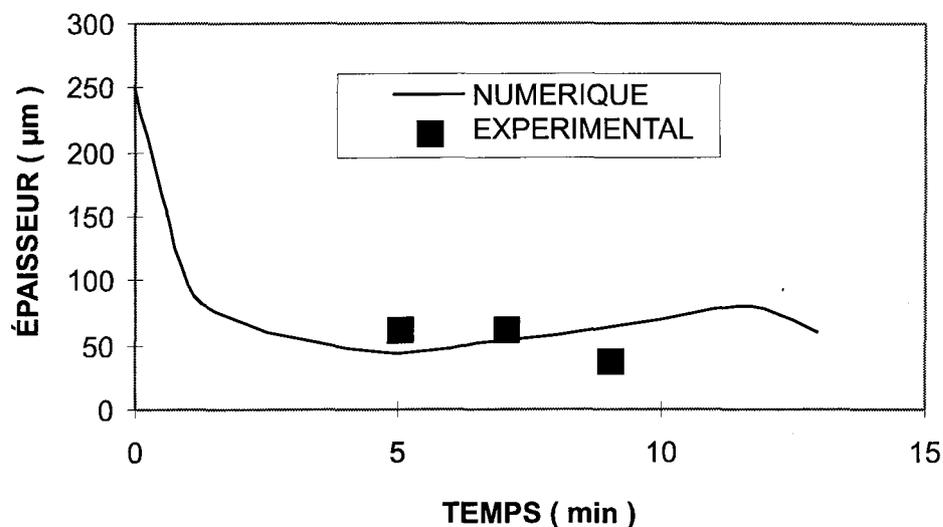


Figure 33: Évolution de l'épaisseur avec la précipitation (F1C)

Une fois de plus, il y a une grande similitude entre les courbes numériques et expérimentales. Sur la Figure 32, on peut se rendre compte que la simulation numérique reproduit bien l'accumulation de masse qu'il y a entre les 10 et 40 minutes. Par rapport à toutes ces comparaisons, on peut conclure que les équations de vitesse et d'épaisseur modélisent bien le phénomène du WSET avec et sans la précipitation.

4.2.3. Comparaison basée sur HOT

Toujours à l'aide des mesures expérimentales venant du laboratoire de recherche LIMA, on a tenté de faire une étude comparative en se basant sur le temps de protection du fluide antigivre (HOT). Pour ce faire, on a réalisé des mesures expérimentales et des simulations numériques pour la plupart des fluides. Toutes les mesures ont été de nouveau réalisées dans une chambre froide, à -5°C avec une précipitation de $5\text{ g/dm}^2\text{h}$. Afin de

mieux faire les comparaisons, on a regroupé les valeurs expérimentales et numériques du HOT dans un tableau (Tableau 7).

Fluides	WSET HOT (min:sec)					
	F1A	F1B	F1C	F2A	F2B	F2C
EXP 100%	7:30	11:00	8:00	34:00	48:00	-
NUM 100%	7:15	10:30	13:00	39:00	49:00	-
EXP 50%	5:30	6:30	6:00	-	-	-
NUM 50%	4:15	6:00	8:30	-	-	-

Tableau 7: Validation expérimentale du HOT

Il apparaît que les résultats sont assez similaires. Cependant, il y a quelques différences dues à la loi de corrélation qu'on a utilisée pour la diffusivité.

4.2.4. Comparaison avec un logiciel numérique de l'industrie

Pour valider le modèle, on a essayé de comparer les résultats d'une simulation faite avec un logiciel bien connu de l'industrie « PHOENIX » et ceux du logiciel de simulation WSETSIM. Sur la Figure 34 ci-dessous, on peut voir les résultats de simulation des deux logiciels.

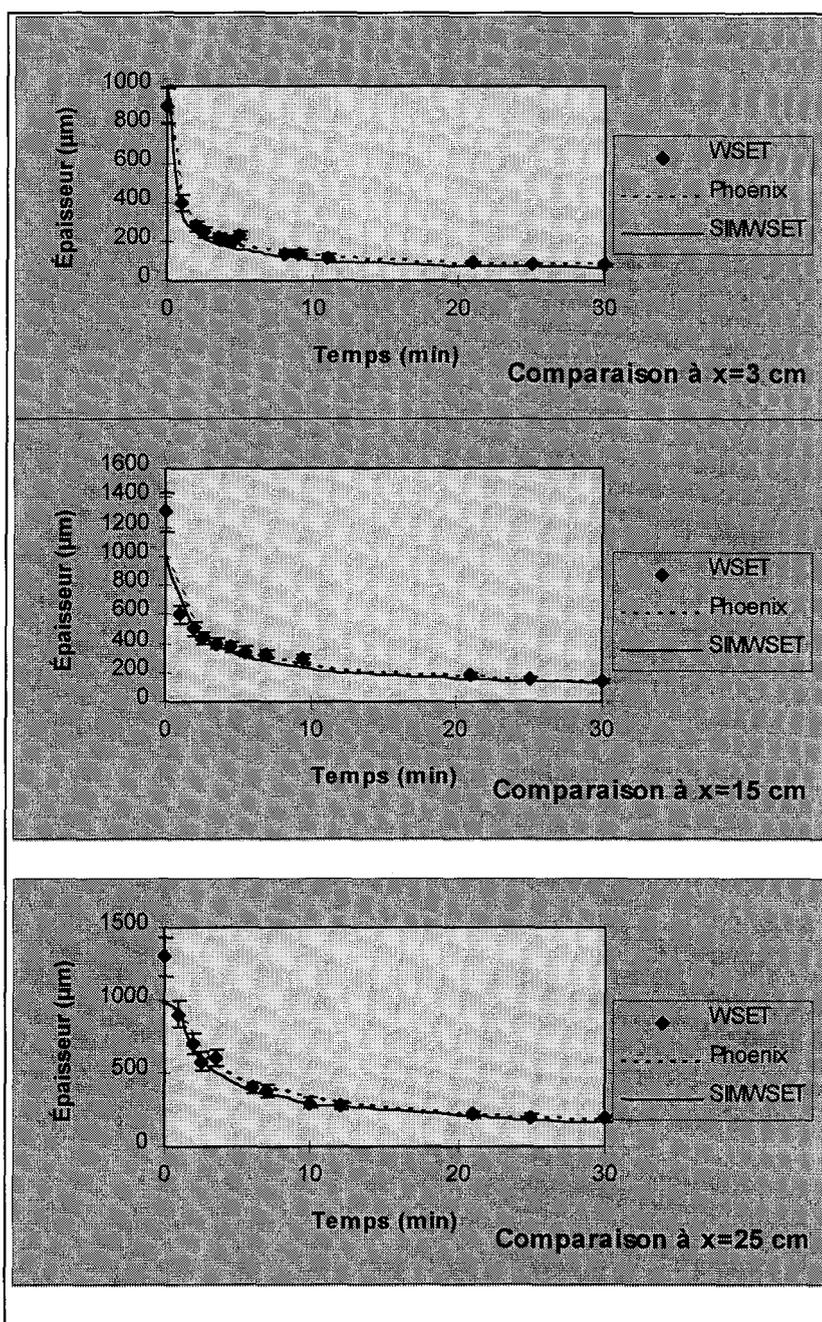


Figure 34: Validation avec le logiciel PHOENIX

En observant ces graphiques, on peut constater que les deux simulations donnent à peu près les mêmes résultats et sont en concordance avec les mesures expérimentales. Le logiciel est

donc en accord avec celui de l'industrie. Pour faire la simulation avec « PHOENIX », on a choisi un maillage de 20 cellules en x et 40 cellules en y avec un pas de temps de 0.01s pour avoir une convergence satisfaisante. Le fluide qu'on a choisi est un fluide fictif à base de propylène glycol et ayant une épaisseur de 1 mm. On a fait une simulation sans précipitation avec une station de travail (SGI IRIS 4D340). Cette simulation a duré plusieurs jours pour un écoulement expérimental de 30 minutes. Cela explique la nécessité d'avoir développé un logiciel spécifique ; avec le logiciel WSETSIM, la durée de la simulation est de 5 minutes seulement. Ce temps est en définitive six fois plus rapide que celui d'une simulation expérimentale. De plus avec le logiciel « PHOENIX », il est très difficile de simuler la précipitation.

CHAPITRE 5

5. Analyse des résultats

Après avoir validé le modèle dans le chapitre précédent, on va dans celui-ci analyser l'influence de quelques paramètres de la simulation sur le HOT, le temps de calcul, etc... Pour faire cette analyse, près de deux cents simulations ont été faites. Grâce au nombre important de celles-ci, on montre en même temps la flexibilité, l'efficacité et les possibilités du logiciel de simulation.

5.1. Influence des paramètres sur le temps de calcul

Dans cette section, on a voulu connaître la sensibilité qu'avait la précision des calculs et le maillage sur le temps de calcul mis par l'ordinateur. Il faut rappeler ici que les tests ont été effectués avec un ordinateur contenant un microprocesseur 80486 cadencé à une vitesse de 75 MHz et en utilisant le fluide F2A comme référence.

5.1.1. Sensibilité de la précision du calcul

Tout d'abord, il faut noter que le critère de convergence du logiciel est basé sur le calcul d'un résidu. En fait, le résidu représente l'erreur relative moyenne de l'épaisseur

dans chaque colonne. On a choisi ce critère parce que le calcul de l'épaisseur dépend directement des vitesses des cellules et indirectement des concentrations en fluide des cellules. Ce critère est un choix judicieux car tous les paramètres qu'on calcule dépendent de ces deux variables. Dans la Figure 35, le HOT et le temps de calcul sont représentés en fonction du résidu. Comme l'échelle est « log-log », le temps de calcul à une croissance exponentielle. En fait, la courbe est composée de deux segments de droites. Le premier concerne l'intervalle des résidus 10^{-2} à 10^{-4} , dans cette région quand on augmente la précision d'un facteur de 10, le temps de calcul augmente d'un facteur de 1.6. Pour le deuxième segment de droite concernant l'intervalle des résidus 10^{-4} à 10^{-7} le facteur de croissance du temps de calcul est beaucoup plus important. En effet, quand on augmente la précision d'un facteur de 10, le temps de calcul augmente aussi mais cette fois-ci d'un facteur de 10. Pour la courbe du HOT, on voit qu'elle s'apparente à une droite horizontale. Cela indique une stabilité dans le calcul quand on varie la précision du calcul. On s'aperçoit ici que le plus petit résidu pour avoir un HOT précis se trouve aux alentours de 10^{-3} . C'est pourquoi lorsqu'on fait la plupart des simulations, l'on utilise un résidu de 10^{-3} pour faire nos calculs. De plus, il faut remarquer que pour un résidu de 10^{-3} le temps de calcul est de 2.15 minutes tandis que le HOT ou temps de simulation expérimentale (WSET) est de 39 minutes. De ce fait, la simulation numérique est dix-huit fois plus rapide que la simulation expérimentale.

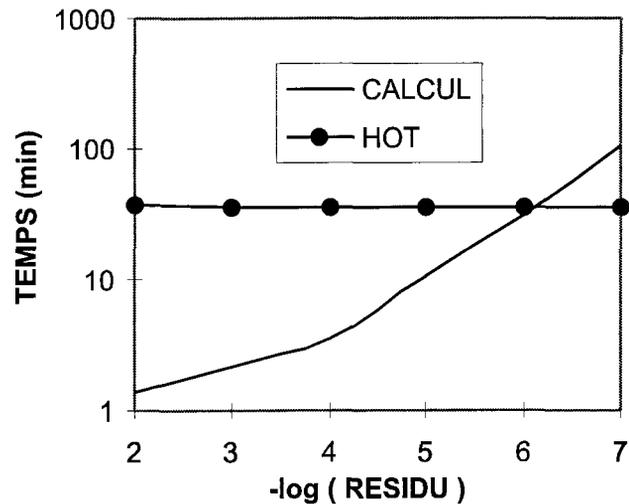


Figure 35: Sensibilité du résidu sur le temps de calcul

5.1.2. Sensibilité du maillage

Ici on veut montrer la sensibilité du maillage ou de la « discrétisation » sur le temps de calcul. Le paramètre n_x représente le nombre de cellules en x , c'est à dire dans la direction de l'écoulement du fluide. Le paramètre n_y représente le nombre de cellules dans la direction perpendiculaire à la plaque, c'est-à-dire dans le sens de l'épaisseur du fluide. Sur la Figure 36, on s'aperçoit que le paramètre n_y est plus influent que le paramètre n_x . De surcroît, pour avoir un temps de calcul inférieur à cinq minutes, il faut avoir un n_y entre les valeurs 10 et 20, et un n_x situé entre les valeurs 50 et 100. Au delà de ces valeurs le temps de calcul semble avoir une croissance exponentielle.

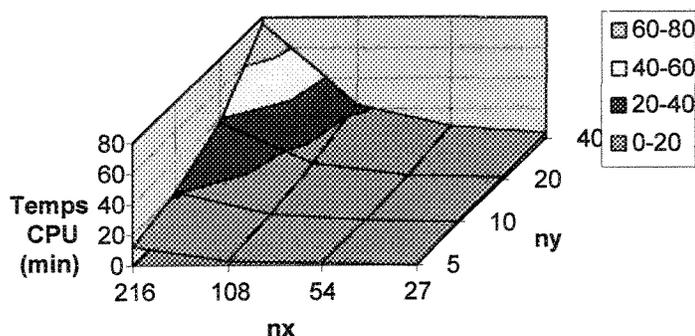


Figure 36: Sensibilité du maillage sur le temps de calcul

5.2. Influence des paramètres sur le HOT

L'objet de la présente section est d'observer comment certains paramètres agissent sur le HOT. Cette étude peut être très utile pour les manufacturiers qui désirent maximiser le temps de protection de leurs fluides. Effectivement, la simulation numérique est un avantage par rapport à la simulation expérimentale car elle permet de faire plusieurs tests à moindre coût et dans un délai raisonnable.

5.2.1. Sensibilité du maillage

D'après la Figure 37, qui représente le HOT en fonction du nombre de cellules en x et en y, on peut constater que le paramètre nx a une influence sur la précision du HOT. Comme dans tout calcul numérique, ici il y a des erreurs sur le HOT quand le nombre de cellules est trop petit ou trop grand. Ceci parce que le maillage n'est pas assez fin, d'où son imprécision ou qu'il est très fin, ce qui entraîne le traitement de grosses matrices engendrant des erreurs de calculs. Finalement, c'est l'endroit où il y a un plateau qui indique le nombre

de cellules adéquat. C'est pourquoi, on recommande de prendre les valeurs $n_x=50$ et $n_y=10$ pour faire les simulations numériques.

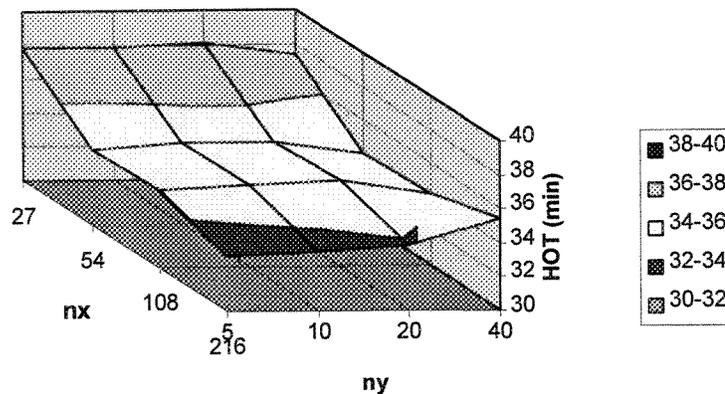


Figure 37: Sensibilité du maillage sur le HOT

5.2.2. Sensibilité de la diffusivité

La diffusivité est le paramètre principal dans le processus de dilution parce que c'est d'elle que dépend la diffusion de l'eau dans le fluide. La première idée qu'on peut se faire est que si l'on veut retarder le gel, il faut avoir un coefficient de diffusion le plus grand possible, car quand le coefficient de diffusion, D , est petit, l'eau a tendance à rester en haut du fluide favorisant le gel de la partie supérieure du fluide. Cependant cette caractéristique ne joue que pour des valeurs de D faibles. Pour des valeurs de D de l'ordre de $1 \text{ cm}^2/\text{s}$, on obtient le maximum pour le HOT. Pour des valeurs de D élevées un autre phénomène entre en action, il s'agit de la réduction de la viscosité avec l'augmentation de la dilution. Partant de ce fait, le fluide s'écoule plus vite entraînant une réduction de l'épaisseur du fluide, ce

qui accélère le gel du fluide. Dans la Figure 38, on a la variation du HOT en fonction de la diffusivité. Le maximum du HOT à lieu quand D se situe autour de $0.5 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ pour un fluide de Type II. Tandis que pour un fluide de Type I, il se produit lorsque D est aux alentours de $0.01 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$.

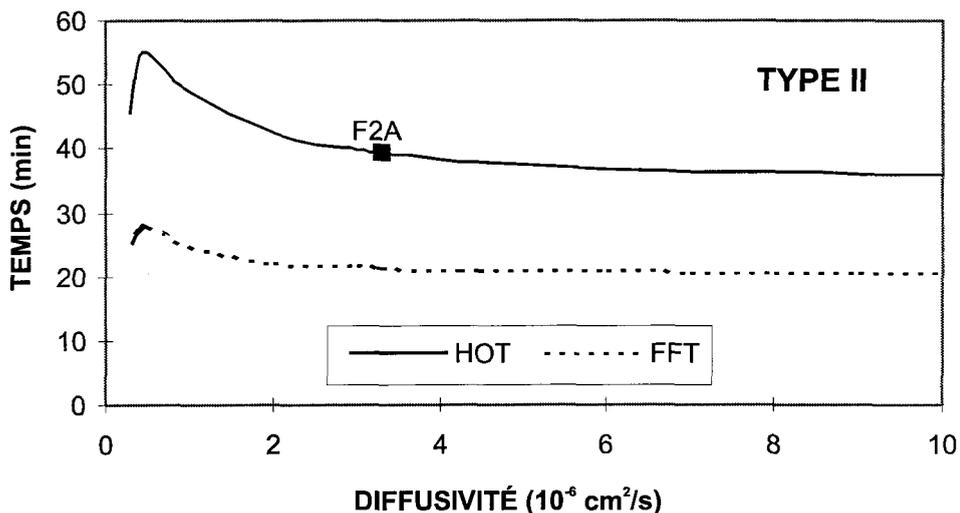


Figure 38: Sensibilité de la diffusivité sur le HOT

5.2.3. Sensibilité de l'épaisseur initiale du fluide

Dans cette sous-section, on a voulu connaître l'influence qu'a l'épaisseur initiale sur le HOT, voir Figure 39. On se rend compte, dans le cas de fluides de Type II, que pour les épaisseurs initiales supérieures à $300 \mu\text{m}$, le HOT ne varie pas. En conséquence, on peut dire que les épaisseurs initiales élevées n'ont pas d'influence sur le HOT. D'après tout ce qui précède, lors de toute simulation expérimentale (WSET), on veillera à ce que l'épaisseur initiale soit supérieure à $300 \mu\text{m}$ afin d'obtenir une valeur correcte du HOT.

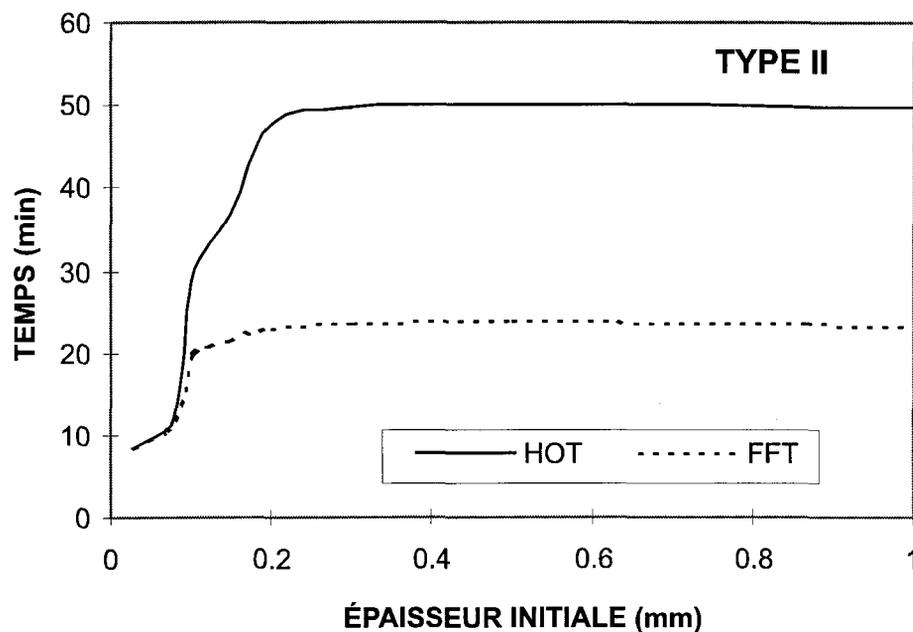


Figure 39: Sensibilité de l'épaisseur initiale du fluide sur le HOF

5.2.4. Sensibilité de l'angle de la plaque

La première idée qui vient à l'esprit est que : « plus l'angle est grand plus le fluide s'écoule et le HOF diminue ». Cette situation est clairement mise en évidence à travers la Figure 40. En fait, l'angle de la plaque influence fortement le HOF dû à l'effet de gravité. Une courbe a été analysée suivant une échelle « log-log » et on a constaté qu'on obtient une loi de puissance (Equation 33) entre le HOF et l'angle de la plaque en prenant comme référence les données du WSET (θ_r et HOF_r).

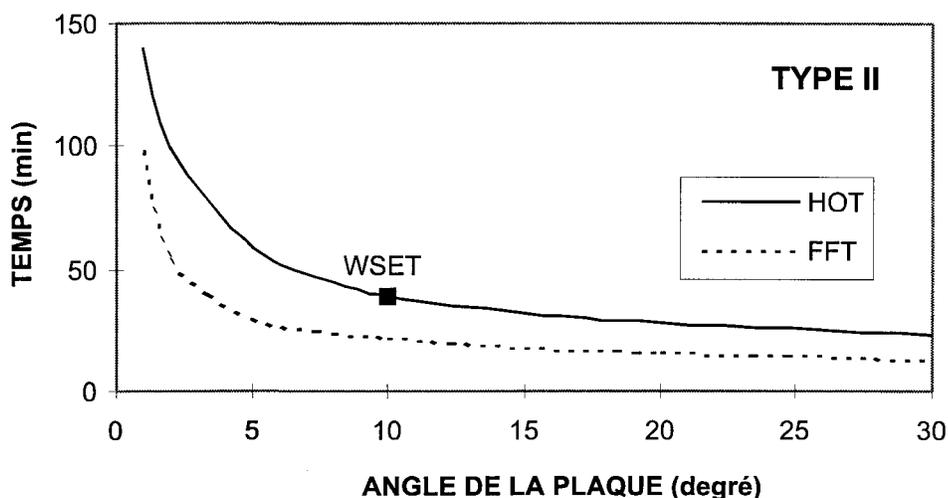


Figure 40: Sensibilité de l'angle de la plaque sur le HOT

$$\frac{HOT}{HOT_r} = \left(\frac{\theta}{\theta_r} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

Equation 33: Relation entre le HOT et l'angle de la plaque

5.2.5. Sensibilité de la longueur de la plaque

La Figure 41 montre l'effet qu'a la longueur de la plaque sur le HOT et le FFT (First Freezing Point). Le FFT est le temps correspondant à la première apparition de la glace sur la plaque. D'après la figure, la longueur de la plaque n'a pas trop d'influence sur le HOT, tandis que pour le FFT elle a un effet considérable. Le FFT varie car lorsque la plaque devient moins grande et qu'elle conserve le même nombre de cellules en x, celles-ci deviennent plus petites, alors dans les calculs le premier gel apparaît plus rapidement. Si les cellules avaient la même taille quelque soit la longueur de la plaque, on aurait eu la même allure pour les deux courbes.

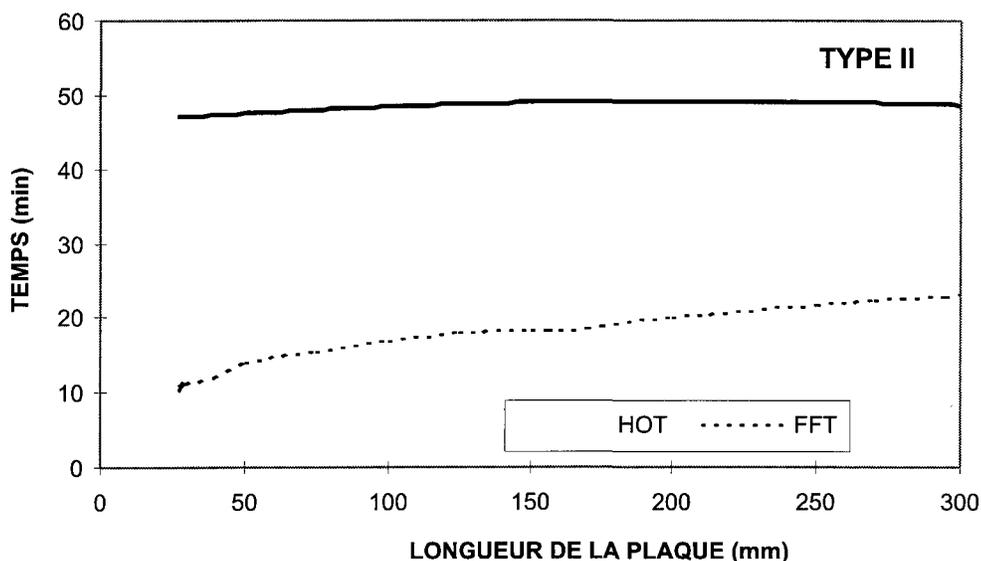


Figure 41: Sensibilité de la longueur de la plaque sur le HOT

5.2.6. Sensibilité de la vitesse du vent

On a voulu ici connaître l'influence du vent sur le HOT. Pour ce faire, on a fait des simulations avec différentes intensités de vitesse du vent dans le sens de l'écoulement ainsi que dans le sens contraire (Figure 42). Lorsque le vent est positif (sens de l'écoulement), le HOT diminue à un taux de 1 minute par m/s. À l'inverse, lorsque le vent est négatif (sens contraire à l'écoulement), le HOT augmente à un taux de 0.5 minute par m/s. Il faut noter que le modèle est valide seulement pour des vents ayant une intensité inférieure à 7.5 m/s. Au delà, des vagues se produisent à la surface du fluide et ceci n'est pas pris en compte par le modèle actuel.

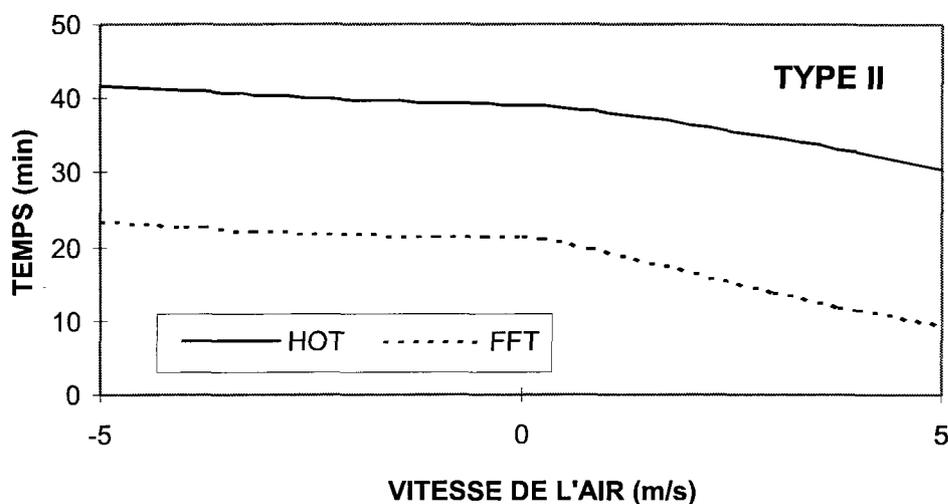


Figure 42: Sensibilité de la vitesse du vent sur le HET

5.2.7. Sensibilité de la précipitation

L'influence de la précipitation sur le HET est une étude très intéressante parce qu'elle peut servir de guide aux pilotes d'avion. Elle peut les aider à connaître le temps de protection des fluides selon l'intensité de précipitation. Vu son importance, on a fait des expériences avec des fluides de Type I et II (Figure 43). Afin d'obtenir une loi de puissance entre le HET et l'intensité de précipitation, on a choisi une échelle « log-log ». En observant les courbes, on voit qu'il y existe une linéarité pour les fluides de Type I et II. Par conséquent, on peut tirer une loi de puissance (Equation 34) de ces courbes en prenant comme base les paramètres du WSET et du HHET.

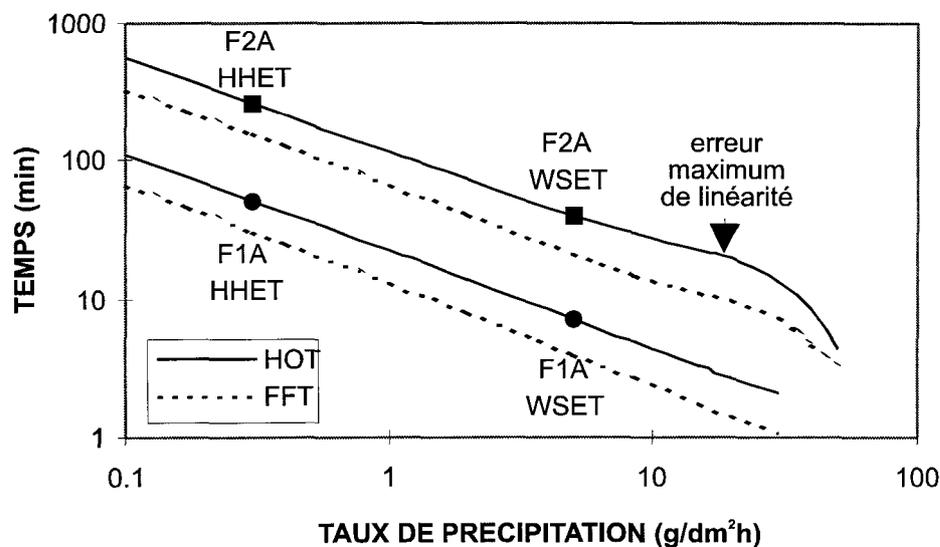


Figure 43: Sensibilité de la précipitation sur le HOT

$$\frac{HOT}{HOT_r} = \left(\frac{m''}{m''_r} \right)^{-\frac{2}{3}}$$

Equation 34: Relation entre le HOT et la précipitation

Pour des valeurs d'intensité de précipitations proches de $m''=5 \text{ g/dm}^2\text{h}$, on prend comme référence les paramètres du WSET et pour des valeurs proche de $m''=0.3 \text{ g/dm}^2\text{h}$, on prend les paramètres du HHET. Sur la figure, on constate que cette linéarité prend fin lorsque le taux de précipitation est supérieur à $m''=20 \text{ g/dm}^2\text{h}$. Ainsi donc, l'Equation 34 n'est plus valable pour ces hautes valeurs de précipitation.

5.3. Analyses des processus physiques

5.3.1. Analyse de l'écoulement du fluide

Pendant les cinq premières minutes où il n'y a pas de précipitation, le fluide s'écoule tout le long de la plaque. Puis lorsque la précipitation commence, il y a une dilution du fluide qui entraîne une augmentation de la viscosité du mélange eau/fluide. Cette augmentation de la viscosité est due aux paramètres de la loi de viscosité (Tableau 5). C'est pourquoi, il y a une augmentation de l'épaisseur qui atteint un maximum pour finalement redescendre progressivement. Ce phénomène est bien illustré sur les figures (Figure 32 et Figure 33). Durant presque tout le processus, l'épaisseur est plus petite en haut de la plaque et plus grande en bas de la plaque. Néanmoins, il y a une élévation relative de l'épaisseur tout en haut de la plaque due à la congélation du mélange eau/fluide qui tend à freiner son écoulement. La Figure 44 décrit ces différentes situations dans le cas des fluides de Type I et II.

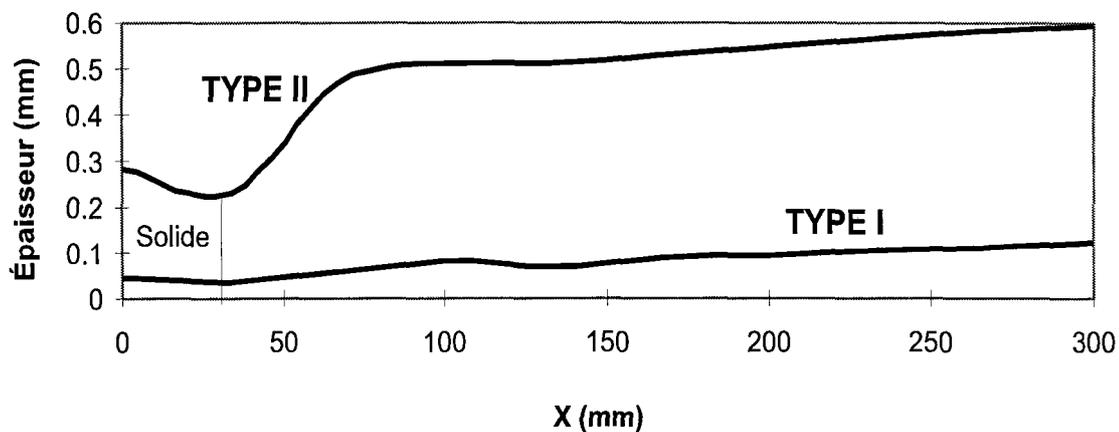


Figure 44: Profil de l'épaisseur au HOT

Les profils quasi-paraboliques des vitesses sur la Figure 45 indiquent une certaine uniformité dans la viscosité. Durant toute la simulation, les vitesses du fluide contre la plaque sont nulles à cause de la condition limite imposée $u(x, 0)=0$ et maximum à l'interface air/fluide. L'ordre de grandeur des vitesses est de 1 mm/s pour les fluides de Type I et 0.1 mm/s pour les fluides de Type II. Le fait que les vitesses de Type I soient supérieures à celles de Type II n'est pas surprenant car l'on sait que les fluides de Type I s'écoulent plus rapidement que ceux du Type II dus à leur faible viscosité. En fin de compte, les petites valeurs de vitesse pour les deux types de fluides justifient qu'on ait négligé les termes de convection dans l'équation de mouvement car les nombres de Reynolds sont aussi petits.

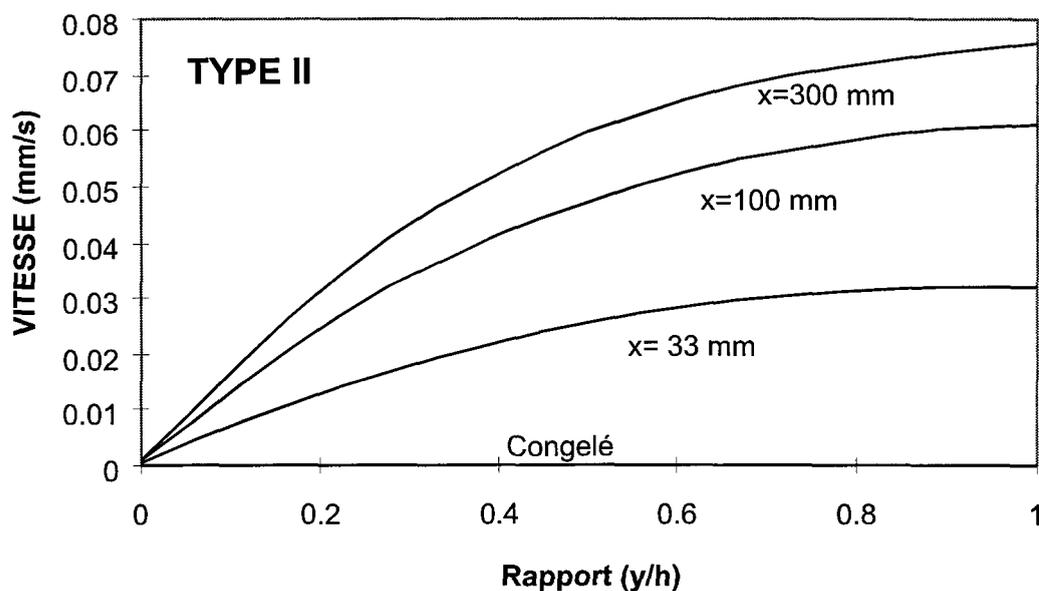


Figure 45: Profil des vitesses le long de l'épaisseur

5.3.2. Analyse de la dilution

Dans le processus de dilution, les courbes de concentrations en fluide qu'on a obtenues ne sont pas étonnantes. En effet, la Figure 46 montre que la dilution est forte à l'interface air/fluide puis elle décroît peu à peu lorsqu'on se rapproche de la plaque.

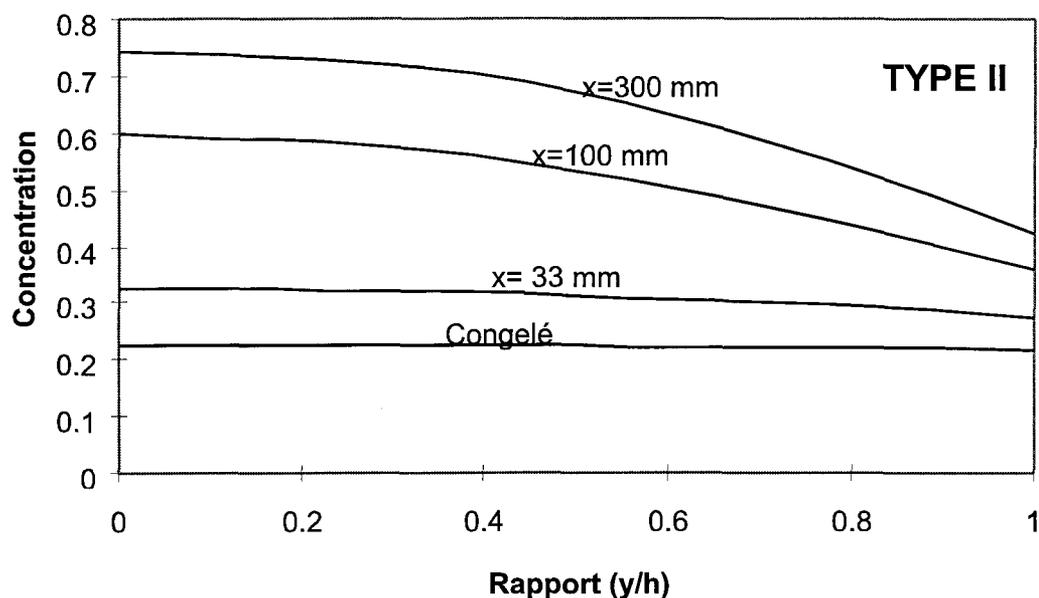


Figure 46: Profil de concentration le long de l'épaisseur au HOT

Sur la Figure 47, on peut voir le même phénomène se produire sur toute la longueur de la plaque. En outre, on se rend compte que le haut de la plaque est toujours plus dilué que le bas. Ceci indique que le gel débute en haut de la plaque et progresse vers le bas.

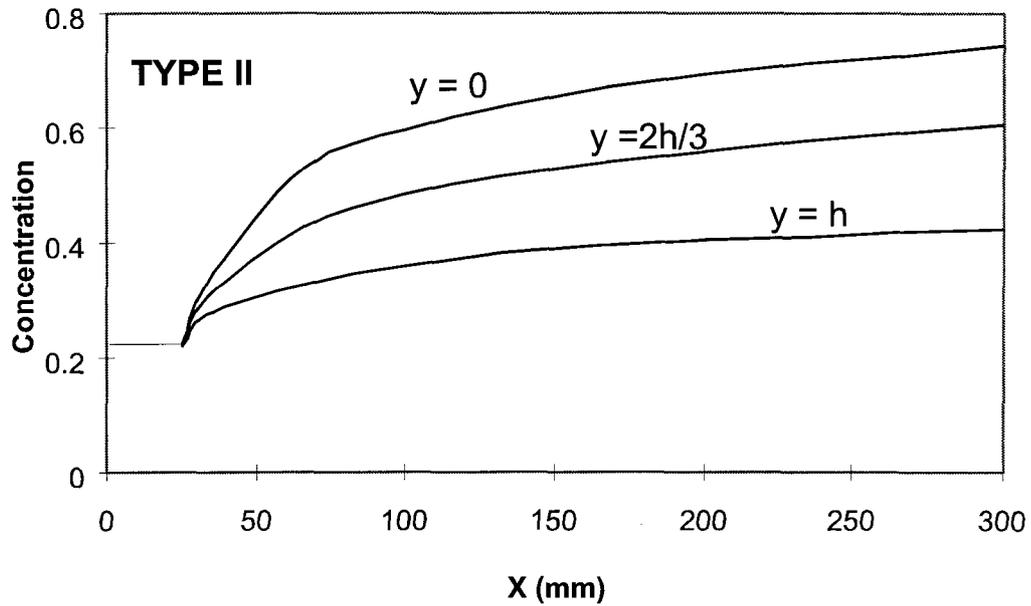


Figure 47: Profil de concentration le long de la plaque

Ce phénomène peut être aussi observé à la Figure 48. Toujours sur la même figure, on a des lignes d'« isoconcentration » le long de la plaque. Ces lignes sont plus verticales en haut de la plaque puis se courbent au fur et à mesure dans le sens de l'écoulement. Cela est normal, les vitesses étant plus importantes en bas de la plaque (Figure 45).

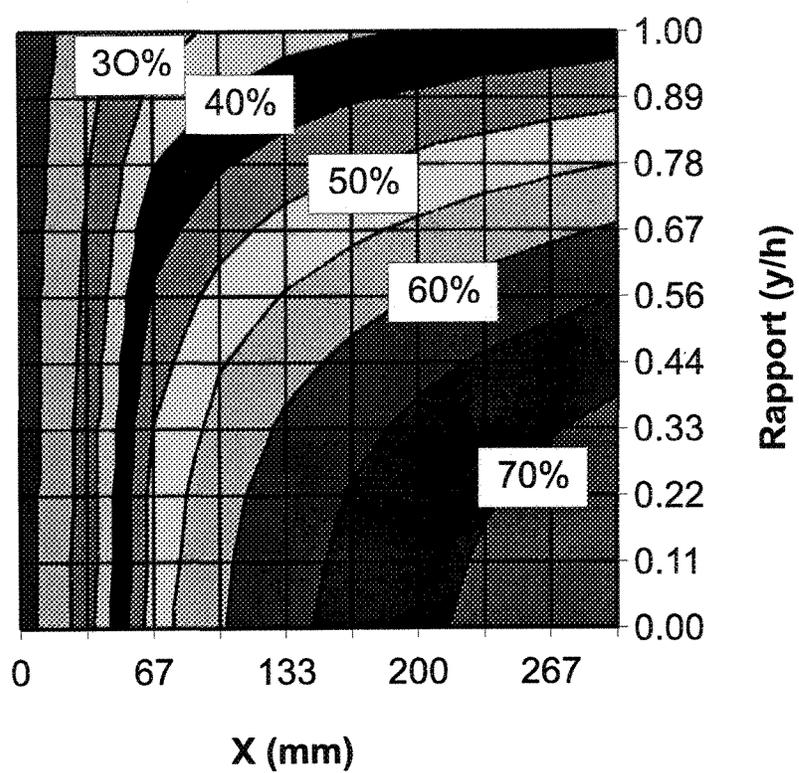


Figure 48: Stratification des concentrations sur tout le domaine

Conclusion

Dans l'ensemble, on pense avoir atteint les objectifs principaux qu'on s'était fixés. En effet, on a obtenu un logiciel de simulation numérique capable non seulement de prédire le temps de protection des fluides dégivrants et antigivres, mais aussi de donner des informations supplémentaires inconnues avec la simulation expérimentale (WSET), l'interface du logiciel est telle que celui-ci peut être utilisé par une personne étrangère au domaine.

On a constaté que les temps de protection des fluides ont été relativement bien prédits par le logiciel de simulation avec une marge d'erreur moyenne de 10 %, ce qui correspond aussi à la marge d'erreur expérimentale du WSET. Il faut noter ici que cet écart n'est pas surprenant car les mesures expérimentales de viscosité, diffusivité, tension de surface et densité ont une précision variant de $\pm 1\%$ à $\pm 10\%$. De plus, dans le modèle on n'a pas considéré l'impact des gouttes d'eau sur la surface du fluide et la grosseur de celles-ci. Dans le modèle, et cela pour des raisons de simplicité, on a postulé que la surface était lisse alors qu'elle ne l'est pas à cause des cratères que font les gouttes d'eau.

Par ailleurs, d'autres informations, ignorées jusqu'à présent, ont pu être mise en évidence grâce au logiciel de simulation. Citons entre autres :

- Les différents événements durant l'écoulement du fluide;
- Les différentes phases durant le processus de dilution;

- L'ordre de grandeur des vitesses, des cisaillements, des taux de cisaillements;
- La relation entre le HOT et l'angle de la plaque;
- La relation entre le HOT et le taux de précipitation ;
- L'effet de la vitesse du vent jusqu'à 7 m/s.

On a pu aussi, se rendre compte que le logiciel était facile d'utilisation, grâce à son interface graphique évolué.

En définitive, ce logiciel de simulation numérique est un outil pouvant aider à connaître non seulement le temps de protection des fluides, mais aussi d'autres informations spécifiques. D'autres part, s'il ne peut encore remplacer totalement le test en laboratoire (WSET), il est important de noter qu'il peut cependant lui servir de complément.

Recommandations

Afin d'améliorer la simulation, on peut considérer les aspects suivants :

- Réduire au maximum les erreurs faites sur les mesures expérimentales des paramètres qu'on utilise en tant qu'entrées;
- Considérer la grosseur des gouttes d'eau et leur impact sur l'interface air/fluide.
- Introduire l'équation de température pour avoir un outil général, ne servant pas exclusivement pour le WSET.
- Changer de méthode de résolution des équations aux dérivées partielles, utiliser une méthode numérique telle que l'ADI (Référence 29) qui permet de faire des calculs en bloc pour l'ensemble du domaine.

Références

1. I. B. Ivanov, (1988), « Thin Liquid Films : Fundamentals And Applications », New York M. Dekker.
2. Prandtl L., (1925), « angew. Math. U. Mech. 5 »
3. Fourier J. B., (1822), « Théorie analytique de la chaleur », Oeuvre de Fourier.
4. Fick A., (1855), « Ann. Phys. Lpz. ».
5. Byers and C. Judson King, (1966), « Liquid Diffusivities in the Glycol-Water System », The Journal of Physical Chemistry, Vol 70, no 8, p. 2499-2503.
6. Francis B. Hildebrand, (1968), « Finite-Difference Equations and Simulations », Prentice-Hall Inc.
7. Klaus-Jürgen Bathe, (1982), « Finite Element Procedures In Engineering Analysis », Prentice-Hall Inc.
8. Joe F. Thompson, Z. U. A. Warsi, C. Wayne Mastin, (1985), « Numerical Grid Generation, Foundations and Applications », North-Holland.
9. Perron E., (1993), « Mesure de la rhéologie des fluides à partir des lectures au viscosimètre Brookfield », Rapport interne GRIEA.
10. Aerospace Material Specification, AMS 1428, (1993), « Fluid Aircraft Deicing/Anti-icing/No-Newtonian, Pseudo-plastic », SAE Type II.
11. Tremblay M., (1995), « Détermination d'une procédure de mesure de la densité des fluides antigivre », Rapport interne GRIEA MT-95-01.

12. Paquin-Lavigne C., (1994), « Évaluation de la diffusivité des liquides antigivres et dégivrants dans l'eau », Rapport Interne GRIEA CPL-94-01.
13. Paquin-Lavigne C., (1994), « Évaluation de la diffusivité des liquides antigivres et dégivrants dans l'eau », Rapport Interne GRIEA CPL-94-02.
14. Jomphe S., (1995), « Mesure de coefficient de diffusion dans l'eau des fluides antigivres », Rapport interne SF-95-01.
15. Laforte J. L., Louchez P. R., Bouchard G. and Frank Ma (1990), « A facility to evaluate performance of aircraft ground de/anti-icing fluids subjected to freezing rain », Cold Regions Science and Technology 18, p. 161-171.
16. Laforte J. L., Louchez P. R. and Bouchard G., (1992), « Cold and humid environment simulation for de/anti-icing fluids evaluation », Cold Regions Science and Technology 20, p. 195-206.
17. Laforte J. L. and Sylvie Bernadin (1994), « Climate Chamber Evaluation of the Aircraft Anti-icing Fluid AD-104/95 », Qualification Test Report WH-94-14.
18. Laforte J. L. and Sylvie Bernadin (1994), « Aerodynamic Acceptance Testing of the Aircraft Anti-icing Fluid DE-825/95 », Qualification Test Report FP-94-18.
19. Kays, William Morrow (1966), « Convective Heat And Mass Transfer », McGraw-Hill.
20. Tông T. V. K., (1995), « Isothermal Draining and Freezing of Deicing Fluids », Cold Regions Science and Technology, accepté pour publication, mai 1995.

21. Tông T. V. K., (1993), « A Numerical Simulation to Evaluate the Performance of Aircraft Ground De-icing Fluids Subjected to Freezing Rain », GRIEA Internal Report, TVKT-93-01.
22. Huang J. R., Theo G. Keith Jr. and Kenneth J., De Witt, (1993), « Efficient Finite Element Method Method for Aircraft Deicing Problems », Journal of Aircraft Vol.30, No. 5, Sept-Oct 1993.
23. Kirchner R. D., (1996), « A Theoretical Model of Freezing Point Depressant Fluid Effectiveness on Frosticator Panels », AIAA 96-0389.
24. Frank M. White, (1994), « Fluid Mechanics », Mc Graw-Hill, Third Edition, p. 20-26.
25. Holman J. P., (1986), « Heat Transfert », Mc Graw-Hill, 6th Edition, p 582.
26. Incropera F. P. et De Witt D. P., (1985), « Fundamentals of Heat and Mass Tranfert », John Wiley & Sons, Second Edition.
27. Patankar S. V., (1978), « Numerical Heat Transfert and Fluid Flow », Hemisphere Publishing Corporation.
28. Lars Eldén, Linde Wittmeyer-Koch, (1990), « Numerical Analysis », Academic Press Inc.
29. John D. Anderson Jr., (1995), « Computational Fluid Dynamics », Mc Graw-Hill
30. Jost W., (1965), « Diffusion », Academic Press Inc.
31. Microsoft Corporation, (1995), « Visual C++ version 4.0 », Microsoft Press
32. Tanner R. I., (1985), « Engineering Rheology », Clarendon Press Oxford p. 451

33. Broofield, (1991), « More Solutions of Sticky Problems », Broofield Engineering Laboratories Inc. Mass.
34. ASTM E 100, (1981), « Standard Specifications for ASTM Hydrometers »
35. ASTM D 8 91, (1981), « Standard Test Methods for specific Gravity, Apparent, of liquid Industrial Chemicals », 1959 reapproved in 1981.
36. ISO 3675, (1993), « Crude Petroleum and Liquid Petroleum Product Laboratory Determination of density or Relative Density »

Annexe 1 : Liste des fluides certifiés par le LIMA

LIST OF TYPE I FLUIDS CERTIFIED AT UQAC

Company Name	Fluid Name	Fluid Type	Aerodynamic Certification	Holdover Time Certification
ARCO CHEMICAL	Arcoplus™	I	95/02/22	95/03/23
BASF AG	Aerex 100	I	95/10/25	95/10/25
BASF AG	Aerex 102	I	95/09/13	95/09/20
HOECHST AG	Safewing MP I 1938	I	95/05/19	95/06/07
HOECHST AG	Safewing DG I 1937	I	95/05/02	95/06/07
OCTAGON PROCESS INC.	OCTAFLO™	I	95/04/21	95/06/05
SPCA	SPCA DE-910	I	95/10/04	95/09/15
SPCA	SPCA DE-825	I	94/06/28	94/06/18
UNION CARBIDE	UCAR® Aircraft Deicing Fluid Concentrate	I	94/11/16	94/11/18
UNION CARBIDE	UCAR® Aircraft Deicing Fluid XL 54	I	94/11/21	94/11/05
UNION CARBIDE	UCAR® ADF 5.1	I	94/11/02	94/10/21

Note: The fluids are certified for a two year period.

Date: June 30, 1996

Sylvie Bernardin
 Anti-icing Materials International Laboratory
 UQAC Tel.: 418 545-2918

LIST OF TYPE II AND II** FLUIDS CERTIFIED AT UQAC

Company Name	Fluid Name	Fluid Type	Aerodynamic Certification	Holdover Time Certification
HOECHST AG	Safewing MP II 1906	II	96/03/27	96/04/09
HOECHST AG	Safewing MP II 1951	II	96/03/18	96/04/10
HOECHST AG	Safewing MP IV 1934	II	95/07/19	95/07/21
HOECHST AG	Safewing MP IV 1957	II**	96/05/24	96/08/01
OCTAGON PROCESS INC.	OCTAGON FORTY BELOW™	II	95/02/17	95/02/21*
SPCA	SPCA AD-104	II	96/04/09	96/04/09
SPCA	SPCA AD-404	II**	95/05/30	95/05/30
SPCA	SPCA AD-460	II**	95/10/05	95/10/13
UNION CARBIDE	UCAR® AAF ULTRA (DYED)	II**	95/02/03	95/02/03
UNION CARBIDE	UCAR® AAF ULTRA+	II**	96/03/25	96/03/29

* HHET: 3 hrs. 58 min average.

** would be Type IV fluids if this type of fluid was approved as currently proposed in AMS1428a.

Note: The fluids are certified for a two year period.

Date: June 30, 1996

Sylvie Bernardin
 Anti-icing Materials International Laboratory
 UQAC Tel.: 418 545-2918

Annexe 2 : Guide de l'utilisateur du SIMWSET

Date : February 1996

Authors : Louchez P. R., Zouzou A.

WSET numerical simulation (V. 1.3)

Menu description

1. Introduction

1.1. Model description

This software proposes a numerical simulation of the Water Spray Endurance Test which is an SAE/ISO laboratory test to assess the anti-icing performance of fluids used to protect aircraft on the ground.

The program computes the dilution level in a de-icing/anti-icing fluid draining down an inclined flat plate and subjected to a supercooled precipitation. The simulation provides an evaluation of the holdover time, defined as the time when one inch of ice is formed.

1.2. Software management

The minimum requirement hardware for this version is a computer with 80386 processor and 4 MB of RAM memory. The user interface works in a WINDOWS 3.1 environment.

The simulation conditions are entered in an input file. The simulation is started and runs according to the input file data. During the calculation the terminal screen exhibits the simulation time and the maximum dilution level. The simulation runs about twice faster than real time. When the calculation is over, the time evolution of each relevant parameter is stored in an output file. Any pertinent graph can then be readily obtained from the menu.

2. General menu strategy

2.1. Work strategy

- The problem configuration is defined by providing the fluid properties, environmental parameters and numerical parameters from default values or old input file.
- The problem definition can then be saved in a new input file which can be used for simulation runs or as a basis for new problems.
- The viscosity and diffusivity data can be checked , if needed, in graphic form.
- The simulation is run based on the last problem definition and stops at first freezing or at a prescribed time.
- The time evolution of all variables and properties within the fluid film can be checked in graphic form.

2.2. Software operation

The various operations required to follow the work strategy are performed according to standard WINDOWS operations. The menu is presented in usual form of toolbar, or a selection of self explanatory instructions.

3. Menu description

3.1. Input

3.1.1. Define new input

Modify (from default values) the data defining the problem configuration.

- **Fluid properties** : density, diffusivity and viscosity.
- **Environment properties**: precipitation intensity, initial thickness, plate slope, plate length and initial draining time without precipitation.
- **Numerical properties**: number of cells in x and in y direction, the time step, the maximum simulation time and the accuracy for computation.

3.1.2. Save new input

Save in a file the information entered in the "define new input" operation. The file name must have a maximum length of eight characters, the extension is automatically set as **.in**.

3.1.3. Load old input

Choose an old input file to define the problem configuration.

3.1.4. Exit

Leave the software.

3.2. Run

3.2.1. Start new simulation

Run simulation with last *define new input* values and store the results in the file [name].out if the new input was saved in the file [name].in, or in default.out if no *save* of the problem configuration was performed.

3.2.2. Load old simulation

Select old output file for the graphic presentation of the results.

3.3. Output

3.3.1. Check properties

This secondary menu allows to visualize the curves associated to the property data for the simulation.

- **Viscosity** : viscosity in function of shear rate and of the volume water concentration in the fluid.

- **Diffusivity** : diffusion in function of shear rate and the volume water concentration in the fluid.

3.3.2. Show results

This secondary menu allows to visualize results in 2D graphic form.

3.4. View

3.4.1. Toolbar

Allows to take away or add the tool bar, this is used to access more rapidly the secondary menu most frequently used.

3.4.2. Status bar

Allows to take away or add the status bar.

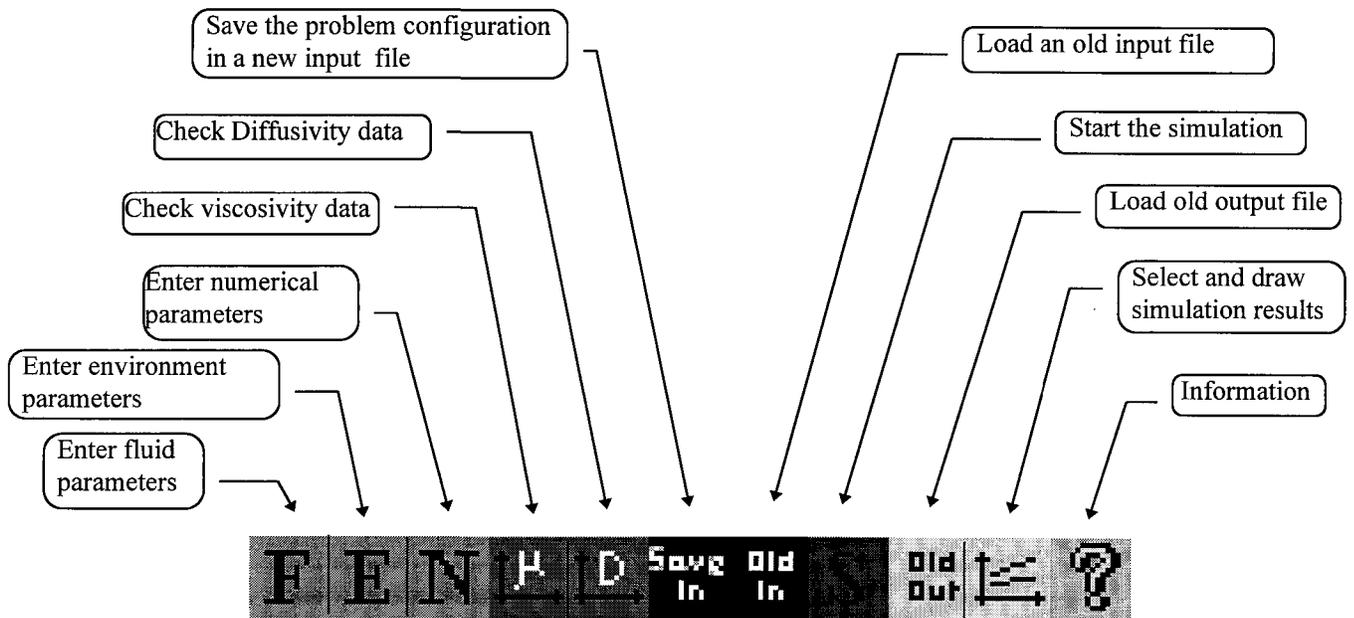
3.5. Help

This menu gives information on the software.

3.5.1. About

Displays the software version.

4. Tool bar



5. Recommendations

In order for the simulation to be fast enough, (about half the time required the normal duration of a laboratory test) the following numerical parameters are suggested :

number of cells in x : 54
number of cells in y : 10
time step dt (s) : 1
eps (precision) : 0.001