

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI  
COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DU DOCTORAT EN INGÉNIERIE

par

Naivonirina Ravelomanantsoa

EFFET DU VENT SUR LE TAUX D'ACCUMULATION DE POLLUTION À LA SURFACE DES  
ISOLATEURS DE HAUTE TENSION DANS LES CONDITIONS HIVERNALES

Décembre 2012

## RÉSUMÉ

L'objectif principal de cette recherche était d'étudier la variation du taux d'accumulation de pollution sur les isolateurs en fonction de la vitesse du vent sous des conditions hivernales. En particulier, cette recherche visait à accroître la connaissance du processus d'accumulation de pollution sur les isolateurs de haute tension durant l'hiver. Comme il n'existe pas encore de méthodes préétablies pour simuler l'accumulation de pollution hivernale sur les isolateurs, la réalisation de cette étude a nécessité le développement de nouvelles méthodes de simulation. Parmi les trois (3) catégories de méthodes de simulation connues, les développements d'une méthode de simulation numérique par ordinateur et d'une méthode d'accumulation artificielle en laboratoire furent retenus.

Le modèle développé pour la simulation numérique par ordinateur est une adaptation d'un modèle en 2D d'accumulation de glace sur un câble. En tenant compte de certaines restrictions, il a été démontré que cette adaptation constituait une bonne approche à la modélisation de l'accumulation de pollution sous des conditions hivernales. Ainsi, les simulations numériques réalisées en utilisant ce modèle ont permis de mettre en évidence la forte corrélation positive entre le taux journalier d'accumulation de pollution hivernale et la vitesse du vent. Les résultats des simulations numériques ont permis aussi de trouver que la relation entre ces deux (2) variables est régie par une loi de puissance selon l'expression  $ESDD = aV^b$ , où  $a$  et  $b$  sont des paramètres dont les valeurs sont conditionnées par la forme de l'isolateur, la taille des particules de pollution et la quantité totale de particules en suspension dans l'air. Toutefois, la relation obtenue était différente de la fonction cubique, caractéristique de la pollution marine, compte tenu de la valeur de  $b$  trouvée. Et, à l'issue de la comparaison des résultats numériques avec ceux obtenus sur le terrain, il a été possible de valider partiellement le modèle numérique, en se limitant à des vitesses de vent qui n'excèdent pas 5 m/s associées à des particules de pollution de 20 µm de diamètre volumique médian (MVD) et de quantité totale de particules en suspension (TSP) égale à 30 µg/m<sup>3</sup>.

Pour l'accumulation artificielle en laboratoire, le développement du modèle expérimental était basé sur l'adaptation de la méthode de contamination « Dry-Mixing ». La réalisation du montage a nécessité la conception spéciale d'un générateur de pollution, composé d'un générateur d'aérosol solide et d'un système de gicleurs, afin de produire un mélange sec externe de polluants solides (poudre de kaolin), et de gouttelettes surfondues de saumure atomisée. Un écoulement d'air, produit par un ventilateur à vitesses variables à l'intérieur d'un tunnel de vent réfrigéré à circuit fermé ou ouvert, transportait les particules de pollution ainsi

formées et les déposait à la surface d'un isolateur de test sous tension ou non, lequel a été installé à une distance spécifique de la buse du générateur de pollution. Des essais de contamination ont pu être effectués par la suite dans la soufflerie réfrigérée ainsi qu'à l'intérieur de la chambre climatique de la CIGELE. Les expériences en absence de source de tension se sont déroulées à la fois dans la soufflerie réfrigérée et dans la chambre climatique. Quant aux expériences en présence de source de haute tension AC, celles-ci se sont déroulées exclusivement dans la chambre climatique.

Les résultats expérimentaux obtenus nous ont permis d'étudier les effets du vent sur le taux d'accumulation de pollution sous des conditions hivernales ainsi que d'analyser l'influence de la haute tension AC sur le processus d'accumulation. Il a été trouvé que l'*ESDD* est aussi une fonction de puissance de la vitesse du vent selon l'expression  $ESDD = aV^b$ , où *a* et *b* sont des paramètres dépendants des conditions expérimentales telles que la durée de l'accumulation, la température, la pression d'air du gicleur, le débit et la concentration de la saumure ainsi que de la tension appliquée. Cependant, la relation est loin d'être une fonction cubique avec les valeurs de *b* obtenues. Par ailleurs, il a été constaté que la pollution s'accumulait plus rapidement sur la surface supérieure du disque que sur la surface inférieure. Et en présence de la haute tension AC, l'effet de la force diélectrophorétique était seulement notable sur la surface supérieure du disque pour des vitesses de vent faibles contrairement sur la surface inférieure où son effet était plus considérable pour des vents de grande vitesse. En outre, en comparant les résultats expérimentaux aux résultats obtenus sur le terrain, il a été possible d'obtenir, dans ce sens, une validation du modèle de la chambre climatique en présence de haute tension AC, mais uniquement pour la surface supérieure.

En somme, les trois (3) modèles de simulation développés dans la présente étude concordaient sur le fait qu'en présence de conditions hivernales, il y a un accroissement rapide du taux d'accumulation de pollution sur les isolateurs lorsque la vitesse du vent est élevée et que généralement, la variation de l'*ESDD* en fonction de la vitesse du vent suit une loi puissance autre que la loi cubique  $V^3$ .

## ABSTRACT

The main objective of this research was to study the variation in the accumulation rate of pollution on insulators according to the speed of the wind under the winter conditions. More specifically, this research aimed to further knowledge on the pollution accumulation process on high voltage energized insulators during the winter. In absence of pre-established methods to simulate the accumulation of winter pollution on the insulators, this study required the development of new methods of simulation. Among the three categories of known methods of simulation, numerical simulation and artificial accumulation in laboratory were selected.

The developed numerical simulation model was adapted from a 2D model of ice accretion on a cable. Taking certain restrictions into account, it was shown that this constituted a good approach for modeling pollution accumulation under winter conditions. Thus, the numerical simulations carried out using this model made it possible to show the strong positive correlation between the daily accumulation rate of winter pollution and wind speed. Numerical simulation results also made it possible to find the relation between these two variables which is governed by a power law according to the expression  $ESDD = aV^b$ , where  $a$  and  $b$  are parameters whose values are determined by insulator shape, pollution particle size and total suspended particles in the air. However, the resulting equation was not a cubic function, characteristic of marine pollution, considering the value obtained for  $b$ . Finally, by comparing the numerical results to the experimental ones, it was possible to partially validate the numerical model, being limited to wind speeds not exceeding 5 m/s together with pollution particle size of 20 µm median volume diameter (MVD), and total suspended particles (TSP) equals to 30 µg/m<sup>3</sup>.

As for the artificial accumulation in laboratory, the developed model was based on the adaptation of the "Dry-Mixing" contamination method. This required setting up a specially designed pollution generator, which was composed of a solid aerosol generator and a nozzle system, in order to produce an external dry mixture of solid pollutants (kaolin powder), and supercooled atomized brine droplets. The air flow, produced by a variable speed fan inside a closed- or an open-loop refrigerated wind tunnel, carried the generated pollution particles and deposited them on the energized or unenergized surface of a test insulator, installed at a specific distance from the pollution generator nozzle. Then, contamination simulations were carried out in the CIGELE refrigerated wind tunnel and in a climate chamber. Experiments without applied voltage were carried out both inside the refrigerated wind tunnel and the

climate chamber, whereas those with high voltage source were carried out exclusively inside the climate chamber.

The obtained experimental results made it possible to study the effects of wind on the accumulation rate of pollution under winter conditions and also to analyze the influence of AC high voltage on the accumulation process. It was found that *ESDD* is also related to the wind speed power function,  $ESDD = aV^b$ , where *a* and *b* are parameters depending on experimental conditions such as accumulation duration, temperature, nozzle air pressure, brine flow rate and concentration, as well as applied voltage. However, this is far from being a cubic function according to the obtained values of *b*. In addition, it was found that pollution accumulated faster on the top surface of the sheds than on the bottom surface. Also under AC high voltage, the effect of the dielectrophoretic force was only notable on the top surface of the sheds at low wind speed contrary to the bottom surface where its effect was more considerable at high wind speed. Moreover, by comparing the experimental results to the ones obtained in the field, it was possible to validate the model used inside the climate chamber under AC high voltage, but only for the top surface.

In brief, the three simulation models developed in this study have this in common that under winter conditions there is a rapid increase of the pollution accumulation rate on the insulators subject to high wind speed, and that the variation of *ESDD* as function of wind speed is a power law different from the cubic law  $V^3$ .

## REMERCIEMENTS

Ce projet de thèse a été réalisé dans le cadre des activités de la Chaire Industrielle CRSNG/Hydro-Québec/UQAC, sur le givrage atmosphérique des équipements des réseaux électriques (CIGELE) et de la Chaire de recherche du Canada, niveau 1, en ingénierie du givrage des réseaux électriques (INGIVRE)

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et témoigner toute ma reconnaissance envers mon directeur, Professeur Masoud Farzaneh, et mon co-directeur, Dr. William. A. Chisholm, de m'avoir guidé tout au long de ce projet que ce soit par les précieux conseils et l'encadrement qu'ils m'ont donnés ou par leur disponibilité qu'ils ont su mettre à mon égard. Et spécialement, je voudrais offrir mes sincères remerciements au Pr. Farzaneh de m'avoir accueilli au sein de son équipe, et de n'avoir jamais cessé de m'encourager et de me témoigner sa confiance et son soutien.

Je tiens à remercier Dr. Fu Ping pour sa précieuse collaboration pour la partie concernant les simulations numériques dans ce projet.

Je remercie les membres du jury d'évaluation, notamment Pr. Issouf Fofana et Dr. Stephan Brettschneider, qui m'ont fait l'honneur d'accepter de juger ce travail.

Je voudrais remercier également Mr. Pierre Camirand, pour son appui technique qui a rendu possible la réalisation de ce projet, ainsi que tout le personnel de la CIGELE pour leur amitié et leur solidarité.

Finalement, je tiens à remercier de tout mon cœur ma famille et mes amis de m'avoir soutenu moralement et de m'avoir encouragé tout au long de ce projet. Particulièrement, j'exprime ma profonde reconnaissance aux grands parents de ma fille, M. et Mme Paul et Micheline Thériault, pour leur amour et leur sollicitude inestimable.

## TABLE DES MATIÈRES

Résumé .....	i
Abstract .....	iii
Remerciements.....	v
Table des matières .....	vi
Liste des abréviations et symboles .....	xi
Liste des tableaux .....	xviii
Liste des figures.....	xx
Publications découlant de cette recherche doctorale.....	xxiv
 CHAPITRE I	
INTRODUCTION .....	1
I.1 Contexte général .....	1
I.2 Problématique de l'accumulation de pollution sur les isolateurs durant la période hivernale.....	3
I.3 Objectifs de cette recherche .....	7
I.4 Méthodologie .....	9
I.5 Originalité de cette étude .....	10
I.6 Structure de la thèse.....	12
 CHAPITRE II	
REVUE DE LITTÉRATURE.....	14
II.1 Introduction.....	14
II.2 Description du phénomène de pollution.....	15
II.2.1 Sources de pollution .....	16
II.2.2 Processus d'accumulation de pollution sur les isolateurs .....	17
II.2.2.1 <i>Rôle du vent</i> .....	19

<i>II.2.2.2 Influence de la taille des particules.....</i>	20
<i>II.2.2.3 Effet de la géométrie de l'isolateur et de la présence de tension .....</i>	21
<i>II.2.2.4 Influence de l'emplacement du réseau électrique par rapport à la source de pollution .....</i>	25
II.2.3 Processus de contournement des isolateurs pollués .....	26
II.3 Mesure du taux d'accumulation de pollution .....	28
II.3.1 Mesure de l' <i>ESDD</i> .....	28
II.3.2 Mesure de la <i>NSDD</i> .....	31
II.3.3 Applications de l' <i>ESDD</i> et de la <i>NSDD</i> .....	32
II.4 Méthodes de simulation de l'accumulation de pollution.....	35
II.4.1 Accumulation naturelle sur terrain .....	36
II.4.2 Accumulation artificielle en laboratoire.....	38
II.4.2.1 <i>Le brouillard salin</i> .....	38
II.4.2.2 <i>Le brouillard clair</i> .....	39
II.4.2.3 <i>Le DCM</i> .....	41
II.4.2.4 <i>Le DSL</i> .....	42
II.4.2.5 <i>Le brouillard froid</i> .....	44
II.4.2.6 <i>Le DMCM</i> .....	44
II.4.3 Simulation numérique par ordinateur.....	46
II.5 Caractéristiques de l'accumulation de pollution sous conditions hivernales.....	50
II.5.1 Durée de la phase de dépôt.....	51
II.5.2 Contribution du sel de déglaçage.....	52
II.6 Conclusion.....	54
<b>CHAPITRE III</b>	
<b>MÉTHODOLOGIE POUR LA SIMULATION PAR ORDINATEUR DE L'ACCUMULATION DE POLLUTION HIVERNALE .....</b>	<b>56</b>
III.1 Introduction.....	56
III.2 Description du problème .....	57
III.3 Modélisation de l'accumulation de pollution.....	59

III.3.1	Modèle de base relatif à l'accumulation de glace sur un câble .....	60
III.3.1.1	<i>Structure générale</i> .....	60
III.3.1.2	<i>Implémentation du modèle</i> .....	62
III.3.1.3	<i>Paramètres d'entrée du modèle</i> .....	63
III.3.2	Modèle adapté au dépôt de pollution sur un isolateur .....	65
III.3.2.1	<i>Structure générale</i> .....	65
III.3.2.2	<i>Calcul de l'écoulement de l'air</i> .....	67
III.3.2.3	<i>Calculs de trajectoire des particules de poussière et de l'efficacité de collision locale</i> .....	71
III.3.2.4	<i>Implémentation du modèle</i> .....	75
III.3.2.5	<i>Paramètres d'entrée</i> .....	77
III.4	Modélisation de la phase de transport.....	78
III.4.1	Équations de mouvement d'une particule.....	80
III.4.2	Exemple de calcul .....	82
III.5	Conclusion.....	88
 <b>CHAPITRE IV</b>		
<b>MONTAGE EXPÉRIMENTAL ET MÉTHODOLOGIE</b> .....		90
IV.1	Introduction.....	90
IV.2	Modèles Physiques .....	91
IV.3	Conception et réalisation du montage expérimental .....	92
IV.3.1	Le générateur de pollution .....	93
IV.3.1.1	<i>Conception</i> .....	93
IV.3.1.2	<i>Réalisation</i> .....	95
IV.3.2	Montage réalisé dans la soufflerie réfrigérée .....	100
IV.3.3	Montage réalisé dans la chambre climatique.....	103
IV.3.4	Les instruments de mesures .....	105
IV.4	Procédures expérimentales et méthodologie pour la prise de mesures.....	106
IV.4.1	Procédures expérimentales pour la phase d'accumulation .....	106
IV.4.2	Méthodologie pour la prise de mesures .....	107
IV.4.2.1	<i>Prise de mesures pour l'ESDD</i> .....	107

IV.4.2.2 <i>Prise de mesures pour la NSDD</i> .....	107
IV.4.3 Quelques difficultés et problèmes rencontrés .....	109
IV.5 Conclusion.....	112
<b>CHAPITRE V</b>	
<b>ÉTUDE DE L'INFLUENCE DE LA VITESSE DU VENT SUR LE TAUX D'ACCUMULATION DE LA POLLUTION HIVERNALE.....</b>	<b>113</b>
V.1 Introduction.....	113
V.2 Simulations numériques bidimensionnelles .....	114
V.2.1 Paramètres .....	114
V.2.2 Résultats numériques.....	115
V.2.2.1 <i>Taux d'accumulation en fonction de la vitesse du vent</i> .....	115
V.2.2.2 <i>Taux d'accumulation en fonction de la taille des particules</i> .....	118
V.2.2.3 <i>Taux d'accumulation en fonction de la concentration de polluants dans l'air</i> .....	119
V.2.3 Analyse et discussions .....	120
V.2.3.1 <i>Relation entre le taux d'accumulation et la vitesse du vent</i> .....	120
V.2.3.2 <i>Influence de la taille des particules de pollution</i> .....	124
V.2.3.3 <i>Influence de la concentration de polluants dans l'air</i> .....	126
V.3 Expérimentations en laboratoire.....	127
V.3.1 Études réalisées dans la soufflerie réfrigérée .....	127
V.3.1.1 <i>Paramètres des essais</i> .....	127
V.3.1.2 <i>Résultats expérimentaux</i> .....	128
V.3.1.3 <i>Analyse et discussions</i> .....	130
V.3.2 Études réalisées dans la chambre climatique .....	135
V.3.2.1 <i>Paramètres des essais</i> .....	135
V.3.2.2 <i>Résultats expérimentaux</i> .....	136
V.3.2.3 <i>Analyse et discussions</i> .....	138
V.4 Comparaison des modèles numériques et expérimentaux .....	151
V.4.1 Comparaison des résultats de simulation numérique avec ceux de la soufflerie réfrigérée.....	151

V.4.2 Comparaison des résultats de simulation numérique avec ceux de la chambre climatique .....	154
V.4.3 Points de commun accord .....	158
V.5 Comparaison avec les études sur le terrain .....	159
V.5.1 Comparaison par rapport au ratio <i>ESDD<sub>t</sub>/ESDD<sub>b</sub></i> .....	163
V.5.2 Comparaison par rapport à l'effet de la force diélectrophorétique.....	170
V.5.3 Comparaison par rapport à l'influence de la forme des isolateurs.....	172
V.6 Conclusion.....	173
 <b>CHAPITRE VI</b>	
<b>CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET RECOMMANDATIONS POUR LES TRAVAUX FUTURS.....</b>	<b>175</b>
VI.1 Conclusions générales.....	175
VI.2 Recommandations .....	180
 <b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>186</b>
 <b>ANNEXE I</b>	
<b>DONNÉES TECHNIQUES DU GÉNÉRATEUR DE POUDRE (MODÈLE SAG 410 DE TOPAS-GMBH) .....</b>	<b>191</b>
 <b>ANNEXE II</b>	
<b>DONNÉES TECHNIQUES DU CONDUCTIMÈTRE (MODÈLE SC72 DE YOKOGAWA) .....</b>	<b>197</b>
 <b>ANNEXE III</b>	
<b>DONNÉES TECHNIQUES DE L'HYGROMÈTRE (MODÈLE TH550 DE DICKSON) .....</b>	<b>199</b>
 <b>ANNEXE IV</b>	
<b>PROCÉDURES POUR LA PHASE D'ACCUMULATION .....</b>	<b>201</b>
 <b>ANNEXE V</b>	
<b>TECHNIQUE POUR LA PRISE DE MESURES DE L'ESDD .....</b>	<b>209</b>
 <b>ANNEXE VI</b>	
<b>MODÈLE DE FEUILLE DE MESURE .....</b>	<b>211</b>

## LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES

<b>AC</b>	Courant alternatif.
<b>DC</b>	Courant continu.
<b>CEI</b>	Commission électrotechnique internationale.
<b>CIGELE</b>	Chaire Industrielle CRSNG/Hydro-Québec/UQAC sur le givrage atmosphérique des équipements des réseaux électriques.
<b>DCM</b>	<i>Dust Cycle Method.</i>
<b>DDDG</b>	<i>Directional Dust Deposit Gauge Measurements</i> ou jauge directionnelle de dépôt de poussière.
<b>DMCM</b>	<i>Dry-Mixing Contamination Method.</i>
<b>DSL</b>	<i>Dry Salt Layer.</i>
<b>ESDD</b>	<i>Equivalent Salt Deposit Density</i> ou densité équivalente de dépôt de sel.
<b>HT</b>	Haute tension.
<b>IEC</b>	<i>International Electrotechnical Commission.</i>
<b>IEEE</b>	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers.</i>
<b>LCE</b>	<i>Local Collision Efficiency</i> ou efficacité de collision locale.
<b>LWC</b>	<i>Liquid Water Content</i> ou teneur en eau liquide.
<b>MEFF</b>	Méthode des éléments finis de frontières.
<b>MVD</b>	<i>Median Volume Diameter</i> ou diamètre volumique médian.
<b>NaCl</b>	Chlorure de sodium.
<b>NSDD</b>	<i>Non Soluble Deposit Density</i> ou densité de dépôt insoluble.

PID	Proportionnelle Intégrale Dérivée.
PMT	Photomultiplicateur.
RTD	<i>Resistance Temperature Detector</i> ou capteur de température à résistance.
SAG	<i>Solid Aerosol Generator</i> ou générateur d'aérosol solide.
SDD	<i>Salt Deposit Density</i> ou densité de dépôt de sel.
TSP	<i>Total Suspended Particles</i> ou quantité totale de particules en suspension.

$A$	Aire du disque de l'isolateur [cm <sup>2</sup> ].
$a$	Constante déterminée expérimentalement.
$\alpha$	Angle [deg].
$a_b$	Constante correspondant à un niveau de fond [g/m <sup>2</sup> /jour].
$A_f$	Surface frontale d'une particule sphérique [m <sup>2</sup> ].
$A_{inf}$	Aire de la partie inférieure du disque [cm <sup>2</sup> ].
$a_{splash}$	Constante associée à l'éclaboussure [g/m <sup>2</sup> /jour].
$a_{spray}$	Constante associée au mécanisme de transport par spray [g/m <sup>2</sup> /jour].
$A_{sup}$	Aire de la partie supérieure du disque [cm <sup>2</sup> ].
$b$	Constante déterminée expérimentalement.
$b_T$	Facteur dépendant de la température.
$b(\theta)$	Efficacité de collision locale.
$C$	Constante déterminée expérimentalement.
$c$	Constante.
$C++$	Langage de programmation.
DC-	Courant continu négatif.
DC+	Courant continu positif.
$C_D$	Coefficient de trainée.
$c_{NaCl}$	Concentration de NaCl [wt%].
$D$	Diamètre volumique d'une particule [m <sup>3</sup> ].
$d$	Distance entre le générateur de poudre et l'isolateur [m].

$D(x)$	Densité de dépôt de chlorure en fonction de la distance x [m].
$d_c$	Constante dimensionnelle.
$D_{inf}$	Diamètre inférieur du disque [m].
$dL$	Distance entre les points d'impact sur la surface de l'objet [m].
$D_{top}$	Diamètre supérieur du disque [m].
$dY$	Distance élémentaire verticale entre deux trajectoires [m].
$\epsilon_0$	Permittivité du vide [F/m].
$ESDDb$	Densité équivalente de dépôt de sel sur la surface inférieure du disque [ $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ].
$ESDDb_{AC}$	Densité équivalente de dépôt de sel sur la surface inférieure du disque sous une tension AC [ $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ].
$ESDDt$	Densité équivalente de dépôt de sel sur la surface supérieure du disque [ $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ].
$ESDDt_{AC}$	Densité équivalente de dépôt de sel sur la surface supérieure du disque sous une tension AC [ $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ].
$F_b$	Poussée d'Archimède [N].
$F_d$	Force de traînée [N].
$F_e$	Force diélectrophorétique [N].
$F_g$	Force gravitationnelle [N].
$g$	Constante de gravité [ $\text{m}/\text{s}^2$ ].
$H$	Hauteur du disque [m].
$h$	Différence de hauteur entre la route et la base des structures de la ligne [m].
$h_0$	Hauteur moyenne d'installation des isolateurs [m].

$\varphi$	Fonction du courant.
$\varphi_1$	Courant initial.
$\varphi_2$	Courant turbulent.
$K$	Constante déterminée par l'expérience.
$k$	Permittivité relative d'une particule.
$k_b$	Constante adimensionnelle.
$k_d$	Constante adimensionnelle.
$k_g$	Constante adimensionnelle.
$k_i$	Constante adimensionnelle.
$l$	Longueur de fuite de l'isolateur [m].
$M$	Masse du dépôt [mg].
$m$	Masse d'une particule [kg].
$M_0$	Masse initiale du papier filtre [mg].
$M_1$	Masse du papier filtre après séchage [mg].
$\mu_a$	Viscosité de l'air [N.s/m <sup>2</sup> ].
$N$	Constante d'arc statique.
$n$	Constante d'arc.
$\nabla$	Divergence.
$\nabla^2$	Laplacien.
$Q$	Quantité moyenne de particules en suspension par mètre cube d'air [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ].
$Q_0$	Valeur initiale de SDD [mg/cm <sup>2</sup> ].

$Q_s$	Densité de dépôt de sel [mg/cm <sup>2</sup> ].
$r$	Rayon de la particule [mm].
$R^2$	Coefficient de détermination.
$\rho_a$	Densité de l'air [kg/m <sup>3</sup> ].
$Re_D$	Nombre de Reynolds d'une particule sphérique de diamètre volumique D.
$\rho_s$	Densité de la particule solide [kg/m <sup>3</sup> ].
$\sigma_{20}$	Conductivité de la couche de pollution à 20°C [S/cm].
$S_o$	Salinité [kg/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_T$	Conductivité mesurée à une température T [S/cm].
$T$	Température [°C].
$t$	Durée du processus [s].
$t_i$	Intervalle de temps [h].
$t_s$	Temps de simulation [min].
$U$	Tension électrique [V].
$u$	Vitesse d'une particule [m/s].
$u_x$	Composante de la vitesse d'une particule selon l'axe des x [m/s].
$u_y$	Composante de la vitesse d'une particule selon l'axe des y [m/s].
$v$	Volume d'une particule [m <sup>3</sup> ].
$V_{eau}$	Volume total de l'eau de lavage [cm <sup>3</sup> ].
$V$	Vitesse du vent [m/s].
$V_0$	Vitesse de départ de l'écoulement [m/s].

$V_i$	Vitesse moyenne du vent durant un intervalle de temps $t_i$ [m/s].
$V_R$	Vitesse de référence du vent [m/s].
$V_x$	Composante de la vitesse du vent selon l'axe des x [m/s].
$V_y$	Composante de la vitesse du vent selon l'axe des y [m/s].
$x$	Abscisse d'une position dans les coordonnées cartésiennes [m].
$y$	Ordonnée d'une position dans les coordonnées cartésiennes [m].
$y_R$	Altitude de référence pour la mesure de $V_R$ [m].
$z$	Paramètre de rugosité du terrain.

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1:	Comparaison de l'amplitude des forces agissant sur une particule de pollution de 5 µm à proximité d'un isolateur .....	20
Tableau II.2:	Correspondance entre la température et la valeur de $bT$ .....	29
Tableau II.3:	Niveau de pollution vs $ESDD$ et $NSDD$ .....	32
Tableau II.4:	Les différents niveaux de pollution .....	34
Tableau III.1:	Paramètres d'entrée du modèle pour l'accumulation de glace .....	65
Tableau III.2:	Paramètres d'entrée du modèle pour l'accumulation de pollution .....	77
Tableau III.3:	Paramètres de simulation .....	83
Tableau V.1:	Paramètres d'entrée .....	114
Tableau V.2:	Spécifications des isolateurs .....	117
Tableau V.3:	Taux journalier d'accumulation en fonction de la vitesse du vent pour trois (3) différents profils d'isolateur .....	117
Tableau V.4:	Taux journalier d'accumulation en fonction de la pente de la surface supérieure du disque en présence de vent de grande vitesse .....	123
Tableau V.5:	Paramètres des essais – Soufflerie réfrigérée .....	128
Tableau V.6:	Valeurs limites de l' $ESDD$ avec un intervalle de confiance de 95% – Soufflerie réfrigérée .....	134
Tableau V.7:	Paramètres des essais – Chambre climatique .....	136
Tableau V.8:	Valeurs limites de l' $ESDDt$ avec un intervalle de confiance de 95% – Chambre climatique – Étude no. 1 .....	142
Tableau V.9:	Valeurs limites de l' $ESDDb$ avec un intervalle de confiance de 95% – Chambre climatique – Étude no. 1 .....	142
Tableau V.10:	Valeurs limites de l' $ESDDt$ @ 45 kVAC avec un intervalle de confiance de 95% – Chambre climatique – Étude no. 2 .....	148
Tableau V.11:	Valeurs limites de l' $ESDDb$ @ 45 kVAC avec un intervalle de confiance de 95% – Chambre climatique – Étude no. 2 .....	148

Tableau V.12: Modèle numérique versus modèle expérimental de la soufflerie réfrigérée .....	152
Tableau V.13: Modèle numérique versus modèle expérimental de la chambre climatique.....	154
Tableau V.14: Valeurs médianes ou moyennes de l'ESDD ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ).....	171

## LISTE DES FIGURES

Figure II.1:	Variation de l'accumulation de pollution selon la direction du vent et la forme de l'isolateur .....	21
Figure II.2:	Trajectoire des particules de pollution selon leur taille.....	22
Figure II.3:	Effet de tourbillon observé sur un disque anti-pollution.....	22
Figure II.4:	Processus de contournement d'une surface isolante polluée .....	27
Figure II.5:	Courbe en Z de la relation entre NSDD/ESDD et la sévérité de la pollution d'un site .....	32
Figure II.6:	Site d'essais de Noto, Japon.....	37
Figure II.7:	Relation entre la NSDD et la quantité de kaolin ou tonoko dans la pâte de pollution .....	40
Figure II.8:	Relation entre la conductivité de la couche et l'ESDD pour trois différents types de matériau inerte .....	41
Figure II.9:	Schéma d'un cycle typique de 120 min du DCM .....	42
Figure II.10:	Montage pour simuler l'accumulation de pollution dans la méthode DSL.....	43
Figure II.11:	Schéma de principe du DMCM: I. Mélange des particules solides et la saumure atomisée. II. Adhésion de la saumure à la surface des particules. III. Humidification augmentant l'adhésion du polluant à la surface de l'isolateur.....	45
Figure II.12:	Schéma du montage du DMCM .....	46
Figure II.13:	Diagramme de calcul .....	48
Figure II.14:	Nombre de jours d'excès de neige.....	52
Figure II.15:	Effet de l'épandage de sel sur le taux d'accroissement de l'ESDD.....	53
Figure II.16:	Relation entre ESDD et le nombre d'heures sans pluie sur des isolateurs de poste à proximité d'une autoroute .....	53
Figure III.1:	Représentation schématique du problème .....	58
Figure III.2:	Structure générale du modèle d'accumulation de glace sur un câble .....	61
Figure III.3:	Schéma conceptuel de l'implémentation du modèle.....	63

Figure III.4:	Hiérarchisation des classes du modèle pour l'accumulation de glace .....	64
Figure III.5:	Structure du modèle de simulation adapté au dépôt de pollution sur un isolateur.....	68
Figure III.6:	Schéma de principe du calcul de l'écoulement d'air .....	69
Figure III.7:	Définition de l'efficacité de collision locale .....	74
Figure III.8:	Subdivision de la surface de l'isolateur en plusieurs cylindres superposés .....	75
Figure III.9:	Schéma conceptuel de l'implémentation du modèle adapté .....	76
Figure III.10:	Hiérarchisation des classes du modèle adapté au dépôt de pollution sur un isolateur.....	79
Figure III.11:	Déplacement d'une particule de sel dans un écoulement d'air du type laminaire .....	81
Figure III.12:	Courbe de $x(t)$ .....	85
Figure III.13:	Courbe de $y(t)$ .....	85
Figure III.14:	Courbe de la trajectoire $y(x)$ pour une particule de $50 \mu\text{m}$ de diamètre .....	86
Figure III.15:	Trajectoires d'une particule pour différentes vitesses $V_R$ .....	87
Figure III.16:	Trajectoires pour deux particules de différentes grosseurs .....	87
Figure IV.1:	Schéma du modèle physique dans la soufflerie réfrigérée .....	91
Figure IV.2:	Schéma du modèle physique à l'intérieur de la chambre climatique .....	92
Figure IV.3:	Disposition des buses. P–buse d'air principal, N–buse de sortie d'air, S–buse des particules solides, et L–buse du liquide .....	95
Figure IV.4:	Premier prototype du générateur de pollution.....	96
Figure IV.5:	Deuxième prototype du générateur de pollution. P–buse d'air principal, N–buse de sortie d'air, S–buse des particules solides, et L–buse du liquide .....	97
Figure IV.6:	Générateur d'aérosols solides à faible débit SAG 410L .....	100
Figure IV.7:	Soufflerie réfrigérée de la CIGELE .....	101
Figure IV.8:	Photos du montage dans la chambre de test de la soufflerie réfrigérée .....	102
Figure IV.9:	Générateur de pollution installé dans la chambre climatique .....	103
Figure IV.10:	Chaîne d'isolateurs installée dans le semi-tunnel de vent à circuit ouvert.....	104
Figure IV.11:	Dispositif utilisé pour la mesure de la NSDD.....	108
Figure IV.12:	Schéma de la procédure pour la mesure de la NSDD.....	108

Figure IV.13: Schéma de principe alternatif pour la mesure de la NSDD .....	111
Figure V.1: Taux journalier d'accumulation en fonction de la vitesse du vent pour un isolateur standard IEEE.....	116
Figure V.2: Taux journalier d'accumulation en fonction de la taille des particules pour trois (3) vitesses de vent ( $V=5, 10, 15 \text{ m/s}$ ).....	118
Figure V.3: Taux journalier d'accumulation en fonction de la concentration de polluants dans l'air pour $V=10$ et $15 \text{ m/s}$ .....	119
Figure V.4: Approximation par la loi de puissance du taux journalier d'accumulation en fonction de la vitesse du vent .....	121
Figure V.5: Taux journalier d'accumulation de pollution en fonction de la vitesse du vent pour différentes tailles de particules.....	126
Figure V.6: Photo de l'isolateur après la période d'accumulation – Soufflerie réfrigérée.....	129
Figure V.7: ESDD de la surface supérieure en fonction de la vitesse du vent – Soufflerie réfrigérée .....	129
Figure V.8: Approximation par une courbe de tendance de l'ESDD moyenne vs vitesse du vent –Soufflerie réfrigérée .....	133
Figure V.9: ESDD moyenne en fonction de la vitesse du vent en absence de tension électrique – Chambre climatique : Étude no 1 .....	137
Figure V.10: ESDD moyenne en fonction de la vitesse du vent à une tension de 45 kVAC – Chambre climatique : Étude no 2 .....	137
Figure V.11: Approximation par une courbe de tendance de l'ESDD moyenne vs vitesse du vent – Chambre climatique : Étude no.1 .....	140
Figure V.12: Approximation par une courbe de tendance de l'ESDD moyenne vs vitesse du vent @ 45 kVAC – Chambre climatique : Étude no.2 .....	145
Figure V.13: ESDD moyennes de la surface supérieure – Sous 45 kVAC vs sans tension électrique.....	149
Figure V.14: ESDD moyennes de la surface inférieure – Sous 45 kVAC vs sans tension électrique .....	150
Figure V.15: Isolateur capot et tige standard IEEE.....	155
Figure V.16: Température horaire enregistrée à la station « Toronto Island A ».....	157
Figure V.17: Point de rosée horaire enregistré à la station « Toronto Island A » .....	157
Figure V.18: Emplacement du poste de « Strachan T.S. ».....	161
Figure V.19: Emplacement du poste de « Richview T.S. ».....	162
Figure V.20: Données relatives au taux de pollution sur les isolateurs à « Strachan T.S. ».....	164

Figure V.21: ESDD moyenne (surfaces supérieure et inférieure) à « Richview T.S. » .....	165
Figure V.22: Vitesses moyennes et maximales hebdomadaires du vent enregistrées à la station « Toronto Island A ».....	169
Figure VI.1 : Modèle géométrique de l'isolateur réalisé avec le logiciel SolidWorks .....	182

## PUBLICATIONS DÉCOULANT DE CETTE RECHERCHE DOCTORALE

**Ravelomanantsoa N., M. Farzaneh et W.A. Chisholm**, « Effects of Wind Speed on the Accumulation Rate of Pollution on Outdoor Insulators under Winter Conditions », XI<sup>th</sup> International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Montréal QC, Canada, juin 2005.

**Ravelomanantsoa N., M. Farzaneh et W.A. Chisholm**, « Insulator Pollution Processes under Winter Conditions », Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Nashville TN, USA, octobre 2005.

**Ravelomanantsoa N., M. Farzaneh et W.A. Chisholm**, « Effects of Wind Velocity on Contamination of HV Insulators in Winter Conditions », Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Québec City QC, Canada, octobre 2008.

**Ravelomanantsoa N., M. Farzaneh et W.A. Chisholm**, « Laboratory Investigation of the HV Insulator Contamination Process under Winter Conditions », International Conference on High Voltage Engineering and Application, Chongqing, China, novembre 2008.

**Ravelomanantsoa N., M. Farzaneh et W.A. Chisholm**, « A Simulation Method for Winter Pollution Contamination of HV Insulators », Electrical Insulation Conference, Annapolis MD, USA, juin 2011.

# CHAPITRE I

## INTRODUCTION

### I.1 CONTEXTE GÉNÉRAL

Depuis leur apparition vers la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, les lignes utilisées pour les réseaux électriques – ensemble des infrastructures permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production (centrales électriques) vers les consommateurs d'électricité – sont constituées majoritairement de lignes électriques aériennes. Les structures et les équipements électriques destinés pour ces lignes sont alors soumis à des conditions météorologiques parfois extrêmes. Sans tarder, divers phénomènes tels que la foudre, le vent, l'accumulation de neige, glace ou verglas ont commencé à perturber le bon fonctionnement de l'ensemble du réseau.

Par-dessus ces contraintes météorologiques, s'ajoute la contrainte environnementale causée par le phénomène de pollution. Contrairement aux phénomènes météorologiques qui peuvent affecter l'ensemble des structures du réseau, le phénomène de pollution concerne particulièrement les isolateurs. Ces derniers sont des composants électrotechniques considérés comme les pièces maîtresses du réseau grâce au double rôle essentiel qu'ils jouent pour la fiabilité de l'acheminement de l'énergie électrique vers les consommateurs. Non seulement ces

composants permettent de fixer, maintenir ou soutenir les conducteurs électriques nus, mais aussi ils assurent l'isolation électrique entre ces derniers et les structures. Dans ce cas, une défaillance au niveau des isolateurs entraînerait inévitablement la formation d'un court-circuit qui, à son tour, mènerait jusqu'à la perte du réseau. Évidemment, une panne d'électricité n'est pas souhaitable ni pour les compagnies fournissant l'électricité, ni pour les abonnés, car les conséquences socio-économiques qu'elle engendre sont parfois désastreuses, surtout à notre heure actuelle. Une illustration très claire d'un tel désastre est la récente grande panne électrique en Inde, survenue le 30 et 31 juillet 2012, plongeant dans le noir au moins 700 millions d'Indiens et touchant gravement les secteurs tels que le transport (trains immobilisés, embouteillages monstres dus à l'absence de feux de circulation) et la santé (arrêt des opérations chirurgicales) [Pidd, 2012].

Le phénomène de pollution résulte de l'humidification d'un dépôt polluant accumulé à la surface des isolateurs. Le dépôt polluant peut s'agir d'embruns marins portés par le vent, se déposant peu à peu sur les isolateurs et formant progressivement une couche de sel. Il peut s'agir aussi de poussières contenant du sel, de la suie provenant des fumées des usines ou du chauffage domestique. Et particulièrement dans les régions froides, le dépôt polluant peut s'agir du sel provenant du salage des routes en hiver; ce dépôt vient alors polluer la neige ou la glace qui recouvre déjà la surface des isolateurs. La contrainte imposée par le phénomène de pollution est la diminution considérable de la performance électrique des isolateurs. En effet, lorsque le phénomène se produit, le dépôt polluant devient conducteur à cause de la dissolution du sel et un courant de fuite commence à circuler à la surface de l'isolateur pollué.

Des arcs électriques peuvent alors apparaître par la suite, se développer dans certaines conditions et continuer même jusqu'à provoquer un court-circuit lorsque le contournement total de l'isolateur aura eu lieu. Dans la plupart des régions froides, les contraintes météorologiques telles que la neige ou la glace sont accentuées par le phénomène de pollution. Le risque de contournement se trouve alors doublé ou même triplé en présence de pluie verglaçante ou durant les périodes de fonte ou de dégel.

## **I.2 PROBLÉMATIQUE DE L'ACCUMULATION DE POLLUTION SUR LES ISOLATEURS DURANT LA PÉRIODE HIVERNALE**

En hiver, les conditions dans lesquelles le processus d'accumulation de pollution sur les isolateurs se produit sont caractérisées généralement par une température moyenne inférieure au point de congélation, en présence de vent dont la vitesse moyenne journalière dépasse parfois 50 km/h [Environnement Canada]. L'accumulation se fait aussi pendant une longue période sans pluie, qui pourrait durer même trois (3) mois dans certaines régions [Farzaneh et Chisholm, 2009]. De plus, cette accumulation est caractérisée par une forte contribution du sel de déglaçage [Chisholm et al., 1993], [Farzaneh et Chisholm, 2009].

Pour les compagnies qui fournissent l'électricité, la performance des isolateurs dans de telles conditions de pollution est devenue un élément essentiel de critères de dimensionnement en vue d'augmenter la fiabilité des réseaux. Dès lors, le champ de recherche concernant le contournement électrique des isolateurs recouverts de pollution ou de glace polluée a suscité beaucoup d'intérêt auprès des pays touchés par ce problème. En effet, l'ampleur des incidents considérés comme étant les conséquences directes du phénomène de

pollution des isolateurs s'est fait sentir dans divers pays tels que le Canada [Chisholm et al., 1993], [Hydro One Networks, 2004], les États-Unis [Kawai, 1970], le Japon [Suguwara et al., 1991], l'Angleterre [Forrest, 1969], la Yougoslavie [Vuckvic et Zdravkovic, 1990], la Norvège [Fikke, 1990], ainsi que la France [Cimador et Vitet, 1990]. En particulier, un incident d'ampleur exceptionnelle, considéré comme une conséquence directe de la pollution des isolateurs, est survenu récemment au Canada le 27 janvier 2004. Des contournements se sont produits sur des bornes de traversée de 115 kV d'une sous-station installée dans une zone considérée comme critique au point de vue de niveau de pollution [Hydro One Networks, 2004]. Cet incident a entraîné des pannes de courant pendant une heure et demie dans la région du centre-ville de Toronto. Les conséquences économiques et humanitaires consécutives à ces coupures de courant justifient amplement l'étude et la compréhension de ce phénomène perturbateur qui empoisonne la vie des exploitants depuis les débuts des transmissions d'énergie électrique.

Dès le début des années 60, de nombreuses recherches et études ont été réalisées en laboratoire sur la problématique du contournement des isolateurs recouverts de pollution [Walshe, 1963], [NGK Insulators LTD, 1968] et de glace polluée [Vuckvic et Zdravkovic, 1990], [Cherney, 1980], [Suguwara et al., 1991], [Farzaneh et al., 2003]. Deux essais sous pollution artificielle ont même été standardisés pour les isolateurs de haute tension en porcelaine et en verre [CEI 60507, 1991], [CEI 1245, 1993]. Toutefois, la réalisation de ces essais requiert le développement des techniques de pré-contamination (phase de dépôt de pollution) pour simuler l'accumulation de la pollution sur les isolateurs à tester. De nombreuses méthodes ont

été développées à cette fin : le brouillard salin [CEI 60507, 1991], [CEI 1245, 1993], le brouillard clair ou la couche solide [CEI 60507, 1991], [CEI 1245, 1993], le « Dry-Mixing » [Besztercey et Karady, 2000], le « Dust Cycle Method » (DCM) [Eklund et al., 1995] et le « Dry Salt Layer » (DSL) [Engelbrecht et al., 2002;2003]. Cependant, la documentation approfondie sur chacune de ces méthodes (voir chapitre II) révèle une grande lacune relative aux conditions hivernales. Les effets de certains paramètres pouvant influencer la quantité de dépôts polluants, telles que la vitesse du vent et la température n'ont pas été prises en considération dans ces méthodes. Ce qui fait qu'aucune d'elle n'a été développée dans le but de simuler l'accumulation de pollution en présence de conditions hivernales. Ces dernières étant caractérisées par de forts vents, une température moyenne au-dessous du point de congélation et une période plus ou moins longue sans précipitations.

À notre connaissance, il existe très peu d'études relatives à l'analyse de l'effet du vent sur l'accumulation de pollution à la surface des isolateurs. Pourtant, cette analyse est d'une importance capitale dans la compréhension du phénomène de pré-contamination. En effet, de nombreuses études [Gerstik et al., 1957], [Vosloo et Holtzhausen, 1993], [Gorur et al., 1999] ont démontré que le vent est le principal transporteur de polluants et que la vitesse du vent affecte considérablement la quantité de pollution accumulée sur les isolateurs. Pour illustrer ceci, l'analyse faite sur l'incident du 27 janvier 2004 survenu au Canada a démontré que vingt-quatre heures précédent ce dernier, la vitesse moyenne du vent près de l'aéroport de l'île de Toronto était de 56 km/h direction est [Environnement Canada]. Les mesures prises par la suite à la sous-station ont démontré que le niveau de pollution a atteint  $90 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ . Une étude faite sur

terrain au Japon vers la fin des années 70 [Taniguchi et al., 1979] a également mentionné que l'accumulation de dépôt polluant à la surface des isolateurs testés a été principalement causée par de forts vents provenant de la mer. Cette étude a même déterminé que la quantité de polluant déposée varie avec la vitesse du vent selon la loi cubique. Cependant, la précision de cette relation est faible car l'écart type obtenu variait entre 40 et 50%. Pour les compagnies qui fournissent l'électricité, l'identification de la relation entre ces deux variables pourrait être utile pour prédire la quantité de pollution accumulée sur les isolateurs en fonction de la vitesse du vent, ce qui permettrait de mieux surveiller le niveau de pollution et de bien coordonner la maintenance des isolateurs durant les longues périodes d'absence de précipitations, comme en hiver. Évidemment, à part de la vitesse du vent, il existe de nombreux facteurs qui peuvent influencer la quantité de pollution accumulée, par exemple la taille et la densité des particules polluantes, la forme des isolateurs, la nature de la source de tension utilisée, etc. Quoique, pour un site donné, la plupart de ces facteurs sont quasiment stables pour une certaine période, ce qui n'est pas le cas pour le vent. Ces facteurs pourraient donc être considérés comme des paramètres fixes.

Devant toutes ces considérations, il nous importe de déterminer le type de corrélation entre la vitesse du vent et la quantité de pollution accumulée à la surface des isolateurs, pendant la saison hivernale. La problématique reliée à une telle étude se trouve dans la simulation de l'accumulation de pollution en condition hivernale, car aucune méthode expérimentale n'a été développée jusqu'à présent pour de telles conditions. Faire une étude sur le terrain serait une alternative pour réaliser cette étude. Mais cela demande une très longue

procédure expérimentale, et nécessite des appareillages lourds, sophistiqués et généralement très onéreux. Toutefois, des mesures sur le terrain ont déjà été prises au début des années 90 par Ontario Hydro dans le cadre d'un programme de surveillance *in situ* de la pollution des isolateurs durant l'hiver [Chisholm et al., 1993]. Les données recueillies lors de ce programme seront utilisées comme référence dans le cadre de cette thèse. Les outils numériques seraient également d'une grande utilité dans le but de déterminer la variation de l'accumulation de pollution en fonction de la vitesse du vent. Avec la performance des ordinateurs actuels et la puissance des logiciels de calculs, il serait possible d'obtenir rapidement des résultats avec de bonne précision.

Dans les sections à venir, il sera question des objectifs fixés par cette recherche, de la méthodologie utilisée pour atteindre ces objectifs, et de l'originalité de ce projet d'étude.

### I.3 OBJECTIFS DE CETTE RECHERCHE

La présente thèse a pour but d'accroître les connaissances du processus d'accumulation de pollution sur les isolateurs de haute tension. Plus précisément, il s'agit d'étudier dans les conditions hivernales ce qui se passe avant que le processus évolutif de contournement des isolateurs pollués, tel que décrit dans le chapitre II, ne commence, c'est-à-dire faire l'étude de la pré-contamination hivernale.

Pour ce faire, nous nous sommes fixé comme principal objectif d'analyser l'impact de la vitesse du vent sur le taux d'accumulation en présence de conditions hivernales, et ceci, par simulation numérique et par l'expérimentation en laboratoire. Cela consiste en premier lieu à :

- ⇒ Développer une méthode de simulation numérique adaptée au processus d'accumulation de pollution hivernale.
- ⇒ Développer de nouvelles méthodes expérimentales afin de simuler en laboratoire une accumulation artificielle de pollution hivernale.

Par la suite, il faudrait déterminer les paramètres pouvant influencer la quantité de polluants accumulée sur les isolateurs et donc pouvant empêcher ou favoriser la formation de couche électrolytique. Spécifiquement, il s'agit de :

- ⇒ Établir la variation entre le taux d'accumulation et la vitesse du vent pendant une période donnée et identifier la relation pouvant exister entre ces deux variables.
- ⇒ Analyser l'effet de la source de tension. C'est-à-dire, comparer le taux d'accumulation entre un isolateur sous tension AC et un isolateur hors tension.
- ⇒ Étudier l'influence des paramètres liés à l'accumulation de pollution en condition hivernale, telle que la densité et la taille des particules, le type et la forme des isolateurs.
- ⇒ Éventuellement, étudier l'effet de l'éloignement vis-à-vis de la source de pollution sur la quantité de polluants accumulée. Autrement dit, analyser l'effet de la distance durant la phase de transport de polluants.

## I.4 MÉTHODOLOGIE

Afin d'atteindre les objectifs mentionnés dans la section précédente, cette recherche a été divisée en trois étapes : la revue de littérature, les mesures expérimentales, la modélisation et la simulation.

### ❖ *Première étape : Revue de littérature*

Dans l'optique de démontrer les lacunes qui sont présentes dans les études existantes afin de justifier la nécessité de cette étude, la revue de littérature porte sur l'analyse du problème à travers les ouvrages et les publications disponibles en faisant d'abord état des réalisations qui ont été faites jusqu'à maintenant quant au phénomène de pollution. Cette étape porte également sur la détermination des paramètres influençant l'accumulation de pollution sur les isolateurs.

### ❖ *Deuxième étape : Modélisation et simulation*

Cette étape concerne la modélisation numérique bidimensionnelle du phénomène d'accumulation de pollution sur un isolateur supposé hors tension. Comme première approche, nous avons opté pour une adaptation du modèle de simulation correspondant à l'accumulation de glace sur un câble. Des simulations numériques sont réalisées par la suite sur un modèle d'isolateur pendant une période d'accumulation afin de déterminer l'effet de la vitesse du vent sur le taux d'accumulation. Cette étape porte également sur l'étude de l'influence de la variation de quelques paramètres comme la forme de l'isolateur, la taille et la densité des particules polluants, sur la relation vitesse du vent versus le taux d'accumulation. Un autre

aspect qui est aussi considéré dans cette étape est la variation durant la phase de transport, de la distance de l'isolateur vis-à-vis la source de pollution. L'objet de cette considération est de pouvoir analyser l'effet combiné de la distance et de la vitesse du vent sur le taux d'accumulation.

❖ *Troisième étape : Mesures expérimentales*

Cette dernière étape consiste à développer en premier lieu le modèle physique nécessaire pour réaliser les expériences en laboratoire. La conception de ce modèle est basée sur les méthodes utilisées actuellement pour simuler l'accumulation de pollution, en particulier sur la méthode du « Dry Mixing » à cause de sa simplicité et la facilité de pouvoir l'adapter aux conditions hivernales. Bien qu'aucune des méthodes actuelles n'ait été conçue pour ce genre de conditions, les procédures expérimentales que nous avons établies découlent de la méthode du « Dry Mixing ». La suite de cette étape porte sur la détermination expérimentale de la relation entre la vitesse du vent et le taux d'accumulation de pollution. En outre, elle fait état de l'étude sur l'influence que pourraient avoir certains paramètres, tels que la présence de la haute tension, sur cette relation.

## I.5 ORIGINALITÉ DE CETTE ÉTUDE

À notre connaissance, ce projet de recherche s'agit d'une première dans l'étude systématique de l'effet du vent sur le taux d'accumulation de pollution à la surface des isolateurs de haute tension et ce, en présence de conditions hivernales. L'originalité de cette étude se trouve alors dans les principales contributions théoriques et pratiques qu'elle apporte.

Parmi ces contributions, nous pouvons mentionner l'établissement de nouvelles méthodes pour simuler, numériquement ou en laboratoire, l'accumulation de pollution dans les conditions hivernales. Autrement dit, cette étude contribue à :

- ⇒ L'élaboration d'une méthode de pré-contamination propre à la pollution hivernale.  
Tel que mentionné précédemment, aucune des méthodes actuelles de pré-contamination n'a été conçue pour type de pollution.
- ⇒ La mise en place du tout premier modèle de simulation numérique du phénomène de pollution hivernale.

Nous pouvons mentionner également comme contribution de cette étude la mise en perspective de la relation entre vitesse du vent et taux d'accumulation de pollution, ainsi que l'analyse de manière plus approfondie, et ce par simulation numérique ou en laboratoire, de l'influence des paramètres importants tels que la taille des particules émises par la source de pollution, la forme et le type d'isolateur ainsi que la présence de la haute tension aux bornes de l'isolateur; des analyses qui n'ont été possibles jusqu'à présent qu'avec des études sur le terrain.

En outre, cette thèse propose deux ouvertures possibles qui sont de grands intérêts dans le domaine de la pollution. Il s'agit du :

- ⇒ Développement d'un modèle de simulation pour prédire le taux d'accumulation de pollution en hiver, qui pourrait favoriser l'émergence de nouvelles compétences dans le domaine de la prévention.
- ⇒ Développement d'une méthode de pré-contamination qui sera utile pour les essais de performance des isolateurs dans les conditions de pollution hivernale.

## I.6 STRUCTURE DE LA THÈSE

Le chapitre II est consacré à la revue de littérature afin de faire le point des connaissances acquises jusqu'à maintenant sur tout ce qui est relatif au phénomène d'accumulation de pollution, et d'identifier les principaux paramètres pouvant influencer la quantité de polluants accumulés sur les isolateurs et d'analyser les méthodes usuelles pour simuler l'accumulation de pollution. De plus, les caractéristiques du phénomène de pollution en présence de conditions hivernales seront présentées.

Le chapitre III présente la méthodologie que nous avons utilisée afin de parvenir au développement du modèle numérique permettant de simuler par ordinateur l'accumulation de pollution hivernale.

Le chapitre IV décrit en détail le montage expérimental ainsi que la méthodologie utilisée pour réaliser l'accumulation de pollution en condition hivernale. Entre autres, il sera question du modèle physique et de la mise en place du montage expérimental. Les différentes étapes de conception du générateur de pollution seront aussi expliquées en détail. En outre, les

procédures expérimentales établies pour la phase d'accumulation et les méthodes utilisées pour mesurer les taux d'accumulation seront décrites.

Le chapitre V est consacré à la présentation, l'analyse et la discussion des résultats. Une partie de ce chapitre portera sur la comparaison des résultats des simulations numériques et expérimentales et une autre partie sur une étude comparative avec des cas réels d'exposition.

Pour terminer, le chapitre VI présente les conclusions générales ainsi que des recommandations sur les travaux futurs.

## **CHAPITRE II**

### **REVUE DE LITTÉRATURE**

#### **II.1 INTRODUCTION**

Le domaine de recherche sur le comportement des isolateurs dans des conditions de pollution a déjà existé depuis une cinquantaine d'année. Cependant, le nombre de publications relatives au phénomène d'accumulation de pollution sur les isolateurs est assez restreint. Cette partie de revue de littérature a donc pour objectif de faire le point des connaissances acquises jusqu'à maintenant sur tout ce qui est relatif au phénomène d'accumulation de pollution afin d'identifier les principaux paramètres pouvant influencer la quantité de polluants accumulés sur les isolateurs. En outre, nous nous sommes intéressés en particulier aux études relatives à l'objet de cette recherche doctorale, à savoir l'analyse de l'effet du vent durant le processus d'accumulation de pollution sur les isolateurs de haute tension en condition hivernale.

La première partie de ce chapitre est consacrée à la description du phénomène de pollution, dans laquelle les principales sources sont identifiées et des explications sont données sur le processus d'accumulation de pollution sur les isolateurs et aussi sur le processus de contournement des isolateurs pollués. Ensuite, dans la deuxième partie sont présentées les méthodes usuelles pour mesurer le taux d'accumulation de pollution ainsi que les différentes

applications de ces mesures dans la classification et la surveillance de la sévérité de pollution dans un site. La troisième partie porte sur les spécifications des différentes méthodes existantes pour simuler l'accumulation de pollution sur les isolateurs afin d'en ressortir les modèles physiques et/ou mathématiques derrières chacune de ces méthodes. Et dans la dernière partie, les caractéristiques du phénomène de pollution en condition hivernale sont présentées.

## **II.2 DESCRIPTION DU PHÉNOMÈNE DE POLLUTION**

Par définition, le mot « pollution » désigne la dégradation d'un milieu qui se produit par l'introduction, directe ou indirecte, de substances nocives pour l'environnement ou par la modification de ses caractéristiques biologiques, chimiques ou physiques [Office québécois de la langue française, 2004]. Cela implique que, lorsqu'on parle des isolateurs, le phénomène de pollution est défini comme étant la dégradation de la surface isolante par des électrolytes solubles ou des particules inertes non solubles, qui sont des substances ayant la capacité d'altérer la performance électrique des isolateurs.

Le terme « pollué », souvent associé avec le mot « sale » au sens usuel, prend ainsi une autre signification lorsqu'il est utilisé pour décrire l'état d'un isolateur. Autrement dit, un isolateur pollué n'a pas nécessairement l'apparence d'être sale. En effet, un isolateur qui est fortement pollué par un embrun salin peut paraître propre alors que sa performance électrique subit une forte dégradation. Par contre, un autre isolateur recouvert de suie, qui paraît sale, peut avoir une performance électrique remarquable. D'où, un isolateur est considéré comme pollué lorsque sa surface est recouverte d'électrolytes solubles ayant les propriétés

d'augmenter la conductivité surfacique de cet isolateur. Le mot « contamination » est alors plus approprié dans ce cas pour décrire le phénomène de pollution des isolateurs et il se réfère plutôt à la conductivité électrique de la surface des isolateurs qu'à leur apparence extérieure. Souvent, dans les ouvrages et publications, les auteurs préfèrent utiliser le mot contamination au lieu de pollution pour lever justement cette ambiguïté.

### **II.2.1 Sources de pollution**

Les substances polluantes qui contaminent les isolateurs peuvent provenir de différentes sources dépendamment du type d'environnement dans lequel se trouve le site [CIGRE Task Force 33.04.01, 2000]. À titre d'exemples, dans un environnement de type marin, les électrolytes solubles proviennent des embruns salins de la mer qui sont présents dans l'atmosphère et constituent ce qu'on appelle la pollution marine. Dans un environnement type industriel, les isolateurs sont exposés à la pollution industrielle dont les substances solubles proviennent de la fumée produite par des centrales électriques thermiques (à charbon ou au mazout), des aciéries ou des raffineries alors que les substances inertes non solubles proviennent de la poussière générée par des cimenteries ou des mines de ciment. Et particulièrement en hiver, la plupart des isolateurs qui sont installés à proximité des autoroutes sont sujets à la pollution hivernale dont les sources d'électrolytes solubles sont principalement le salage des routes. Il arrive parfois que la fumée provenant du chauffage domestique dans un milieu urbain à forte densité de population constitue aussi une source de pollution en hiver. Certes, il existe d'autres types d'environnement qui sont également susceptibles de produire les substances polluantes selon la norme IEC 60815 [2008].

### **II.2.2 Processus d'accumulation de pollution sur les isolateurs**

Les théories relatives à la formation naturelle d'une couche de pollution sur les isolateurs ont déjà fait l'objet de nombreuses études qui sont expliquées par Looms [1988] dans son ouvrage, selon lequel le processus menant à l'accumulation de pollution à la surface des isolateurs comporte généralement quatre phases, soient : le transport, le dépôt, le nettoyage et l'équilibre de dépôt.

Durant la phase de transport, les polluants ou contaminants – particules de pollution ou substances susceptibles d'altérer la performance électrique des isolateurs – généralement sous forme de poussières, sont transportés principalement par le vent à partir de leurs sources, jusqu'à la proximité des installations électriques (lignes aériennes ou postes électriques de haute tension). Dans le cas de la pollution hivernale, le sel de déglaçage pourrait être déposé à proximité de la route par éclaboussure ou transporté par le vent sur de longues distances sous forme d'embruns [Lundmark et Olofsson, 2007].

Une fois arrivés à proximité des installations électriques, les polluants qui se trouvent au voisinage des isolateurs sont captés par ces derniers et forment graduellement par la suite une couche sèche d'électrolytes solubles recouvrant leur surface isolante. Une importante quantité additionnelle d'électrolytes peut également être déposée par des précipitations telles que de la glace polluée, de la neige ou de la brume [Farzaneh et Chisholm, 2009].

Après la phase de dépôt, les isolateurs peuvent être lavés d'une façon naturelle soit par le vent, soit par la pluie ou une combinaison des deux. Cette dernière est reconnue comme très

efficace pour enlever la couche polluante de la surface supérieure des isolateurs [Beauséjour, 1981]. Toutefois, une certaine quantité pourrait rester sur la surface inférieure dépendamment de l'intensité et de la quantité de pluie [Kimoto et al., 1971]. La précipitation hivernale telle que la neige ou la glace peut nettoyer également la surface des isolateurs durant la période de fonte ou de chute de glace en emportant les électrolytes dissoutes avec l'eau qui dégouline [Farzaneh et Chisholm, 2009].

À la fin du processus, un équilibre de dépôt est atteint lorsque les taux d'accumulation et de nettoyage sont égaux et les variations sont aléatoires plutôt que monotones. D'après Looms [1988], cette phase peut être atteinte après des jours ou des années et que le temps, pour atteindre cet équilibre, suivrait la loi logarithmique suivante :

$$M = a \log(t) + b \quad (\text{II.1})$$

où  $M$  est la masse du dépôt,  $t$  est le temps, et  $a$  et  $b$  sont des constantes qui dépendent de la forme, du matériau de l'isolant, de la taille et de l'orientation de l'isolateur.

Par ailleurs, de nombreux facteurs peuvent influencer le processus d'accumulation de pollution sur les isolateurs des réseaux électriques à l'extérieur. Parmi ces facteurs, nous avons identifiés quelques-uns que nous considérons comme ayant le plus d'effets sur le processus et par conséquent sur le taux d'accumulation :

- ⇒ la vitesse et la direction du vent;
- ⇒ la taille des particules de pollution;

- ⇒ la forme des isolateurs ainsi que la tension appliquée à ses bornes;
- ⇒ la distance des installations électriques par rapport à la source de pollution.

Nous allons passer en revue un à un ces facteurs afin de déterminer l'influence de chacun dans le processus d'accumulation de pollution.

### ***II.2.2.1 Rôle du vent***

Le vent est considéré comme étant le principal agent transporteur de pollution [Looms, 1988], [Vosloo et Holtzhausen, 2003], [Taniguchi et al., 1979]. Les conditions du vent sont donc parmi les facteurs qui influencent la distance de transport des polluants [Blomqvist, 1999]. Et durant la phase de dépôt, la force du vent est considérée comme de loin la plus dominante par rapport aux autres forces qui peuvent agir sur les particules de pollution comme nous rapporte Gorur et al. [1999] dans le Tableau II.1 ci-après.

La forte influence de la vitesse du vent sur le taux d'accumulation de pollution a également été observée par Taniguchi et al. [1979] lors de l'étude près de la mer du Japon, dans laquelle ils ont trouvé que la densité de dépôt de sel varie avec le cube de la vitesse moyenne du vent toutes les heures selon l'expression donnée par l'équation (II.2) suivante :

$$ESDD = C \sum_i (V_i^3 \cdot t_i) \quad (\text{II.2})$$

où  $ESDD$  [ $\text{mg/cm}^2$ ] est la densité équivalente de dépôt de sel sur la surface de l'isolateur,  $C$  est une constante dont la valeur dépend du type des isolateurs et de leur emplacement par

Tableau II.1: Comparaison de l'amplitude des forces agissant sur une particule de pollution de 5 µm à proximité d'un isolateur

Type de force	Amplitude relative
Gravité	1 PU (référence)
Contrainte de la tension ( $E = 2 \text{ kV/cm}$ )	10
Divergence du champ ( $E^2 = 0.2 \text{ kV}^2/\text{cm}^3$ )	0,0001
Vent (vitesse = 2 m/s)	1,000
Vent (vitesse = 5 m/s)	2,000
Vent (vitesse = 10 m/s)	3,000

R.S. Gorur et al. [1999]

rapport à la mer,  $V_i$  [m/s] est la vitesse moyenne du vent durant un intervalle de temps  $t_i$  [heures].

Quant à la direction du vent, son effet peut être notable dans certains cas où il y a une importante source directionnelle d'ions, comme le sel provenant de l'océan [Farzaneh et Chisholm, 2009]. La direction du vent détermine, entre autre, la répartition du dépôt de pollution sur les surfaces des isolateurs. En effet, comme nous montre la Figure II.1 suivante, la pollution s'accumule rapidement sur la partie de la surface supérieure qui est directement perpendiculaire à la direction du vent.

### ***II.2.2.2 Influence de la taille des particules***

Dépendamment de la vitesse du vent, la taille des particules de pollution peut jouer un rôle important sur le taux d'accumulation. En effet, tel qu'il est expliqué par Looms [1988], les particules ayant une densité plus élevée que l'air ne sont pas capables de suivre la ligne de courant lorsque le flux change de direction et laisse un point de stagnation après avoir heurté

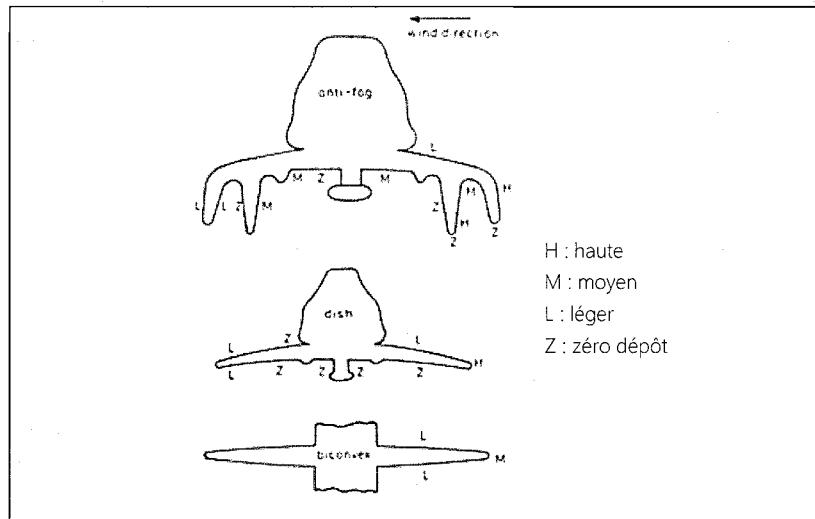


Figure II.1: Variation de l'accumulation de pollution selon la direction du vent et la forme de l'isolateur [Looms, 1988].

un isolateur. Ces particules poursuivent alors une trajectoire qui est en dérive par rapport à l'écoulement et leur mouvement est contré par la force visqueuse. Les particules relativement grosses se déposent ainsi facilement au point de stagnation où il n'y a aucune force pour les enlever (Figure II.2). Quant aux petites particules, certaines parviennent à s'échapper étant donné la faiblesse de la force visqueuse agissant sur elles, par contre la majorité est captée à l'intérieur de la cloche dû à l'effet tourbillon de l'écoulement qui s'y produit (Figure II.3).

#### **II.2.2.3 Effet de la géométrie de l'isolateur et de la présence de tension**

La forme de l'isolateur ainsi que son état (sous tension ou non) peuvent influencer également le taux d'accumulation de pollution car l'efficacité de capture de l'isolateur est directement liée à ces facteurs. Premièrement, par rapport à la forme, nous pouvons constater sur la Figure II.1 précédente que les isolateurs dont les disques ont une forme aérodynamique captent moins de pollution dans leur partie inférieure que ceux qui possèdent un disque en

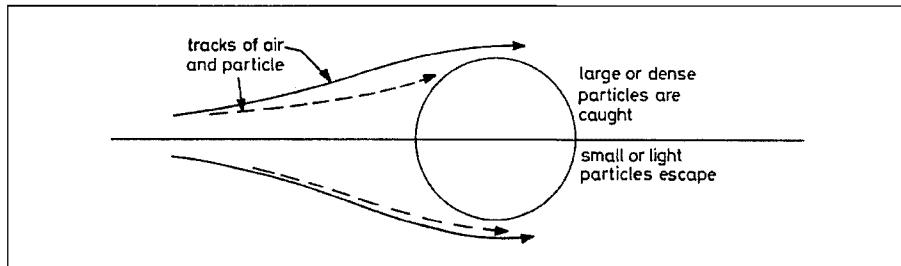


Figure II.2: Trajectoire des particules de pollution selon leur taille [Looms, 1988].

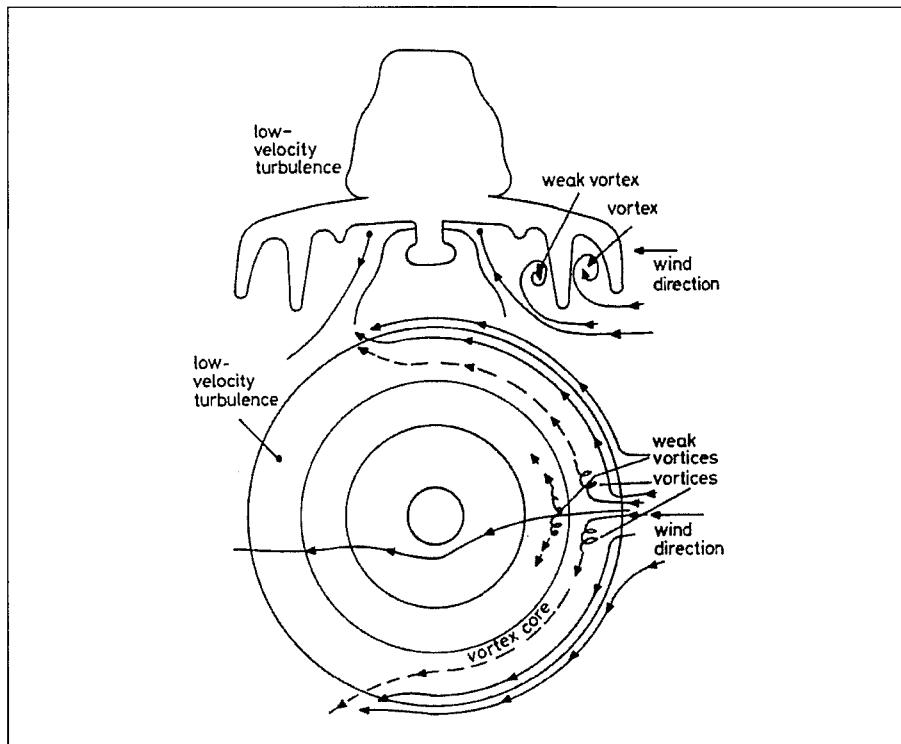


Figure II.3: Effet de tourbillon observé sur un disque anti-pollution [Looms, 1988].

forme de cloche contenant plusieurs rainures internes. L'explication selon Walshe [1963] est que le fait d'éliminer le vortex affecte grandement la capture de pollution dans la partie inférieure du disque. Les mesures effectuées par Akbar et Zedan [1991] corroborent également cette hypothèse en montrant que, dans les mêmes conditions de contamination, l'efficacité de

capture des disques aérodynamiques à profil complètement ouvert est de 30 à 60 % inférieure à celle des disques standards dont la surface inférieure comporte plusieurs rainures internes.

Deuxièmement, par rapport à l'état de l'isolateur, à priori un isolateur sous tension devrait capter plus de pollution qu'un isolateur hors tension étant donné que la présence de tension aux bornes de l'isolateur expose les particules de pollution environnant à l'influence d'un champ électrique. Lorsqu'une tension est appliquée aux bornes de l'isolateur, on distingue deux types de force électrique : la force proportionnelle au champ électrique  $E$ , appelée force de Coulomb, seulement dans le cas d'une source à courant continu (DC) et la force proportionnelle à  $E^2$  causée par la divergence du champ électrique, appelée aussi force diélectrophorétique, que ce soit dans le cas d'une source DC ou d'une source à courant alternatif (AC). En effet, dans un champ divergent, les particules deviennent polarisées et acquièrent un moment dipolaire. Étant donné que l'intensité du champ varie d'une particule à une autre, une force s'exerce sur chaque dipôle formé et a tendance à entraîner ce dernier, peu importe la polarité du champ, vers les zones de champ fort (objets de forme acérée) lorsque la permittivité de la particule de pollution est supérieure à celle de l'air. Selon Looms [1988], l'expression de cette force est donnée par la relation suivante :

$$F_e = c \times v \times \left( \frac{k-1}{k+2} \right) \nabla E^2 \quad (\text{II.3})$$

où  $F_e$  [N] est la force diélectrophorétique,  $c$  une constante,  $v$  le volume de la particule, et  $k$  la permittivité relative de la particule. En considérant que les particules ont une forme sphérique,

le produit  $c \times v = 2\pi r^3 \varepsilon_0$  [Hall et Mauldin, 1981], où  $r$  [m] est le rayon de la particule et  $\varepsilon_0$  [F/m] la permittivité du vide. Il s'agit donc d'une force proportionnelle au cube du diamètre et son intensité est plus élevée dans le cas où les particules sont conductrices et sont placées dans des champs fortement divergents. Par ailleurs, une force électrostatique appelée force image, résultant du phénomène d'induction électrostatique, peut s'exercer entre la surface de l'isolateur et les particules de pollution lorsque ces dernières sont chargées. Toutefois, son effet est négligeable par rapport à celui de la force de Coulomb lorsque la distance entre les particules de pollution est largement supérieure à la taille de ces particules [Keyence]

Malgré la prédominance de l'effet du vent sur le processus d'accumulation de pollution, la nature de la tension appliquée aux bornes des isolateurs joue quand même un rôle non négligeable durant la phase de dépôt. En effet, des études [Hylten-Cavallius et al., 1964; Kimoto et al., 1973] ont montré que le taux d'accumulation est plus élevé sur des isolateurs sous haute tension DC que sur des isolateurs sous haute tension AC ou hors tension. Cela vient corroborer la comparaison faite par Gorur et al. [1999] dans le Tableau II.1 qui nous indique que la force diélectrophorétique, la seule force en présence dans un champ alternatif, est plus faible que la force de Coulomb dans un champ continu. Wu et Zhiyi [1997] ont également trouvé que dans les sites de faible pollution industrielle, l'ESDD sous tension DC peut atteindre parfois le double et même le triple de l'ESDD sous tension AC lorsque la vitesse du vent est élevée. Toutefois, dans les sites où il n'y a que de la pollution naturelle, ils ont constaté que l'écart est réduit à moins de 20 % en présence d'un vent de grande vitesse.

Outre cela, les mesures faites par Hall et Mauldin [1981] à l'intérieur d'une soufflerie mettent aussi en évidence l'effet de la haute tension AC sur l'*ESDD* lorsqu'on compare le taux d'accumulation obtenu sur des isolateurs sans tension avec ceux qui ont été obtenus sur des isolateurs soumis à deux valeurs différentes de haute tension AC. Par rapport à l'*ESDD* en absence de tension, les taux d'augmentation sont de 160% et de 240% sous une tension de 7 kVAC et 12 kVAC respectivement.

#### ***II.2.2.4 Influence de l'emplacement du réseau électrique par rapport à la source de pollution***

La distance entre l'emplacement du réseau électrique à l'extérieur par rapport à la source de pollution affecte surtout la quantité de pollution transportée par le vent et qui sera déposée par la suite sur les isolateurs. Par exemple, dans le cas d'une pollution marine, la quantité de particules de sel contenue dans une masse d'air augmente en fonction de la distance que cette masse d'air a parcourue au-dessus d'une étendue d'eau. En parcourant de longues distances, les particules de sel peuvent contaminer les isolateurs des réseaux électriques très éloignés de la côte [Gorur et al., 1999]. Dans le cas de la pollution hivernale, une observation en Ontario sur l'*ESDD* de quatre postes électriques situés à différentes positions des autoroutes a révélé que le niveau de l'*ESDD* est plus élevé à proximité des autoroutes [Farzaneh et Chisholm, 2009]. Lundmark et Olofsson [2007] ont également déterminé, dans le cadre d'une étude en Suède, que la quantité totale de chlorure déposée quotidiennement à une certaine distance  $x$  du bord de l'autoroute suit une loi exponentielle selon l'expression donnée par l'équation (II.4) suivante :

$$D(x) = a_{splash} \cdot e^{-\frac{1}{2}x} + a_{spray} \cdot e^{-\frac{1}{20}x} + a_b \quad (\text{II.4})$$

où  $D(x)$  [g/m<sup>2</sup>/jour] est la densité de dépôt de chlorure,  $a_{splash} = 8$  g/m<sup>2</sup>/jour est une constante associée à l'éclaboussure,  $a_{spray} = 0,12$  g/m<sup>2</sup>/jour est une constante associée au mécanisme de transport par spray et  $a_b = 0,003$  g/m<sup>2</sup>/jour est une constante correspondant à un niveau de fond.

Par ailleurs, l'équilibre de dépôt pourrait être aussi grandement affecté par la position relative des isolateurs par rapport à la source de pollution. Selon Looms [1988], dans le cas de la pollution marine, la variation de la masse du dépôt  $M$  avec la distance par rapport à la mer obéit à une loi de puissance, exprimée par l'équation (II.5) suivante :

$$M(x) = a \cdot x^{-b} \quad (\text{II.5})$$

où  $x$  est la distance et  $a, b$  sont des constantes selon les régions.

### **II.2.3 Processus de contournement des isolateurs pollués**

Une fois la pollution accumulée sur la surface des isolateurs, le contournement peut survenir, dans certaines conditions, au terme d'un processus évolutif tel que montré sur la Figure II.4. En effet, après son humidification (par la rosée, la pluie, le brouillard), la couche d'électrolytes formée à la surface d'un isolateur devient conductrice et engendre la circulation d'un courant de fuite, provoquant ainsi un échauffement qui a pour effet d'accroître la

conductivité du milieu et par la suite le courant. Un assèchement local de la couche polluante se produit à la suite de cet échauffement croissant, entraînant la formation d'une zone sèche qui peut s'étendre latéralement jusqu'à ce que le courant soit interrompu complètement. Dès lors, des arcs locaux sont susceptibles de s'amorcer car la tension se trouve reportée aux bornes de la zone sèche qui subissent, à son tour, un élargissement dû à la constriction des lignes de courant au voisinage des pieds d'un arc local. À cette étape, un contournement peut se produire lorsque l'arc s'allonge jusqu'à atteindre les électrodes.

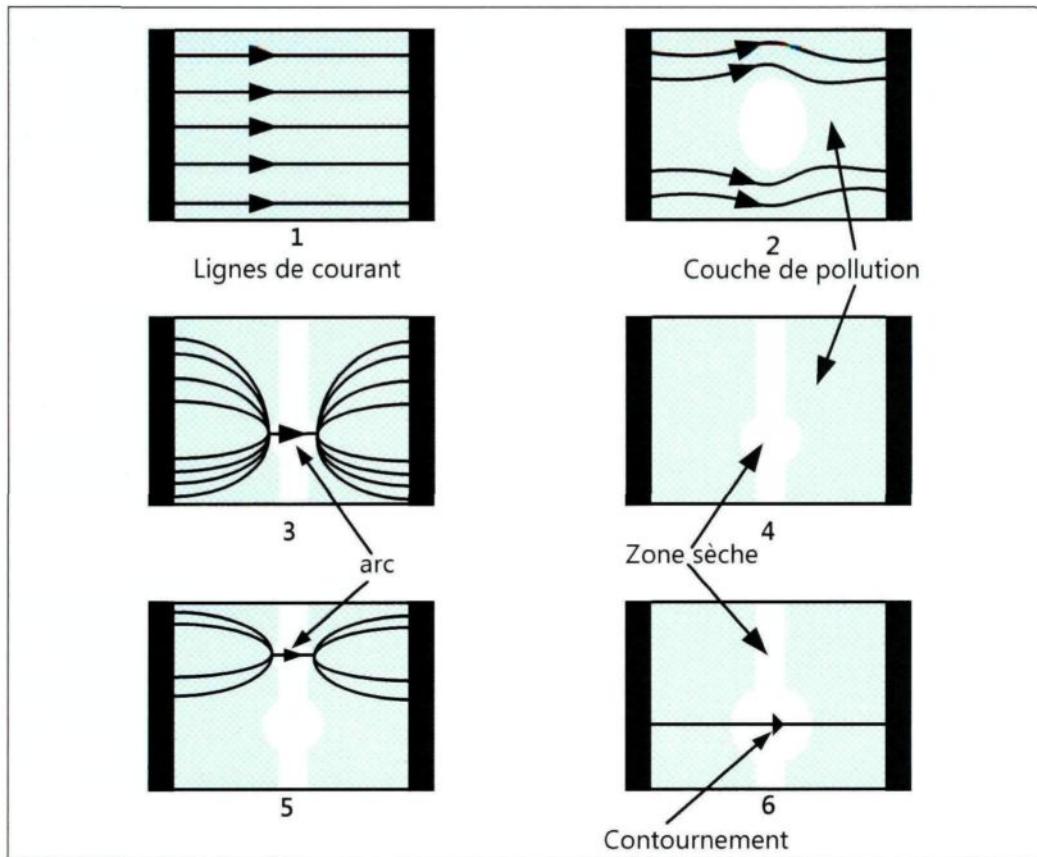


Figure II.4: Processus de contournement d'une surface isolante polluée [Cimador et Vitet, 1990].

Tout compte fait, c'est la coexistence d'un dépôt polluant et de l'humidification de ce dépôt qui produit le phénomène de pollution. Mais en général, les polluants – quel que soit leur nature – ne posent pas de problème lorsqu'ils sont secs. La propriété de la surface isolante peut alors influencer considérablement, dans ce cas, le processus de contournement. Par exemple, pour les isolateurs en céramique, la propriété hydrophile du verre ou de la porcelaine favoriserait grandement l'humidification du dépôt polluant.

### **II.3 MESURE DU TAUX D'ACCUMULATION DE POLLUTION**

Généralement, la pollution accumulée sur la surface des isolateurs est formée d'un dépôt soluble, électriquement conducteur, et d'un dépôt non soluble qui est relativement non conducteur. Afin d'évaluer la quantité de pollution accumulée à la surface d'un isolateur, il faudrait donc mesurer la contribution de chacun de ces types de dépôt. Dans la norme IEC 60815 [2008], les deux paramètres suivants sont utilisés afin de mesurer le taux d'accumulation de pollution : la densité équivalente de dépôt de sel (ou *ESDD* en terminologie anglaise) et la densité de dépôt non soluble (ou *NSDD* en terminologie anglaise).

#### **II.3.1 Mesure de l'*ESDD***

L'*ESDD* est définie comme l'équivalent de dépôt de NaCl (chlorure de sodium) en mg/cm<sup>2</sup> à la surface d'un isolateur, qui a une conductivité égale à celle du dépôt (polluant) actuel dissous dans la même quantité d'eau. La méthode couramment utilisée pour prendre la mesure de l'*ESDD* est déjà bien décrite dans la norme IEC 60815 [2008]. En résumé, cette méthode consiste à laver les isolateurs sélectionnés avec un chiffon et de l'eau distillée. Après avoir rincé

dans la même eau à maintes reprises le chiffon avec lequel on a essuyé l'isolateur, on mesure la conductivité ( $\sigma$ ) et la température de cette eau contaminée. Par la suite, on applique un facteur de correction à cette valeur de conductivité pour la ramener à sa valeur correspondant à une température de 20 °C selon la formule suivante :

$$\sigma_{20} = \sigma_T [1 - b_T (T - 20)] \quad (\text{II.6})$$

où  $\sigma_{20}$  [S/cm] est la conductivité de la couche de pollution à 20 °C,  $\sigma_T$  [S/cm] est la conductivité mesurée à une température  $T$  [°C], et  $b_T$  le facteur dépendant de la température  $T$  selon le tableau de correspondance ci-après pour une température comprise entre 5 °C et 30 °C.

NOTE – Pour d'autres valeurs de la température  $T$ , comprises entre 5 °C et 30 °C, le facteur  $b_T$  est obtenu par interpolation ou peut être déterminé en utilisant la formule suivante :

$$b_T = -3,200 \times 10^{-8} T^3 + 1,032 \times 10^{-5} T^2 - 8,272 \times 10^{-4} T + 3,544 \times 10^{-2} \quad (\text{II.7})$$

Tableau II.2: Correspondance entre la température et la valeur de  $b_T$

T (°C)	$b_T$
5	0,03156
10	0,02817
20	0,02277
30	0,01900

CEI 60507 [1991], CEI 1245 [1993]

À partir de cette valeur normalisée de la conductivité, on détermine la salinité équivalente  $S_a$  [kg/m<sup>3</sup>] puis l'ESDD [mg/cm<sup>2</sup>] avec les formules suivantes :

$$S_a = (5,7\sigma_{20})^{1,03} \quad (\text{II.8})$$

$$ESDD = S_a \cdot \frac{V_{eau}}{A} \quad (\text{II.9})$$

où  $V_{eau}$  [cm<sup>3</sup>] est le volume total de l'eau distillée ayant servi à nettoyer l'isolateur, et  $A$  [cm<sup>2</sup>] l'aire de la surface nettoyée de l'isolateur.

Il est à noter que dans le cas d'un faible niveau de pollution, une méthode plus précise est proposée par [Chisholm et al., 1994], pour effectuer la mesure de l'ESDD. Normalement, les mesures pour la surface supérieure et la surface inférieure sont aussi effectuées séparément. Si tel est le cas, la valeur de l'ESDD moyenne peut être calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\overline{ESDD} = (ESDDt \times A_{sup} + ESDDb \times A_{inf}) / A \quad (\text{II.10})$$

où  $ESDDt$  [mg/cm<sup>2</sup>] est l'ESDD de la surface supérieure,  $ESDDb$  [mg/cm<sup>2</sup>] l'ESDD de la surface inférieure,  $A_{sup}$  [cm<sup>2</sup>] l'aire de la surface supérieure,  $A_{inf}$  [cm<sup>2</sup>] l'aire de la surface inférieure et  $A$  [cm<sup>2</sup>] l'aire totale de la surface nettoyée de l'isolateur.

### **II.3.2 Mesure de la NSDD**

La NSDD correspond à la quantité des composants non soluble de la couche de pollution.

La méthode couramment utilisée pour prendre la mesure de la NSDD est déjà bien décrite également dans la norme IEC 60815 [2008]. Elle est mesurée en filtrant l'eau de lavage utilisée pour la mesure de l'ESDD à travers des papiers filtres qui ont été pré-séchés dans un four et séchés de nouveau par après. Les papiers filtres secs et reséchés sont pesés en utilisant une balance avec une résolution dans l'ordre de 0,1 mg. La NSDD est définie comme la différence entre la masse du papier filtre sec et la masse après reséchage, divisée par l'aire de la surface nettoyée de l'isolateur selon l'expression mathématique suivante :

$$NSDD = \frac{M_1 - M_0}{A} \quad (\text{II.11})$$

où  $M_1$  [mg] est la masse du papier filtre reséché,  $M_0$  [mg] est la masse initiale du papier filtre sec,  $A$  [ $\text{cm}^2$ ] est l'aire de la surface nettoyée de l'isolateur. La NSDD est donc exprimée en  $\text{mg}/\text{cm}^2$ , mais parfois on utilise aussi l'unité  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  pour de faible densité.

Avec cette façon de faire, on obtient une mesure directe pour la NSDD. Cependant, il existe d'autres méthodes indirectes qui sont utilisées pour évaluer la NSDD. Parmi celles-ci, on retrouve l'échantillonnage des retombées de poussière et la jauge directionnelle de dépôt de poussière (ou DDDG en terminologie anglaise). Cette dernière est déjà normalisée et dont la façon de procéder est décrite dans la norme IEC 60815 [2008].

### II.3.3 Applications de l'*ESDD* et de la *NSDD*

La principale application de l'*ESDD* et de la *NSDD* est dans l'évaluation de la sévérité de pollution dans un site afin de bien sélectionner et dimensionner les isolateurs qui y vont être utilisés. Le Tableau II.3 ci-dessous nous donne la relation entre le niveau de pollution du site et les valeurs de l'*ESDD* et de la *NSDD* selon norme IEC 60815. On peut se servir également de la Figure II.5 selon la même norme pour classifier le niveau de pollution d'un site à partir de la combinaison de l'*ESDD* et de la *NSDD*. Le Tableau II.3 et la courbe en Z de la Figure II.5 servent

Tableau II.3: Niveau de pollution vs *ESDD* et *NSDD*

Niveau de pollution	<i>ESDD</i> ( $\text{mg/cm}^2$ )	<i>NSDD</i> ( $\text{mg/cm}^2$ )
Léger	0 – 0,03	0,03 – 0,06
Moyen	0,03 – 0,06	0,10 – 0,20
Élevé	0,06 – 0,10	0,30 – 0,60
Très élevé	> 0,10	> 0,80

IEC 60815 [2008]

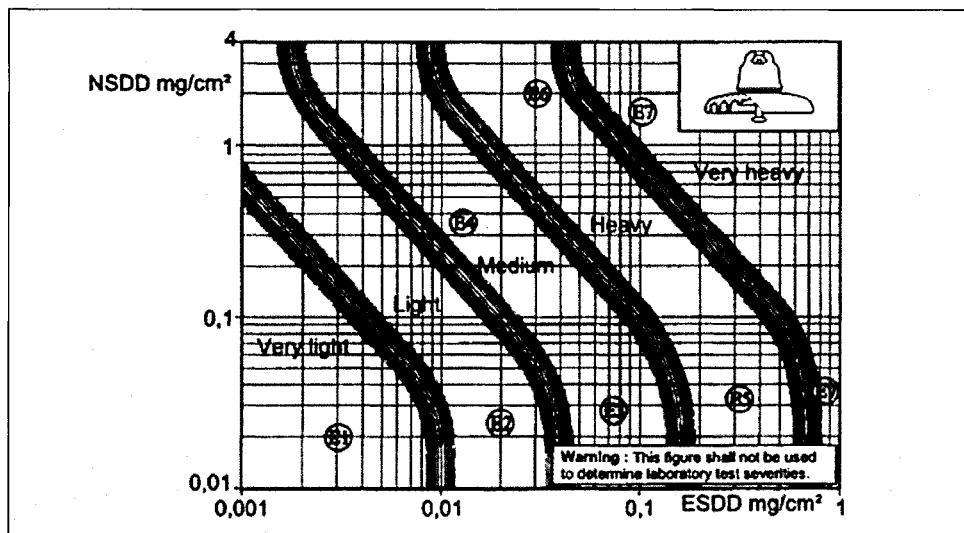


Figure II.5: Courbe en Z de la relation entre *NSDD/ESDD* et la sévérité de la pollution d'un site [IEC 60815, 2008].

donc de directive quant à la classification précise pour un site donné selon son niveau de pollution mesuré. Mais généralement, selon le Tableau II.4, il est possible déjà de savoir à priori quel sera le niveau de pollution d'un site en connaissant les caractéristiques de son environnement.

Par ailleurs, d'autres applications de l'*ESDD* et de la *NSDD* se trouvent dans le domaine de la surveillance du niveau de pollution dans une installation électrique à l'extérieur pour bien coordonner la maintenance des isolateurs avant qu'une condition critique ne survienne. En principe, les mesures sont prises sur le site à chaque intervalle de temps précis et on établit le niveau de pollution selon le Tableau II.3 ou la Figure II.5. On peut se servir également des mesures environnementales sur le site pour une surveillance en temps réels de l'*ESDD* à l'aide d'un modèle dynamique de l'environnement [Mizuno et al., 1997] permettant de prédire le niveau seuil de taux d'accumulation de pollution correspondant à une haute probabilité de contournement.

**Tableau II.4: Les différents niveaux de pollution**

Niveau de pollution	Exemples d'environnements caractéristiques
I – Faible	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Zones sans industrie et avec faible densité d'habitation équipées d'installations de chauffage.</li> <li>▪ Zones avec faible densité d'industries ou d'habitats mais soumises fréquemment aux vents et/ou aux pluies.</li> <li>▪ Régions agricoles.</li> <li>▪ Régions montagneuses.</li> </ul> <p>Toutes ces zones doivent être situées à des distances d'au moins 10 à 20km de la mer et ne doivent pas être exposées aux vents venant directement de la mer.</p>
II – Moyen	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Zones avec industries ne produisant pas de fumées particulièrement polluantes et/ou avec une densité moyenne d'habitats équipées d'installation de chauffage.</li> <li>▪ Zones à forte densité d'habitats et/ou d'industries mais soumises fréquemment aux vents et/ou à des chutes de pluies.</li> <li>▪ Zones exposées aux vents de mer, mais pas trop proches de la côte (distances d'au moins quelques kilomètres).</li> </ul>

III – Fort	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Zones avec forte densité d'industries et banlieues de grandes villes ayant une forte densité d'installations de chauffage polluantes.</li> <li>▪ Zones situées près de la mer, ou exposées à des vents relativement forts venant de la mer.</li> </ul>
IV – Très fort	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Zones généralement peu étendues, soumises à des poussières conductrices et à des fumées industrielles produisant des dépôts conducteurs particulièrement épais.</li> <li>▪ Zones généralement peu étendues, très proches de la côte et exposées aux embruns ou aux vents très forts et polluants venant de la mer.</li> <li>▪ Zones désertiques caractérisées par de longues périodes sans pluie, exposées aux vents forts transportant du sable et du sel et soumises à une condensation régulière.</li> </ul>

IEC 60815 [2008]

## II.4 MÉTHODES DE SIMULATION DE L'ACCUMULATION DE POLLUTION

Le choix d'un isolateur pour un site donné repose sur sa performance de tenue en pollution dans le type d'environnement qui caractérise le site. Pour évaluer cette performance, il est nécessaire de procéder à un test de pollution, lequel permettra de confirmer la valeur spécifiée du degré de tenue en pollution ou de déterminer sa valeur maximale à une tension phase-terre. Dès le début des années 60, de nombreuses recherches et études expérimentales ont été réalisées afin d'étudier le comportement et la performance des isolateurs recouverts de pollution [Walshe, 1963; NGK Insulators LTD, 1968] et de glace polluée [Vuckvic et Zdravkovic,

1990; Cherney, 1980; Suguwara et al., 1991; Farzaneh et al., 2003]. Dès lors, de nombreuses méthodes et techniques d'essais de pollution ont été développées, et actuellement deux essais normalisés existent déjà pour les isolateurs de haute tension en céramique destinés aux réseaux à courant alternatif [IEC 60507, 1991] et à courant continu [IEC 1245, 1993].

De pair avec le développement de ces méthodes et techniques d'essais de pollution, de nombreuses méthodes de pré-contamination furent également élaborées afin de simuler l'accumulation de pollution sur l'isolateur à tester.

Les méthodes de simulation existantes peuvent être divisées en trois (3) groupes : l'accumulation de pollution naturelle sur le terrain, l'accumulation de pollution artificielle en laboratoire et la simulation numérique.

#### **II.4.1 Accumulation naturelle sur terrain**

La méthode pour l'accumulation naturelle de pollution sur terrain consiste à construire des sites d'essais dans un endroit proche d'une source de pollution connue (mer, usines, autoroutes, etc.). Les isolateurs qui y sont installés sont donc exposés directement à la pollution typique dans cet endroit et ce, pour une période plus ou moins longue. Ainsi, l'accumulation de pollution sur les isolateurs installés dans ces stations se fait de façon naturelle, ce qui permet de réaliser des essais directement sur le terrain pour étudier. Un exemple de ce type de station est montré à la Figure II.6. Il s'agit d'un site d'essais établi à Noto (Japon), qui est installé à une cinquantaine de mètres du bord de la mer et à une altitude inférieure à 5 m au-dessus du niveau de la mer, afin de simuler l'accumulation naturelle de pollution marine. De nombreuses

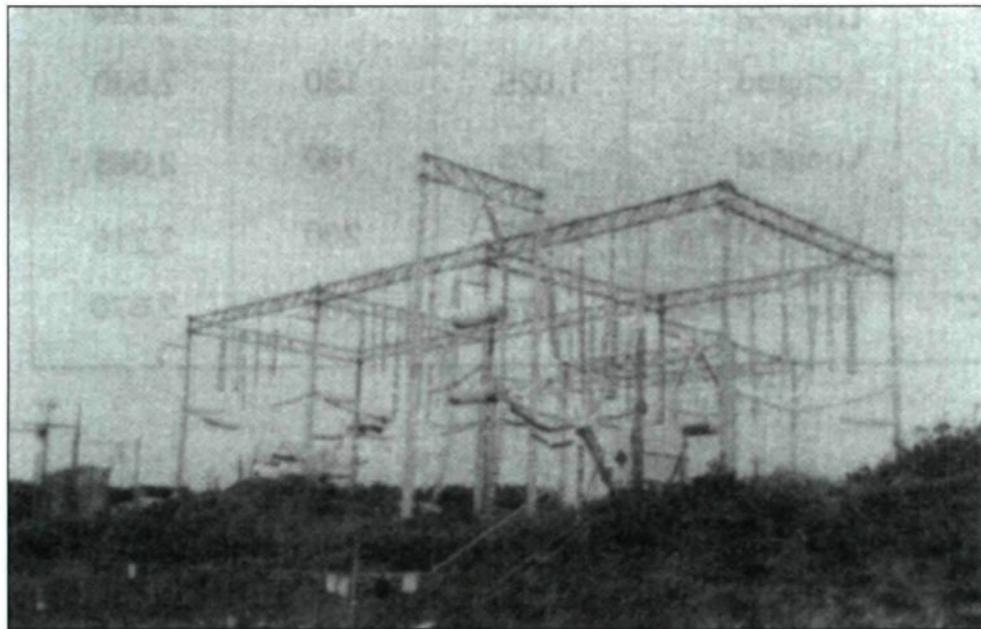


Figure II.6: Site d'essais de Noto, Japon [Taniguchi et al., 1979].

stations dans ce genre ont aussi été établies partout ailleurs dans différents pays comme les États-Unis, le Royaume-Uni, l'Afrique du Sud, la France, la Suède, etc., dont les observations ont été rapportées dans plusieurs articles scientifiques depuis 1935 [Forrest, 1936; Ely et al., 1971].

L'avantage d'une telle méthode est l'assurance d'obtenir une meilleure représentativité du phénomène de pollution et l'isolateur peut être directement testé dans son milieu naturel. Toutefois, il est difficile d'obtenir de bonne répétabilité et de reproductibilité à cause de certaines variables climatiques telles que le vent, la température et les précipitations, qui ne sont pas contrôlables. De ce fait, il n'est pas évident d'établir le rapport entre les conditions d'exposition d'un site à d'autres emplacements. En outre, cette méthode a un certain inconvénient au niveau du coût d'installation, lequel est parfois très onéreux. Et du côté

pratique, réaliser de l'accumulation naturelle demande beaucoup de temps sans compter qu'il faut avoir de l'espace pour ériger le site d'essais.

#### **II.4.2 Accumulation artificielle en laboratoire**

Actuellement, il existe de nombreuses méthodes qui ont été développées afin de simuler en laboratoire l'accumulation de pollution sur un isolateur à tester. Les méthodes couramment utilisées ont été développées dans le but de simuler l'accumulation de pollution marine ou industrielle. Parmi les méthodes existantes, on trouve le brouillard salin, le brouillard clair, le DCM (Dust Cycle Method), le DSL (Dry Salt Layer), le brouillard froid et le DMCM (Dry-Mixing Contamination Method).

##### ***II.4.2.1 Le brouillard salin***

Le brouillard salin a été développé dans les années 60 pour simuler la pollution marine qui est caractérisée par la formation d'une mince couche de sel conductrice recouvrant la surface de l'isolateur. En général, aucun matériau non soluble n'est contenu dans cette couche. Standardisée bien avant 1991, la procédure utilisée pour simuler l'accumulation de pollution avec cette méthode consiste à vaporiser de la saumure sur l'isolateur à l'aide d'un ensemble de pulvérisateurs qui atomisent la solution saline dont la conductivité varie de 4,3 à 200 mS/cm. Le niveau de pollution obtenu est donc défini par la salinité du brouillard salin. Tout le processus se déroule à l'intérieur d'une chambre d'essai. Le montage des pulvérisateurs ainsi que les conditions de test (salinité, débit de la saumure et pression de l'air comprimé) sont bien décrites dans les normes CEI 60507 [1991] et IEEE 4 [1995].

Le principal avantage de cette méthode est qu'elle ne demande pas beaucoup de temps. Et du point de vue économique, l'installation ne coûte pas très chère non plus. Par contre, cette méthode est exclusive à la pollution marine et ne convient pas aux isolateurs faits de matériaux autres que la céramique.

#### ***II.4.2.2 Le brouillard clair***

Le brouillard clair a été développé dans le but de simuler la pollution industrielle qui est caractérisée par l'humidification naturelle, soit par la rosée, le brouillard ou la pluie, d'un dépôt sec qui s'est formé depuis un certain temps. La procédure utilisée pour simuler l'accumulation de pollution avec cette méthode consiste à appliquer uniformément sur la surface de l'isolateur une couche de revêtement de matériau inerte qu'on humidifie par la suite avec du brouillard produit à l'aide d'un générateur de vapeur.

Dépendamment du type d'isolateurs, la procédure pour appliquer la couche solide n'est pas la même. Dans le cas des isolateurs en céramique, la méthode standard consiste à appliquer d'abord une couche humide contenant une quantité considérable de matériau non soluble, qu'on fait sécher par après. La couche est formée d'une sorte de pâte blanche obtenue en mélangeant une solution de kaolin et de sel dont les concentrations respectives sont définies dans la norme CEI 60507 [1991]. Les valeurs de la *NSDD* et de l'*ESDD* du dépôt sont donc liées directement avec ces concentrations selon la Figure II.7 et la Figure II.8 respectivement. De ces figures, on peut aussi remarquer que les relations donnant la *NSDD* et l'*ESDD* diffèrent selon le type de matériau inerte utilisée. Dans le cas des isolateurs composites (non faits de céramique), la procédure est un peu complexe compte tenu de l'hydrophobicité

de ce type de matériau. À l'heure actuelle, il n'y a pas encore de méthode standard utilisée. Par contre, il existe deux catégories de méthodes qui ont été développées et évaluées dans le CIGRE Task Force 33.04.07 [1999]. La première consiste à conditionner la surface de l'isolateur afin de permettre une application uniforme de la pâte de pollution. Pour ce faire, il faut détruire temporairement l'hydrophobicité de la surface de façon contrôlée en utilisant des techniques comme le sablage ou la projection de billes. Quant à la deuxième méthode, elle consiste tout simplement à appliquer de la poudre sèche à la surface de l'isolateur.

L'avantage de la méthode du brouillard clair est qu'elle permet d'obtenir une bonne représentativité, répétabilité et reproductibilité. En outre, elle n'est pas dispendieuse non plus pour son installation. Par contre, son application demande beaucoup de temps par rapport à la méthode du brouillard salin.

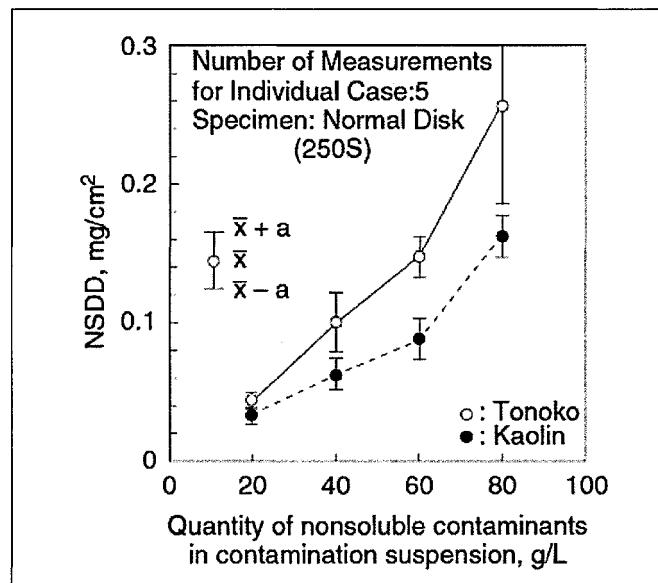


Figure II.7: Relation entre la NSDD et la quantité de kaolin ou tonoko dans la pâte de pollution [Matsuoka et al., 1996].

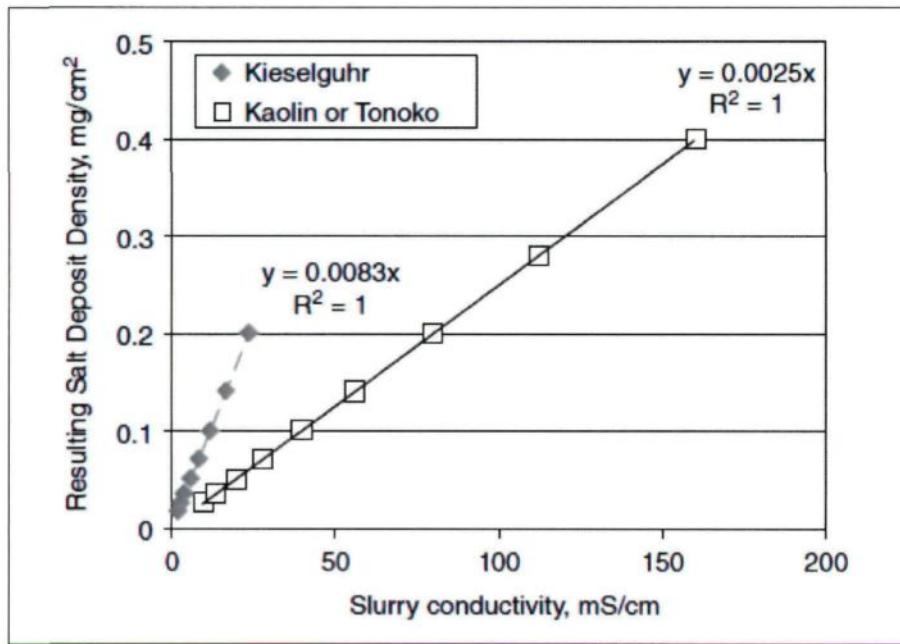


Figure II.8: Relation entre la conductivité de la couche et l'ESDD pour trois différents types de matériau inerte [CEI 60507, 1991].

#### II.4.2.3 Le DCM

Le DCM ou « Dust Cycle Method » a été développé par Eklund et al. [1995] afin de simuler le dépôt naturel par l'air d'une couche solide de pollution à la surface des isolateurs. La procédure pour réaliser cette simulation consiste à amener de la poussière sur l'isolateur de façon naturel par l'air, au lieu de forcer artificiellement une couche de pollution sur l'isolateur, et ce, pendant des cycles consécutifs. La Figure II.9 nous illustre un cycle typique qui dure 120 minutes. Comme nous pouvons le remarquer, l'application de la poussière est suivie d'une série d'humidification par le brouillard et la pluie. De la tension est aussi appliquée sur l'isolateur durant toute la période d'essais. La quantité de pollution accumulée est déterminée selon la propriété de la surface, la forme de la jupe, la tension appliquée et le nombre de cycles.

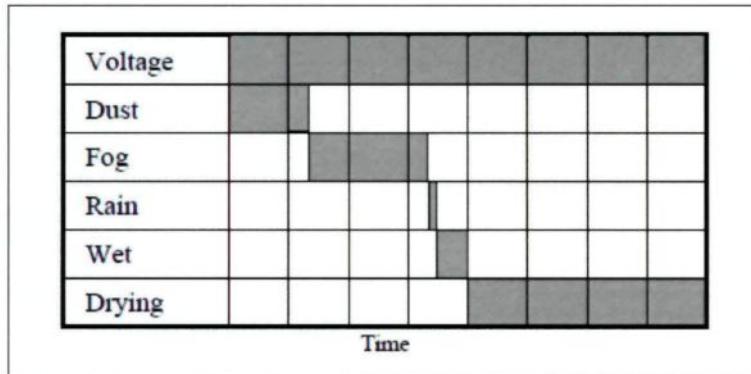


Figure II.9: Schéma d'un cycle typique de 120 min du DCM [Eklund et al., 1995].

Le DCM se veut alors comme une meilleure alternative au brouillard clair car elle permet de tenir compte de l'influence du champ électrique, du profil des isolateurs et de la propriété de la surface sur la distribution de la pollution. Et comme elle ne nécessite pas un traitement de surface, elle convient parfaitement aux isolateurs composites aussi bien qu'aux isolateurs en céramique. Toutefois, son coût d'installation exorbitant limite son utilisation malgré le fait que c'est de loin la méthode qui imite le plus l'accumulation naturelle de pollution sur les isolateurs.

#### **II.4.2.4 Le DSL**

Le DSL ou « Dry Salt Layer » a été développé par Engelbrecht et al. [2002, 2003] pour simuler l'accumulation de pollution marine sur les isolateurs composites qui sont proches des côtes. La réalisation de cette simulation consiste à utiliser le vent comme force conductrice pour transporter et déposer des particules de sel humide sur les isolateurs. Tout le processus se déroule à l'intérieur d'une chambre spécialisée où les particules de sel sont générées à l'aide d'un système d'injection de sel alors que le vent est produit par un ensemble de souffleur comme nous le montre la Figure II.10. Une photographie du montage est également montrée

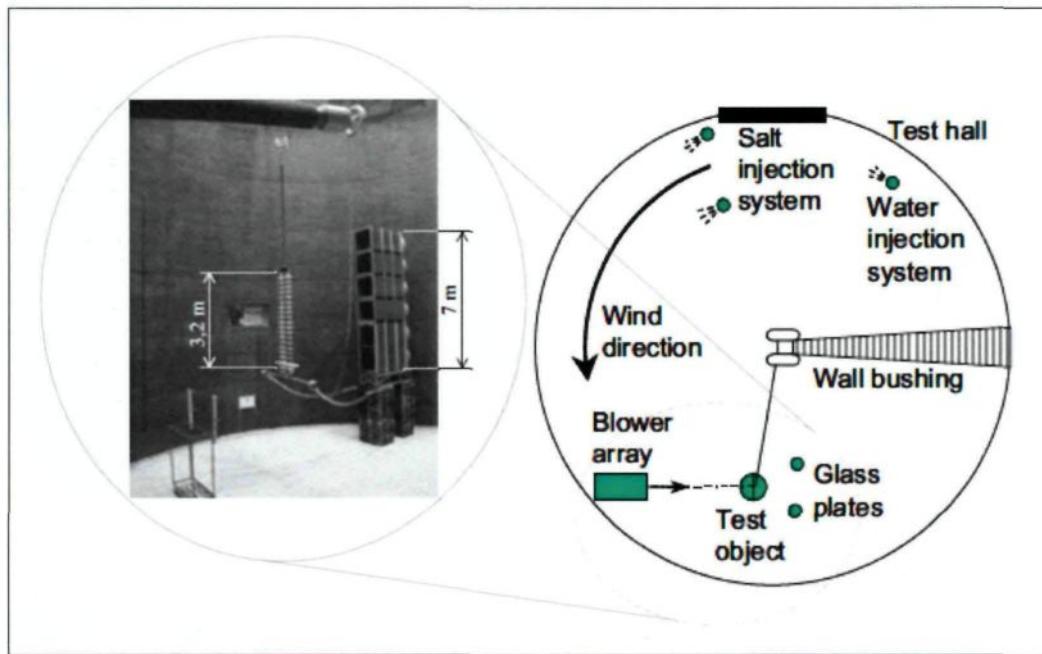


Figure II.10: Montage pour simuler l'accumulation de pollution dans la méthode DSL [adapté de Engelbrecht et al., 2002, 2003].

sur cette figure. La vitesse du vent autour de l'isolateur est comprise entre 4 et 7 m/s. Selon qui est décrit par Engelbrecht et al. [2002, 2003], la mesure du taux d'accumulation en termes de SDD (Salt Deposit Density) est déterminée par la durée d'exposition de l'isolateur aux contaminants. Des mesures additionnelles de SDD sont aussi relevées séparément sur chacun des quatre (4) quadrants du disque après le dépôt.

Cette méthode est considérée comme étant une meilleure alternative au brouillard salin, surtout pour les isolateurs qui sont faits de matériau autre que la céramique. De plus, elle offre une meilleure fiabilité et rentabilité comparativement à la méthode standardisée.

#### ***II.4.2.5 Le brouillard froid***

Le brouillard froid a été développé par Chisholm et al. [1996] dans le but de reproduire la formation répétitive d'une mince couche de glace sur l'isolateur à chaque fois que la température augmente de  $-2^{\circ}\text{C}$  à  $+1^{\circ}\text{C}$ . Cette méthode est en quelque sorte une adaptation de la méthode standard du brouillard clair aux conditions hivernales. La procédure pour simuler l'accumulation de pollution consiste à appliquer un mélange de kaolin et de sel sur la surface de l'isolateur par arrosage ou par pulvérisation sèche. Après avoir refroidi l'isolateur à  $-2^{\circ}\text{C}$ , on fait circuler du brouillard dont le diamètre volumique moyen est de  $10\mu\text{m}$ , et du vent à  $3\text{ m/s}$  pour humidifier le dépôt à une dépression du point de rosée pas plus grande que  $2^{\circ}\text{C}$ .

#### ***II.4.2.6 Le DMCM***

Le DMCM ou « Dry-Mixing Contamination Method » est un nouveau concept développé par Besztercey et Karady [2000] afin de simuler l'accumulation de pollution sur les isolateurs composites. La différence de cette méthode par rapport aux autres est qu'elle n'est pas associée à un essai de performance sous pollution. Par contre, elle se veut comme une alternative aux procédures de contamination utilisée dans le brouillard clair et le DCM. Le principe utilisé pour simuler l'accumulation de pollution est représenté schématiquement par la Figure II.11. Des particules de kaolin et de saumure atomisée sont injectées à l'aide de deux (2) buses dans un jet d'air turbulent où elles forment un mélange de particules de pollution. Étant donné que les particules sont humidifiées, leur adhérence à la surface de l'isolateur est plus efficace, favorisant ainsi l'homogénéité de la couche de pollution sans avoir à humecter la surface au préalable.

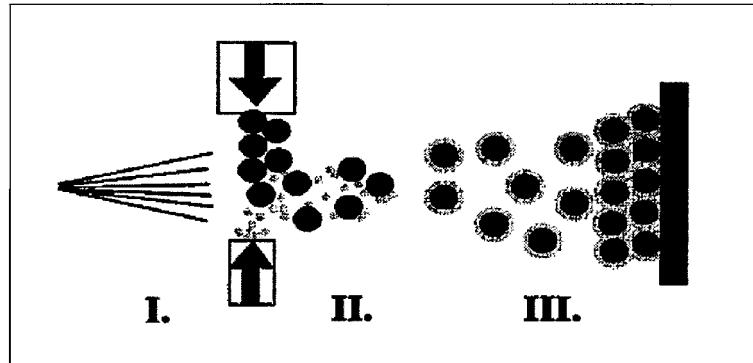


Figure II.11: Schéma de principe du DMCM: I. Mélange des particules solides et la saumure atomisée. II. Adhésion de la saumure à la surface des particules. III. Humidification augmentant l'adhésion du polluant à la surface de l'isolateur [Besztercey et Karady, 2000].

Pour réaliser l'accumulation, on utilise le montage issu de ce principe montré par la Figure II.12. La distance optimale entre l'isolateur et du fusil mélangeur à sec, telle que déterminée par Besztercey et Karady [2000], est de 61 cm (2 pieds). Avec l'ajustement des différents paramètres du montage à leurs valeurs optimales, on obtient un débit de 30 ml/min pour la saumure et un débit massique de 40 g/min pour le kaolin. L'*ESDD* obtenue est reliée avec la concentration du sel et la durée du traitement selon l'équation (II.12) alors que la *NSDD* est reliée par la durée uniquement selon l'équation (II.13). Il est alors possible de contrôler le niveau de contamination en jouant avec l'un et/ou l'autre de ces deux (2) paramètres.

$$ESDD(t, c_{NaCl}) = (-530 + 31,6t + 160c_{NaCl} - 8,61c_{NaCl}^2 + 1,28t \cdot c_{NaCl}) \times 10^{-4} \quad (II.12)$$

$$NSDD(t) = 0,006 + 3,6 \times 10^{-3}t \quad (II.13)$$

où  $t$  [s] est la durée du processus et  $c_{NaCl}$  [wt%] la concentration de la saumure.

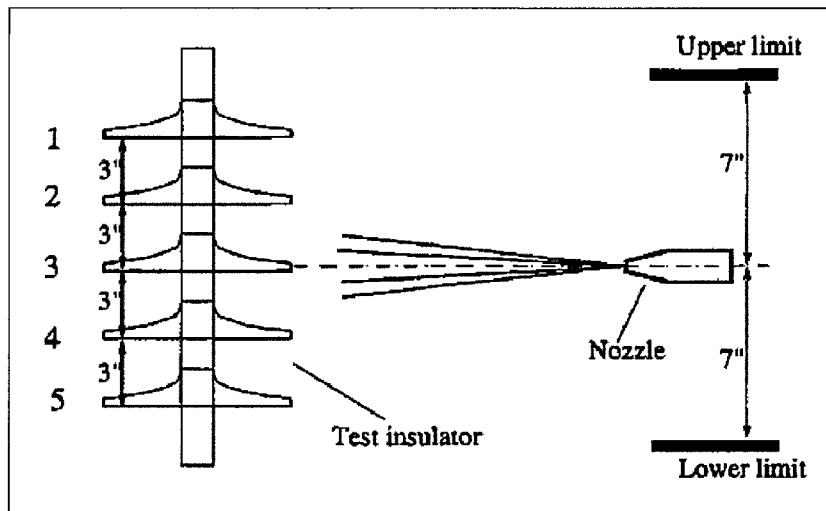


Figure II.12: Schéma du montage du DMCM [Besztercey et Karady, 2000].

Même si au départ cette méthode était prévue pour les isolateurs composites, elle peut être aussi bien appliquée aux isolateurs en céramique. Par rapport aux autres méthodes susmentionnées, l'avantage du DMCM est au niveau de son côté pratique. En effet, il s'agit d'une méthode très simple, facile d'utilisation, ne nécessite pas beaucoup de temps et peut être facilement intégrée à la méthode du brouillard clair pour effectuer des essais de performance sous pollution pour n'importe quelle sorte d'isolateurs. Et le dernier et non la moindre, elle est très économique par rapport au DCM.

#### **II.4.3 Simulation numérique par ordinateur**

La simulation numérique par ordinateur du dépôt de pollution est un domaine qui reste encore à explorer. Jusqu'à présent, il y a quelques approches qui ont été faites concernant la pollution naturelle mais qui ne pourront pas être appliquées aux autres types comme la pollution industrielle. Parmi ces approches, nous pouvons citer le modèle dynamique de

Fierro et al. [1994] qui a été développé pour prédire la résistance surfacique des isolateurs en utilisant comme intrant des variables météorologiques telles que la vitesse et la direction du vent, la température, la pression atmosphérique, la formation de rosée et l'apparition de pluie. Nous pouvons citer également le modèle d'Arabani et Shirani [1994] qui a été développé pour déterminer l'*ESDD* en utilisant un réseau de neurones artificiels.

Par ailleurs, Mizuno et al. ont développé en 1997 un modèle numérique afin de simuler dynamiquement le risque de contournement d'un système d'isolateurs pollués en tenant compte du changement en temps réel des facteurs climatiques et environnementaux. Tel que montré à la Figure II.13 qui représente le diagramme de calcul, le début du processus commence par la simulation numérique de l'accumulation de pollution qui est modélisée par l'équation (II.14) suivante :

$$Q_1 = K \cdot V^3 \cdot t \quad (\text{II.14})$$

où  $Q_1$  [mg/cm<sup>2</sup>] est la densité de dépôt de sel,  $K$  est une constante déterminée par l'expérience,  $V$  [m/s] la vitesse du vent et  $t$  [heures] le temps. Il est clair que dans ce modèle, l'équation (II.14) est dérivée de l'équation (II.2) décrivant la relation entre la vitesse du vent et l'*ESDD* dans le cas de la pollution marine.

Ensuite, l'effet de nettoyage par la pluie est simulé numériquement en utilisant le modèle mathématique basé sur l'équation (II.15) :

$$Q = Q_0 \left(1 - b\sqrt{r}\right) \quad (\text{II.15})$$

où  $Q$  [mg/cm<sup>2</sup>] est la densité de dépôt de sel en tenant compte de l'effet de nettoyage par la pluie, pour une quantité de précipitation  $r$  [mm],  $Q_0$  est la valeur initiale de SDD et  $b$  est une constante déterminée expérimentalement.

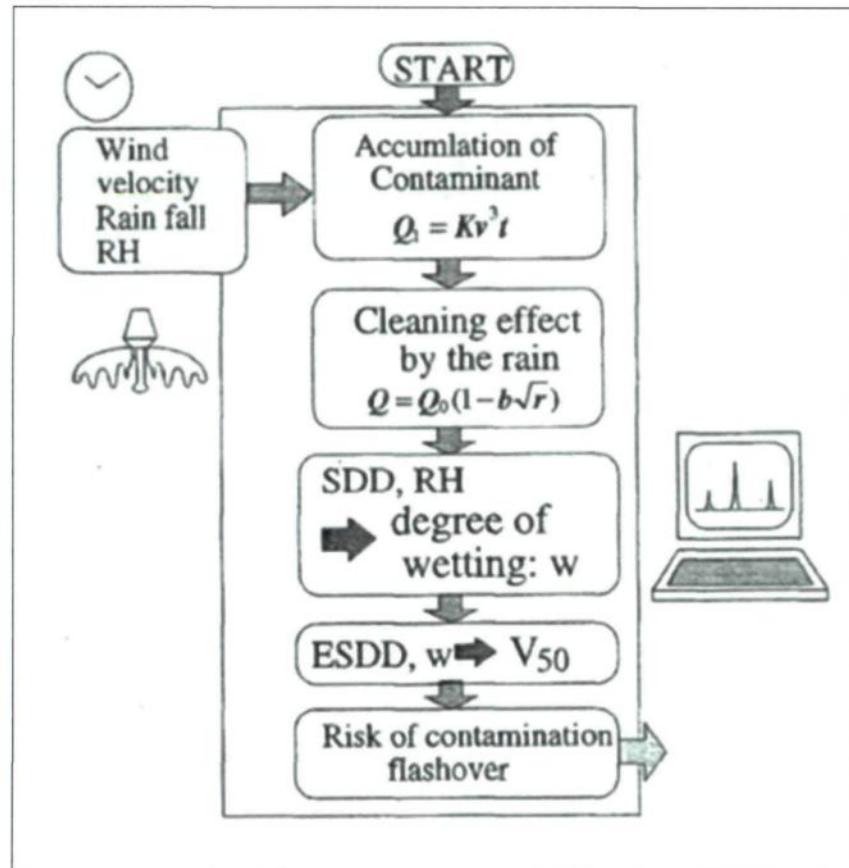


Figure II.13: Diagramme de calcul [Mizuno et al., 1997].

Toujours dans le cas de la pollution marine, un développement mathématique a été établi par Salam et al. [2000;2005] déterminant les relations entre l'*ESDD* et la vitesse du vent pour un isolateur pollué. La première relation fait intervenir les autres variables comme la longueur de fuite de l'isolateur, la constante d'arc statique et la tension appliquée, selon l'expression :

$$ESDD = f(V, l, N, U) \quad (\text{II.16})$$

où  $V, l, N, U$  représentent respectivement la vitesse du vent, la longueur de fuite de l'isolateur, la constante d'arc statique et la tension. En utilisant la technique d'analyse dimensionnelle, on obtient l'expression suivante :

$$ESDD = V^3 l^{-\frac{3n+1}{n}} N^{-\frac{1}{n}} U^{-\frac{n-1}{n}} \quad (\text{II.17})$$

où  $n$  représente la constante d'arc. En considérant  $N$  et  $U$  comme constantes [Rizk, 1970] et en choisissant la valeur de 0,3 pour  $n$  [Alston et Zoledzowski, 1963], l'équation (II.17) devient :

$$ESDD = V^3 l^{0,4} \quad (\text{II.18})$$

Dans la deuxième relation, la durée d'exposition  $t$  est considérée comme variable à la place de la longueur de fuite de l'isolateur. Ainsi, l'équation (II.17) devient :

$$ESDD = d_c V^{-\frac{4n-1}{n}} t^{-\frac{n-1}{n}} N^{\frac{1}{n}} U^{\frac{n-1}{n}} \quad (\text{II.19})$$

où  $d_c$  est une constante dimensionnelle. En considérant cette fois-ci  $t$ ,  $N$ ,  $U$  comme constantes [Rizk, 1970], on obtient la relation entre l'ESDD et la vitesse du vent selon l'expression :

$$ESDD = d_c V^{-\frac{4n-1}{n}} \quad (\text{II.20})$$

Les données expérimentales recueillies dans un site d'essai installé à 50 m du bord de la mer, ont permis à Salam et al. de déterminer les valeurs de la constante d'arc et de la constante dimensionnelle pour deux groupes de vitesse du vent. Pour des vitesses de vent de 2,0 à 4,0 m/s, les valeurs trouvées pour  $n$  et  $d_c$  sont 0,14 et 0,000236 respectivement. Et pour des vitesses comprises entre 4,5 à 6,5 m/s, ils ont trouvé  $n = 0,15$  et  $d_c = 0,000696$ .

Nous pouvons constater ici que la constante d'arc obtenue est quasi-constante si on considère les vitesses de vent de 2,0 à 6,5 m/s, ce qui donne un exposant à peu près égal à 3 pour  $V$ . Cela implique que les deux relations suggèrent pour la pollution marine un modèle mathématique de l'ESDD qui correspond à une fonction cubique de la vitesse du vent.

## **II.5 CARACTÉRISTIQUES DE L'ACCUMULATION DE POLLUTION SOUS CONDITIONS HIVERNALES**

Les conditions hivernales sont caractérisées par une température moyenne journalière inférieure à 0°C pendant plusieurs jours, une vitesse moyenne de vent relativement élevée, l'absence de pluie pendant une longue période, et la forte contribution du sel de déglaçage. Toutes ces conditions réunies font en sorte que l'accumulation de pollution hivernale est très différente des autres types de pollution.

### **II.5.1 Durée de la phase de dépôt**

Par rapport au nombre de jours sans pluie, les conditions hivernales sont apparentes aux conditions désertiques. Dans certaines régions des États-Unis, la durée de la période sans pluie en hiver peut atteindre trois (3) mois en moyenne [Farzaneh et Chisholm, 2009]. Cela veut dire que le dépôt de pollution aura le temps de s'accumuler sur la surface des isolateurs due à l'absence du processus de nettoyage naturel pendant une période prolongée. Cela entraîne aussi un taux d'accroissement de pollution plus rapide sur la surface supérieure que sur la surface inférieure [Farzaneh et Chisholm, 2009], comparativement à la pollution marine où des études ont rapporté plutôt le contraire [Taniguchi et al., 1979], [Hall et Mauldin, 1981].

Souvent, les longues périodes sans pluie durant l'hiver sont aussi combinées avec d'autres précipitations telles que la neige dont la profondeur est parfois supérieure à 25 mm pendant plusieurs jours. Par exemple, aux États-Unis, la Figure II.14 nous montre que la période durant laquelle il y a des excès de neige dépasse les 84 jours dans presque 40% des états. Durant ce grand laps de temps où la neige recouvre les isolateurs, la pollution continue à s'accumuler jusqu'à atteindre le niveau maximum. En effet, d'après ce que nous avons mentionné précédemment, la neige peut également déposée une importante quantité additionnelle d'électrolytes sur l'isolateur. Comme dans la plupart des zones urbaines, plus de neige veut dire plus d'accumulation de sel de déglaçage sur les isolateurs.

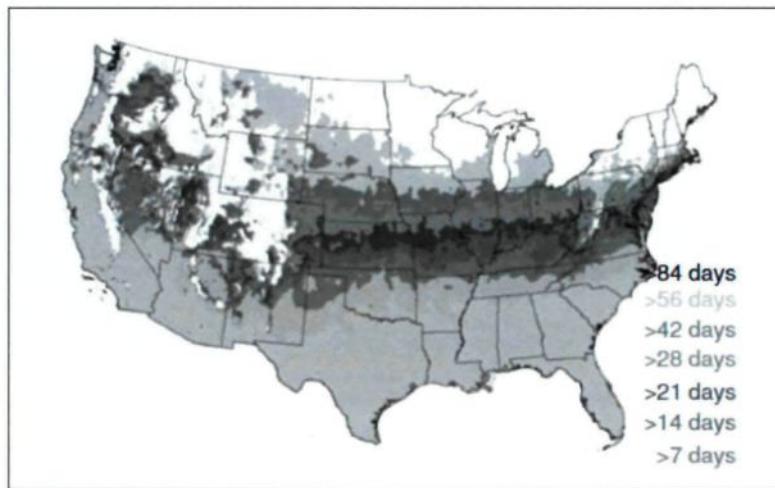


Figure II.14: Nombre de jours d'excès de neige [Farzaneh et Chisholm, 2009].

### II.5.2 Contribution du sel de déglaçage

Durant l'hiver, l'épandage de sel sur les autoroutes pendant l'hiver contribue de façon significative à un accroissement rapide du niveau de l'ESDD sur les isolateurs. En effet, sur la Figure II.15, on peut constater facilement que le taux d'accroissement journalier de l'ESDD est quasiment le double sur les isolateurs qui se trouvent dans des postes électriques situés à moins de 50 m d'une autoroute à 14 voies par rapport à ceux qui sont installés dans des postes à plus de 100 m. D'autre part, l'effet d'une longue période sans pluie mentionnée précédemment accentue d'avantage la contribution du sel de déglaçage à l'augmentation du niveau de l'ESDD comme nous le montre la Figure II.16. On peut remarquer qu'il y a une forte contribution du sel de déglaçage à l'élévation de l'ESDD durant les deux premiers mois de l'année où la quantité de sel épandue sur la route est à la pointe.

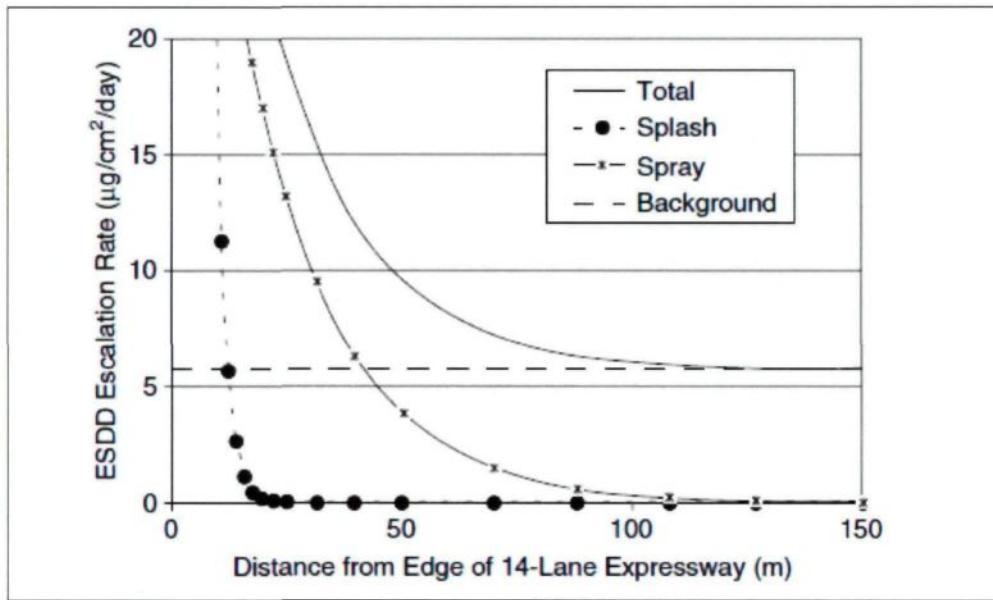


Figure II.15: Effet de l'épandage de sel sur le taux d'accroissement de l'*ESDD* [Farzaneh et Chisholm, 2009], [Lundmark et Olofsson, 2007].

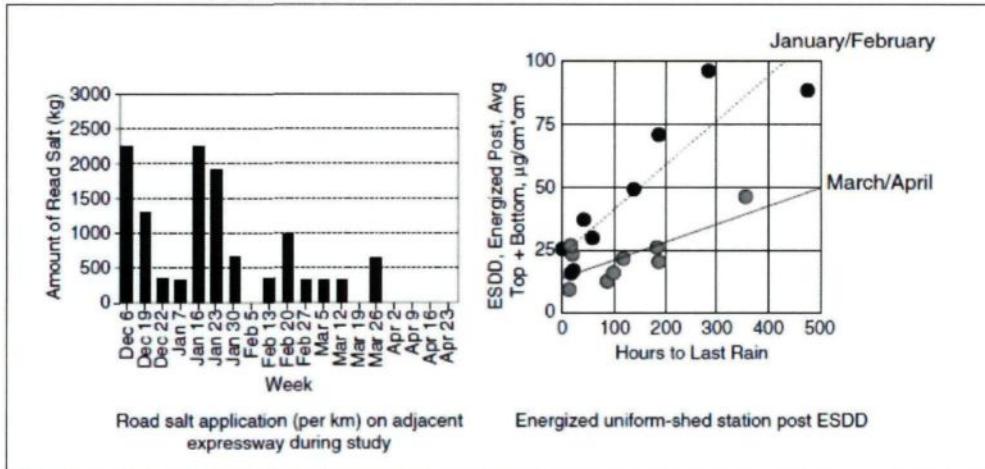


Figure II.16: Relation entre *ESDD* et le nombre d'heures sans pluie sur des isolateurs de poste à proximité d'une autoroute [Farzaneh et Chisholm, 2009; Chisholm et al., 1993].

Il est à noter que le chauffage domestique (au gaz naturel ou au bois) constitue également une source de pollution en hiver. Cependant, dans le cadre de la présente étude, nous avons considéré uniquement le salage des routes.

## II.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue le phénomène de pollution en commençant par la description dans laquelle nous avons identifié les principales sources, expliqué le processus d'accumulation et le processus de contournement des isolateurs pollués. Il en est ressorti que le salage des routes est la principale source de pollution hivernale et que la force du vent domine sur les autres forces impliquées dans le processus d'accumulation. Ensuite, nous avons présenté l'*ESDD* et la *NSDD* parmi les méthodes usuelles pour mesurer le taux d'accumulation de pollution. Nous avons montré que ces mesures peuvent être utilisées comme critères pour déterminer la sévérité de pollution d'un site et qu'on peut aussi s'en servir pour surveiller le niveau de pollution dans une installation électrique à l'extérieur.

En outre, nous avons exposé les différentes méthodes pour simuler l'accumulation de pollution sur les isolateurs qui sont regroupées en trois (3) catégories : l'accumulation naturelle sur terrain, l'accumulation artificielle en laboratoire et la simulation numérique par ordinateur. Les modèles physiques et/ou mathématiques derrières ces méthodes ont été identifiées. Il en est ressorti que faire une accumulation naturelle sur le terrain est de loin la plus représentative de toutes les méthodes et la seule qui permet d'analyser la variation en temps réels du niveau de pollution des isolateurs. Par contre, elle se heurte à une problématique au niveau de l'absence totale de contrôle sur les variables climatiques. Également, son coût d'installation prohibitif et la nécessité d'une période d'observation prolongée la rendent moins pratique. De ce fait, l'accumulation en laboratoire est la procédure la plus utilisée pour étudier le phénomène de pollution. Quant à la modélisation numérique, elle est encore moins

développée et les modèles actuels ne peuvent être utilisés que pour simuler l'accumulation de pollution marine sur des isolateurs en céramique.

En résumé, malgré le développement de nouvelles méthodes montrant l'avancement des études expérimentales relatives au phénomène de pollution, les modèles empiriques existants ne reflètent pas encore les conditions réelles de service dans la plupart des pays nordiques, notamment le Canada. En effet, aucune des méthodes de simulation de l'accumulation de pollution susmentionnées n'ont été développées pour étudier l'aspect de la pollution en condition hivernale qui est caractérisée par une forte variation de la vitesse du vent et une température moyenne largement inférieure au point de congélation. De nouvelles études doivent être alors effectuées pour mieux avancer dans ce domaine de recherche qui est la pollution.

## CHAPITRE III

# MÉTHODOLOGIE POUR LA SIMULATION PAR ORDINATEUR DE L'ACCUMULATION DE POLLUTION HIVERNALE

### III.1 INTRODUCTION

La simulation par ordinateur du processus d'accumulation de pollution en condition hivernale nécessite le développement d'un modèle numérique à partir d'une modélisation mathématique du phénomène. Au meilleur de nos connaissances, un modèle mathématique n'a encore été établi jusqu'à présent dans le cas d'une accumulation de pollution sur un isolateur en présence de conditions hivernales. Comme approche, nous avons adopté et utilisé le modèle développé il y a quelques années pour l'accumulation de glace sur un câble [Fu, 2004] en vue de l'adapter à notre problème. Expliquer la méthodologie que nous avons utilisée afin d'y parvenir fera ainsi l'objet de ce chapitre.

Dans la première section, nous allons décrire le problème pour faire ressortir les hypothèses sur lesquelles sera basée la modélisation. Ensuite, sera expliqué le principe utilisé pour adapter à l'accumulation de pollution le modèle ayant été développé pour l'accumulation de glace sur un câble. En outre, les techniques pour implémenter le modèle numérique en vue de la simulation par ordinateur seront présentées. Pour terminer, un modèle sera proposé pour la phase de transport qui est un préalable au processus de dépôt.

### III.2 DESCRIPTION DU PROBLÈME

Tel que nous avons mentionné dans le chapitre précédent sur la revue de littérature, l'effet du vent est le facteur le plus important durant le processus d'accumulation [Looms, 1988], [Vosloo et Holtzhausen, 2003], [Taniguchi et al., 1979]. Dans le cas de la pollution hivernale, les particules de sel de déglaçage s'accumulent progressivement sur les isolateurs sous l'effet combiné du vent et de la circulation de véhicules. Généralement, les particules de sel projetées de la route par les pneus de véhicule sont dissoutes dans la gadoue de neige et de glace fondues. La plupart des particules sont éclaboussées à une distance de tout au plus 20 m du bord de la route [Farzaneh et Chisholm, 2009]. Par contre, certaines particules plus fines, restent en suspension et peuvent être transportées par le vent sur de plus longues distances.

Le problème qui se pose généralement en hiver pour les installations électriques à proximité d'une autoroute qui est surélevée par rapport à l'emplacement de ces installations peut être représenté schématiquement à la Figure III.1. La description du problème est la suivante : nous avons un corridor de ligne électrique aérienne de haute tension (ou un poste électrique) qui se trouve à une distance  $x > 20$  m d'une autoroute très achalandée. Cette dernière étant surélevée par rapport à la base des structures de la ligne, avec une différence de hauteur  $h$ . Chaque conducteur de la ligne est supporté par une chaîne d'isolateurs verticale composée d'isolateurs à capot et tige standard IEEE; la chaîne étant installée à une hauteur moyenne  $h_0 \leq h$ . Pour une durée d'observation de 24 heures, on considère que dans un mètre cube d'air on a une certaine quantité moyenne  $Q$  de particules en suspension et que la distribution de la taille des particules donne un diamètre volumique

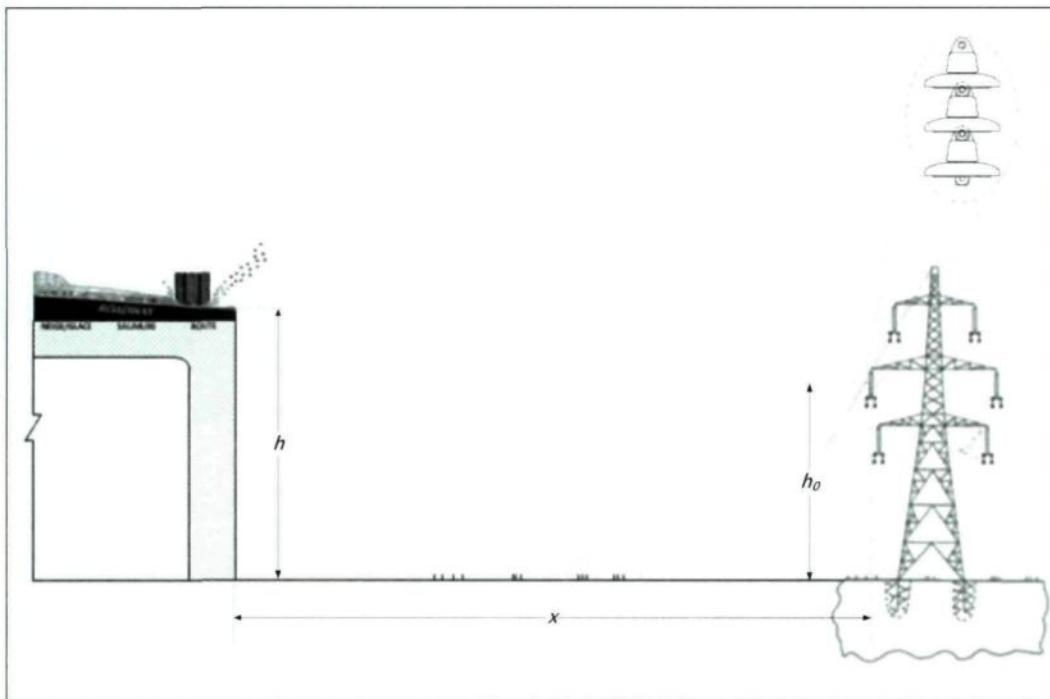


Figure III.1: Représentation schématique du problème

médian  $D$ . On suppose également que la température moyenne de la journée est de  $-15^\circ\text{C}$  et qu'il n'y a pas de précipitation. En tenant compte de ces paramètres, on veut étudier la variation de la quantité de pollution accumulée sur les isolateurs en fonction de la vitesse moyenne du vent afin de déterminer la vitesse à partir de laquelle on peut s'attendre à un niveau critique de pollution sur les isolateurs après une journée d'accumulation. On serait également intéressé à connaître l'influence de certains paramètres sur cette variation, tels que la quantité de sel épandue sur la route, le diamètre volumique médian des particules, la forme des isolateurs constituant la chaîne ainsi que la distance entre l'emplacement des installations électriques et la route.

### III.3 MODÉLISATION DE L'ACCUMULATION DE POLLUTION

Il est clair que pour aborder le problème décrit précédemment par une approche théorique, il faudrait effectuer des simulations par ordinateur qui font appel à un modèle numérique issu d'une modélisation mathématique du phénomène. L'analyse du problème nous fait comprendre que dès l'instant où les particules de pollution sont projetées par les pneus de véhicules jusqu'à leur accumulation sur les isolateurs, le processus comprend deux phases : le transport et le dépôt. Dans un premier temps, nous allons présenter les étapes menant au développement du modèle numérique jusqu'à son implantation concernant la phase de dépôt. Quant à la phase de transport, nous allons proposer un modèle numérique dans la dernière section de ce chapitre.

Avant toute chose, il est nécessaire de fixer les premières hypothèses sur lesquelles le modèle sera basé. Selon la description du problème, nous pouvons ressortir les hypothèses suivantes :

- ⇒ les particules de pollution sont transportées essentiellement par spray étant donné que la distance entre la source de pollution et les isolateurs est supérieure à 20 m; dans ce cas, nous allons considérer uniquement les particules de pollution qui sont en suspension;
- ⇒ les isolateurs sont installés à un niveau inférieur à celui de la route;
- ⇒ dans une journée, la quantité moyenne de particules en suspension par mètre cube d'air au voisinage des isolateurs est  $Q$ ;

- ⇒ il n'y a pas d'auto-nettoyage car on suppose qu'il n'y a pas de précipitation et que la température est largement inférieure au point de congélation.

En outre, afin de pouvoir utiliser le modèle de l'accumulation de glace sur un câble, nous devons supposer que le processus d'accumulation de glace et celui de la pollution en présence de conditions hivernales seraient similaires. Nous devons supposer également que les particules de pollution sont assimilables à des particules sphériques de tailles très fines.

### **III.3.1 Modèle de base relatif à l'accumulation de glace sur un câble**

#### ***III.3.1.1 Structure générale***

Tel que nous avons mentionné précédemment, le modèle de base que nous avons utilisé dans le développement de notre modèle de simulation est le modèle qui a été développé par Fu [2004] pour la simulation de l'accumulation de glace sur un câble et dont le schéma de principe est présenté à la Figure III.2. Cette dernière montre une structure générale du modèle qui est plutôt modulaire. En premier lieu, on a le module qui calcule l'écoulement d'air, qui est en quelque sorte le module central du modèle, car de lui dépend les autres modules. En effet, la distribution du champ de vitesse du vent, qui est la sortie de ce premier module, sera utilisée dans le module pour le calcul de trajectoire des gouttelettes d'eau, lequel est nécessaire pour déterminer l'efficacité de collision locale. D'autre part, la distribution du champ de vitesse du vent sur la frontière servira au module qui évalue le coefficient de transfert de chaleur afin de résoudre l'équation de l'équilibre thermique permettant d'estimer sur chaque élément de

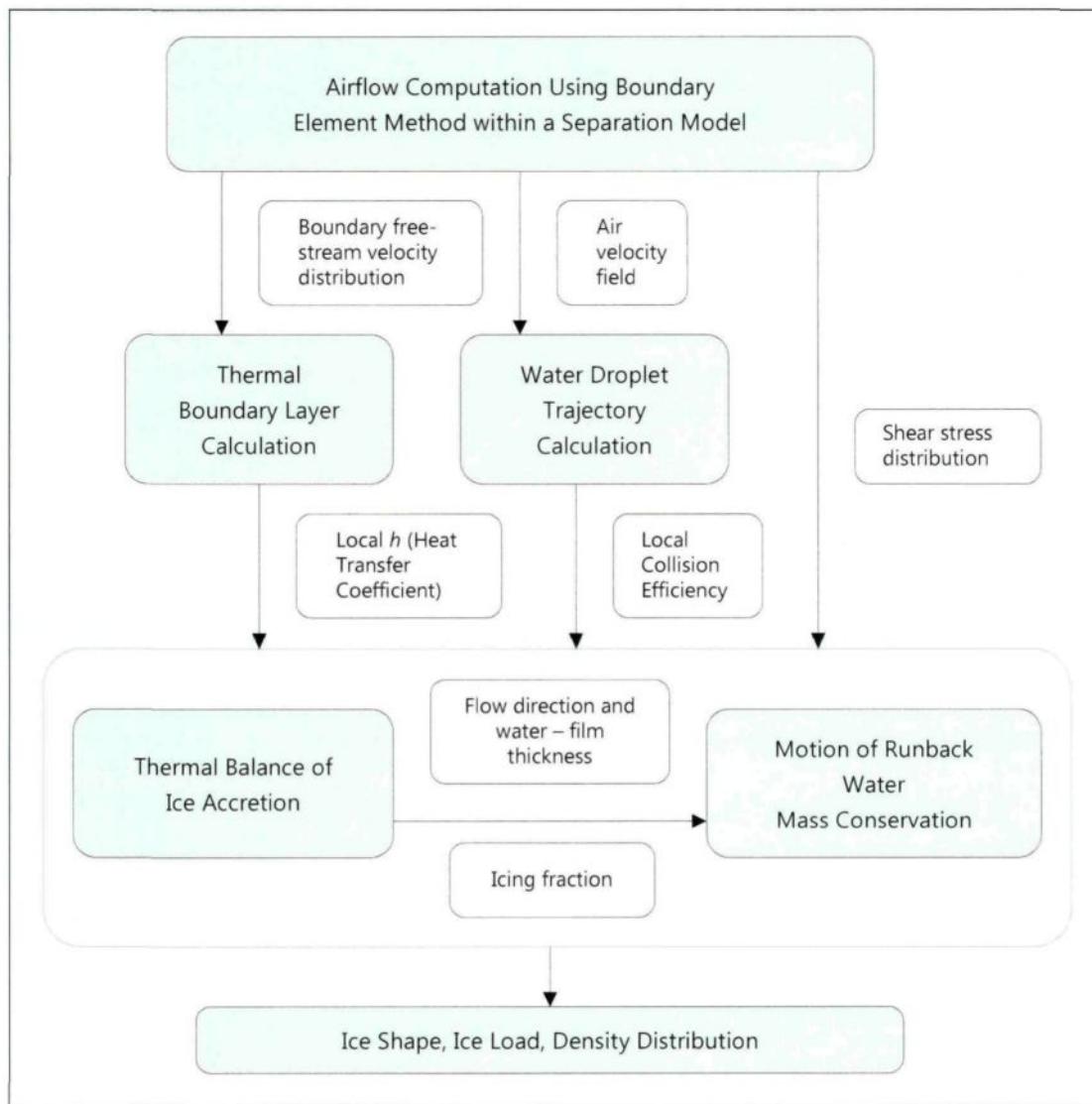


Figure III.2: Structure générale du modèle d'accumulation de glace sur un câble [Fu, 2004].

surface la fraction de glace par rapport à l'eau qui y est recueillie. Par la suite, l'épaisseur du film d'eau ainsi que la vitesse d'écoulement de l'eau sont évaluées en simulant l'écoulement d'un film d'eau de surface en régime humide. Et dans le dernier module, on détermine à chaque pas de simulation la forme, la charge et la distribution de la densité de glace.

Il est important de souligner que derrière chaque module de calcul se cache un modèle mathématique constitué d'équations parfois très complexes dont le développement a été largement expliqué en détail dans la thèse de Fu [2004]. Cela implique que des méthodes numériques ont été utilisées pour la résolution de certaines équations. Par exemple, la méthode des éléments finis de frontière a été utilisée dans le calcul du champ d'écoulement d'air. De même que dans le calcul de trajectoire des gouttelettes d'eau, l'algorithme numérique de Runge-Kutta a été utilisé afin de résoudre les équations différentielles du mouvement.

### ***III.3.1.2 Implémentation du modèle***

La Figure III.3 ci-après montre la représentation schématique du concept utilisé pour implémenter le modèle. Comme nous pouvons le constater, le programme pour les modules de calcul et celui pour la visualisation ont été codés séparément pendant leur développement. Par contre, lors de l'exécution de la simulation, leurs codes vont se relier de telles sortes que les résultats de calculs pouvaient être animés par le programme de visualisation.

L'implémentation du modèle a été réalisée en utilisant la technique de programmation orientée objet avec le C++ comme langage. Cette technique consiste à associer une classe à chaque module de calcul. D'autres classes ont été aussi ajoutées pour le besoin du programme de simulation. Les classes ainsi formées peuvent être réparties en trois niveaux d'hierarchie selon la Figure III.4. Les classes qui appartiennent au premier niveau font référence à des paramètres clés qui sont nécessaires aux classes du deuxième niveau qui exécutent des calculs spécifiques comme l'écoulement d'air, la trajectoire des gouttelettes et l'équilibre thermique.

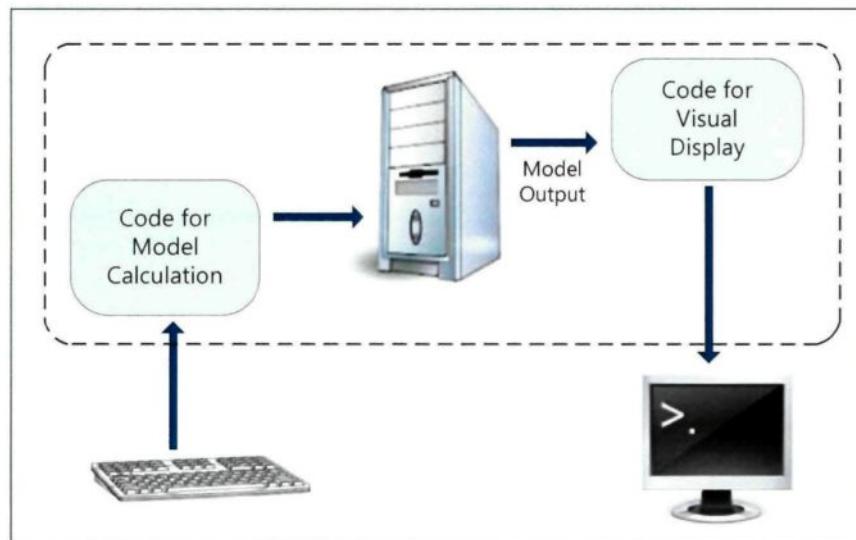


Figure III.3: Schéma conceptuel de l'implémentation du modèle [Fu, 2004].

La classe nommée « CControlSession » contrôle et manipule ces calculs. Dans le dernier niveau se trouve la classe « CView » qui fournit les sous-routines pour l'interaction avec les résultats calculés ainsi que leur visualisation.

### ***III.3.1.3 Paramètres d'entrée du modèle***

Les paramètres d'entrées du modèle sont regroupés dans le Tableau III.1 ci-après. De ce tableau, nous pouvons remarquer que les paramètres se divisent en deux catégories : les conditions atmosphériques ou météorologiques et les paramètres de simulation. Les conditions météorologiques regroupent les paramètres qui conditionnent la formation et l'accumulation de glace. Parmi ces paramètres, on trouve la vitesse du vent, la température de l'air, l'humidité relative, la taille des gouttelettes. Quant aux paramètres de simulation, ils sont plutôt liés à la durée de l'observation et au pas de calcul.

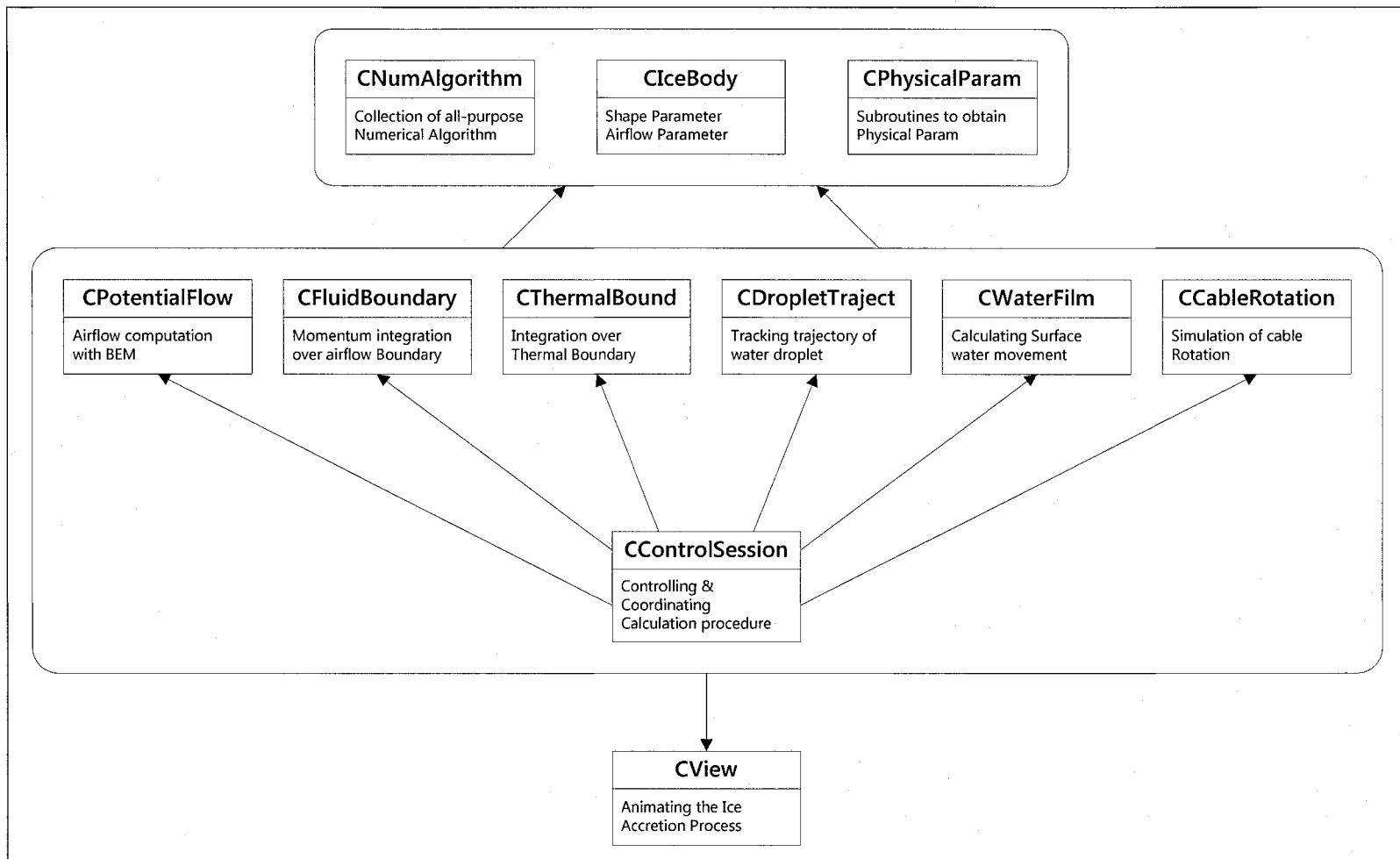


Figure III.4: Hiérarchisation des classes du modèle pour l'accumulation de glace [Fu, 2004].

Tableau III.1: Paramètres d'entrée du modèle pour l'accumulation de glace

Catégorie	Conditions de simulation
Conditions de givrage	Vitesse du vent, température de l'air, distribution de la taille des particules, teneur en eau liquide (LWC), humidité relative.
Paramètres de simulation	Durée de la période de givrage, temps de simulation, diamètre du cylindre.

Fu [2004]

### III.3.2 Modèle adapté au dépôt de pollution sur un isolateur

#### III.3.2.1 Structure générale

Le principe utilisé derrière le modèle de base précédent est la détermination de la trajectoire des gouttelettes d'eau. Dans notre cas, nous allons utiliser le même principe en remplaçant les gouttelettes d'eau par des particules de poussière. Pour pouvoir adapter le modèle d'accumulation de glace à la simulation de l'accumulation de pollution hivernale, nous avons dû analyser le rôle de chaque module qui compose la structure du modèle de base et par la suite déterminer lequel devrait être modifié ou non, et lequel ne serait plus nécessaire.

D'après ce qui précède, la structure du modèle de base comprend cinq (5) modules de calculs associés respectivement à l'écoulement d'air, la trajectoire des gouttelettes d'eau, la couche limite thermique, l'équilibre thermique de l'accrétion de glace, et le mouvement du reflux d'eau. La structure comprend également un 6<sup>e</sup> module associé à la visualisation de la forme et de la densité de distribution de l'accumulation de glace sur le câble. En commençant notre analyse par le module de calcul de l'écoulement d'air, nous avons dit précédemment qu'il

s'agit du module central car il sert à calculer le champ de vitesse du vent, duquel dépendra la détermination de la vitesse de chaque gouttelette dépendamment de leur position à un instant  $t$ . Ainsi, nous avons jugé que ce module est nécessaire pour pouvoir déterminer la vitesse de chaque particule. Et normalement, il ne devrait pas être modifié car le champ de vitesse du vent est indépendant des matières qu'il transporte. Le deuxième module du modèle de base sert à calculer la trajectoire de chaque gouttelette pour déterminer l'efficacité de collision locale (LCE) permettant ainsi de connaître si la gouttelette sera captée ou non par le câble. De ce fait, il est clair que ce module doit faire partie de la structure du modèle d'accumulation de pollution si on veut bien déterminer la trajectoire d'une particule de poussière. Par contre, il doit être modifié pour tenir compte du fait que nous avons des particules de poussière à la place des gouttelettes d'eau ainsi qu'un isolateur au lieu d'un câble. Quant aux modules de calcul associés à la couche limite thermique et à l'équilibre thermique de l'accrétion de glace, ils servent à déterminer la fraction de glace formée parmi la quantité d'eau super-refroidie recueillie à la surface du câble. Comme il s'agit d'un phénomène propre à la formation de glace, nous avons jugé de ne pas en tenir compte dans la structure adaptée à l'accumulation de pollution. Donc ces deux (2) modules ne seront pas nécessaires. Pour le dernier module de calcul associé au mouvement du reflux d'eau, il sert à estimer la quantité d'eau retenue sur la surface du câble à la fin de chaque pas de simulation pour tenir compte du fait que le film d'eau de surface se déplace le long du substrat de la surface sous l'action de la gravité, de la trainée ou de la tension superficielle. Dans notre cas, nous considérons que les particules de poussière sont des matières solides et qu'aucune force externe ne peut les enlever une fois qu'elles sont déposées sur la surface de l'isolateur. Par conséquent, le 5<sup>e</sup> module ne sera pas

non plus nécessaire. En dernière analyse, nous avons statué que ce ne sera pas important d'avoir une visualisation à ce stade-ci de la modélisation. Ce qui nous importait le plus c'est de pouvoir évaluer le taux d'accumulation de pollution. Pour cette raison, le module associé à la visualisation de l'accumulation de glace serait remplacé par un module de calcul qui va déterminer la masse de pollution accumulée.

En dernière analyse, la structure du modèle adapté contient seulement trois (3) modules comme nous pouvons le constater sur la Figure III.5 ci-après. Nous avons ainsi une structure simplifiée du modèle de base. Dans ce qui suit, nous allons rappeler brièvement les principes utilisés pour le calcul de l'écoulement d'air et le calcul de trajectoire des particules de poussière. Nous allons également expliquer la méthodologie utilisée pour modifier le module associé au calcul de trajectoire, lequel est relié à la détermination de l'efficacité de collision locale.

### ***III.3.2.2 Calcul de l'écoulement de l'air***

Dans le modèle adapté, le principe pour le calcul de l'écoulement d'air du modèle de l'accumulation de glace n'a pas été modifié et le schéma est demeuré le même tel que démontré à la Figure III.6. À titre de rappel, le calcul comprend deux étapes d'itérations puisque d'après la théorie de la couche limite, l'écoulement d'air se divise en deux régions à la rencontre d'un obstacle : la région de l'écoulement potentiel et la région de l'écoulement visqueux sur la couche limite au voisinage de l'objet. Ainsi, la première étape d'itération sert à calculer l'écoulement potentiel dont le résultat servira au calcul de la couche limite dans la deuxième étape. Autrement dit, les itérations sont faites de telle sorte que la distribution du

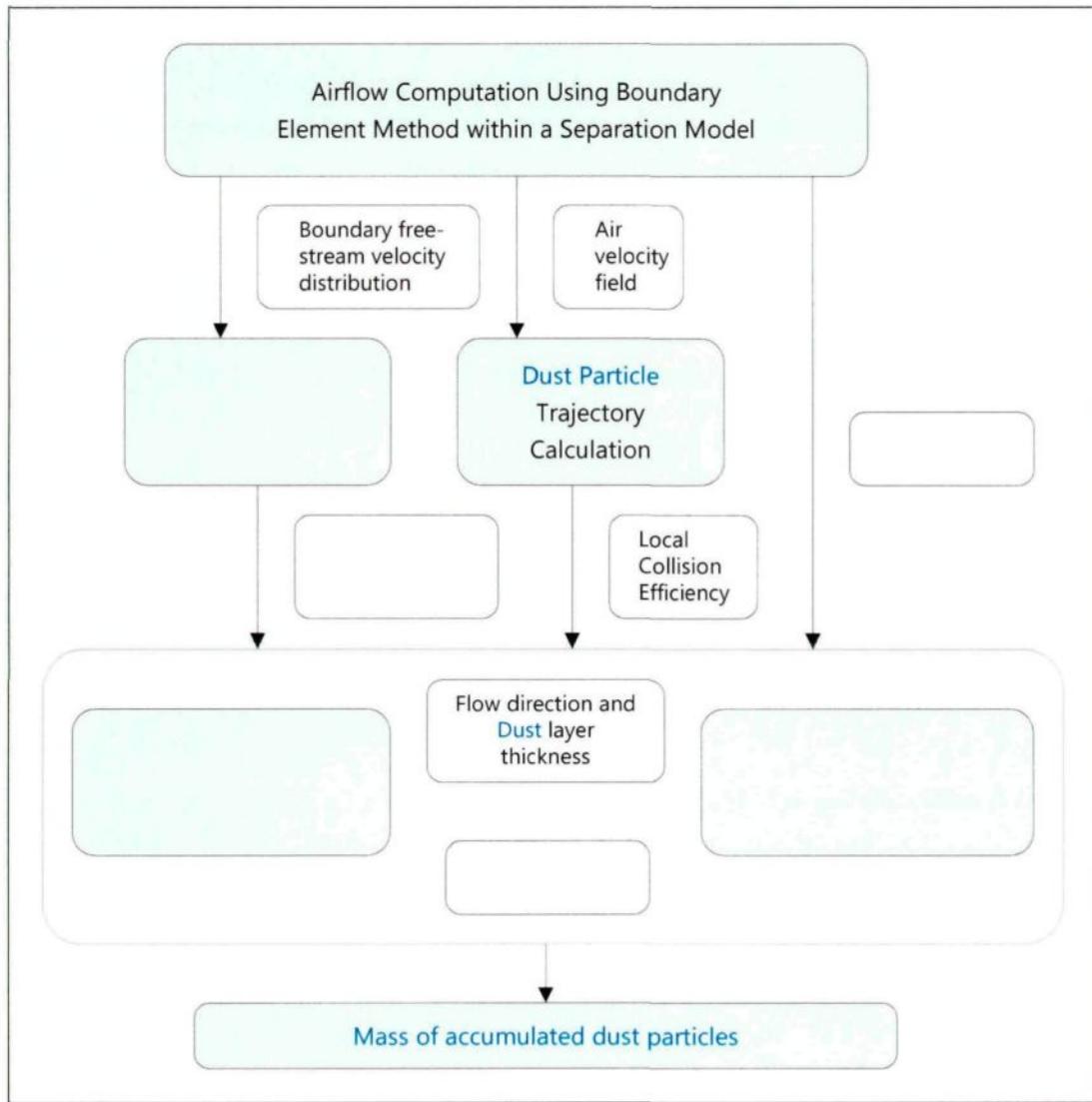


Figure III.5: Structure du modèle de simulation adapté au dépôt de pollution sur un isolateur.

champ de vitesse à la frontière, obtenue par le calcul de l'écoulement potentiel, devient un intrant pour calcul de la couche limite et ainsi de suite. Les itérations sont répétées jusqu'à la convergence.

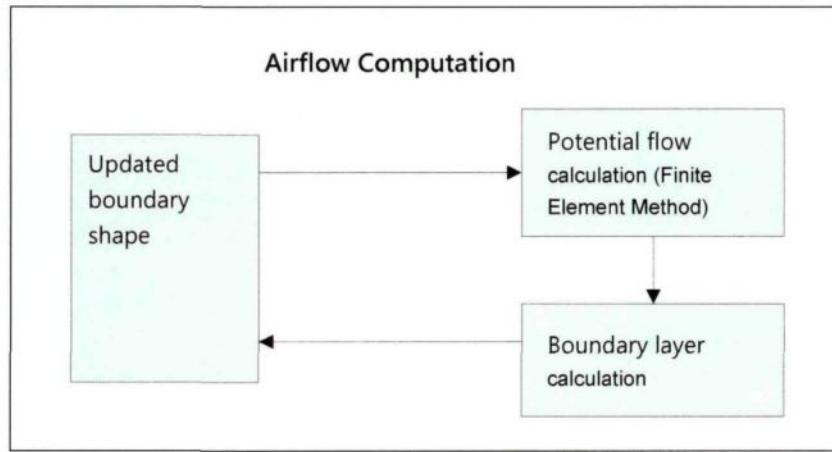


Figure III.6: Schéma de principe du calcul de l'écoulement d'air [Fu, 2004].

Dans la première étape d'itérations, l'écoulement potentiel est calculé avec la méthode des éléments finis de frontière (MEFF). Le choix de cette méthode numérique a été basé sur le fait que la région de l'écoulement potentiel pourrait être considérée comme la superposition d'un courant uniforme, correspondant au champ de vitesse initial lorsque la frontière du corps est vue comme transparente permettant au courant d'y entrer et d'en sortir librement, et d'un courant turbulent incompressible et non rotationnel simulant l'effet imposé par le corps immergé. Mathématiquement, cela veut dire que la somme d'un courant initial ( $\varphi_1$ ) et d'un courant turbulent ( $\varphi_2$ ) peut être considérée comme étant la fonction du courant ( $\varphi$ ) à n'importe quelle position dans le champ d'écoulement. En somme, le champ d'écoulement est défini par les équations suivantes :

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 \quad (\text{III.1})$$

$$\varphi_1 = V_0 \cdot y \quad (\text{III.2})$$

$$\nabla^2 \varphi_2 = 0 \quad (\text{III.3})$$

où  $V_0$  représente la vitesse de départ de l'écoulement et  $y$  l'ordonnée des axes dans le système de coordonnées cartésiennes.

Puisque l'expression de l'écoulement uniforme  $\varphi_1$  est déjà connue, la MEFF n'a été utilisée que dans la résolution de l'équation (III.3) pour déterminer l'écoulement potentiel  $\varphi$ . Par la suite, les composantes  $V_x$  et  $V_y$  de la vitesse du vent à n'importe quelle position dans le champ d'écoulement ont été calculées selon l'équation suivante :

$$(V_x, V_y) = \left( \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) \quad (\text{III.4})$$

Dans la deuxième étape d'itérations, on se sert de la distribution de la vitesse du vent de courant libre précédent pour évaluer l'écoulement couche limite. En utilisant des formules empiriques, on détermine les positions des points de transition et des points de séparation par l'intégration de cette distribution de vitesse le long de la surface de l'objet. Certains paramètres tels que l'épaisseur de la quantité de mouvement et le coefficient de frottement sont également déterminés à partir de ces formules empiriques pour les parties laminaires et turbulentes de l'écoulement.

### ***III.3.2.3 Calcul de trajectoire des particules de poussière et de l'efficacité de collision locale***

Le principe de calcul de trajectoire des particules de poussière est le même que celui utilisé pour une gouttelette d'eau. Au voisinage d'une chaîne d'isolateurs sous haute tension AC, chaque particule de pollution est généralement soumise aux forces suivantes : la force de traînée, la gravité, la poussée d'Archimède et la force diélectrophorétique. Toutefois, pour des raisons de complexité, la force due au champ électrique n'a pas été considérée dans le modèle de l'accumulation de glace. Donc, dans notre modèle adapté, nous avons dû assumer que les isolateurs étaient hors tension durant le processus d'accumulation de pollution pour ne pas tenir compte de cette force diélectrophorétique. De ce fait, l'équation de mouvement demeure inchangée et dont la formulation mathématique est selon l'équation (III.5) ci-après.

$$m \frac{d\vec{u}}{dt} = \vec{F}_d + \vec{F}_g + \vec{F}_b \quad (\text{III.5})$$

où  $m$  est la masse d'une particule de NaCl,  $\vec{u}$  sa vitesse,  $\vec{F}_d$  la force de traînée,  $\vec{F}_g$  la gravité et  $\vec{F}_b$  la poussée d'Archimède.

Les expressions mathématiques de ces forces selon leur définition respective sont données par les équations suivantes :

$$\vec{F}_d = \frac{1}{2} \rho_a C_D A_f |\vec{V} - \vec{u}| (\vec{V} - \vec{u}) \quad (\text{III.6})$$

$$\vec{F}_g = \rho_s v \vec{g} \quad (\text{III.7})$$

$$\vec{F}_b = -\rho_a v \vec{g} \quad (\text{III.8})$$

où  $\rho_a$  est la densité de l'air,  $C_D$  le coefficient de traînée,  $\rho_s$  la densité de la particule de NaCl de surface frontale  $A_f$  et de volume  $v$ ,  $\vec{g}$  l'accélération gravitationnelle et  $\vec{V}$  la vitesse du vent.

De ces expressions, nous pouvons obtenir par la suite les équations (III.9) et (III.10) correspondant aux équations différentielles du mouvement à partir de l'équation (III.5) sous forme adimensionnelle selon les axes des  $x$  et des  $y$  respectivement :

$$k_i \frac{du_x}{dt} = k_d (V_x - u_x) \quad (\text{III.9})$$

$$k_i \frac{du_y}{dt} = k_d (V_y - u_y) - (k_g - k_b) g \quad (\text{III.10})$$

où  $k_i$ ,  $k_d$ ,  $k_g$  et  $k_b$  sont des constantes adimensionnelles dont les expressions sont les mêmes que dans le calcul de l'accumulation de glace mais seulement en remplaçant tous les paramètres relatifs à la gouttelette d'eau tels que la densité et le diamètre par ceux de la particule de pollution.  $V_x$  et  $V_y$  sont les composantes de la vitesse du vent trouvées précédemment par le calcul de l'écoulement d'air. Les composantes  $u_x$  et  $u_y$  de la vitesse de chaque particule sont reliées aux coordonnées  $x$  et  $y$  de cette dernière à chaque instant  $t$  selon les équations (III.11) et (III.12).

$$\frac{dx}{dt} = u_x \quad (\text{III.11})$$

$$\frac{dy}{dt} = u_y \quad (\text{III.12})$$

Ainsi, pour trouver la trajectoire de chaque particule, il faudrait tout d'abord résoudre les équations (III.9) et (III.10) qui sont non linéaires. Pour ce faire, on utilise l'algorithme de Runge-Kutta à quatre variables. Par la suite, on détermine les coordonnées  $x$  et  $y$  de chaque particule par intégration temporelle des équations (III.11) et (III.12). Une fois la trajectoire de chaque particule connue, la prochaine étape est de calculer l'efficacité de collision locale (LCE) afin de déterminer si la particule sera captée ou non par l'isolateur. La LCE représente ainsi la quantité de particules collectées à n'importe quelle position sur un isolateur. Pour l'évaluer, on utilise le même principe que dans le modèle de l'accumulation de glace. À titre de rappel, la relation qui définit la LCE est :

$$\beta(\theta) = \frac{dY}{dL} \quad (\text{III.13})$$

où  $dY$  représente la distance élémentaire verticale entre deux trajectoires dans l'écoulement initial, et  $dL$  est la distance entre les points d'impact sur la surface de l'objet. Une illustration de cette définition dans le cas d'une accumulation de glace est montrée à la Figure III.7.

Langmuir et Blodgett [1946] ont déterminé la LCE pour un objet cylindrique par des équations et des résultats compilés qui ont été obtenus en utilisant un analyseur différentiel.

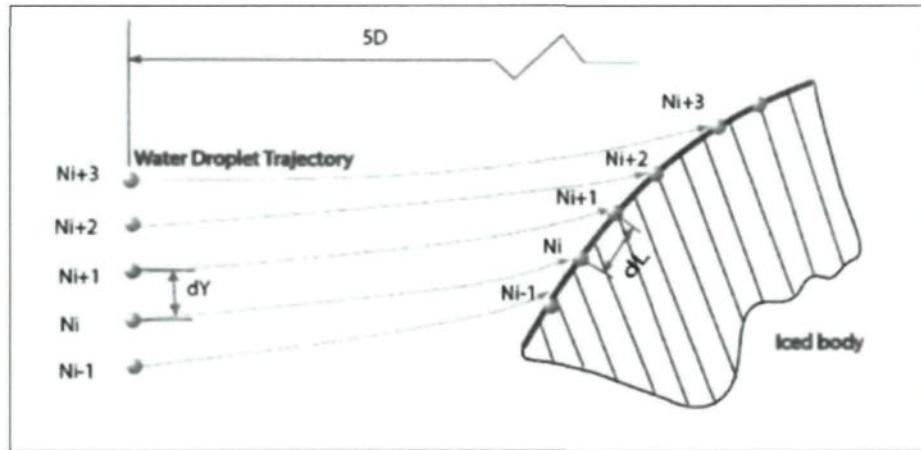


Figure III.7: Définition de l'efficacité de collision locale [Fu, 2004].

La validité de cette approche a été vérifiée par des études récentes, par exemple celles de McComber et Touzot [1981], mais en utilisant des méthodes différentes. Nonobstant, il est nécessaire d'examiner la validité d'une telle pratique dans le cadre de notre problème actuel, c'est-à-dire il faudrait que les conditions appliquées dans la méthode de Langmuir soient aussi respectées dans le cas de l'accumulation de pollution à la surface d'un isolateur. Ces conditions comprennent :

- ⇒ l'objet exposé aux particules transportées par l'air doit être de forme cylindrique ou approximativement cylindrique;
- ⇒ les particules simulées peuvent être considérées comme des sphères rigides, et leur taille si petite pour que la loi de Stokes puisse être utilisée convenablement ( $Re_D < 1$ ) [Wikipédia].

Étant donné que les particules de sel sont transportées sous forme d'aérosol, la deuxième condition pourrait être respectée. Toutefois, un isolateur ne peut pas être considéré comme un

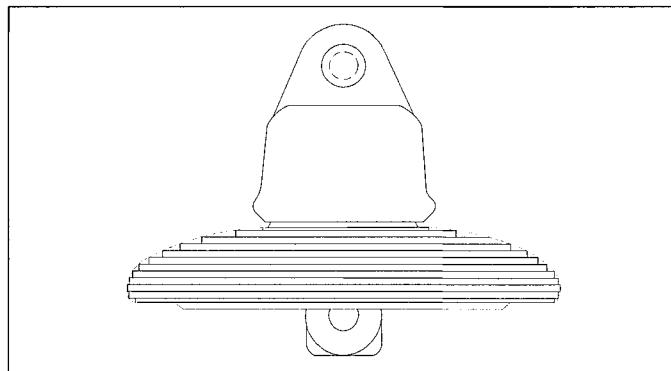


Figure III.8: Subdivision de la surface de l'isolateur en plusieurs cylindres superposés

objet réel cylindrique. Afin de pouvoir appliquer la méthode de Langmuir, la surface de l'isolateur doit être subdivisée en plusieurs cylindres superposés (Figure III.8) et la masse totale des particules sur l'isolateur sera la somme de la masse des particules déposées sur la surface de chaque cylindre.

#### ***III.3.2.4 Implémentation du modèle***

En nous basant sur le concept d'implémentation du modèle de base, nous avons, sur la Figure III.9, la représentation schématique du concept utilisé pour implémenter le modèle adapté au dépôt de pollution sur un isolateur. De cette figure, nous pouvons remarquer qu'il n'y a plus de visualisation car celle-ci a été remplacée par un programme qui calcule la masse de pollution accumulée en tenant compte de la sortie du programme correspondant aux modules de calculs. Les résultats sont aussi programmés pour être exportés directement dans un fichier Excel.

Pour implémenter le modèle adapté, la technique de programmation utilisée demeure la même que précédemment, soit la programmation orientée objet avec le C++ comme langage.

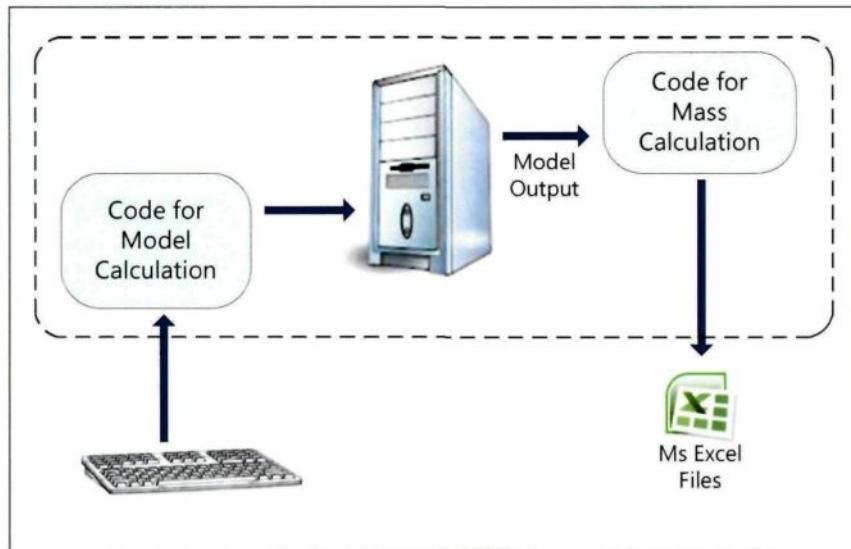


Figure III.9: Schéma conceptuel de l'implémentation du modèle adapté

Toutefois, compte tenu des modifications apportées dans la structure générale du modèle de base pour obtenir la structure du modèle adapté, des changements ont dû être effectués à cet effet au niveau de certaines classes fin de refléter ces modifications dans l'implémentation du modèle adapté. D'après la Figure III.10, la classe « CDropletTraject » correspondant au module de calcul de trajectoire des gouttelettes d'eau a été transformée en une classe appelée « CDustTraject » pour le calcul de trajectoire des particules de poussière. En outre, les classes correspondant aux modules spécifiques au modèle d'accumulation de glace ont été désactivées. Sur le diagramme, ces classes désactivées sont de couleur grise. Quant à la classe « CView », elle a été remplacée par la classe « COut » pour le calcul de la masse de pollution accumulée et l'exportation des résultats dans un fichier Excel. Par ailleurs, il est à noter qu'au niveau de la classe « CPhysicalParam », les sous-programmes ont dû être modifiés pour tenir compte des changements au niveau des paramètres d'entrée. De la Figure III.10, nous pouvons

remarquer aussi que le nombre de niveaux d'hierarchie demeurent le même que dans l'implémentation du modèle de base. Ainsi, les changements ont affecté uniquement le nombre de classes dans les premier et deuxième niveaux hiérarchiques.

### ***III.3.2.5 Paramètres d'entrée***

Compte tenu de ce qui précède, certains paramètres d'entrée ont dû être modifiés en conséquence. En comparant le Tableau III.2 ci-dessous avec le Tableau III.1, nous pouvons constater les changements suivants :

- ⇒ dans la première catégorie de paramètre qui est devenue « Conditions de pollution », le paramètre TSP remplace la LWC et le taux d'humidité relative a été supprimé.
- ⇒ dans la catégorie « Paramètres de simulation », les dimensions de l'isolateur remplacent le diamètre du cylindre.

Le paramètre TSP représente la masse totale Q de particules de sel contenu dans un échantillon d'une unité de volume d'air. Quant à la taille des particules, le diamètre se situe entre 0,1 et 100 µm [Chisholm et al., 1993]. Pour l'isolateur, les dimensions nécessaires sont les diamètres

**Tableau III.2: Paramètres d'entrée du modèle pour l'accumulation de pollution**

Catégorie	Conditions de simulation
Conditions de pollution	Vitesse du vent, température de l'air, distribution de la taille des particules, quantité totale de particules en suspension (TSP).
Paramètres de simulation	Durée de la période de dépôt, temps de simulation, dimensions de l'isolateur.

supérieur et inférieur du disque ainsi que sa hauteur. Certains paramètres parmi tant d'autres pouvaient être aussi évalués à partir des conditions de simulation susmentionnées.

### III.4 MODÉLISATION DE LA PHASE DE TRANSPORT

L'analyse de l'influence de la distance entre l'emplacement des installations électriques et la route sur le taux d'accumulation nécessite la modélisation de la phase de transport. En effet, en se basant sur le fait que le vent est considéré comme étant le principal agent transporteur de polluants, notre hypothèse est que la distance de la source de pollution par rapport à l'emplacement des réseaux électriques affecterait la quantité  $Q$  de particules de pollution contenue dans un volume d'air au voisinage des isolateurs. Autrement dit, le vent pourrait transporter les particules de pollution sur une distance plus ou moins longue selon sa vitesse. Et si la quantité  $Q$  qui arrive au voisinage des isolateurs est faible, le taux d'accumulation le sera également a priori.

Le principe que nous avançons pour modéliser la phase de transport en condition hivernale est la suivante : tout d'abord, on établit les équations de mouvement pour une particule, ce qui permettrait de calculer sa trajectoire. Par la suite, on prend à chaque instant  $t$  un échantillon de volume d'air contenant  $n$  particules de sel dont le diamètre volumique médian est  $D$ . En supposant que chaque particule se trouve à une position initiale de coordonnées,  $(x_i(0), y_i(0))$ , on résout les équations de mouvement de chaque particule pour déterminer leur trajectoire respective. Et après, on peut évaluer le nombre total de particules qui vont se retrouver au voisinage des isolateurs après un certain laps de temps.

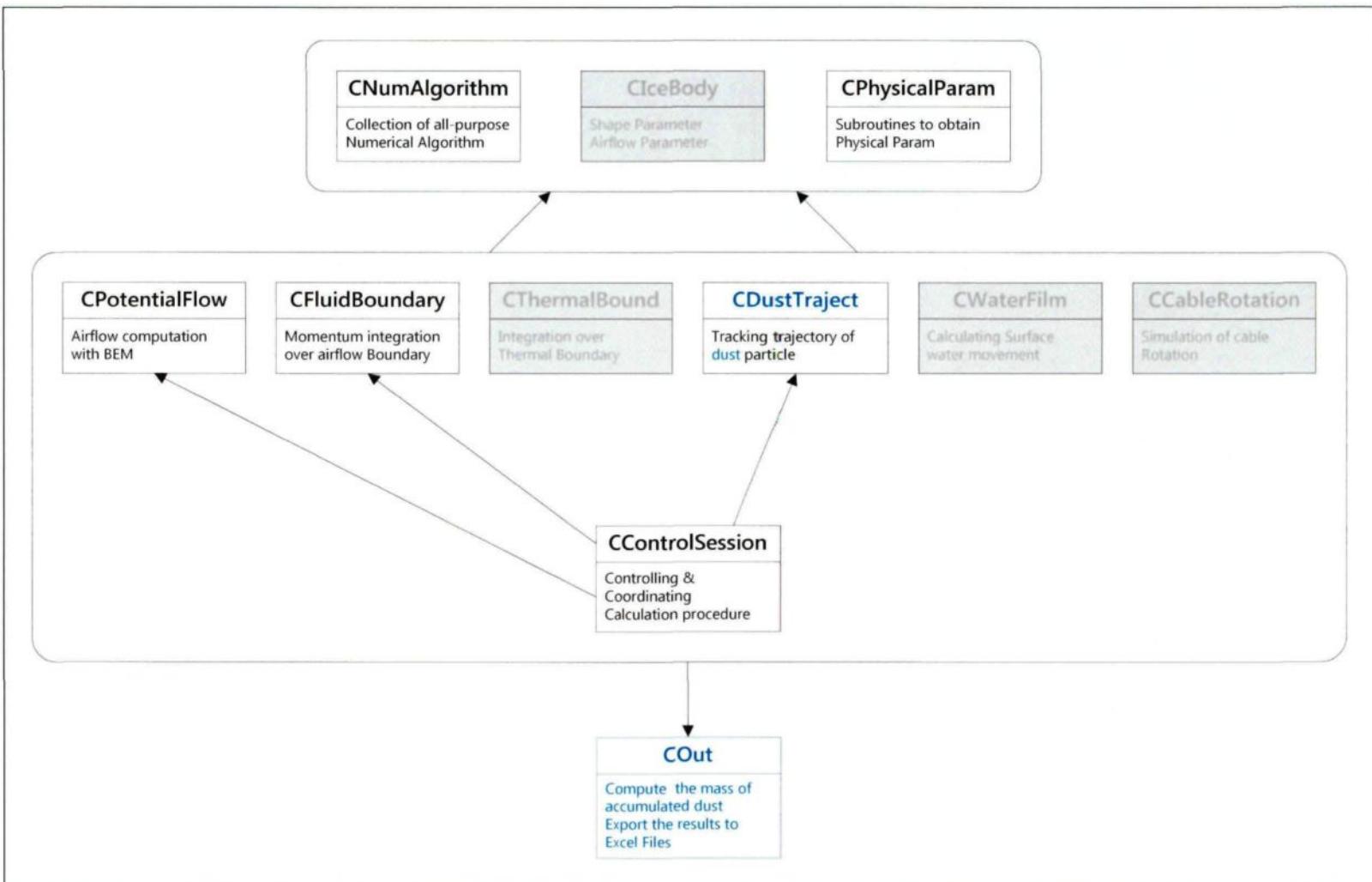


Figure III.10: Hiérarchisation des classes du modèle adapté au dépôt de pollution sur un isolateur.

Dans le cadre de cette étude nous ne nous sommes pas rendus jusqu'au développement d'un modèle complet pour la phase de transport. Par contre, nous avons pu élaborer un simple modèle de simulation pour le transport d'une particule, qui pourrait être développé d'avantage pour arriver à un modèle général par la suite pour un ensemble de particules. En effet, notre but était uniquement de pouvoir démontrer comment la distance pourrait influencer le taux d'accumulation de pollution à partir de la détermination de la trajectoire d'une particule.

### **III.4.1 Équations de mouvement d'une particule**

En assimilant une particule de pollution dans l'air à un objet sphérique de diamètre volumique  $D$ , les forces qui agissent sur cet objet peuvent être représentées comme dans la Figure III.11. Nous pouvons remarquer que les forces qui régissent le mouvement d'une particule de pollution dans l'air durant la phase de transport sont les mêmes que durant la phase de dépôt. Cela implique que les équations différentielles du mouvement sont identiques aux équations (III.9) et (III.10). Par contre, nous n'avons pas à résoudre les équations d'écoulement d'air pour la phase de transport, étant donné que l'objet est considéré comme étant éloigné de tout obstacle et de surface plane. Dans ce cas, nous avons seulement à considérer l'écoulement uniforme de l'air dont le champ de vitesse de vent à une hauteur  $y$  varie en fonction de la rugosité du terrain selon la formule :

$$\vec{V} = V_R \left( \frac{y}{y_R} \right)^z \vec{i} \quad (\text{III.14})$$

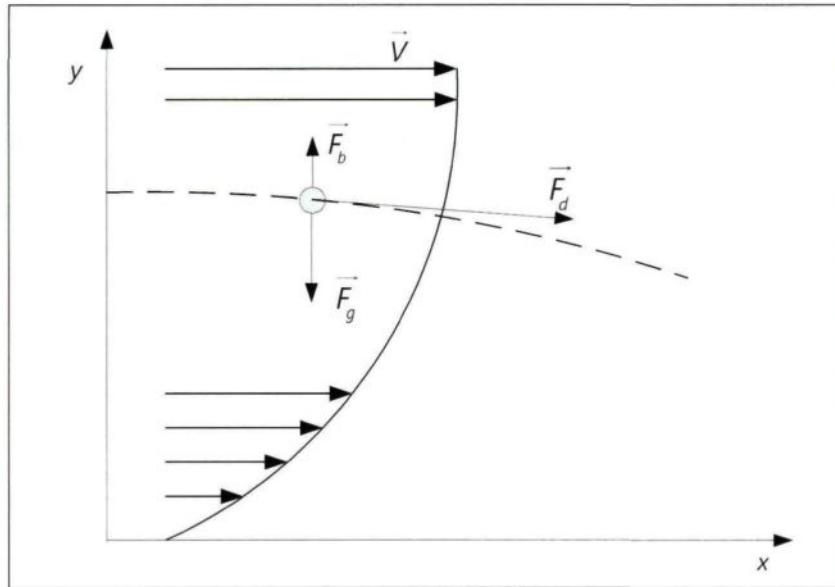


Figure III.11: Déplacement d'une particule de sel dans un écoulement d'air du type laminaire

où  $V_R$  est la vitesse du vent mesurée à une altitude  $y_R$  du sol,  $y$  la hauteur où se trouve la particule à l'instant  $t$ , et  $z$  un paramètre de rugosité qui varie selon le type de terrain. De l'équation (III.14), nous déduisons que la composante verticale de la vitesse du vent est nulle. Par conséquent, les équations différentielles du mouvement sous forme adimensionnelle se résument aux expressions suivantes :

$$k_i \frac{du_x}{dt} = k_d \left[ V_R \left( \frac{y}{y_R} \right)^z - u_x \right] \quad (\text{III.15})$$

$$k_i \frac{du_y}{dt} = -k_d u_y - (k_g - k_b) g \quad (\text{III.16})$$

Pour déterminer la trajectoire d'une particule dans l'air, il faut d'abord résoudre les équations différentielles (III.15) et (III.16) pour obtenir  $u_x$  et  $u_y$ , ensuite les intégrer pour trouver les expressions de  $x(t)$  et  $y(t)$ . Après, il suffit de déterminer la relation  $y=f(x)$  pour modéliser la trajectoire de la particule.

Pour résoudre l'équation (III.15), il faut utiliser une méthode numérique car il s'agit d'une équation non linéaire. Quant à l'équation (III.16), sa résolution peut se faire analytiquement étant donné qu'il s'agit d'une équation linéaire. Après résolution, nous obtenons l'expression analytique de  $y(t)$  suivante :

$$y(t) = \frac{k_g - k_b}{k_d} g \left[ \frac{k_i}{k_d} \left( 1 - e^{-\frac{k_d}{k_i} t} \right) - t \right] + y(0) \quad (\text{III.17})$$

où  $y(0)$  est la hauteur initiale à laquelle se trouve la particule de sel au moment où celle-ci est projetée hors de la route par les pneus de véhicules.

### **III.4.2 Exemple de calcul**

En prenant comme exemple le problème décrit précédemment, nous allons démontrer comment on peut simuler la trajectoire d'une particule de pollution, laquelle sera représentée par une particule de NaCl dans ce cas-ci, en utilisant les équations de mouvement que nous venons de développer. Premièrement, nous avons besoin de spécifier certains paramètres relatifs aux conditions externes. Par exemple, supposons que les isolateurs de la ligne sont

Tableau III.3: Paramètres de simulation

	Paramètres
Particules de NaCl	$\rho_s = 2170 \text{ kg/m}^3, D = 50 \mu\text{m}$
Air	$\rho_a = 1,34 \text{ kg/m}^3, \mu_a = 1,66 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$
Autres	$x(0) = 0, y(0) = 25 \text{ m}, g = 9,8 \text{ m/s}^2$

installés à une hauteur moyenne  $h_0 = 22 \text{ m}$  et que la route se trouve à une hauteur  $h = 25 \text{ m}$  par rapport à la base des pylônes. Supposons également que la vitesse moyenne du vent mesurée à une hauteur de référence de 10 m du sol est de 10 m/s et que la rugosité du terrain correspondant à une zone urbaine est  $z = 0,3$ . Par la suite, nous devons établir les autres paramètres de simulation tels que démontrés dans le Tableau III.3. Pour résoudre les équations du mouvement, nous avons utilisé le logiciel Matlab. On peut également développer un programme informatique en utilisant les langages de programmation connus. Notre choix d'utiliser Matlab est basé sur le fait qu'il possède déjà toutes les librairies nécessaires aux calculs numériques. Les solutions obtenues sont indiquées par les deux (2) figures ci-après. La solution numérique de la distance parcourue en fonction du temps est illustrée sur la Figure III.12; sur la Figure III.13, nous avons l'illustration de la solution numérique de  $y(t)$  qui représente la hauteur où se trouve la particule à chaque instant  $t$ . Comme indiqué sur ces figures, nous pouvons approximer les solutions  $x(t)$  et  $y(t)$  par les expressions suivantes :

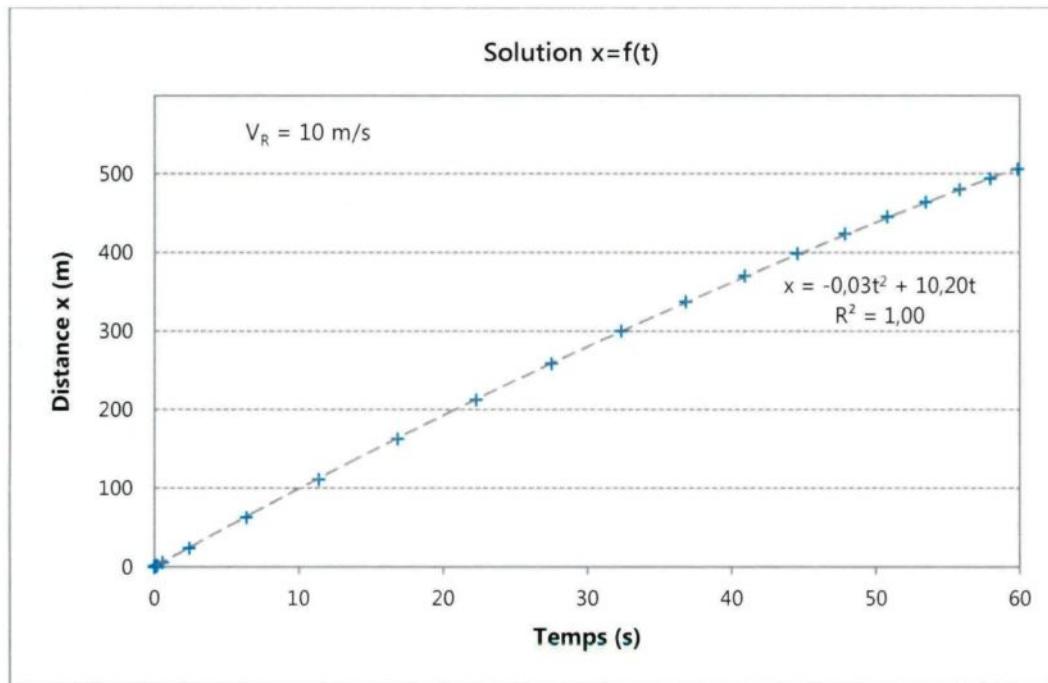
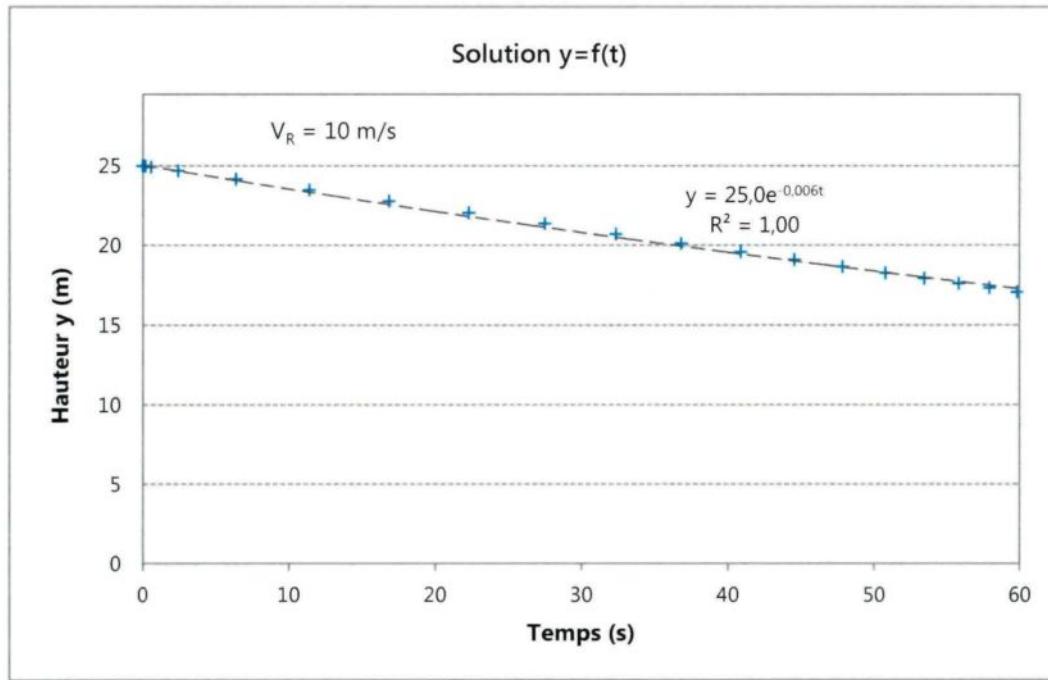
$$x(t) = -0,03t^2 + 10,20t \quad (\text{III.18})$$

$$y(t) = 25,0e^{-0,006t} \quad (\text{III.19})$$

En combinant les deux expressions, nous obtenons la fonction qui détermine la trajectoire de la particule selon l'illustration produite par la Figure III.14 et que nous pouvons approximer avec la loi exponentielle selon l'équation (III.20).

$$y(x) = 25,0e^{-0,0007x} \quad (\text{III.20})$$

De l'équation (III.20), nous constatons que la hauteur où se trouve la particule baisse exponentiellement en fonction de la distance qu'elle a parcourue. Toutefois, la constante de distance est grande ( $\sim 1428$  m), ce qui implique qu'une particule de sel d'une taille de  $50 \mu\text{m}$  peut parcourir quelques kilomètres avant de tomber sur le sol si la vitesse de référence du vent est de  $10 \text{ m/s}$ . Sur la Figure III.14, nous pouvons aussi constater que la trajectoire de la particule coïncide avec la hauteur  $h_0 = 22 \text{ m}$  (hauteur à laquelle sont installés les isolateurs) à une distance d'environ  $175 \text{ m}$ . Cela veut dire qu'une particule de sel qui a été projetée de la route à une hauteur initiale de  $25 \text{ m}$  peut se retrouver au voisinage des isolateurs si la ligne est installée à une distance entre  $150$  et  $200 \text{ m}$  de la route. Donc, si on applique cette hypothèse à une quantité  $Q$  de particules de sel de  $50 \mu\text{m}$  qui sont projetées hors de la route à une hauteur autour de  $25 \text{ m}$ , on pourra s'attendre à un taux d'accumulation important sur les isolateurs dans les mêmes conditions. Par contre, on peut considérer qu'il n'y aura pas de risque d'accumulation si la ligne se trouvait à  $500 \text{ m}$  de la route. D'où, la distance entre la

Figure III.12: Courbe de  $x(t)$ Figure III.13: Courbe de  $y(t)$

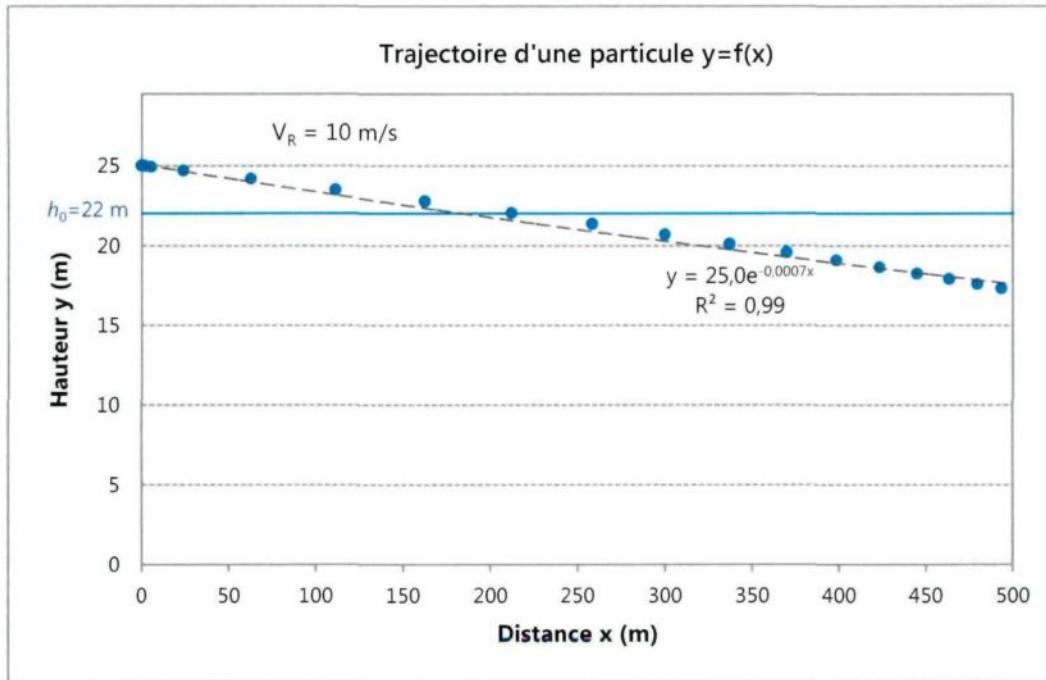


Figure III.14: Courbe de la trajectoire  $y(x)$  pour une particule de  $50 \mu\text{m}$  de diamètre

route et l'emplacement des isolateurs influence le taux d'accumulation de pollution sur ces derniers.

Par ailleurs, il ne faut pas oublier que c'est le vent qui joue le rôle principal dans le transport des particules. Il est clair que si on modifie la vitesse de référence du vent dans ce modèle, on obtiendrait des résultats différents (voir Figure III.15). Plus la vitesse de référence est élevée, plus la même particule est capable de rester en suspension à haute altitude même après une longue distance. De même, la taille des particules peut influencer aussi la longueur de la distance sur laquelle le vent est capable de la transporter comme nous le démontre la Figure III.16. Plus la particule est de grosse taille, plus vite elle perd de l'altitude après une certaine distance en considérant la même vitesse du vent. Il est à noter que le niveau de l'ESDD

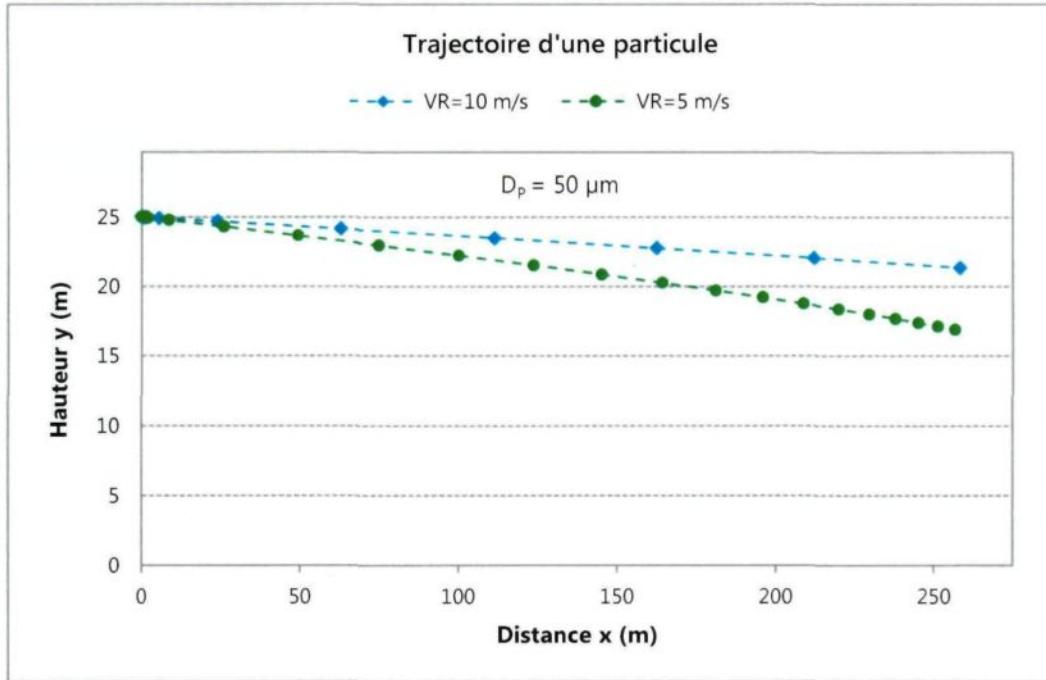


Figure III.15: Trajectoires d'une particule pour différentes vitesses  $V_R$

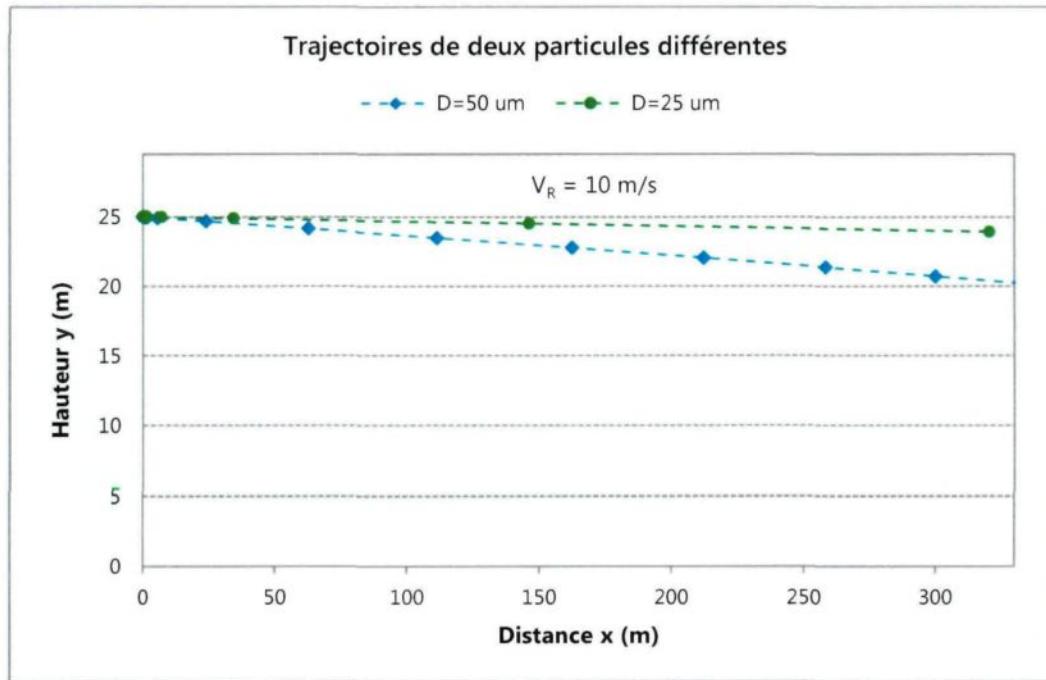


Figure III.16: Trajectoires pour deux particules de différentes grosseurs

obtenue avec des particules de 50 µm serait huit (8) fois plus élevé que celui obtenu avec des particules de 25 µm en supposant que l'ESDD varie au cube du diamètre des particules. Ainsi, durant la phase de transport, le ratio entre la quantité de particules initiale projetée de la route et la quantité qui va se retrouver au voisinage des isolateurs dépend de la combinaison de trois facteurs : la distance, la taille des particules et surtout de la vitesse du vent.

### **III.5 CONCLUSION**

Nous avons expliqué, au cours de la première partie de ce chapitre, la méthodologie que nous avons utilisée pour arriver à un modèle de simulation pour l'accumulation de pollution hivernale sur un isolateur à partir d'un modèle de simulation pour l'accumulation de glace sur un câble. Nous en concluons qu'il est possible de faire cette adaptation en faisant quelques modifications dans le modèle d'accumulation de glace. Toutefois, certaines restrictions s'appliquent :

- ⇒ les particules de pollution doivent être assimilables à de fines particules sphériques;
- ⇒ la surface de l'isolateur doit être décomposée, au préalable, en petits cylindres superposés;
- ⇒ l'accumulation doit se faire sur un isolateur hors tension.

Au reste, il faudrait aussi préciser qu'il s'agit d'un modèle en 2D et ce n'est qu'une première approche à la modélisation plus évoluée qui devrait être réalisée en 3D. Néanmoins, dans les sections à venir, nous allons voir les résultats de simulation obtenus avec ce modèle en 2D pour discuter par la suite de la validité.

Dans la deuxième partie, nous avons proposé un modèle pour la simulation de la phase de transport. Il s'agit d'un modèle préliminaire qui est basé sur le calcul de la trajectoire d'une particule à partir de sa source jusqu'à certaines distances. Bien que ce modèle ne soit applicable que pour une particule à la fois, il pourrait tout de même constituer une base pour développer un modèle complet qui sera capable de simuler le transport d'un échantillon de particules de pollution en condition hivernale. En outre, il a été possible d'analyser l'effet de la distance après avoir effectué un exemple de calcul avec ce modèle préliminaire. De cette analyse, nous en venons à la conclusion que la quantité de particules qui sera transportée jusqu'au voisinage des isolateurs ne dépendra pas uniquement de la distance, mais aussi de la taille des particules et surtout de la vitesse moyenne du vent.

## CHAPITRE IV

### MONTAGE EXPÉRIMENTAL ET MÉTHODOLOGIE

#### IV.1 INTRODUCTION

La réalisation des études expérimentales nécessite la mise en place d'un montage approprié au phénomène étudié, et l'utilisation d'un modèle physique le plus représentatif possible. Étant donné qu'il n'existe pas encore, à notre connaissance, une méthode qui a été développée pour simuler en laboratoire l'accumulation de pollution en condition hivernale, le développement et la mise en place du montage expérimental qui ont été utilisés pour la réalisation de nos investigations font partie intégrante des travaux que nous avons dû réaliser dans le cadre de cette étude. De ce fait, beaucoup de temps a été consacré de la conception jusqu'à sa réalisation.

Ce chapitre a pour but de décrire le montage expérimental ainsi que la méthodologie utilisée pour réaliser l'accumulation de pollution en présence de conditions hivernales. Dans la première partie, il sera question du modèle physique que nous avons établi pour représenter le phénomène de pollution hivernale. Ensuite, pour reproduire ce modèle, il a fallu mettre en place le montage expérimental, lequel est composé d'un élément principal qui est le générateur de pollution. Dans la deuxième partie, nous allons expliquer en détail les différentes

étapes de conception de ce générateur de pollution pour en arriver au modèle final que nous avons utilisé. Ensuite, nous allons décrire les procédures expérimentales établies pour la phase d'accumulation et les méthodes utilisées pour mesurer les taux d'accumulation. Et dans la dernière partie, quelques difficultés et problèmes inhérents aux expérimentations seront soulevés.

## IV.2 MODÈLES PHYSIQUES

Dans un premier temps, nous avons établi les modèles physiques démontrés aux Figures IV.1 et IV.2 dont le principe a été adapté de celui du DMC « Dry-Mixing Contamination Method » [Besztercey et Karady, 2000]. La Figure IV.1 nous indique le modèle physique pour le montage dans la soufflerie réfrigérée et sur la Figure IV.2 nous avons le modèle physique correspondant au montage dans la chambre climatique. Le ventilateur à vitesses variables produit l'effet du vent tandis que le système de refroidissement de la soufflerie ou de la chambre climatique établit la température hivernale. La poudre de kaolin générée par le

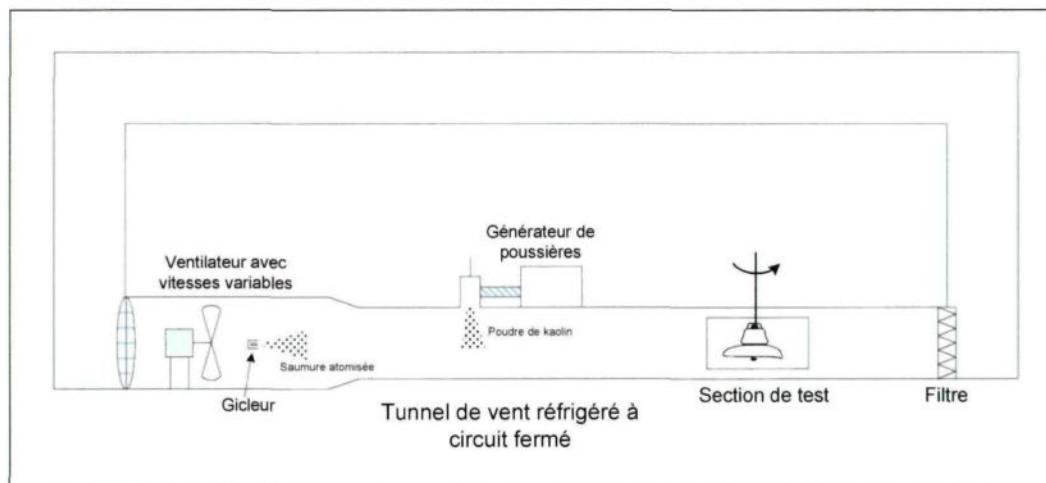


Figure IV.1: Schéma du modèle physique dans la soufflerie réfrigérée.

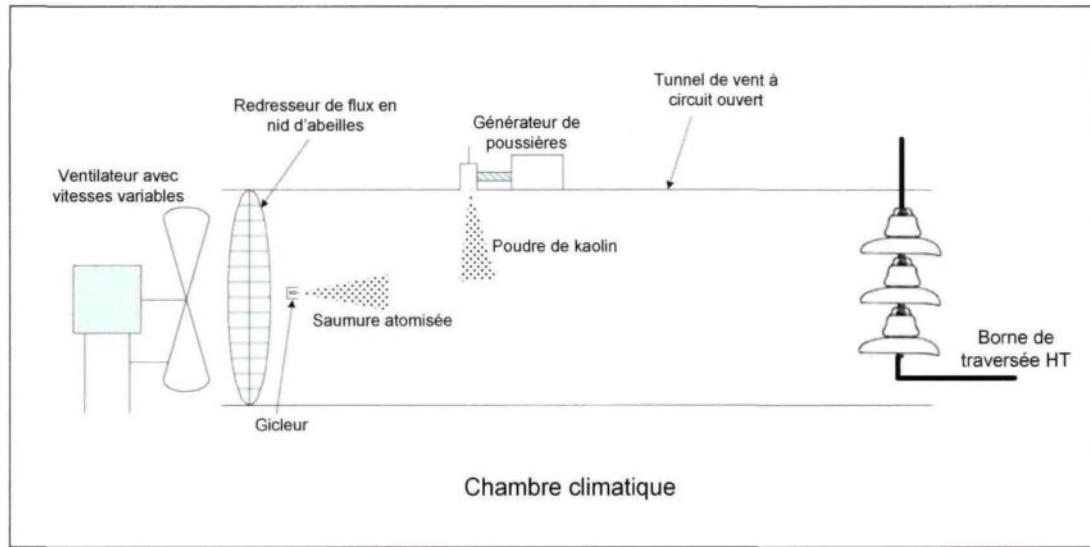


Figure IV.2: Schéma du modèle physique à l'intérieur de la chambre climatique.

générateur de poussières représente les composantes non solubles, et la saumure atomisée par un gicleur représente les composantes solubles. Le mélange des deux composantes forme ainsi la pollution qui se produit sous des conditions hivernales. Cette pollution est transportée dans un écoulement d'air et se dépose à la surface d'un échantillon de disque d'isolateur sous tension ou non, installé à une distance  $d$  du générateur de poudre. La quantité de pollution accumulée, à différentes vitesses du vent, sera évaluée par la suite en utilisant les méthodes de mesures standards.

### IV.3 CONCEPTION ET RÉALISATION DU MONTAGE EXPÉRIMENTAL

Le montage expérimental, utilisé pour la réalisation de cette étude, est composé de quatre éléments essentiels : le générateur de pollution, la soufflerie réfrigérée, la chambre climatique et les équipements de mesure.

### **IV.3.1 Le générateur de pollution**

Le générateur de pollution est considéré comme l'élément principal de ce montage. De ce fait, beaucoup de temps a été consacré dans le cadre de cette thèse, pour sa conception jusqu'à sa réalisation.

#### ***IV.3.1.1 Conception***

Selon la classification des types de pollution donnée par la norme IEC 60815 [2008], la pollution durant l'hiver est principalement de type A, c'est-à-dire, composée d'une partie soluble et d'une partie non soluble. De ce fait, le générateur de pollution doit être conçu de telle sorte qu'il puisse produire le mélange de ces deux composants. Selon les normes en vigueur pour les tests de pollution [CEI 60507, 1991; IEEE 4, 1995], la partie soluble est composée de NaCl tandis que la partie non soluble est composée soit de kaolin, de tonoko ou de kieselguhr (terre d'infusoires, diatomées). Dans le cadre de cette étude, nous avons opté pour le kaolin car c'est le seul produit largement disponible et utilisé en Amérique du Nord, donc le seul qui était disponible à la CIGELE.

Les critères de conception du générateur ont été déterminés par la suite à partir du choix de la méthode appropriée pour pouvoir étudier l'effet du vent sur le taux d'accumulation. Parmi les nombreuses méthodes mentionnées dans le chapitre II, le DMCM fût retenu car son concept est plus simple et aussi plus facile à adapter à cette étude en particulier. Notons qu'il n'existe pas encore à notre connaissance une méthode qui a été développée pour simuler l'accumulation de la pollution hivernale. Comme nous l'avons mentionné antérieurement, le DMCM est une méthode d'accumulation de pollution basée sur le mélange à sec de deux

composants susmentionnés. Son principe comporte trois étapes : la première étape est le mélange externe des particules solides et de la saumure atomisée, lequel est suivi par la suite, à la deuxième étape, par l'adsorption de la saumure à la surface des particules solides facilitant l'accumulation de ces dernières à la surface de l'isolateur à la dernière étape.

La mise en place de cette méthode requiert donc trois buses dont la disposition est indiquée à la Figure IV.3. Deux des buses sont utilisées pour injecter respectivement les particules solides et la saumure tandis que la troisième sert à introduire de l'air sous pression. Dans leur article portant sur la DMCM, Besztercey et Karady [2000] ont déterminé les paramètres optimaux suivants pour le bon fonctionnement de cette méthode :

- ⇒ 5,080 mm ( $\frac{1}{5}$  po) de diamètre pour l'orifice de la buse d'air;
- ⇒ 1,270 mm ( $\frac{1}{20}$  po) de diamètre pour celle de la buse de liquide;
- ⇒ 3,175 mm ( $\frac{1}{8}$  po) de diamètre pour celle de la buse des particules solides;
- ⇒ 552 kPa (80 psi) pour la pression d'air;
- ⇒ 0,611 m (2 pieds) pour la distance entre le générateur de pollution et l'isolateur;
- ⇒ 9,144 mm/s (0,36 po/s) pour la vitesse d'alternance de la buse.

Avec ces paramètres, le débit volumique de liquide fourni est de 30 ml/min et pour les particules solides, le débit massique est de 40 g/min.

Ainsi, pour la conception de notre générateur de pollution, nous nous sommes basés sur le plan du montage indiqué à la Figure IV.3. Quant aux critères de dimensionnement, nous

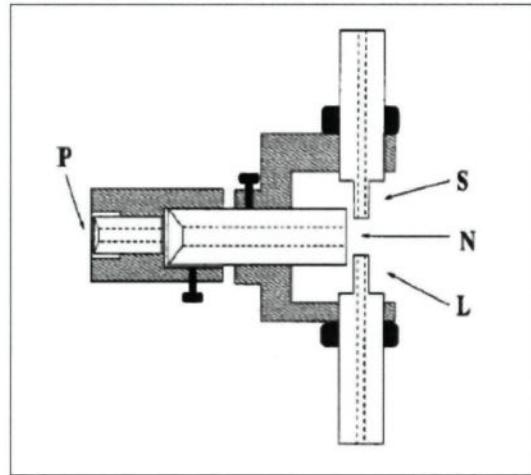


Figure IV.3: Disposition des buses. P-buse d'air principal, N-buse de sortie d'air, S-buse des particules solides, et L-buse du liquide [Besztercey et Karady, 2000].

avons utilisés les paramètres susmentionnés comme références de base. Toutefois, un autre critère a dû être ajouté. Il s'agit de l'opérabilité en présence de conditions hivernales. Étant donné que cette méthode a été développée pour un fonctionnement dans une température ambiante, des modifications ont dû être apportées pour adapter son application en condition hivernale. Les détails de ces modifications seront présentés dans la section suivante sur la réalisation.

#### **IV.3.1.2 Réalisation**

La première idée qui nous est venue pour la réalisation du générateur de pollution, selon le concept présenté précédemment, est l'utilisation d'un pistolet à peinture avec un connecteur en Y pour relier les deux réservoirs contenant respectivement de la saumure et de kaolin (voir Figure IV.4). Les deux composants sont mélangés dans le pistolet avant d'être expulsés par un jet d'air comprimé en actionnant le pistolet. À la sortie de ce dernier, on obtient des particules de pollution prêtes à contaminer la surface de l'isolateur. L'avantage de l'utilisation d'un

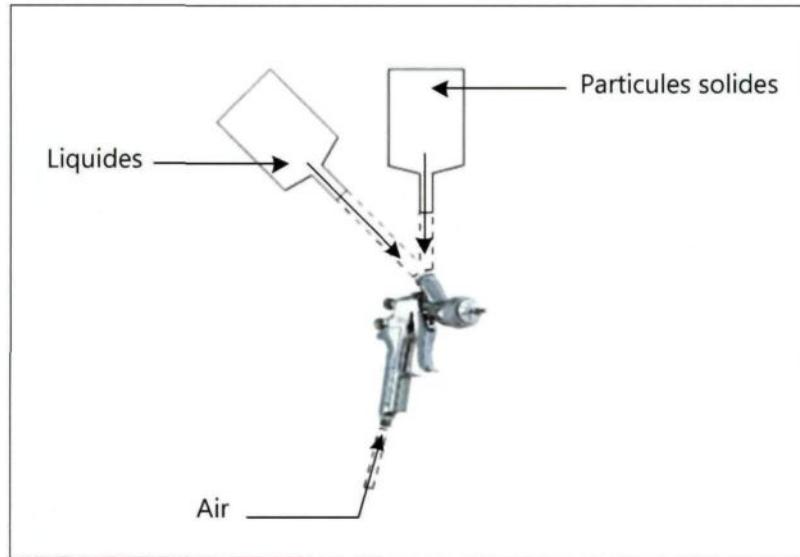


Figure IV.4: Premier prototype du générateur de pollution.

pistolet à peinture est que toutes les buses étaient déjà en place et nul n'est besoin d'en fabriquer. Mais malgré cet avantage, ce système présente beaucoup d'inconvénients à savoir un encrassement rapide à l'intérieur du pistolet dû au kaolin humidifié, ce qui bloque l'orifice de la buse après quelques secondes. Il est également difficile de contrôler et de mesurer le débit volumique de la saumure ainsi que le débit massique du kaolin. De ce fait, l'idée d'utiliser un pistolet à peinture comme générateur de pollution fut très vite abandonnée.

Pour la deuxième réalisation, nous avons procédé à la fabrication du générateur de pollution selon la disposition indiquée à la Figure IV.3, c'est-à-dire, trois buses dont le diamètre respectif de chaque orifice est tel que spécifié selon les paramètres optimaux définis précédemment. Le système réalisé est présenté à la Figure IV.5. Un réservoir de kaolin est raccordé à une buse pour les particules solides, et un réservoir d'eau salée est raccordé à une buse pour le liquide. Le tout est monté avec la buse d'air sur un support permettant

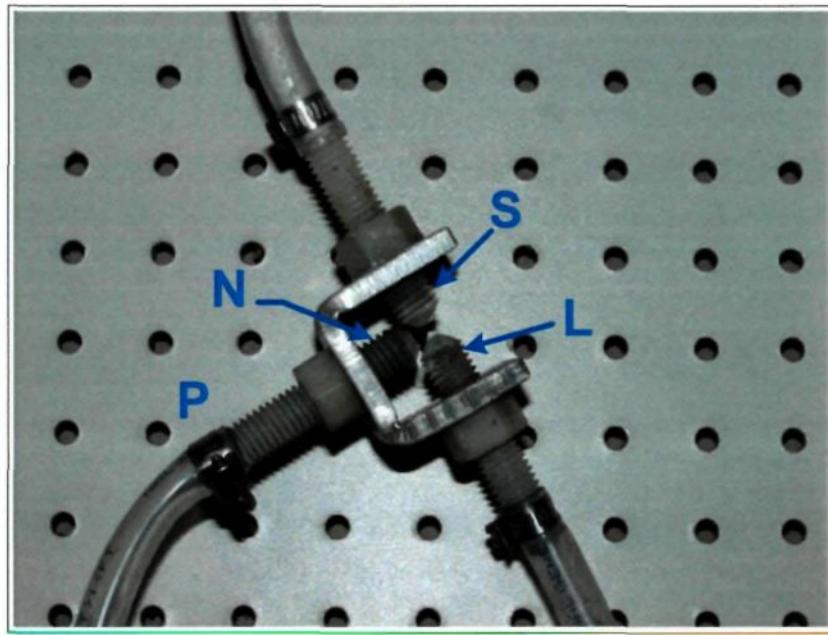


Figure IV.5: Deuxième prototype du générateur de pollution. P–buse d'air principal, N–buse de sortie d'air, S–buse des particules solides, et L–buse du liquide.

l'ajustement de la distance entre les trois buses. L'avantage de ce système est que le mélange saumure – kaolin se fait à l'extérieur, ce qui empêche théoriquement l'encrassement de l'orifice de la buse pour le kaolin. Mais d'autres problèmes sont survenus, nuisant au bon fonctionnement du générateur. Parmi ces problèmes, il y a discontinuité de l'apport en kaolin. Secouer le réservoir nous semblait être la solution pour remédier à ce problème, mais cela n'a pas été suffisant pour maintenir un écoulement continu de kaolin. L'agglomération de ce dernier à l'intérieur de la buse provoque un colmatage. Même avec un diamètre de 3,175 mm ( $\frac{1}{8}$  po) pour l'orifice de la buse, il nous était difficile de contrôler le débit massique de kaolin. Pareillement en ce qui concerne le débit volumique de l'eau. En principe, la succion provoquée par le jet d'air à l'orifice de la buse de liquide, devrait théoriquement permettre à la solution saline de monter de son réservoir jusqu'à la sortie de l'orifice de la buse où elle sera atomisée.

Mais lors des essais avec le système, ce ne fut pas le cas. Malgré l'ajustement de la distance entre la buse d'air et la buse de liquide, il était difficile de contrôler le débit de la saumure. Il est à noter que ce type de configuration des buses pour pulvériser de la saumure, en utilisant un mélange externe de cette dernière avec de l'air comprimé, est utilisé dans la méthode du brouillard salin. Cependant, la pulvérisation obtenue (et donc la distribution des diamètres de particules d'aérosols) est mal contrôlée comparativement au technique de mélange interne de ces deux fluides ou aux gicleurs ultrasoniques. Par conséquent, nous avons dû abandonner l'utilisation de ce système et trouver une autre solution de recharge.

Pour les deux premiers systèmes que nous avons réalisés, l'encrassement du kaolin dans la buse et la difficulté à contrôler le débit volumique de la saumure ainsi que le débit massique du kaolin, étaient les principaux obstacles au bon fonctionnement du générateur de pollution. La solution que nous avons trouvée est d'apporter des modifications à la disposition présentée à la Figure IV.3. En conservant le même principe que la DMCM, les modifications suivantes ont été apportées pour la réalisation du système de génération de pollution :

- ⇒ utiliser un générateur de poudre muni d'un régulateur de débit au lieu d'un simple réservoir pour assurer un apport constant de kaolin et pour mieux contrôler son débit;
- ⇒ combiner la buse d'air et celle de l'eau salée en un seul gicleur, ce qui permettra d'avoir une atomisation constante. L'utilisation d'un débitmètre est aussi requise pour le contrôle du débit. Le gicleur doit être installé à au moins 0,305 m (1 pi) de la sortie de kaolin pour éviter un encrassement éventuel.

La sélection du générateur de poudre convenable s'est déroulée en comparant les caractéristiques de quelques appareils potentiels trouvés après une recherche intensive sur Internet. À la suite de cette étude comparative, il nous a paru judicieux d'opter pour le SAG 410L, illustré à la Figure IV.6, pour son rapport convenance/prix. Les détails sur les spécifications et le fonctionnement de cet appareil se trouvent à l'Annexe I. En résumé, il s'agit d'un générateur d'aérosols solides que l'on utilise généralement pour disperser des poudres sèches dans les procédés industriels ou des travaux de contrôle de qualité. L'apport en continu de matériau au disperseur et la dispersion du matériau sous forme d'aérosols font partie de la technique utilisée par cet appareil pour disperser les poussières sèches et les poudres avec un taux d'alimentation constant et reproductible sur une large gamme. De ce fait, il convient à de nombreuses applications incluant la nôtre. Hormis son coût qui nous a paru un peu élevé au départ, nous ne voulions pas prendre de chance pour choisir un autre appareil moins cher qui pourrait ne pas convenir à notre application.

La deuxième partie du nouveau concept de générateur de pollution est le système d'atomisation de l'eau salée. Il est composé d'un gicleur muni d'une entrée d'eau et d'air, d'un débitmètre et d'un réservoir. Heureusement, le système était déjà bien en place dans notre laboratoire, donc aucune modification n'a été apportée sauf pour le débitmètre qu'on a dû remplacer car celui qui était là auparavant ne convenait pas pour le faible débit avec lequel nous travaillons.

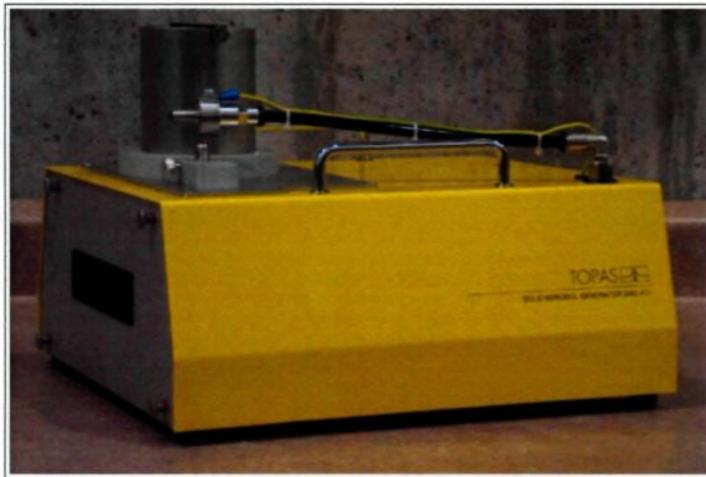


Figure IV.6: Générateur d'aérosols solides à faible débit SAG 410L.

Après l'acquisition de l'appareil SAG 410L, la mise en place du montage en vue des premières expériences s'est poursuivie avec l'installation du générateur de pollution dans la soufflerie réfrigérée et ensuite dans la chambre climatique dont nous allons décrire dans la section suivante.

#### **IV.3.2 Montage réalisé dans la soufflerie réfrigérée**

La soufflerie réfrigérée, avec son mode de fonctionnement en circuit fermé, sert à simuler la vitesse du vent lors de la phase d'accumulation. Comme nous pouvons le voir sur la Figure IV.7, elle comporte plusieurs sections dont la longueur totale est d'environ 28 m. Elle se divise en deux parties : la chambre d'essai avec ses 4,5 m de longueur, 3,5 m de largeur et 3 m de hauteur, et le canal de circulation du vent.

Pour générer le vent, la soufflerie est équipée d'un moteur électrique de 45 kW dont le régime de fonctionnement est modifiable à l'aide d'un logiciel de contrôle. Ce dernier permet



Figure IV.7: Soufflerie réfrigérée de la CIGELE.

de varier la fréquence de rotation entre 0 et 60 Hz, correspondant à des vitesses de vent allant de 0 à 30 m/s. Un système de réfrigération à l'ammoniaque relié à un panneau de contrôle équipe également le tunnel pour permettre de travailler à des températures hivernales jusqu'à -30°C avec une précision de  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Les mesures de la température de l'air circulant dans le tunnel sont obtenues à partir de deux équipements : un détecteur de température à l'aide d'une résistance (RTD) et des thermocouples de type T à différents endroits.

Le montage réalisé dans la soufflerie réfrigérée selon le modèle physique sur la Figure IV.1 est illustré à la Figure IV.8. Nous avons installé le générateur de poussières SAG 410L sur le dessus de la section de tests qui est située dans la chambre d'essai. Un tube en cuivre relié à la sortie de l'appareil permet d'introduire la poudre de kaolin à l'intérieur de cette section de 3,05 m de longueur, 0,90 m de largeur et 0,45 m de hauteur, laquelle est fermée, amovible et

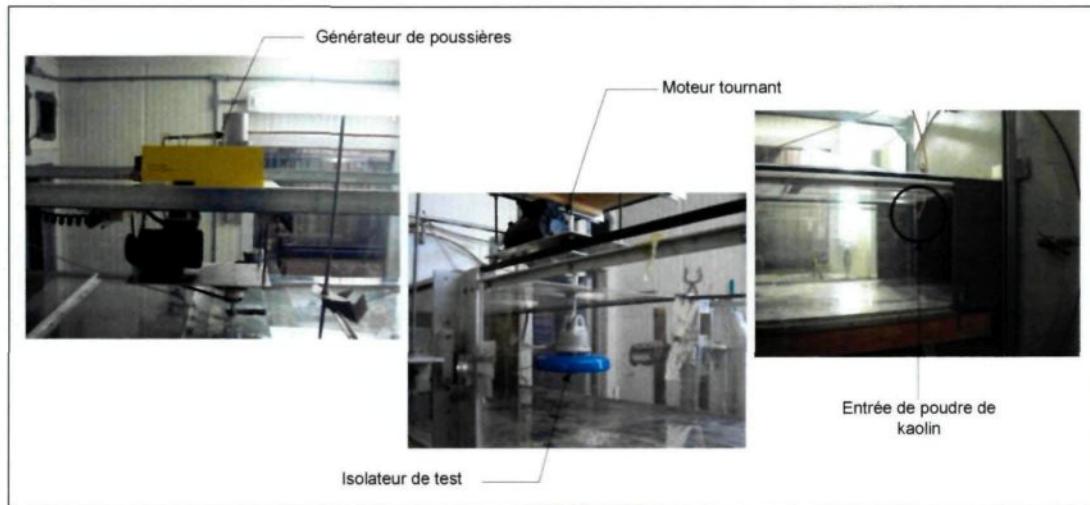


Figure IV.8: Photos du montage dans la chambre de test de la soufflerie réfrigérée.

faite de plexiglass. Un support fixé à un moteur tournant se trouve au centre de la section pour y suspendre un disque d'isolateur. La distance entre l'entrée de poudre et le centre de la section est d'environ 0,75 m. Ce qui respecte la distance optimale de 0,611 m (2 pi) requise. La tige du disque d'isolateur est aussi fixée à la paroi inférieure de la section de tests à l'aide d'un support spécialement conçu [M. Duchesne, 2006].

Pour compléter le système de génération de pollution, le gicleur au centre parmi les trois installés près du puissant ventilateur du tunnel a été utilisé. Ce gicleur est muni de deux (2) entrées : l'une d'elle est reliée à un réservoir d'eau salée sous pression dont le débit est régularisé à l'aide d'un débitmètre; l'autre entrée est reliée à un tuyau d'air comprimé dont la pression est ajustée grâce à un manomètre muni d'une vanne régulatrice. Les paramètres de réglages sont fixés selon le besoin des expériences. Pour éviter le gel ou la formation de glace

autour du gicleur, ce dernier est entouré d'un fil chauffant relié à un panneau de contrôle qui régule sa température de fonctionnement.

#### IV.3.3 Montage réalisé dans la chambre climatique

Pour réaliser l'accumulation de pollution sous haute tension, la chambre climatique n°1 de la CIGELE a été utilisée étant donné l'impossibilité de réaliser ce type d'expérience dans la soufflerie réfrigérée pour des raisons techniques. À l'intérieur de la chambre climatique n°1, le montage réalisé est un peu différent de celui dans la soufflerie réfrigérée comme nous le démontre la Figure IV.9 et la Figure IV.10. La chambre climatique de  $4 \times 4 \times 4 \text{ m}^3$  est aussi équipée d'un système d'arrosage formé d'un ensemble de gicleurs, des ventilateurs, d'une borne de traversée pour la haute tension et d'un système de refroidissement. Pour compléter

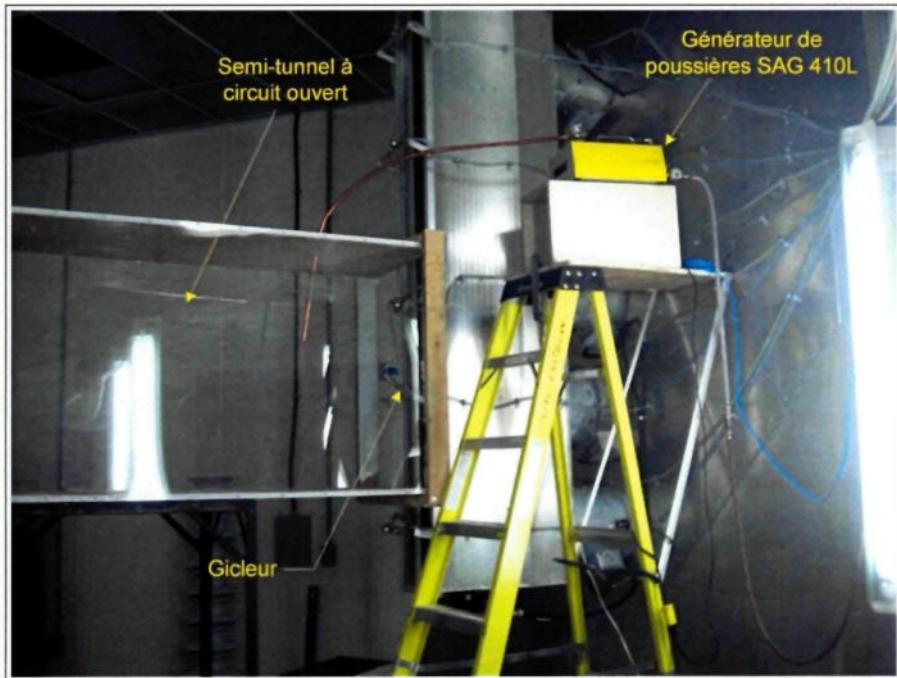


Figure IV.9: Générateur de pollution installé dans la chambre climatique.

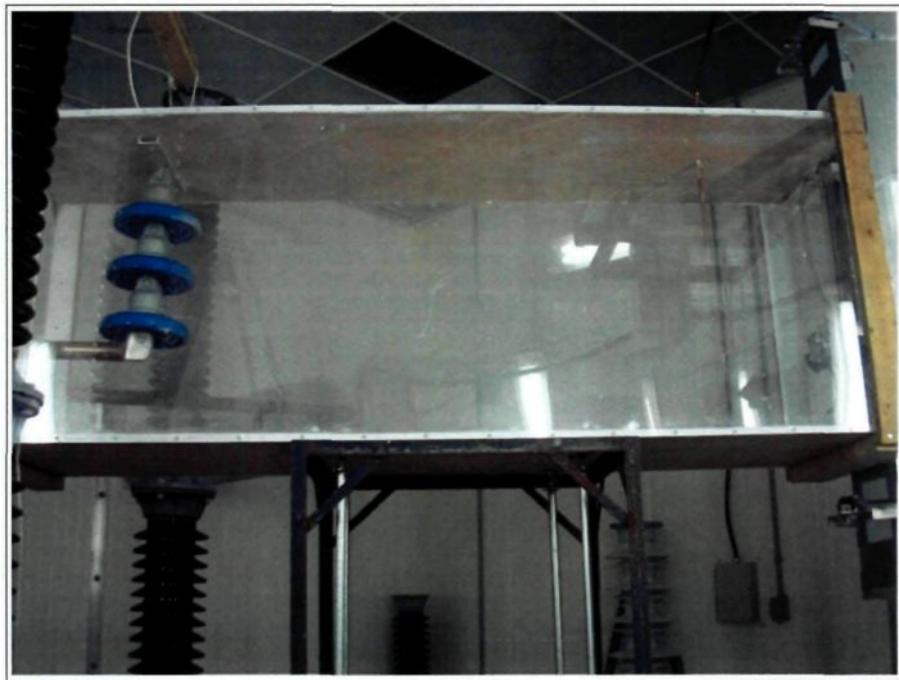


Figure IV.10: Chaîne d'isolateurs installée dans le semi-tunnel de vent à circuit ouvert.

le modèle physique tel que démontré sur la Figure IV.2, un semi-tunnel d'une section de  $1 \times 1 \text{ m}^2$  a été conçu et installé dans la chambre. Tous les détails concernant la conception et la réalisation de ce semi-tunnel sont expliqués dans le rapport de M. Duchesne [2006] dans le cadre de son projet de fin d'études. Ce semi-tunnel est nécessaire pour reproduire l'équivalent des conditions expérimentales dans la soufflerie réfrigérée. Toutefois, les différences fondamentales sont au niveau des dimensions de la section de tests qui sont plus grandes pour le semi-tunnel. Le vent circule également dans un circuit ouvert à l'intérieur du semi-tunnel contrairement au tunnel de vent à circuit fermé de la soufflerie. L'entrée de particules solides est installée au début du semi-tunnel, à une certaine distance du gicleur d'eau salée. La poudre de kaolin est amenée à l'intérieur du semi-tunnel à l'aide d'un tube en cuivre relié à la sortie du générateur de poussières SAG 410L, lequel est posé sur un support mécanique situé à côté de

la section avant du semi-tunnel. Une chaîne de trois disques d'isolateur est suspendue près de la sortie du semi-tunnel, à l'aide d'un support fixé à la paroi supérieure du semi-tunnel et d'un autre support relié à la borne de traversée HT.

Pour produire un brouillard de gouttelettes d'eau salée en surfusion, un seul gicleur parmi l'ensemble de gicleurs montés sur un support vertical constituant le système d'arrosage est utilisé. Ces gouttelettes vont se mélanger avec la poudre de kaolin produite par le SAG 410L, formant ainsi les particules polluantes qui seront entraînées par la suite par le vent généré par les ventilateurs installés en aval des gicleurs. La vitesse du vent peut être modifiée à l'aide d'un panneau de contrôle qui varie la fréquence de rotation des ventilateurs entre 1 et 60 Hz. La vitesse maximale du vent atteinte à l'intérieur du semi-tunnel, à l'emplacement des isolateurs, est de 20 m/s.

En ce qui concerne le système de refroidissement de la chambre climatique, il est constitué d'une unité frigorifique suspendue au plafond, facilitant l'échange de chaleur pour uniformiser la température. Un contrôleur PID, relié à un thermocouple, maintient la température qui peut être baissée jusqu'à  $-30^{\circ}\text{C}$  avec un écart de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ .

#### **IV.3.4 Les instruments de mesures**

Pour relever les mesures nécessaires dans le cadre de cette étude de l'effet du vent sur l'accumulation de la pollution durant la saison hivernale, quelques instruments de mesures ont été utilisés. Tout d'abord pour évaluer l'*ESDD*, deux mesures sont nécessaires : la conductivité et le volume de l'eau utilisée pour laver l'isolateur après que ce dernier ait été contaminé.

La mesure de la conductivité a été prise avec un conductimètre de marque YOKOGAWA modèle SC72 dont les caractéristiques se trouvent à l'Annexe II. Pour le volume, il a été mesuré à l'aide d'une éprouvette graduée de 0 à 500 ml avec une précision de 1 ml par division. Dans la soufflerie réfrigérée, ainsi que dans la chambre climatique, l'utilisation d'un anémomètre a permis d'établir les courbes de corrélation entre la vitesse du vent et la fréquence de rotation du moteur. Pour connaître l'humidité relative et le point de rosée dans la chambre climatique, un hygromètre numérique de marque DICKSON modèle TH550 a été utilisé (voir Annexe III pour les spécifications). Dans le tunnel, ces mesures sont données directement par un afficheur numérique installé à l'extérieur de la chambre d'essai. Les données envoyées à l'afficheur proviennent cependant d'une sonde posée à l'intérieur de la section d'essai.

#### **IV.4 PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES ET MÉTHODOLOGIE POUR LA PRISE DE MESURES**

Cette section explique les procédures expérimentales qui ont été suivies pour réaliser l'accumulation de pollution et présente la méthodologie qui a été utilisée pour prendre les mesures nécessaires afin d'évaluer convenablement le taux d'accumulation. Quelques difficultés et problèmes rencontrés au cours des expérimentations seront aussi soulevés à la fin de cette section.

##### **IV.4.1 Procédures expérimentales pour la phase d'accumulation**

Le déroulement des expériences se passe en deux étapes : la préparation qui consiste à faire les mises au point de départ avant de procéder à la deuxième étape qui est la phase

d'accumulation proprement dite. Les procédures à suivre pour ces deux étapes sont telles que décrites dans l'Annexe IV.

#### **IV.4.2 Méthodologie pour la prise de mesures**

Une fois l'accumulation terminée, nous avons appliqué la méthodologie décrite dans cette section pour relever les mesures pour les besoins de l'évaluation de la quantité de pollution qui s'est accumulée sur l'isolateur de test.

##### ***IV.4.2.1 Prise de mesures pour l'ESDD***

Avant toute manipulation, tous les équipements tels que récipients, éprouvettes graduées, conductimètre, etc., ont été soigneusement lavés afin d'enlever toutes électrolytes initiales aux mesures. La technique que nous avons utilisée pour pouvoir relever les mesures nécessaires à l'évaluation de l'ESDD est celle du coup de torchon telle que décrite dans l'Annexe V.

Une fois les valeurs de la conductivité recueillies, l'ESDD correspondante sera déterminée en utilisant les formules mentionnées dans le chapitre II.

##### ***IV.4.2.2 Prise de mesures pour la NSDD***

Après avoir relevé les mesures pour l'ESDD, l'eau de lavage sera filtrée en utilisant un bécher muni d'un dispositif à succion (voir Figure IV.11), une pompe à vide, et un papier filtre. La procédure à suivre telle que démontrée à la Figure IV.12 est la suivante :

- ⇒ peser le papier filtre sec avant le filtrage avec une balance de haute précision. Noter le poids obtenu;

- ⇒ filtrer l'eau de lavage à travers le papier filtre;
- ⇒ sécher le papier filtre;
- ⇒ peser de nouveau le papier filtre sec avec et noter la valeur donnée par la balance.



Figure IV.11: Dispositif utilisé pour la mesure de la NSDD.

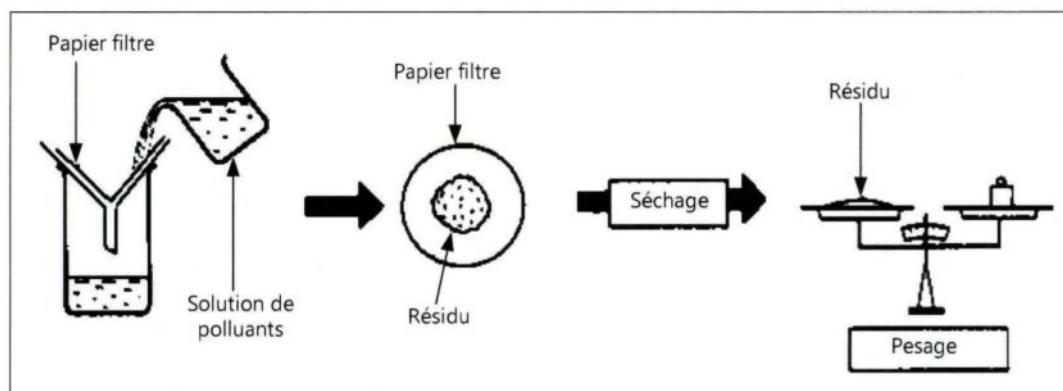


Figure IV.12: Schéma de la procédure pour la mesure de la NSDD [IEC 60815, 2008].

La valeur de la *NSDD* correspondant à la différence entre le poids du filtre avant et après le filtrage sera déterminée par la suite en utilisant la formule mentionnée dans le chapitre II.

#### **IV.4.3 Quelques difficultés et problèmes rencontrés**

Pour les expériences qui se sont déroulées dans la chambre climatique, nous avons dû faire face à certains problèmes techniques. Parmi ceux-ci, la durée de l'arrivée d'eau au gicleur pour les expériences subséquentes est trop longue. En effet, en fermant la vanne pour l'alimentation d'eau salée – il s'agit de la vanne située à la sortie du débitmètre – à la fin de chaque expérience, l'eau restée dans le bout du tuyau qui se trouve à l'intérieur de la chambre se vide graduellement. Ainsi, lorsqu'on débute la prochaine expérience, en ouvrant la vanne, l'eau salée met du temps avant d'arriver au gicleur à cause de son débit qui est faible. Pour remédier à ceci, nous avons dû installer une vanne électrique de type on/off directement avant le gicleur. Ceci a pour effet de couper l'arrivée d'eau au gicleur sans avoir à fermer la vanne qui se trouve à la sortie du débitmètre, à l'extérieur de la chambre. Il arrive parfois aussi que du liquide se retrouve dans le tuyau d'air. Cet incident a pour effet d'obstruer la circulation d'air et d'en modifier son débit.

En ce qui concerne la mesure de la *NSDD*, le filtrage de l'eau de lavage nous était impossible à réaliser pour des problèmes techniques. En utilisant la méthode mentionnée dans le chapitre II, les pores du filtre sont obstrués après juste quelques secondes car la quantité de matières non solubles présentes dans l'eau de lavage est considérable. De ce fait, l'aspiration à vide ne fonctionne plus. Il faudrait procéder à un filtrage progressif en utilisant au moins deux

filtres de grades différents. Cela nécessite, cependant l'acquisition d'un système sophistiqué et très coûteux.

Ayant pris conscience de ce problème lors du filtrage, nous avons essayé de trouver une méthode alternative pour évaluer rapidement la quantité de matières non solubles. Ainsi, nous nous sommes basés sur le principe démontré à la Figure IV.13 pour concevoir un appareil de mesure. Le principe consiste à mesurer la luminosité en fonction de l'opacité de la solution. En connaissant la masse du kaolin ajouté dans la solution, on établit une courbe d'étalonnage définissant la relation masse versus opacité. Pour étalonner l'appareil de mesure, la procédure est la suivante :

- ⇒ Mettre 500 ml d'eau distillée dans l'appareil. Bien fermer le couvercle;
- ⇒ allumer la diode pour émettre une intensité lumineuse;
- ⇒ mesurer la tension obtenue à la sortie du photomultiplicateur (PMT). Il s'agit du modèle R3896 de Hamamatsu Photonics, dont le temps de montée est de 22 ns ;
- ⇒ éteindre la diode;
- ⇒ commencer à introduire dans l'appareil une infime quantité de kaolin (environ 2 mg);
- ⇒ bien mélanger pendant 10 secondes. Fermer le couvercle par la suite;
- ⇒ allumer de nouveau la diode;
- ⇒ mesurer la tension correspondante à la sortie du PMT. Une légère diminution devra être observée;
- ⇒ répéter les étapes 4 à 8 jusqu'à l'obtention d'une grande plage de données;

- ⇒ tracer par la suite la courbe d'étalonnage présentant la variation de la tension de sortie en fonction du poids du kaolin qui a été mélangé avec l'eau distillée;
- ⇒ tester l'étalonnage obtenu. Pour ce faire, bien nettoyer l'appareil et le remplir par 500 ml d'eau distillée. Ensuite prendre une quantité quelconque de kaolin, pesée préalablement, que nous allons nommer  $m_0$ . Mélanger cette quantité avec l'eau distillée dans l'appareil. Fermer le couvercle et mesurer la tension correspondante après avoir allumé la diode. Rapporter cette valeur sur la courbe et déterminer la masse équivalente, qui sera  $m_1$ . Calculer l'erreur relative par rapport à  $m_0$ .

Nous avons trouvé que l'étalonnage de l'appareil est fiable pour des quantités minimes de matières non solubles, mais il devient inefficace pour les grandes quantités ( $\geq 80$  mg). En effet, lorsque la quantité à mesurer dépasse cette valeur, la saturation fait en sorte que l'opacité du mélange ne change plus. Donc il serait difficile d'évaluer précisément la quantité présente dans

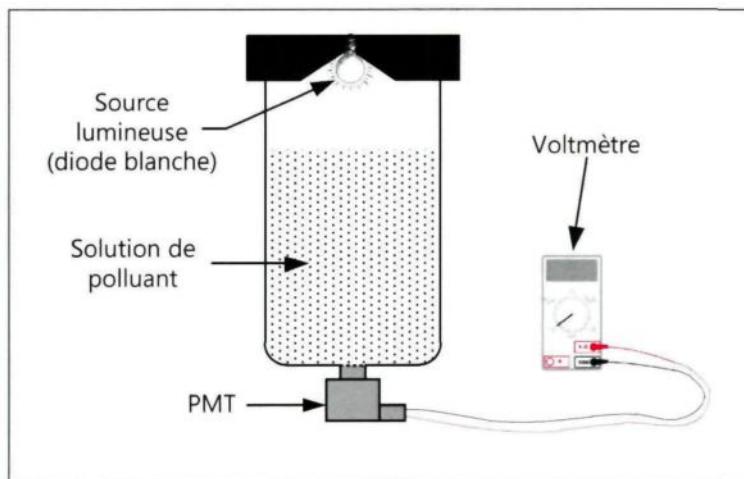


Figure IV.13: Schéma de principe alternatif pour la mesure de la NSDD.

le liquide. De ce fait, nous avons dû abandonner l'utilisation de cet appareil car il n'était pas fiable dans la plage à l'intérieur de laquelle nous voulions l'utiliser.

#### **IV.5 CONCLUSION**

Le montage expérimental a été conçu dans le but d'obtenir des résultats expérimentaux sur le taux d'accumulation de pollution à la surface des isolateurs sous conditions hivernales. Des procédures détaillées ont été établies afin de s'assurer du bon déroulement des expériences et les méthodes standards ont été utilisées pour effectuer les prises de mesures. Le montage pour les expériences en absence de source de tension a été installé à la fois dans la soufflerie réfrigérée et dans la chambre climatique. Quant au montage pour les expériences en présence de sources de tension, celui-ci a été installé exclusivement dans la chambre climatique. Suite à de nombreux problèmes rencontrés durant les mises au point dans la chambre climatique, des modifications ont dû être apportées au montage. Avec les équipements à notre disposition, il nous a été impossible d'effectuer convenablement la mesure de la *NSDD* selon la méthode standard. Ainsi, la prise de cette mesure fût abandonnée et seules les mesures relatives à l'évaluation de l'*ESDD* ont été réalisées pour l'ensemble des expériences.

## CHAPITRE V

# ÉTUDE DE L'INFLUENCE DE LA VITESSE DU VENT SUR LE TAUX D'ACCUMULATION DE LA POLLUTION HIVERNALE

### V.1 INTRODUCTION

L'étude de la variation du taux d'accumulation de pollution en fonction de la vitesse du vent sous conditions hivernales est le principal objectif de nos investigations. En se servant des deux (2) méthodologies que nous avons présentées précédemment, il a été possible d'obtenir des résultats nous permettant de déterminer la corrélation entre ces deux variables. Dans la première partie de ce chapitre, les résultats provenant de la simulation numérique bidimensionnelle par ordinateur sont analysés et discutés. La discussion de ces résultats porte essentiellement sur la loi qui régit la relation entre le taux d'accumulation et la vitesse du vent. En outre, les influences de certains paramètres sur cette relation sont aussi analysées. Dans la deuxième partie, il sera question des résultats expérimentaux. Tout d'abord, les résultats obtenus dans la soufflerie réfrigérée sont analysés et discutés en faisant ressortir la relation empirique entre l'ESDD et la vitesse du vent ainsi que son implication théorique et pratique. Ensuite, nous allons poursuivre avec l'analyse et la discussion des résultats obtenus dans la chambre climatique en mettant l'accent sur l'effet de la force diélectrophorétique. Dans la troisième partie, il sera question de la comparaison des résultats de simulation numérique et

expérimentaux afin de ressortir les points communs entre les modèles. Et pour terminer ce chapitre, une étude comparative avec des cas réels d'exposition sera présentée.

## V.2 SIMULATIONS NUMÉRIQUES BIDIMENSIONNELLES

### V.2.1 Paramètres

Comme nous l'avons présenté dans le chapitre III, deux types de paramètres d'entrée sont utilisés pour exécuter les simulations. Les conditions de pollution sont des variables définies par l'environnement où se déroule le processus d'accumulation alors que les paramètres de simulation sont des variables dont les valeurs sont définies pour le besoin de l'observation. Puisqu'il s'agit de la pollution hivernale, les substances polluantes sont représentées par des particules de NaCl en aérosol. Dans le Tableau V.1, nous avons les valeurs définies pour chaque paramètre.

Tableau V.1: Paramètres d'entrée

Type	Conditions de simulation
Conditions de pollution	Vitesse du vent : $V = 5 - 20 \text{ m/s}$ Température de l'air : $T = -15^\circ\text{C}$ Taille des particules : $MVD = 15 \mu\text{m}$ Quantité totale de particules en suspension : $TSP = 30 \mu\text{g/cm}^3$
Paramètres de simulation	Durée de l'accumulation : $t = 24 \text{ h}$ Temps de simulation : $t_s = 10 \text{ min}$ Dimensions du disque : $D_{top} = 92 \text{ mm}, D_{inf} = 254 \text{ mm}, H = 44 \text{ mm}$

Pour la vitesse du vent et la température de l'air, nous avons choisi des valeurs typiques en hiver. Quant à la taille des particules, nous avons choisi la valeur minimale qui donne des résultats significatifs pour le taux d'accumulation. Et pour la quantité totale de particules en suspensions, nous avons pris une valeur typique du site Richview T.S [Chisholm et al., 1993]. Par rapport à la durée de l'accumulation, nous avons choisi 24 heures pour avoir une moyenne journalière. Le temps de simulation utilisé est de 10 min pour accélérer le calcul.

## V.2.2 Résultats numériques

La seule variable de sortie de notre modèle numérique est la masse de particules accumulées à la surface de l'isolateur. En divisant cette masse par une période de contamination d'une journée, nous obtenons un taux d'accumulation exprimé en mg/jour. Ensuite, pour déterminer le taux d'accroissement de la densité de dépôt de sel (SDD), il faudrait encore diviser ce taux journalier d'accumulation par la superficie de la surface supérieure du disque. Différentes simulations ont été effectuées en faisant varier certains paramètres afin de mieux analyser l'effet de la vitesse du vent. Toutefois, durant toute la période de simulation, la température moyenne de l'air a été fixée à -15°C et nous avons considéré qu'il n'y a aucun nettoyage naturel de l'isolateur.

### V.2.2.1 Taux d'accumulation en fonction de la vitesse du vent

Pour effectuer cette simulation, nous avons fait varier la vitesse du vent de 5 à 20 m/s en considérant une valeur de TSP de 30 µg/m<sup>3</sup> et des particules de sel de 15 µm de MVD. Un isolateur de suspension standard IEEE en porcelaine dont la superficie de la surface supérieure

est approximativement  $600 \text{ cm}^2$  a été utilisé à cette fin. Le disque de l'isolateur a été subdivisé en dix (10) cylindres superposés. La durée de contamination est de 24 heures, c'est-à-dire, une journée. Les résultats issus de cette simulation sont indiqués à la Figure V.1. La courbe représente la densité de dépôt de sel sur la surface supérieure du disque après une journée d'accumulation. Elle illustre la variation du taux journalier d'accumulation de pollution en fonction de la vitesse du vent sous conditions hivernales.

Par la suite, nous avons effectué le même type de simulation sur trois (3) isolateurs en porcelaine, de formes différentes dont les spécifications sont indiquées au Tableau V.2. Chaque disque de ces isolateurs a été subdivisé en vingt (20) cylindres superposés. Le Tableau V.3 nous présente les résultats des simulations qui démontrent les différents taux journalier d'accumulation de pollution pour chacun des trois (3) isolateurs.

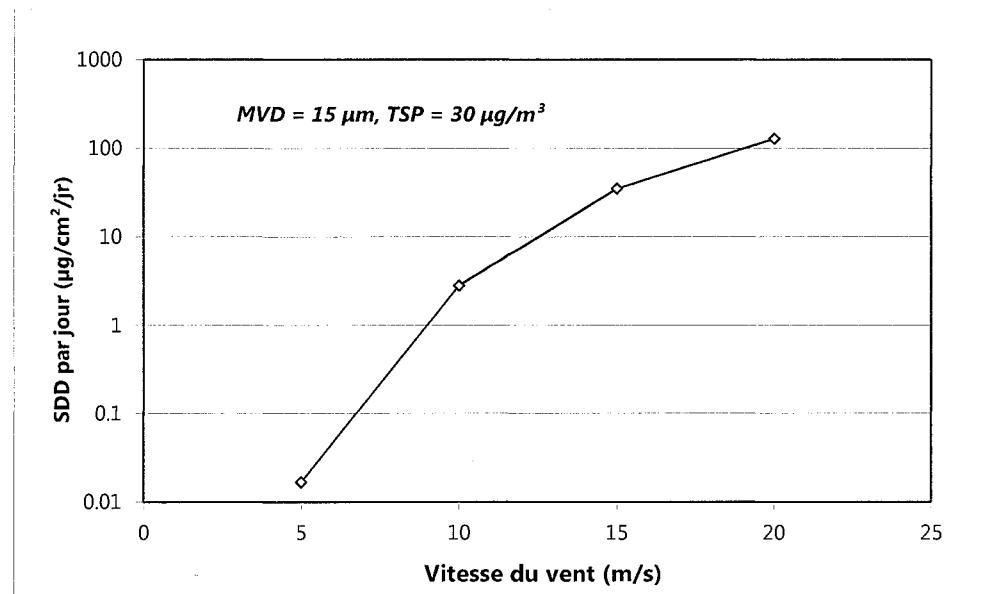


Figure V.1: Taux journalier d'accumulation en fonction de la vitesse du vent pour un isolateur standard IEEE

Tableau V.2: Spécifications des isolateurs

Type	Forme
<b>Aérodynamique</b> NGK en porcelaine 15-kip Diamètre inférieur 42,5 cm Superficie de la surface supérieure 1 385 cm <sup>2</sup>	
<b>Bell</b> NGK en porcelaine 36-kip Diamètre inférieur 42,5 cm Superficie de la surface supérieure 1 955 cm <sup>2</sup>	
<b>Bell</b> Lapp/CP en porcelaine 15-kip Diamètre inférieur 34,3 cm Superficie de la surface supérieure 1 536 cm <sup>2</sup>	

Tableau V.3: Taux journalier d'accumulation en fonction de la vitesse du vent pour trois (3) différents profils d'isolateur.

Vitesse du vent (m/s)	SDD par jour ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{jr}$ )		
	Forme aérodynamique $\alpha=10^\circ$	Forme Bell NGK $\alpha=36^\circ$	Forme Bell Lapp/CP $\alpha=45^\circ$
5	~0	~0	~0
10	~0	1,3	2,0
15	1,4	5,1	11,1
20	3,6	14,3	29,3

### V.2.2.2 Taux d'accumulation en fonction de la taille des particules

Dans cette simulation, nous avons fait varier le MVD de 15 à 30 µm pour observer l'effet d'un vent fort combiné avec des particules de sel de diamètre volumique médian relativement grand. En considérant le même type d'isolateur IEEE standard que précédemment et la même quantité totale de particules de sel suspendues qui est de 30 µg/m<sup>3</sup>, nous avons obtenu les résultats indiqués à la Figure V.2, illustrant la variation du taux journalier d'accumulation en fonction de la taille des particules pour différentes vitesses de vent.

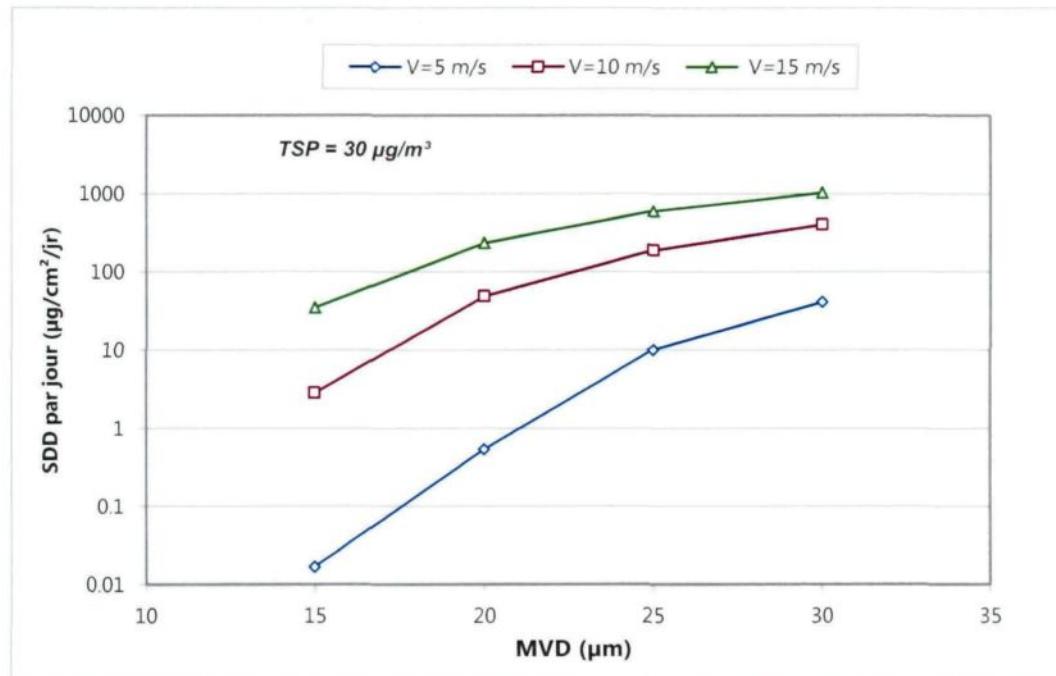


Figure V.2: Taux journalier d'accumulation en fonction de la taille des particules pour trois (3) vitesses de vent (V=5, 10, 15 m/s)

### V.2.2.3 Taux d'accumulation en fonction de la concentration de polluants dans l'air

La concentration de polluants dans l'air est directement reliée à la quantité de sel de déglaçage versée sur la route [Chisholm et al., 1993]. L'objet de cette simulation est d'observer ce qui se passe en présence de forts vents quand la concentration de particules de sel dans l'air est très élevée. Pour ce faire, nous avons fait varier la valeur de TSP de 10 à 40 µg/m<sup>3</sup> en considérant des particules de 15 µm. Le type d'isolateur utilisé étant le même que précédemment. Les résultats obtenus sont indiqués à la Figure V.3 qui nous illustre la variation du taux journalier d'accumulation en fonction de la concentration de polluants dans l'air pour des vitesses de vent de 10 et 15 m/s.

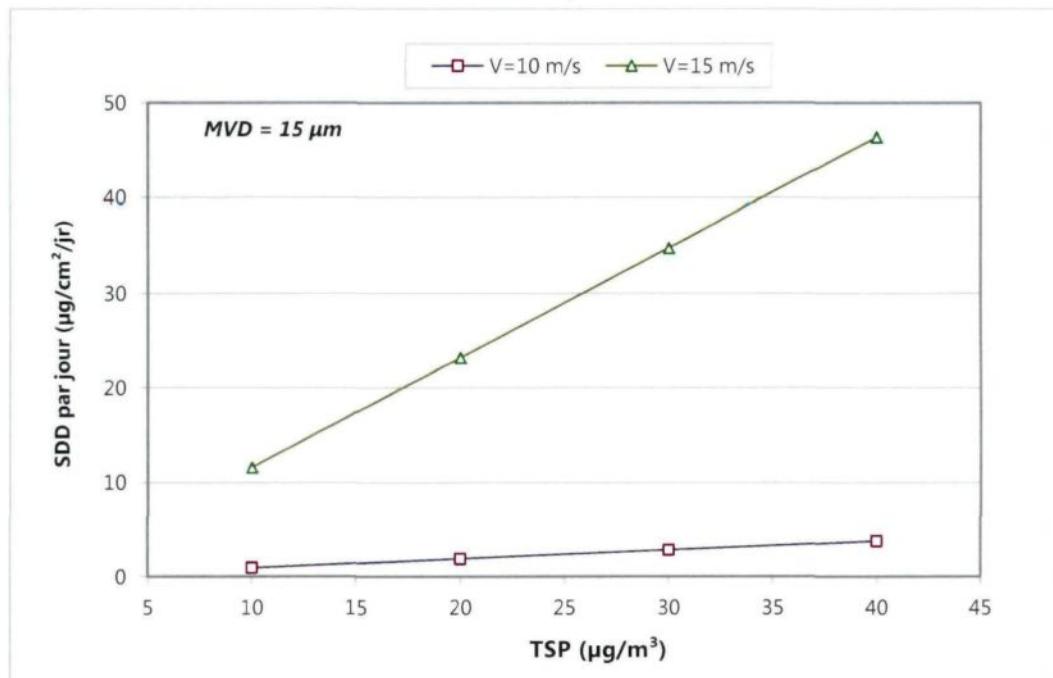


Figure V.3: Taux journalier d'accumulation en fonction de la concentration de polluants dans l'air pour V=10 et 15 m/s

### V.2.3 Analyse et discussions

#### V.2.3.1 Relation entre le taux d'accumulation et la vitesse du vent

Les résultats de simulation indiqués à la Figure V.1 permettent de constater une forte corrélation positive entre le taux journalier d'accumulation de pollution et la vitesse du vent sous conditions hivernales. En effet, on note que, dans une journée, la densité de dépôt de sel à la surface supérieure d'un disque d'isolateur standard IEEE est négligeable ( $SDD < 0,02 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) lorsque la vitesse moyenne du vent est de 5 m/s, par contre, l'accumulation devient très importante si la vitesse moyenne du vent atteint 20 m/s. Ce qui implique que le taux d'accumulation de pollution dépend fortement de la vitesse du vent. Cette dépendance a également été trouvée pour les autres types de pollution dans le cadre des études à température ambiante [Taniguchi et al., 1979]. Par ailleurs, nous pouvons remarquer par l'allure de la courbe obtenue que le taux d'accumulation ne varie pas linéairement avec la vitesse du vent. De 5 à 10 m/s, le taux d'accroissement journalier est à peine  $0,56 \mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{jour}$  par m/s alors qu'il est 33 fois supérieur, soit  $18,6 \mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{jour}$  par m/s, de 15 à 20 m/s. En approximant les résultats obtenus par des courbes de tendances, nous avons également trouvé que la meilleure corrélation est selon la loi de puissance comme nous le démontre la Figure V.4. L'expression de cette relation est donnée par l'équation (V.1) suivante avec un coefficient de détermination avoisinant la valeur unitaire.

$$SDD(V) = 6 \times 10^{-7} V^{6,55} \quad R^2 = 0,99 \quad (\text{V.1})$$

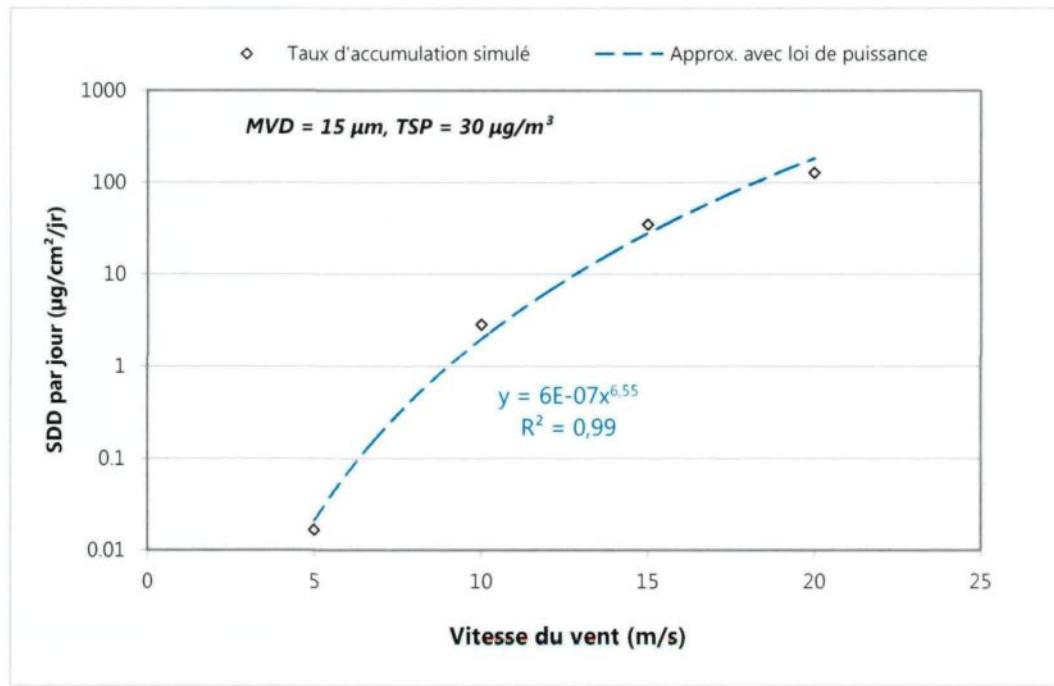


Figure V.4: Approximation par la loi de puissance du taux journalier d'accumulation en fonction de la vitesse du vent

où  $SDD$  [ $\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{jr}$ ] est la densité de dépôt de sel par jour et  $V$  [m/s] la vitesse moyenne du vent dans une journée.

La Figure V.4 et l'équation (V.1) nous donnent ainsi plus de précision quant à la nature de la relation entre la vitesse du vent et le taux d'accumulation de pollution sous conditions hivernales. On peut en déduire que, si au courant d'une journée d'hiver la vitesse moyenne du vent est supérieure à 18,5 m/s (67 km/h), on pourra s'attendre à une accumulation au-delà de 0,1 mg/cm<sup>2</sup> en termes de densité de dépôt de sel. Autrement dit, le niveau de pollution sera très élevé le lendemain selon la classification de la norme IEC 60815 et la situation sera vraiment critique pour le réseau électrique étant donné que les isolateurs sont fortement

pollués. Toutefois, il est important de mentionner que cette approximation est seulement valide pour une TSP de 30  $\mu\text{g}/\text{cm}^3$  et des particules de 15  $\mu\text{m}$  de MVD. Si nous essayons de reproduire l'événement du 27 janvier 2004 en utilisant cette approximation, nous obtenons un taux d'accumulation de 31  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  pour une vitesse de vent de 15,5 m/s (56 km/h). Ce qui est largement inférieur à la valeur de 90  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  mesurée ce jour-là. Cet écart pourrait être lié au fait que, pour cet événement, la teneur en particules de sel dans l'air ou la taille des particules serait différente des valeurs utilisées dans cette simulation. Il est à noter que ces valeurs ne sont pas disponibles pour cet événement.

Du Tableau V.3, nous pouvons constater également l'effet de la vitesse du vent sur le taux journalier d'accumulation dépendamment de la forme de l'isolateur. Si nous considérons un grand vent frais de 15 m/s (54 km/h) selon l'échelle de Beaufort, le taux d'accumulation de sel sera de 11,1  $\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{jr}$  pour un isolateur de type Bell Lapp/CP, 5,1  $\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{jr}$  pour un isolateur de type Bell NGK, et 1,4  $\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{jr}$  pour un isolateur de type aérodynamique NGK. Par contre, pour une bonne brise et moins (vitesse du vent inférieure à 10 m/s), le taux d'accumulation est quasiment nul pour les trois (3) types d'isolateurs. Ainsi, ces résultats indiquent que lorsque la vitesse du vent est élevée, la forme de l'isolateur a une certaine influence sur le taux journalier d'accumulation. Notre hypothèse est que, une vitesse de vent élevée réduit grandement la distance entre deux points d'impact des particules de sel sur la surface supérieure de l'isolateur au fur et à mesure que la pente de cette surface augmente, ce qui a pour effet d'augmenter l'efficacité de collision locale (LCE) telle que définie par l'équation III.13. Comme nous le

démontre le Tableau V.4, en associant chaque forme du disque à la valeur de leurs pentes respectives, nous pouvons en déduire qu'en présence de vent de grande vitesse, plus la surface supérieure possède une pente prononcée, plus l'accumulation est importante sur cette surface. On peut noter également que, pour seulement une augmentation de 25% de la pente de la surface supérieure de l'isolateur, soit de  $36^\circ$  à  $45^\circ$ , le taux d'accumulation prévu a plus que doublé pour des vitesses de vent de 15 et 20 m/s. D'où, dans de telles conditions, l'influence de la forme de l'isolateur sur la densité de dépôt de sel sera considérable.

En outre, la relation exprimée par l'équation (V.1) suggère que le taux journalier d'accumulation varie à la puissance 6,55 de la vitesse du vent sous conditions hivernales. Comparativement à l'étude réalisée au Japon [Taniguchi et al., 1979] dans le cas d'une pollution marine à température ambiante, cette valeur de l'exposant est plus que le double de la valeur supposée qui est 3. La différence observée entre ces valeurs de l'exposant est plutôt normale étant donné que les conditions sous lesquelles ces deux types de pollution se produisent ne sont pas les mêmes. Il est toutefois intéressant d'investiguer davantage sur la cause de cette grande différence. Pour ce faire, il faudrait déterminer l'influence de certains paramètres tels

**Tableau V.4: Taux journalier d'accumulation en fonction de la pente de la surface supérieure du disque en présence de vent de grande vitesse**

Pente de la surface ( $\alpha$ )	Taux d'accumulation, $SDD$ ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{jr}$ )	
	$V=15 \text{ m/s}$	$V=20 \text{ m/s}$
$10^\circ$	1,4	3,6
$36^\circ$	5,1	14,4
$45^\circ$	11,1	29,3

que la température de l'air, la taille des particules de pollution, la concentration de polluants dans l'air, la distance de l'emplacement des isolateurs par rapport à la source de pollution, etc., sur la relation entre le taux d'accumulation et la vitesse du vent. Les résultats présentés à la Figure V.2 et la Figure V.3 démontrent l'influence de quelques-uns de ces paramètres.

#### ***V.2.3.2 Influence de la taille des particules de pollution***

De la Figure V.2, nous pouvons constater que, pour les trois (3) différentes vitesses de vent, soient 5, 10 et 15 m/s, la masse de polluants par jour qui s'accumule sur la surface supérieure augmente au fur et à mesure que la taille des particules de pollution grossisse. De plus, il est intéressant de voir que l'accumulation est encore plus importante en présence de vents forts lorsque les particules ont un MVD de plus de 20  $\mu\text{m}$ . La variation est aussi considérable même lorsque la vitesse du vent est faible. Par exemple, associée à un vent de 5 m/s, la densité de dépôt de sel est d'environ 2 500 fois supérieure lorsque la taille des particules passe de 15 à 30  $\mu\text{m}$  de MVD. Ces résultats confirment donc le fait que les particules plus grosses sont aussi susceptibles d'être captées plus facilement par les isolateurs en présence de conditions hivernales. Nous pouvons constater également que, pour toute la gamme de tailles de particules considérées, la plus importante accumulation de pollution se produit à une vitesse de vent de 30 m/s, suivie des vitesses de vent à 10 et à 5 m/s. Autrement dit, peu importe la taille des particules, l'accumulation obtenue à un vent de forte vitesse est toujours plus importante que celle obtenue à une vitesse de vent moindre.

Ainsi, la taille des particules ne change pas le fait qu'il y a une corrélation positive entre le taux journalier d'accumulation de pollution et la vitesse du vent sous conditions hivernales. Par contre, nous pouvons remarquer que l'allure des trois (3) courbes ne se ressemble pas parfaitement. En effet, pour des particules de 15 µm de MVD, l'écart entre les SDD par jour est très grand en considérant des vitesses de 5, 10 et 15 m/s, alors que cet écart est réduit pour des particules de 30 µm de MVD pour les mêmes vitesses. Afin de mieux analyser cette influence de la taille des particules sur la relation entre la vitesse du vent et le taux journalier d'accumulation de pollution sous conditions hivernales, il faudrait présenter les courbes de la Figure V.2 autrement, soit en choisissant comme variable indépendante la vitesse du vent.

La Figure V.5 nous donne la représentation des résultats sous un angle différent, avec les approximations par les courbes de tendance selon la loi de puissance ainsi que leurs équations respectives. De cette figure, nous pouvons constater clairement que la corrélation positive entre le taux journalier d'accumulation de pollution et la vitesse du vent demeure inchangée même si la taille des particules de pollution varie. Cependant, d'après les équations respectives des courbes de tendance, nous pouvons remarquer une diminution progressive de la valeur de l'exposant au fur et à mesure que la taille des particules augmente, alors que c'est plutôt l'inverse pour le coefficient. Et avec des particules de 30 µm de MVD associées à une TSP de 30 µg/cm<sup>3</sup>, nous obtenons une expression similaire à celle trouvée par Taniguchi et al., pour la pollution marine à température ambiante. De ces résultats, nous pouvons donc en déduire que la taille des particules a une influence directe sur la relation entre le taux d'accumulation de pollution et la vitesse du vent. Théoriquement, cela implique qu'en présence de conditions

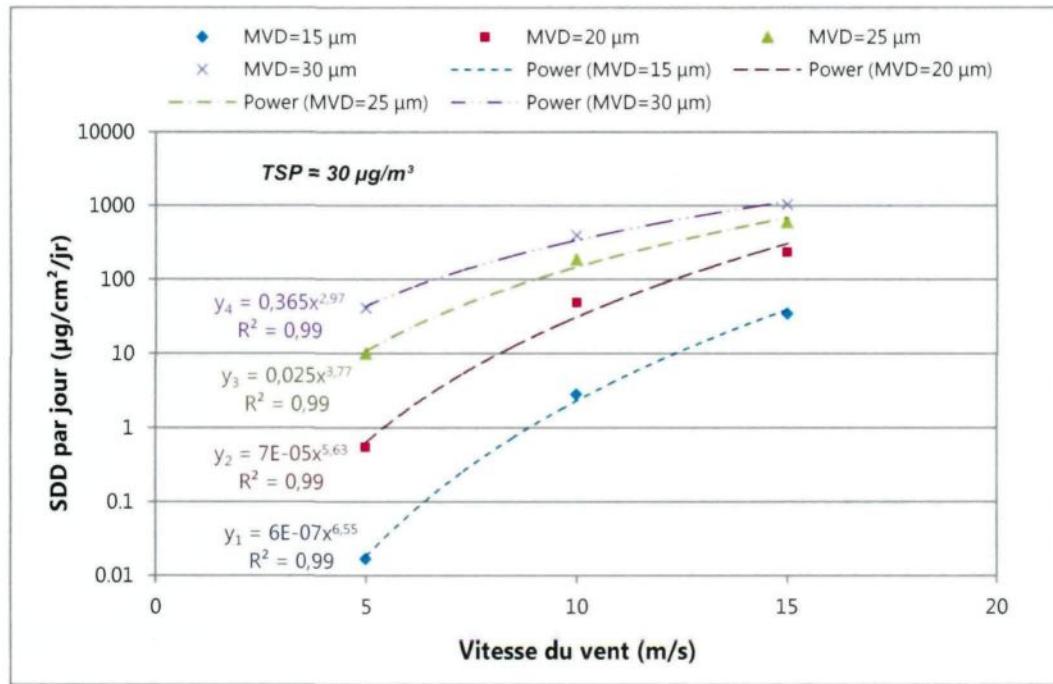


Figure V.5: Taux journalier d'accumulation de pollution en fonction de la vitesse du vent pour différentes tailles de particules.

hivernales, la SDD serait une fonction non linéaire de la vitesse du vent et de la taille des particules. Il est toutefois intéressant de noter la haute sensibilité du taux d'accumulation par rapport au MVD.

#### V.2.3.3 Influence de la concentration de polluants dans l'air

De la Figure V.3, nous pouvons constater que, pour une vitesse de vent donnée, la densité de dépôt de sel par jour sur l'isolateur varie linéairement en fonction de la quantité totale de particules suspendues (TSP). Pour des particules de 15 µm de MVD, le taux journalier d'accroissement est de 0,094 µg/cm<sup>2</sup>/jr par µg/m<sup>3</sup> lorsque la vitesse du vent est de 10 m/s, et atteint 1,16 mg/jour par µg/m<sup>3</sup>, soit 12 fois supérieur, lorsque la vitesse du vent augmente à

15 m/s. Cela démontre, que sous des conditions hivernales, l'influence de la concentration de polluants dans l'air sur le taux d'accumulation est plutôt faible pour des vitesses de vent inférieures à 10 m/s, mais devient importante lorsque la vitesse du vent dépasse 15 m/s. Ainsi, un épandage typique de sel sur les routes combiné avec un grand vent frais durant la période hivernale pourrait avoir une conséquence néfaste sur la performance électrique des isolateurs à proximité de la route. À titre d'exemple, nous trouvons par extrapolation des résultats simulés qu'une teneur de 80 µg/m<sup>3</sup> en particules suspendues de sel de 15 µm de MVD associée à un vent moyen de 15 m/s aurait donné le même niveau de contamination de 90 µg/cm<sup>2</sup> qui a causé le contournement du 27 janvier 2004 après une journée d'accumulation.

### V.3 EXPÉRIMENTATIONS EN LABORATOIRE

#### V.3.1 Études réalisées dans la soufflerie réfrigérée

##### V.3.1.1 *Paramètres des essais*

Pour les essais qui se sont déroulés dans la soufflerie réfrigérée, nous avons utilisé le montage indiqué à la Figure IV.8 du chapitre précédent. Les paramètres que nous avons utilisés sont présentés au Tableau V.5 ci-après. Chaque essai est d'une durée de 5 min, suffisante pour avoir une répétitivité acceptable. Les conditions techniques des installations dans la soufflerie réfrigérée nous ont permis de simuler une vitesse de vent pouvant aller jusqu'à 30 m/s (108 km/h), soit l'équivalent d'une violente tempête sur l'échelle de Beaufort. La température a été fixée à -10°C pour simuler une accumulation semi-humide [Fu, 2004] permettant une certaine humidification des particules de pollution. Le débit de la saumure atomisée est basé sur la valeur recommandée par Karady et Besztercey [2000].

Tableau V.5: Paramètres des essais – Soufflerie réfrigérée

Identification	Valeur choisie
Vitesse du vent	5 à 30 m/s
Durée de l'accumulation	5 min
Température du tunnel	-10°C
Pression d'air du gicleur	276 kPa (40 psi)
Débit de la saumure atomisée	30 ml/min
Conductivité de la saumure	330 µS/cm @ 20°C
Vitesse de la courroie du SAG 410L	50%

Pour la pression d'air du gicleur, nous avons utilisé 276 kPa (40 psi) pour permettre aux particules d'eau salée atomisée de se mélanger convenablement à la poudre de kaolin et d'être transportées et déposées par le vent de façon naturelle. Quant à la conductivité de la saumure, il s'agit d'une valeur que nous avons simplement choisie pour commencer. De même pour la vitesse de la courroie, nous l'avons ajustée à 50% pour débuter avec une valeur moyenne.

### ***V.3.1.2 Résultats expérimentaux***

La Figure V.6 illustre la photo de l'isolateur après une période d'accumulation de 5 min. L'aspect visuel du disque met en évidence la formation d'une accumulation de pollution quasi-uniforme à la surface de l'isolateur. L'évaluation de la quantité de pollution accumulée a été effectuée par la suite en prenant les mesures relatives à l'ESDD de la surface supérieure à la fin de chaque expérience. Afin d'obtenir des mesures fiables et de pouvoir analyser la répétitivité des expériences, une série d'au moins trois (3) essais d'accumulation a été effectuée pour chaque variation de la vitesse du vent. La Figure V.7 représente la variation de l'ESDD moyenne en fonction de la vitesse du vent en condition hivernale.



Figure V.6: Photo de l'isolateur après la période d'accumulation – Soufflerie réfrigérée

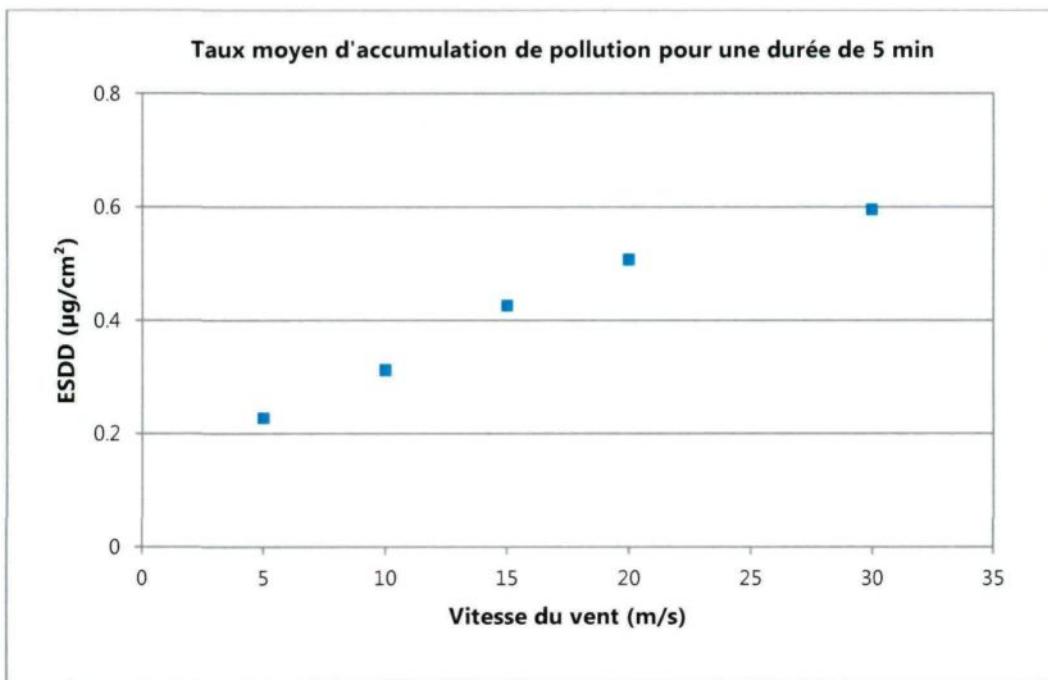


Figure V.7: ESDD de la surface supérieure en fonction de la vitesse du vent – Soufflerie réfrigérée

### **V.3.1.3 Analyse et discussions**

De la Figure V.7, nous pouvons constater que l'ESDD moyenne sur la surface supérieure augmente au fur et à mesure que la vitesse du vent s'intensifie. À 5 m/s, l'ESDD mesurée dépasse à peine  $0,2 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  après une période de cinq (5) minutes mais atteint un maximum de  $0,6 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ , soit le triple, à 30 m/s pour la même période. Ce qui démontre qu'il existe une corrélation positive entre le taux d'accumulation de pollution et la vitesse du vent en condition hivernale. Toutefois, il semble y avoir un certain non linéarité dans cette variation de l'ESDD moyenne en fonction du vent. En effet, le taux de variation diminue à partir de 20 m/s contrairement à la plage de 5 à 20 ms où sa valeur est plutôt le même ( $0,008 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  par m/s versus  $0,018 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  par m/s). Ceci peut être expliqué par le fait qu'au-delà d'une certaine vitesse – 20 m/s dans cette expérience – la force du vent contribue à l'arrachement de quelques particules de pollution qui n'ont pas adhéré solidement à la surface de l'isolateur, diminuant ainsi l'efficacité de captation de ce dernier.

Par ailleurs, la faible concentration de pollution dans l'air, qui est représentée par la concentration de la saumure utilisée, fait aussi en sorte que le taux de pollution accumulée à la surface de l'isolateur paraît insignifiant pour une période de cinq (5) minutes. Par contre, en supposant que le taux d'accumulation varie linéairement avec le temps, la valeur de l'ESDD obtenue après une journée d'exposition à une vitesse de vent de 15 m/s, par exemple, serait environ  $124 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ . Ce qui est considéré déjà comme très polluée selon la classification donnée par la publication IEC 60815. Dans ces conditions, un contournement aurait pu donc se produire si de la haute tension avait été appliquée aux bornes de l'isolateur. En effet, tel que

mentionné précédemment, lors de l'incident du 27 janvier 2004 à Toronto, en Ontario, le taux d'accumulation de pollution ayant causé la panne électrique avait atteint  $90 \text{ } \mu\text{g/cm}^2$  après une période d'exposition de 24 h à une vitesse moyenne du vent de 15,6 m/s (56 km/h).

Pour déterminer la loi qui régit la relation empirique entre les deux variables, la vitesse du vent et le taux d'accumulation de pollution, nous avons approximé avec quelques courbes de tendance les résultats obtenus. La meilleure corrélation que nous avons trouvée est avec la loi de puissance, selon l'équation (V.2) suivante :

$$ESDDt(V) = 0,09V^{0,56} \quad R^2 = 0,99 \quad (\text{V.2})$$

où  $ESDDt$  [ $\mu\text{g/cm}^2$ ] est le taux d'accumulation moyen sur la surface supérieure et  $V$  [m/s] la vitesse du vent.

D'après l'équation (V.2), l'expression de la relation empirique entre ces deux variables est donc de la forme  $y = ax^b$  où  $x$  représente la vitesse du vent comme étant la variable indépendante et  $y$  représente l' $ESDD$  comme étant la variable dépendante. Les valeurs des paramètres  $a$  et  $b$  sont conditionnées par la durée de l'accumulation, la température dans la soufflerie, la pression d'air du gicleur, le débit et la conductivité de la saumure atomisée. Par contre, ces paramètres ne devraient pas varier en fonction de la vitesse de la courroie du générateur de poudre SAG 410L, laquelle est reliée à la quantité de particules non solubles et, par conséquent, ne devrait pas avoir d'influence sur l' $ESDD$ . Autrement dit, les paramètres  $a$  et  $b$  doivent être indépendants de la vitesse de la courroie du SAG 410L. Cependant, nous n'avons

pas pu valider cette hypothèse dans le cadre de cette étude. Il serait donc intéressant dans l'avenir de procéder aux mêmes expériences, mais en variant la vitesse de la courroie du SAG 410L afin de vérifier si le modèle physique utilisé corrobore cette hypothèse. Au point de vue dimensionnelle, l'exposant  $b$  doit être un nombre adimensionnel alors que le coefficient  $a$  doit être une constante dimensionnelle pour que l' $ESDD$  puisse être exprimée en [ $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ].

Il faudrait souligner aussi que cette équation empirique a été établie selon l'hypothèse qu'il n'y a aucune accumulation de pollution lorsque la vitesse du vent est nulle et elle demeure valide à condition que les valeurs des autres paramètres aient été fixées selon le Tableau V.5. Autrement dit, tout résultat d'extrapolation en-deçà de 5 m/s ou au-delà de 30 m/s devrait être validé expérimentalement en se servant des mêmes paramètres dudit tableau.

Sur la Figure V.8, les barres d'erreurs représentant l'écart-type de l' $ESDD$  moyenne calculée pour chaque vitesse du vent, nous révèlent que les essais étaient plus ou moins répétitifs. En effet, l'écart-type obtenu varie de 0,03 à 0,08  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  pour l'ensemble des résultats, ce qui correspond à des dispersions relatives variant de 8 à 28%. Étant donné le faible niveau de contamination, la précision de l' $ESDD$  mesurée est très sensible et n'importe quelle source d'erreurs pourrait affecter grandement les mesures [Chisholm et al., 1994]. Ainsi, il serait nécessaire dans l'avenir d'augmenter la concentration de la saumure pour obtenir des valeurs de l' $ESDD$  plus appréciables.

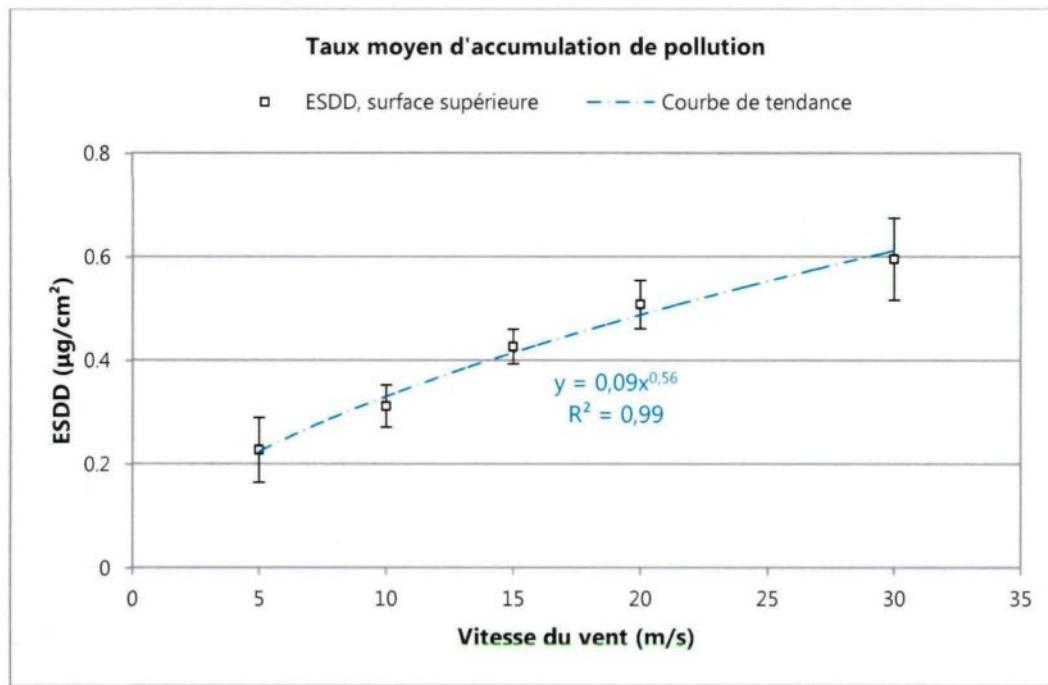


Figure V.8: Approximation par une courbe de tendance de l'*ESDD* moyenne vs vitesse du vent – Soufflerie réfrigérée

Pour mieux définir l'étendue des valeurs de l'*ESDD* obtenues, nous avons déterminé l'intervalle de confiance de 95% dont les limites supérieures et inférieures sont présentées au Tableau V.6 ci-après. Nous pouvons affirmer, selon ce tableau, que dans 95% des cas, les taux d'accumulation moyen de pollution sont compris dans l'intervalle [0,16 – 0,29 µg/cm<sup>2</sup>] à 5 m/s, [0,21 – 0,41 µg/cm<sup>2</sup>] à 10 m/s, [0,34 – 0,51 µg/cm<sup>2</sup>] à 15 m/s, [0,43 – 0,58 µg/cm<sup>2</sup>] à 20 m/s et [0,40 – 0,79 µg/cm<sup>2</sup>] à 30 m/s. Comme nous pouvons le remarquer, les intervalles ne sont pas exclusifs. Il existe des valeurs de l'*ESDD* qui sont communes à au moins deux (2) intervalles.

Tableau V.6: Valeurs limites de l'ESDD avec un intervalle de confiance de 95% – Soufflerie réfrigérée

Vitesse du vent (m/s)	Nombre de données (N)	Valeur moyenne ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )	Limite inférieure ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )	Limite supérieure ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )
5	6	0,23	0,16	0,29
10	3	0,31	0,21	0,41
15	3	0,43	0,34	0,51
20	4	0,51	0,43	0,58
30	3	0,60	0,40	0,79

Cela veut dire qu'il est possible d'obtenir la même valeur de l'ESDD pour deux (2) différentes vitesses de vent. Le nombre insuffisant de données que nous avons recueillies pourrait expliquer ce grand écart entre les limites inférieure et supérieure de chaque intervalle de confiance. Pour pouvoir diminuer cet écart, le nombre de données devrait être augmenté. Cela implique que pour chaque variation de la vitesse de vent, il faudrait réaliser une série d'au moins dix (10) essais d'accumulation selon notre estimation.

Néanmoins, compte tenu de ces résultats, les expériences qui se sont déroulées dans la soufflerie réfrigérée démontrent que le modèle physique que nous avons mis en place a permis de bien simuler l'accumulation naturelle de pollution en présence de conditions hivernales sur un disque d'isolateur en absence de tension électrique. Ainsi, nous avons réussi à développer une nouvelle méthode de pré-contamination pour les études de comportement des isolateurs sous des conditions de pollution hivernale. Certes, quelques ajustements sont encore nécessaires pour raffiner le montage, mais nous pouvons dire que le générateur de pollution que nous avons conçu et utilisé est fonctionnel. Il reste tout de même le fait qu'il nous a été impossible de réaliser une accumulation de pollution en condition hivernale avec un disque

d'isolateur sous haute tension. La section de test de la soufflerie n'est pas suffisamment grande pour permettre d'appliquer de la haute tension aux bornes de l'isolateur. Donc par mesure de sécurité, nous n'avons pas poursuivi ce genre d'expérience dans la soufflerie réfrigérée. La solution que nous avons optée est de mettre en place le modèle physique dans la chambre climatique qui est plus grande et mieux équipée pour réaliser une telle expérience. Dans la section suivante, nous allons présenter les résultats des essais d'accumulation que nous avons effectués avec le montage installé dans cette chambre climatique.

### **V.3.2 Études réalisées dans la chambre climatique**

#### ***V.3.2.1 Paramètres des essais***

L'objet des expériences effectuées dans la chambre climatique est de démontrer l'effet de la force diélectrophorétique sur la variation de l'*ESDD* en fonction de la vitesse du vent. Pour ce faire, nous avons utilisé le montage illustré à la Figure IV.9 et à la Figure IV.10 dans le chapitre précédent avec les paramètres présentés au Tableau V.7 ci-après. Selon ce qui a été mentionné précédemment, les conditions techniques des installations à l'intérieur de la chambre climatique, permettent de simuler une vitesse de vent pouvant aller jusqu'à 18 m/s (65 km/h), soit l'équivalent d'un coup de vent sur l'échelle de Beaufort. Toutefois, nous nous sommes limités jusqu'à 15 m/s dans le cadre de la présente étude. Et contrairement à ce qui a été fait pour les expériences dans la soufflerie réfrigérée, la durée de l'accumulation a dû être augmentée à 10 min et nous avons dû opérer à une température plus élevée qui est de -5°C pour des raisons que nous avons déjà évoquées dans le chapitre précédent. Nous avons également utilisé une valeur standardisée de la concentration de la saumure atomisée qui est

Tableau V.7: Paramètres des essais – Chambre climatique

Identification	Valeur choisie
Vitesse du vent	5 à 15 m/s
Durée de l'accumulation	10 min
Température de la chambre climatique	-5°C
Pression d'air du gicleur	276 kPa (40 psi)
Débit de la saumure atomisée	60 ml/min
Conductivité de la saumure	4,30 mS/cm @ 20°C
Vitesse de la courroie du SAG 410L	50%
Tension appliquée	0 – 45 kVAC

de 4,30 mS/cm. Après avoir effectué chaque essai, nous avons relevé séparément les mesures relatives à l'*ESDD* des surfaces supérieure et inférieure de l'isolateur de test se trouvant au milieu de la chaîne. Afin d'obtenir des mesures fiables et de pouvoir analyser la répétitivité des expériences, une série d'au moins trois (3) essais d'accumulation a été effectuée pour chaque variation de la vitesse du vent, comme ce fut le cas dans la soufflerie réfrigérée.

### ***V.3.2.2 Résultats expérimentaux***

Dans un premier temps, les essais ont été effectués en absence de tension électrique étant donné que nous ne pouvions pas nous servir des résultats obtenus dans la soufflerie réfrigérée pour comparaison à cause des conditions expérimentales différentes. Les résultats obtenus avec une chaîne d'isolateurs sans tension sont indiqués à la Figure V.9. Par la suite, nous avons effectué les essais sous haute tension en appliquant une source de 45 kVAC aux bornes de la chaîne d'isolateurs. Les résultats de ces essais sont indiqués à la Figure V.10. Les courbes représentent la variation respective de l'*ESDD* moyenne des surfaces supérieure et inférieure en fonction de la vitesse du vent sous des conditions hivernales en absence de tension électrique et sous tension 45 kVAC respectivement.

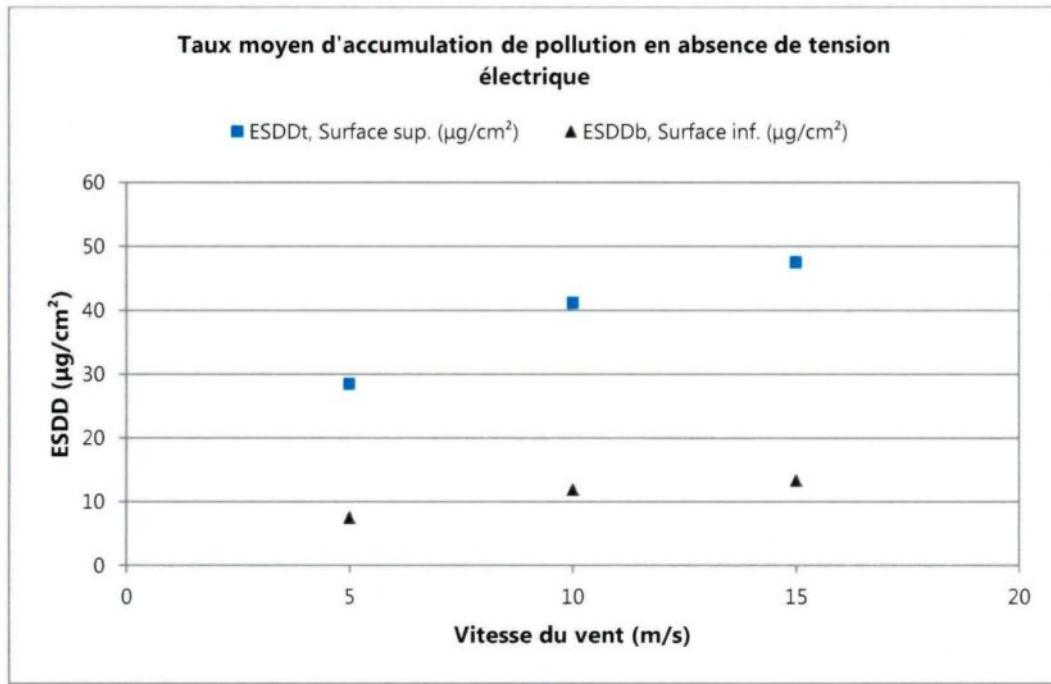


Figure V.9: ESDD moyenne en fonction de la vitesse du vent en absence de tension électrique – Chambre climatique : Étude n° 1

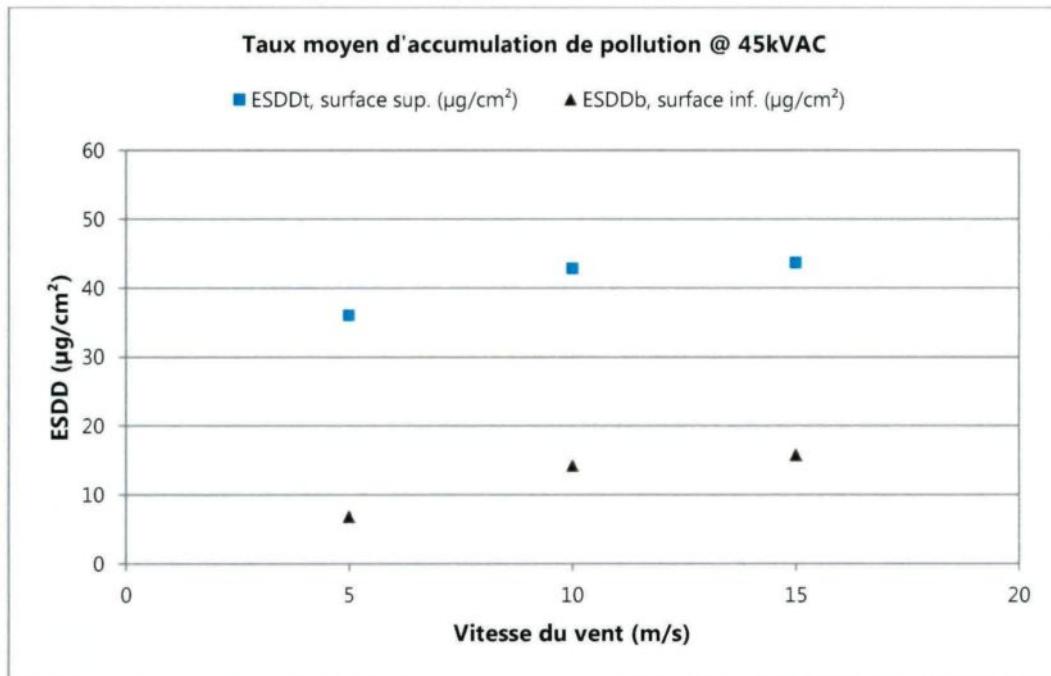


Figure V.10: ESDD moyenne en fonction de la vitesse du vent à une tension de 45 kVAC – Chambre climatique : Étude n° 2

### **V.3.2.3 Analyse et discussions**

#### *a) Relations empiriques entre l'ESDD et la vitesse du vent*

En observant l'allure des courbes de variation obtenues sur la Figure V.9, nous pouvons constater que le taux moyen d'accumulation de pollution augmente avec la vitesse du vent, que ce soit pour la surface supérieure ou la surface inférieure. Cela indique qu'il existe une corrélation positive entre ces deux variables. De la Figure V.9, nous pouvons remarquer aussi que les variations obtenues ne sont pas linéaires. Par exemple, si on considère la courbe de variation de la surface supérieure, le taux d'accroissement de l'ESDD est plus élevé (environ  $2,5 \mu\text{g/cm}^2$  par m/s) entre 5 et 10 m/s, contrairement entre 10 et 15 m/s où le taux d'accroissement est légèrement plus faible (environ  $1,3 \mu\text{g/cm}^2$  par m/s). Par analogie avec ce qui a été observé dans la soufflerie réfrigérée, cela s'explique par le fait que l'adhésion des particules de pollution à la surface de l'isolateur est plus efficace entre 5 et 10 m/s, mais pour une vitesse de vent plus élevée, la force du vent devient trop excessive au point où elle contribue à l'arrachement de quelques particules de pollution déjà accumulées.

Par ailleurs, nous pouvons constater que l'ESDD de la surface supérieure est nettement plus élevée que l'ESDD de la surface inférieure. Selon l'échelle indiquée au Tableau II.3 du chapitre II, la surface supérieure est déjà légèrement polluée, après une période d'exposition de dix (10) minutes à des vitesses de vent allant de 5 à 15 m/s, alors que la surface inférieure peut être encore considérée comme propre ou faiblement polluée dans les mêmes conditions. Pour ces motifs, nous estimons que la pollution s'accumule plus rapidement sur la surface supérieure du disque. Et cela s'explique par le fait que l'absence du processus d'auto-nettoyage

entraîne plus d'accumulation de sel sur la surface supérieure que sur la surface inférieure, une tendance qui a également été observée lors des études sur terrain où des isolateurs ont été exposés à des conditions hivernales [Chisholm et al., 1993].

En approximant à l'aide des courbes de tendance les résultats présentés à la Figure V.9, nous avons obtenu la meilleure corrélation avec la loi de puissance, comme ce fût le cas dans la soufflerie réfrigérée. La Figure V.11 nous démontre la courbe de tendance obtenue. Les équations (V.3) et (V.4) donnent les expressions mathématiques correspondantes pour la surface supérieure et la surface inférieure respectivement. Ces équations empiriques ont été établies selon la même hypothèse qu'il n'y a aucune accumulation de pollution lorsque la vitesse du vent est nulle et elles demeurent valides à condition que les valeurs des autres paramètres aient été fixées selon le Tableau V.7.

$$ESDDt(V) = 13,4V^{0,47} \quad R^2 = 0,99 \quad (\text{V.3})$$

$$ESDDb(V) = 3,2V^{0,54} \quad R^2 = 0,97 \quad (\text{V.4})$$

où  $ESDDt$  [ $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ] est le taux d'accumulation moyen pour la surface supérieure,  $ESDDb$  [ $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ] le taux d'accumulation moyen pour la surface inférieure et  $V$  [m/s] la vitesse du vent.

Les expressions obtenues montrent que la valeur de l'exposant est presque identique pour les surfaces supérieure et inférieure lorsqu'aucune tension électrique n'est appliquée aux bornes de la chaîne d'isolateurs. En calculant le rapport  $ESDDt/ESDDb$  entre 5 et 15 m/s, on

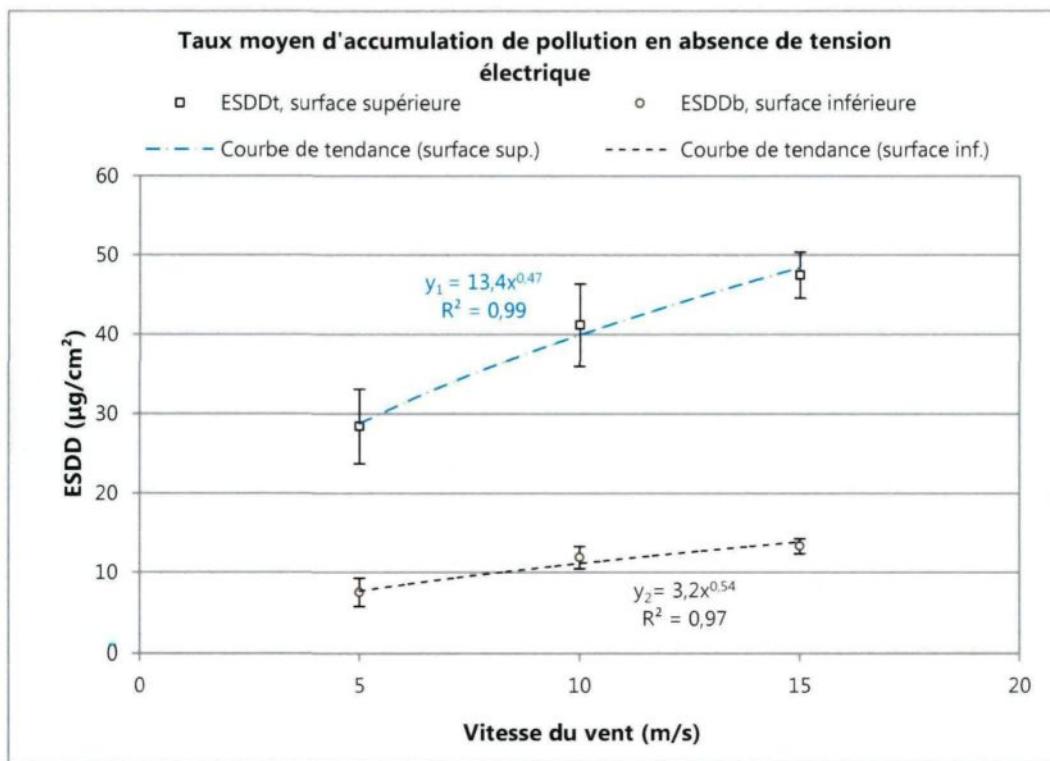


Figure V.11: Approximation par une courbe de tendance de l'*ESDD* moyenne vs vitesse du vent – Chambre climatique : Étude no.1

obtient aussi un ratio quasi constant de 3,6 : 1. Dans ce cas, nous pouvons dire que les taux d'accumulation pour les deux (2) surfaces sont proportionnels. Des équations (V.3) et (V.4), nous pouvons dire également que pour ces deux (2) surfaces de l'isolateur de test, l'expression de la relation empirique entre le taux d'accumulation de pollution et la vitesse du vent prend la forme  $y = ax^b$ , comme ce fut le cas dans la soufflerie réfrigérée pour la surface supérieure. La variable dépendante  $y$  représente l'*ESDD* de la surface supérieure ou inférieure. Les paramètres  $a$  et  $b$  sont aussi fonction des conditions expérimentales soit la durée de l'accumulation, la température de la chambre climatique, la pression d'air du gicleur, le débit et la conductivité de la saumure atomisée. Par contre, ces deux paramètres doivent être indépendants de la vitesse

de la courroie du SAG 410L, comme nous l'avons déjà expliqué ailleurs sauf que nous n'avons pas pu non plus valider cette hypothèse dans le cadre de cette étude qui s'est déroulée dans la chambre climatique. Il serait donc intéressant à l'avenir de procéder également aux mêmes expériences, mais en variant la vitesse de la courroie du SAG 410L afin de vérifier si le modèle physique utilisé corrobore cette hypothèse. Et pour que l'ESDD puisse être exprimée en [ $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ], le coefficient  $a$  doit être une constante dimensionnelle alors que l'exposant  $b$  doit être un nombre adimensionnel.

Sur la Figure V.11, les barres d'erreurs représentant la dispersion relative de l'ESDD moyenne calculée pour chaque vitesse du vent, nous révèlent une bonne répétitivité pour les essais si on considère l'ensemble des résultats. En effet, pour les mesures de l'ESDD de la surface supérieure, la dispersion relative obtenue varie de 6 à 16 % alors que pour la surface inférieure, la dispersion relative est de 7 à 24 %. Et pour les deux (2) surfaces, la dispersion relative décroît progressivement au fur et à mesure que la vitesse du vent augmente. Autrement dit, c'est à 5 m/s que la dispersion relative est la plus élevée (16 % pour la surface supérieure et 24 % pour la surface inférieure), et le minimum obtenu correspond à 15 m/s. Une explication possible que nous pouvons donner à cette constatation est que la précision des mesures de l'ESDD est très sensible lorsque le niveau de contamination est faible. Et dans notre cas, la plus faible valeur de l'ESDD est obtenue à 5 m/s.

Comme ce qui a été effectué précédemment avec les résultats obtenus dans la soufflerie réfrigérée, nous avons déterminé l'intervalle de confiance de 95 % dans le but de mieux définir

l'étendue des valeurs de l'ESDD obtenues. Le Tableau V.8 et le Tableau V.9 ci-après présentent les limites supérieures et inférieures des intervalles respectives à chaque surface. Ainsi, dans 95 % des cas, nous pouvons dire que pour la surface supérieure, les taux moyens d'accumulation de pollution sont compris entre [25,5 – 31,4 µg/cm<sup>2</sup>] à 5 m/s, entre [36,8 – 45,5 µg/cm<sup>2</sup>] à 10 m/s, et entre [43,9 – 51,0 µg/cm<sup>2</sup>] à 15 m/s. Pour la surface inférieure, les taux moyens d'accumulation sont compris entre [6,4 – 8,6 µg/cm<sup>2</sup>], [10,7 – 13,1 µg/cm<sup>2</sup>] et [12,1 – 14,6 µg/cm<sup>2</sup>] à 5, 10 et 15 m/s respectivement.

De ces tableaux, nous pouvons constater que pour les deux (2) surfaces, les intervalles de confiance correspondant à 10 et 15 m/s ne sont pas exclusifs car il existe des valeurs de l'ESDD qui leurs sont communes. Le nombre insuffisant de données que nous avons recueillies, surtout

Tableau V.8: Valeurs limites de l'ESDD<sub>t</sub> avec un intervalle de confiance de 95% – Chambre climatique – Étude no. 1

Vitesse du vent (m/s)	Nombre de données (N)	Valeur moyenne (µg/cm <sup>2</sup> )	Limite inférieure (µg/cm <sup>2</sup> )	Limite supérieure (µg/cm <sup>2</sup> )
5	12	28,4	25,5	31,4
10	8	41,2	36,8	45,5
15	5	47,5	43,9	51,0

Tableau V.9: Valeurs limites de l'ESDD<sub>b</sub> avec un intervalle de confiance de 95% – Chambre climatique – Étude no. 1

Vitesse du vent (m/s)	Nombre de données (N)	Valeur moyenne (µg/cm <sup>2</sup> )	Limite inférieure (µg/cm <sup>2</sup> )	Limite supérieure (µg/cm <sup>2</sup> )
5	12	7,5	6,4	8,6
10	8	11,9	10,7	13,1
15	5	13,3	12,1	14,6

à 15 m/s, pourrait être à l'origine du chevauchement de ces intervalles. Selon notre estimation, une série d'au moins dix (10) essais d'accumulation à 10 et à 15 m/s devrait être réalisée pour résoudre ce problème.

Compte tenu des résultats obtenus, nous pouvons déduire qu'en absence de source de tension, le modèle physique que nous avons mis en place dans la chambre climatique permet de simuler adéquatement l'accumulation naturelle de pollution sous des conditions hivernales sur une chaîne d'isolateurs. En utilisant le montage qui a été conçu, il nous a été possible d'établir et d'analyser, en absence de tension électrique, les courbes de variation de l'ESDD des surfaces supérieure et inférieure de l'isolateur de test en fonction de la vitesse du vent. Ce qui nous a permis par la suite de réaliser les essais sous haute tension en appliquant une source de 45 kVAC aux bornes de la chaîne d'isolateurs afin d'étudier l'influence de la force diélectrophorétique sur les relations susmentionnées.

b) *Effet de la force diélectrophorétique*

Sur la Figure V.10, nous pouvons constater que, en présence d'une haute tension de 45 kVAC, le taux moyen d'accumulation de pollution pour les deux (2) surfaces augmente en fonction de la vitesse du vent de façon non linéaire et que l'ESDD de la surface supérieure est aussi nettement plus élevée que l'ESDD de la surface inférieure, comme ce fût le cas avec les essais en absence de tension électrique. Ce qui veut dire que la présence de la force diélectrophorétique ne change pas le fait qu'il existe une corrélation positive entre le taux moyen d'accumulation et la vitesse du vent sous des conditions hivernales et que la pollution

s'accumule plus rapidement sur la surface supérieure du disque. Cependant, en observant l'allure de la courbe pour la surface supérieure, on constate que l'*ESDD* ne varie que très peu entre 10 et 15 m/s. En effet, le taux d'accroissement n'est que 0,16  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  par m/s, soit une diminution nette de plus de 80 % par rapport au taux d'accroissement obtenu en absence de tension électrique entre 10 et 15 m/s. Et contrairement à l'allure des courbes présentées à la Figure V.9, les deux (2) courbes de variation sur la Figure V.10 sont à peu près parallèles : la différence *ESDD<sub>t</sub>* – *ESDD<sub>b</sub>* est quasi-constante entre 5 et 15 m/s. Cela indique que la présence de la haute tension aux bornes de la chaîne d'isolateurs a un effet sur la relation entre l'*ESDD* et la vitesse.

Afin d'approfondir davantage l'effet de cette force diélectrophorétique, nous avons approximé les résultats de la Figure V.10 à l'aide des courbes de tendance selon la loi de puissance comme nous démontre la Figure V.12. Les expressions mathématiques correspondant à ces courbes sont données par les équations (V.5) et (V.6) pour les surfaces supérieure et inférieure respectivement.

$$ESDD_{AC}(V) = 27,2V^{0,18} \quad R^2 = 0,92 \quad (\text{V.5})$$

$$ESDD_{AC}(V) = 2,0V^{0,79} \quad R^2 = 0,93 \quad (\text{V.6})$$

où *ESDD<sub>t<sub>AC</sub></sub>* [ $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ] et *ESDD<sub>b<sub>AC</sub></sub>* [ $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ] sont les taux moyens d'accumulation de pollution à 45 kVAC pour chaque surface et *V* [m/s] la vitesse du vent. Contrairement aux expressions

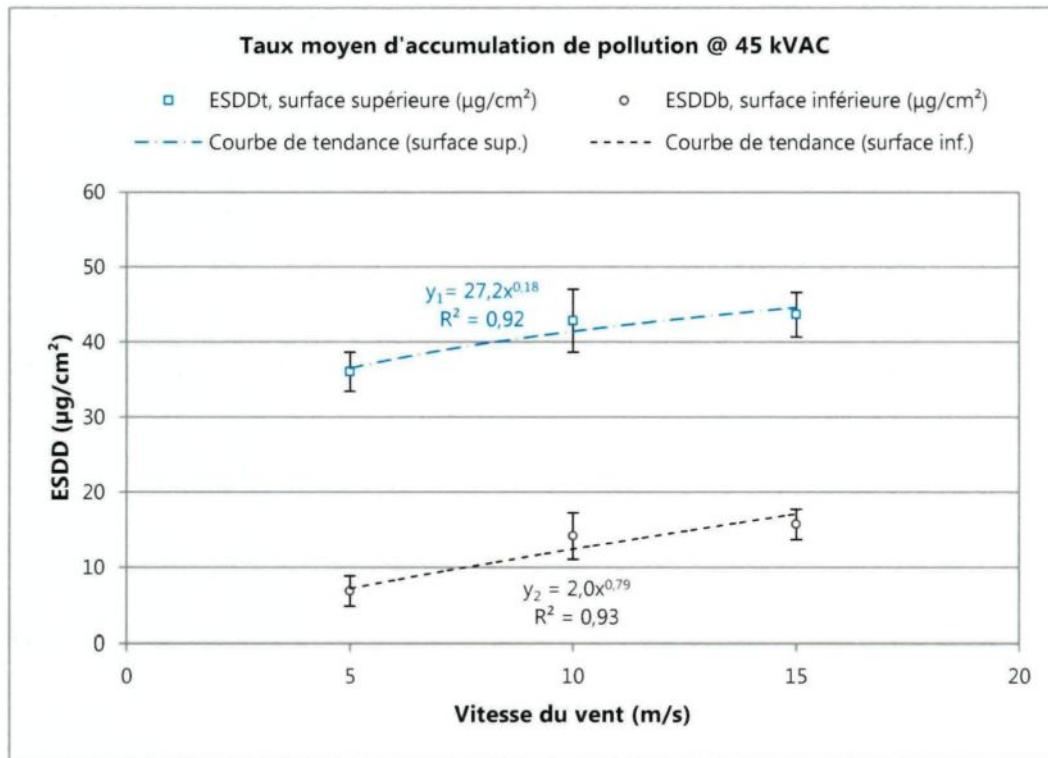


Figure V.12: Approximation par une courbe de tendance de l'ESDD moyenne vs vitesse du vent @ 45 kVAC – Chambre climatique : Étude no.2

obtenues en absence de tension électrique, la valeur de l'exposant de  $V$  est nettement distincte pour les surfaces supérieure et inférieure. En outre, l'intensité de la corrélation obtenue avec la loi de puissance a légèrement diminuée.

Si nous supposons qu'en condition hivernale, l'équation (II.20) précédente selon Salam et al. [2005] est applicable, alors l'exposant  $b$ , dans ce cas-ci, dépend de la constante d'arc dont la valeur devrait être différente selon la surface considérée à cause de la non uniformité de la distribution du champ électrique [Farzaneh et Chisholm, 2009]. Ainsi, cela pourrait expliquer le fait qu'en absence de tension électrique, la valeur de l'exposant  $b$  est quasiment le même pour

les deux surfaces, mais lorsque de la haute tension est appliquée aux bornes de la chaîne d'isolateurs, on retrouve deux valeurs bien distinctes pour les surfaces supérieure et inférieure.

D'autre part, en considérant les équations (V.5) et (V.6), nous constatons que les relations empiriques établies entre la vitesse du vent et l' $ESDD$  sous des conditions hivernales sont très différentes de celles qui ont été établies dans le cadre de l'étude réalisée au Japon par Taniguchi et al. [1979] pour des isolateurs exposés aux embruns salins provenant de la mer à une température ambiante. Rappelons que cette étude stipule que le taux d'accumulation de pollution sur la surface inférieure serait plus élevé que sur la surface supérieure et que l' $ESDD$  est une fonction cubique de la vitesse du vent. Beaucoup de paramètres peuvent être à l'origine de cette différence. Tout d'abord, la pollution marine ne se produit pas dans les mêmes conditions que la pollution hivernale. La surface supérieure de l'isolateur atteint un équilibre d'humidification et de nettoyage lors de l'exposition aux embruns salins provenant de l'océan, alors que sous des conditions hivernales, une telle situation ne se produit pas. D'autres facteurs comme l'humidité relative, la présence de glace et de neige, la concentration des particules non solubles pourraient, entre autres, modifier la nature de corrélation entre l' $ESDD$  et la vitesse du vent.

La comparaison des résultats que nous avons obtenus avec ceux de Hall et Mauldin [1981] nous indique également les différences entre l'accumulation de pollution sous des conditions hivernales et en température ambiante. Le rapport médian entre l' $ESDD_t$  et l' $ESDD_b$  pour l'ensemble des résultats montrés sur les Figure V.9 et Figure V.10 est de 3,5:1 en présence de

conditions hivernales alors que le rapport médian trouvé dans des essais similaires à l'intérieur d'une soufflerie à température ambiante pour une vitesse de vent de 0,4 à 11 m/s est de 0,25 : 1. Ainsi, les études réalisées par Hall et Mauldin démontrent une accumulation de pollution quatre (4) fois plus élevée sur la surface inférieure que sur la surface supérieure.

Selon la Figure V.12, les barres d'erreurs représentant l'écart-type de l'ESDD moyenne calculée pour chaque vitesse du vent nous démontrent qu'il y a une petite amélioration quant à la répétitivité des essais sur la surface supérieure en présence de la haute tension AC. Par contre, pour la surface inférieure, aucune amélioration n'a été constatée. En effet, pour la surface supérieure, la valeur maximale de l'écart-type est de 10 % en termes de pourcentage sous une tension de 45 kVAC contre 16 % en absence de tension. Pour la surface inférieure, le maximum est de 30 % sous une tension de 45 kVAC contre 24 % en absence de tension. Cela indique que l'application de la haute tension AC aux bornes de la chaîne d'isolateurs n'a pas vraiment d'influence sur la répétitivité des essais.

Afin de mieux définir l'étendue des valeurs de l'ESDD obtenues, nous avons déterminé l'intervalle de confiance de 95 %. Le Tableau V.10 et le Tableau V.11 ci-après présentent les limites supérieures et inférieures des intervalles respectives à chaque surface. Dans 95 % des cas, les taux moyen d'accumulation de pollution sur la surface supérieure sont compris entre [33,9 – 38,2 µg/cm<sup>2</sup>] à 5 m/s, entre [37,6 – 48,0 µg/cm<sup>2</sup>] à 10 m/s, et entre [36,3 – 51,0 µg/cm<sup>2</sup>] à 15 m/s. Pour la surface inférieure, les taux moyen d'accumulation de pollution sont compris

Tableau V.10: Valeurs limites de l'*ESDDt* @ 45 kVAC avec un intervalle de confiance de 95% – Chambre climatique – Étude no. 2

Vitesse du vent (m/s)	Nombre de données (N)	Valeur moyenne ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )	Limite inférieure ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )	Limite supérieure ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )
5	8	36,1	33,9	38,2
10	5	42,8	37,6	48,0
15	3	43,7	36,3	51,0

Tableau V.11: Valeurs limites de l'*ESDDb* @ 45 kVAC avec un intervalle de confiance de 95% – Chambre climatique – Étude no. 2

Vitesse du vent (m/s)	Nombre de données (N)	Valeur moyenne ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )	Limite inférieure ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )	Limite supérieure ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )
5	8	6,8	5,1	8,5
10	5	14,2	10,4	18,0
15	3	15,6	10,7	20,8

entre [5,1 – 8,5  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ], [10,4 – 18,0  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ] et [10,7 – 20,8  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ] à 5, 10 et 15 m/s respectivement. De ces deux tableaux, nous pouvons dire que pour les deux (2) surfaces, les intervalles ne sont pas non plus pas exclusifs pour les essais sous haute tension AC Et comme précédemment, le chevauchement de ces intervalles de confiance de 95 % s'explique aussi par le fait que nous n'avons pas recueilli suffisamment de données. Et, à notre avis, réaliser une série d'au moins dix (10) essais d'accumulation à 5, 10 et 15 m/s respectivement résoudrait probablement ce problème.

Par ailleurs, l'effet de la force diélectrophorétique est aussi remarquable sur la surface supérieure lorsque la vitesse du vent est faible. En effet, de la Figure V.13 qui nous montre une comparaison de valeurs de l'*ESDDt* de la surface supérieure, nous pouvons constater qu'à

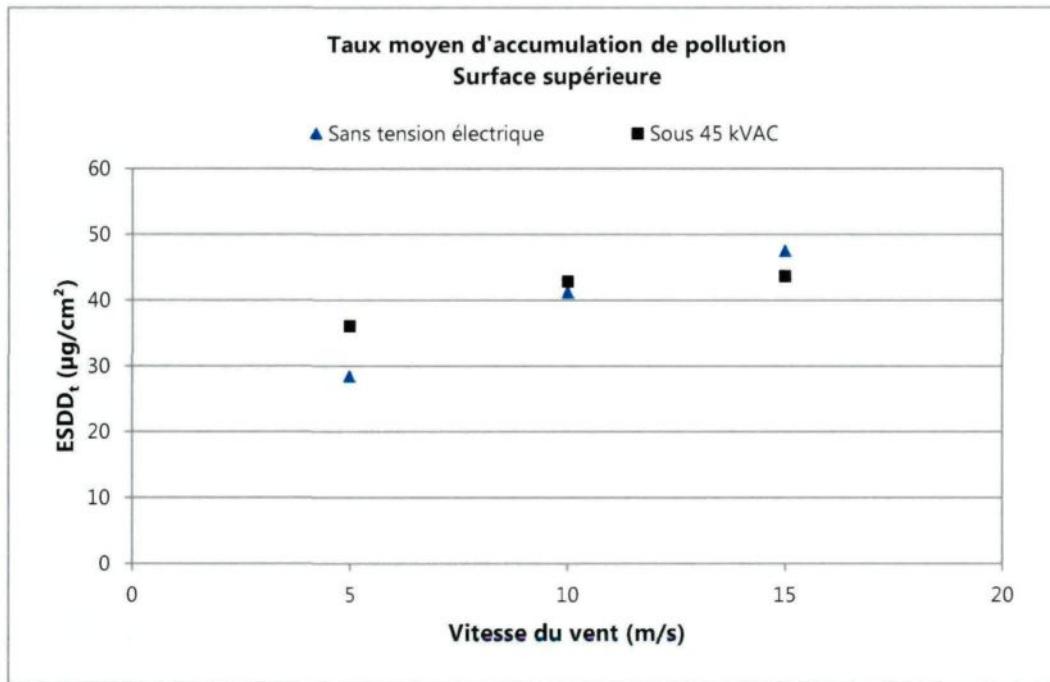


Figure V.13: *ESDD* moyennes de la surface supérieure – Sous 45 kVAC vs sans tension électrique

5 m/s, le taux moyen d'accumulation est plus élevé lorsque la chaîne d'isolateurs est soumise à une tension de 45 kVAC comparativement à une chaîne d'isolateurs hors tension. Par contre, pour des vitesses de vent supérieures à 10 m/s, l'effet de la force diélectrophorétique est plutôt moins important, ce qui veut dire qu'à partir d'une bonne brise sur l'échelle de Beaufort, le facteur qui domine le plus sur l'accumulation de pollution à la surface supérieure de l'isolateur, sous des conditions hivernales, est l'effet du vent même si de la haute tension AC est appliquée.

Quant à la surface inférieure, nous avons trouvé plutôt le contraire, c'est-à-dire, la force diélectrophorétique amplifie l'adhésion des particules de pollution à mesure que la vitesse du

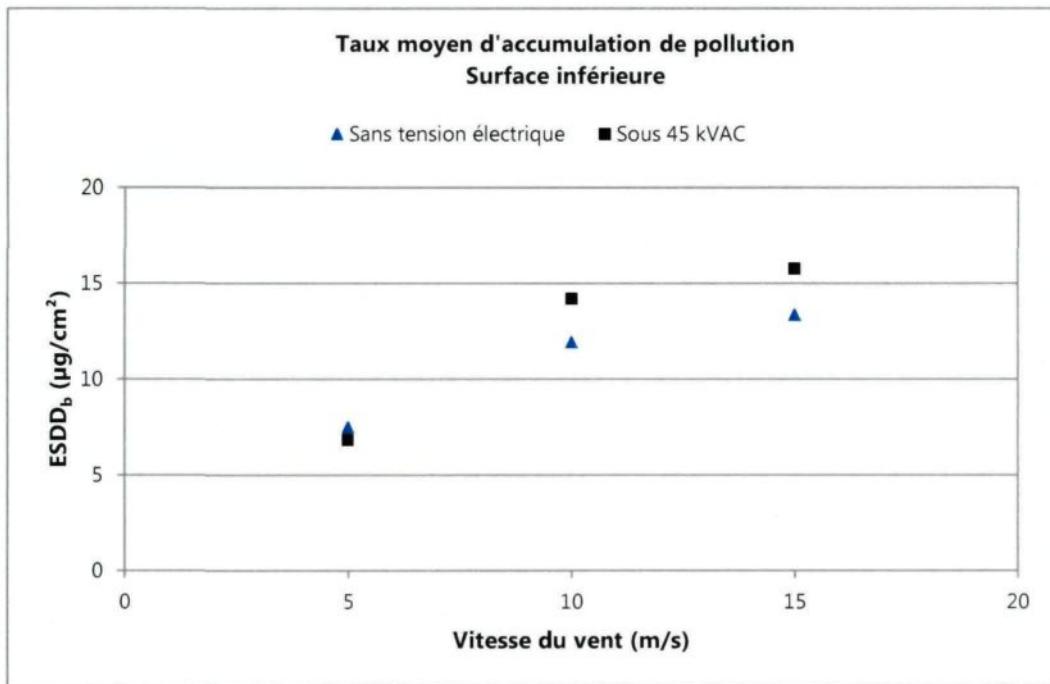


Figure V.14: *ESDD* moyennes de la surface inférieure – Sous 45 kVAC vs sans tension électrique

vent augmente. De la Figure V.14, nous pouvons remarquer que les valeurs de l'*ESDD<sub>b</sub>* sont presque les mêmes à 5 m/s pour une chaîne d'isolateurs sous haute tension AC et sans tension électrique. Par contre, avec des vitesses de vent plus élevées, il y a plus d'accumulation de pollution sur la surface inférieure lorsque la chaîne d'isolateurs est soumise à une tension de 45 kVAC. Cela pourrait être lié au fait que les particules qui sont entraînées par le courant de tourbillon de vent à proximité de la tige de l'isolateur sont soumis à l'effet dominant de la force diélectrophorétique dans cette zone, ce qui peut conduire à une forte densité de dépôt de sel proche de la tige, mais plutôt faible sur les bords du disque de l'isolateur [Hall et mauldin, 1981], [Farzaneh et Chisholm, 2009]. Par conséquent, l'accroissement de l'*ESDD* sur la surface

inférieure relié aux effets diélectrophorétiques est presque similaire en amplitude que l'accroissement relié à la vitesse du vent.

Il faudrait noter cependant qu'à l'étape où nous sommes rendus dans nos investigations, nous avons été capables d'analyser uniquement l'influence de l'application de la haute tension AC. Mais à l'avenir, il serait intéressant de mener des expériences en utilisant des sources de tension DC+ et DC- afin de mieux approfondir l'analyse des effets de la tension appliquée aux bornes de la chaîne d'isolateurs et de mettre en évidence l'influence du type de tension utilisé sur la variation du taux d'accumulation de pollution en fonction de la vitesse du vent sous des conditions hivernales.

## V.4 COMPARAISON DES MODÈLES NUMÉRIQUES ET EXPÉRIMENTAUX

### V.4.1 Comparaison des résultats de simulation numérique avec ceux de la soufflerie réfrigérée

En nous basant sur l'analyse des résultats de simulation numérique et des résultats dans la soufflerie réfrigérée, nous pouvons ressortir les trois points de comparaison suivants : la corrélation entre l'*ESDD* et la vitesse du vent, la loi qui définit cette corrélation et la façon dont l'accumulation se produit sur la surface de l'isolateur. Le Tableau V.12 ci-après nous résume la comparaison par rapport à ces trois points.

Tout d'abord, au niveau de la corrélation entre l'*ESDD* et la vitesse du vent, les résultats de simulation numérique ont démontré qu'il existe une corrélation positive entre ces deux variables, peu importe la pente de la surface de l'isolateur. Autrement dit, pour un isolateur

Tableau V.12: Modèle numérique versus modèle expérimental de la soufflerie réfrigérée

Points de comparaison	Résultats de simulation numérique	Résultats expérimentaux dans la soufflerie réfrigérée
Corrélation entre <i>ESDD</i> et <i>v</i>	positive	positive
Loi régissant la corrélation	puissance $V^b$ avec $b = f(MVD)$ variant de 6,55 à 2,97	puissance $V^b$ avec $b = 0,56$
Caractéristique de l'accumulation	accumulation sur la surface supérieure uniquement	accumulation abondante sur la surface supérieure mais faible sur la surface inférieure

donné, le taux d'accumulation augmente au fur et à mesure que la vitesse du vent s'intensifie.

Dans la soufflerie réfrigérée, les résultats obtenus vont également dans le même sens. En effet, avec un isolateur standard IEEE, la courbe de variation de l'*ESDD* en fonction de la vitesse du vent (Figure V.7), démontre clairement une forte corrélation positive entre ces deux variables.

Dans les deux cas – la simulation numérique et l'expérimentation dans la soufflerie réfrigérée – il a été également trouvé que la variation de l'*ESDD* en fonction de la vitesse du vent n'est pas linéaire mais suit la loi de puissance selon l'expression  $ESDD = aV^b$ . En outre, les résultats de la simulation numérique ont démontré que l'exposant *b* varie selon la taille des particules. Plus précisément, la valeur de *b* diminue au fur et à mesure que le diamètre volumique médian des particules augmente. Par ailleurs, avec les résultats expérimentaux dans la soufflerie, nous avons trouvé une valeur de *b* largement plus petite qui est de 0,56. À première vue, il y a un certain désaccord entre le modèle numérique et expérimental sur ce

point étant donné que la taille des particules d'eau atomisées et celle des particules de kaolin n'excèdent pas, en général, les dizaines de micromètres. Toutefois, il serait nécessaire de connaître la taille réelle des particules de pollution dans la soufflerie réfrigérée – une mesure qui n'a pas été réalisée dans cette étude – afin de valider si celle-ci peut correspondre à une valeur de 0,56 de l'exposant  $b$  par extrapolation des résultats numériques. D'autre part, dans le cas des résultats expérimentaux dans la soufflerie réfrigérée, l'effet du vent en condition hivernale est loin de suivre la loi cubique  $V^3$ , caractéristique de la pollution marine, alors que par simulation numérique, on peut obtenir un modèle similaire sous des conditions hivernales si la taille des particules est environ 30 µm.

Par rapport au dernier point de comparaison, à savoir la façon dont l'accumulation se produit sur la surface de l'isolateur, l'analyse qualitative des résultats expérimentaux dans la soufflerie a démontré qu'il y a plus d'accumulation de pollution sur la surface supérieure du disque que sur la surface inférieure. Cependant, aucune mesure n'a été relevée sur la surface inférieure du disque dans le cadre de cette étude pour quantifier cette différence. Au point de vue simulation numérique, le modèle utilisé ne tient pas compte non plus de cette surface inférieure du disque, mais tout porte à croire que même si le modèle permettait de calculer le taux d'accumulation sur cette surface, les résultats obtenus de devraient pas aller à l'encontre de l'analyse faite sur les résultats expérimentaux sur ce point.

#### V.4.2 Comparaison des résultats de simulation numérique avec ceux de la chambre climatique

En se basant sur les mêmes points de comparaison que précédemment, nous pouvons dresser le Tableau V.13 ci-dessous pour comparer les résultats de simulation numérique avec ceux de la chambre climatique. Nous pouvons constater que les résultats obtenus avec les deux modèles indiquent la présence de corrélation positive entre l'*ESDD* et la vitesse du vent. Par simulation numérique, les résultats ont aussi démontré que l'*ESDD* dépend fortement de la pente de la surface du disque au fur et à mesure que la vitesse du vent devient importante. Théoriquement, cela implique que dans le cas d'un isolateur capot et tige standard IEEE, dont la surface du disque est composée de deux parties : une partie verticale et une partie inclinée

Tableau V.13: Modèle numérique versus modèle expérimental de la chambre climatique

Points de comparaison	Résultats de simulation numérique	Résultats expérimentaux dans la chambre climatique (sans tension électrique)
Corrélation entre <i>ESDD</i> et <i>V</i>	Positive sur la surface supérieure	Positive sur les deux surfaces (supérieure et inférieure)
Loi régissant la corrélation	Puissance : $V^b$ avec $b = f(MVD)$ variant de 6,55 à 2,97	Puissance : $V^b$ avec $b = 0,47$ pour la surface supérieure et $b = 0,54$ pour la surface inférieure
Caractéristique de l'accumulation	Accumulation sur la surface supérieure uniquement	Plus d'accumulation sur la surface supérieure que sur la surface inférieure

avec un angle similaire à un disque aérodynamique (Figure V.15), il y aura plus d'accumulation sur le bord vertical du disque. En analysant l'aspect visuel du disque sur la Figure V.6 après la période d'accumulation, que ce soit dans la chambre climatique ou dans la soufflerie réfrigérée, nous croyons pouvoir affirmer que c'est le cas. Il faudrait tout de même mesurer séparément l'ESDD sur le bord vertical et sur la surface oblique du disque pour s'en assurer étant donné que l'aspect visuel n'est pas suffisant pour évaluer l'ESDD sur un isolateur.

Au niveau de la loi régissant la corrélation entre l'ESDD et la vitesse du vent, on trouve aussi avec le modèle expérimental de la chambre climatique une loi de puissance  $V^b$  mais avec une valeur de l'exposant  $b$  nettement différente de celle du modèle numérique comme ce fut le cas avec le modèle expérimental dans la soufflerie réfrigérée. Cette différence pourrait être causée par de nombreux facteurs. Un des facteurs pourrait être la température à laquelle se sont déroulées les expériences. En effet, dans la chambre climatique, la température a été

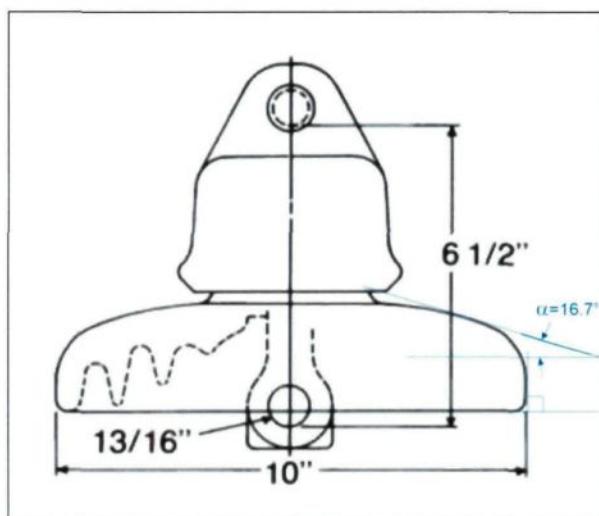


Figure V.15: Isolateur capot et tige standard IEEE

maintenue à  $-5^{\circ}\text{C}$  pour toutes les expériences alors que pour la simulation numérique, la valeur de la température utilisée était de  $-15^{\circ}\text{C}$ . Et dans la soufflerie réfrigérée, la température a été réglée à  $-10^{\circ}\text{C}$ .

Étant donné que la température est un paramètre d'entrée pour le modèle numérique, les résultats obtenus vont varier en fonction de la valeur utilisée. D'autre part, la température définit la condition d'accumulation. À  $-15^{\circ}\text{C}$ , il s'agit d'une accumulation sèche, à  $-10^{\circ}\text{C}$  c'est une accumulation semi-humide et à  $-5^{\circ}\text{C}$  on parle d'une accumulation humide [Fu, 2004], comme ce fut le cas durant l'incident qui s'est produit au poste de « Esplanade T.S. » selon les données sur la température et le point de rosée dans les figures ci-après. Ainsi, dépendamment de la température, on peut dire que le coefficient d'adhésion des particules de pollution à la surface de l'isolateur varie. Toutefois, des mesures expérimentales seraient nécessaires afin de déterminer la relation existante entre le taux d'accumulation et la température.

Un autre paramètre qui pourrait être aussi à l'origine de cette différence est la conductivité des particules de pollution. Comme nous avons mentionné précédemment, l'*ESDD* est proportionnelle à la salinité selon l'équation (II.9). Étant donné que la salinité est une fonction de la conductivité selon l'équation (II.8), par conséquent l'*ESDD* en est une également. D'un autre côté, l'*ESDD* est proportionnelle à la masse de pollution accumulée sur la surface de l'isolateur. Donc, théoriquement, la quantité de particules accumulée est fonction de la conductivité. Ce qui veut dire qu'en définissant la quantité totale de particules suspendues ou TSP dans la simulation numérique, on définit la conductivité des particules. Cependant, dans la

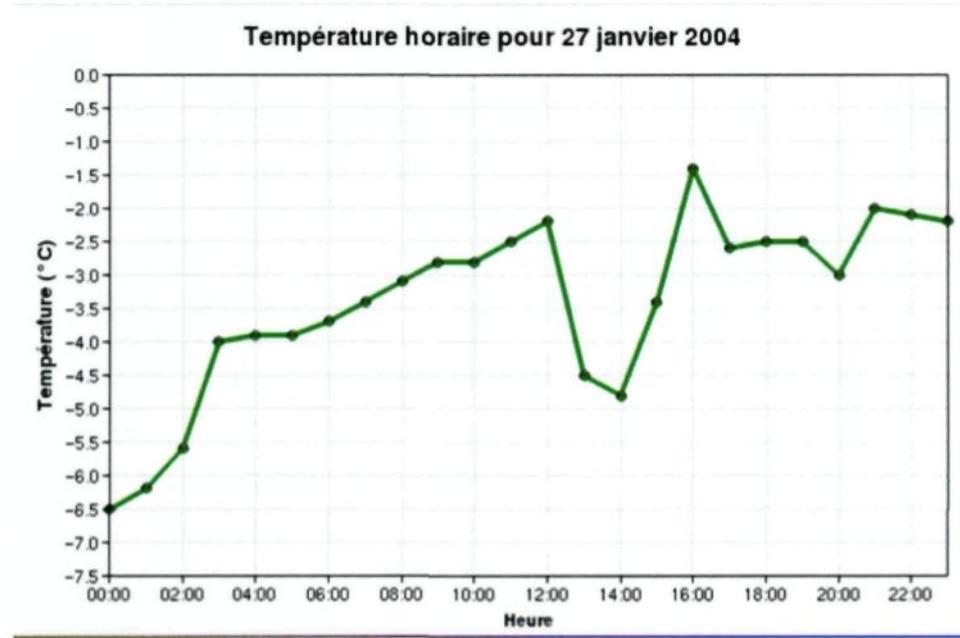


Figure V.16: Température horaire enregistrée à la station « Toronto Island A », [Environnement Canada]

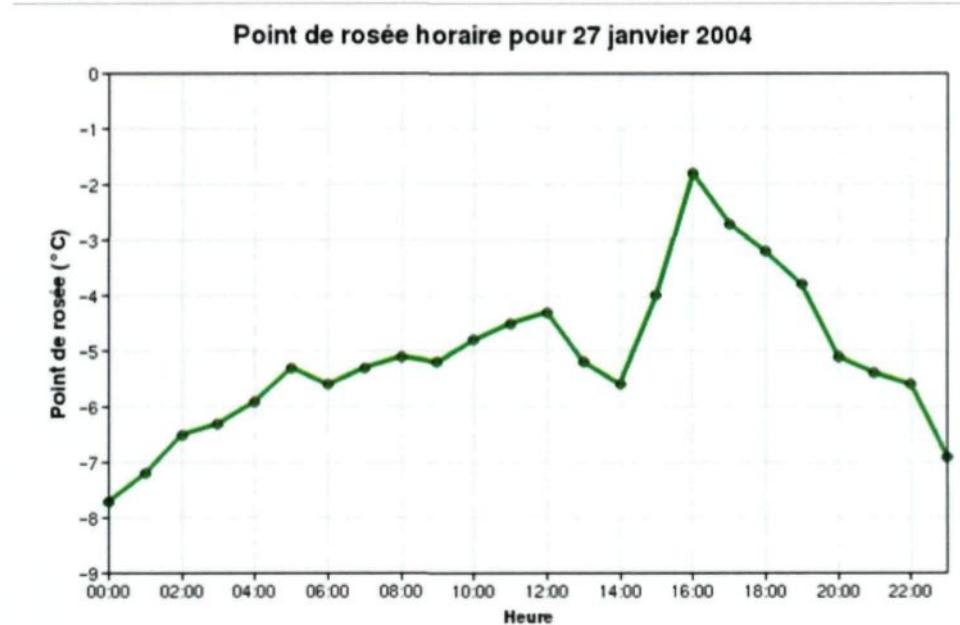


Figure V.17: Point de rosée horaire enregistré à la station « Toronto Island A », [Environnement Canada]

chambre climatique, on n'a pas nécessairement utilisé la même valeur que celle de la simulation numérique, de même dans la soufflerie réfrigérée. D'où la différence trouvée au niveau de la valeur de l'exposant  $b$ . Il importe toutefois de mener des expériences afin de déterminer la relation entre la conductivité et l' $ESDD$  mesurée.

Concernant le dernier point de comparaison sur la caractéristique de l'accumulation, nous pouvons dire que le modèle expérimental dans la chambre prédit également une accumulation plus élevée sur la surface supérieure que sur la surface inférieure du disque. Sauf que, contrairement avec le modèle expérimental dans la soufflerie réfrigérée, nous avons le ratio  $ESDDt/ESDDb$  pour le confirmer. En présence de conditions hivernales, il apparaît ainsi évident que la vitesse du vent contribue à l'accumulation de pollution surtout à la surface supérieure de l'isolateur. Sans doute, faut-il tenir compte de l'effet diélectrophorétique lorsque de la haute tension est appliquée aux bornes de l'isolateur sous des conditions réelles de service.

#### **V.4.3 Points de commun accord**

Compte tenu des comparaisons faites précédemment sur les résultats de simulation numérique et expérimentaux, nous pouvons affirmer que les trois (3) modèles développés dans le cadre de cette étude convergent sur le fait que sous des conditions hivernales, le taux d'accumulation est plus élevé sur la surface supérieure que sur la surface inférieure. Il faudrait quand même compléter le modèle numérique ainsi que le modèle expérimental de la soufflerie réfrigérée pour qu'on puisse comparer le ratio  $ESDDt/ESDDb$  pour les trois (3) modèles.

Un autre point commun aux trois (3) modèles développés est l'accroissement rapide du taux journalier d'accumulation lorsque la vitesse du vent est élevée. Par exemple, à 15 m/s nous obtenons un taux d'environ  $90 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  par jour avec le modèle numérique en considérant des particules de pollution de  $15 \mu\text{m}$  de MVD et une TSP de  $80 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ . De même, avec le modèle expérimental de la soufflerie réfrigérée, nous obtenons un taux de  $123 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  par jour en supposant que l'ESDD varie linéairement avec la durée de l'accumulation. Et avec le modèle expérimental de la chambre climatique, le taux journalier atteint même  $6,84 \text{ mg}/\text{cm}^2$  par jour pour la surface supérieure (en absence de tension électrique). Notons que dans ce dernier exemple, la conductivité de la saumure qui a été utilisée est très élevée. Nous avons également remarqué que dans les trois (3) modèles, il serait possible de contrôler le taux d'accumulation avec la conductivité de la saumure.

Comme dernier point commun, il en résulte de la comparaison des résultats de simulation numérique et expérimentaux que les trois (3) modèles ont tous suggéré que le taux d'accumulation de pollution, sous des conditions hivernales, varie en fonction de la vitesse du vent selon la loi de puissance  $V^b$ . Par contre, la valeur de l'exposant  $b$  varie d'un modèle à l'autre et que la variation obtenue est différente de la loi cubique  $V^3$  en général.

## **V.5 COMPARAISON AVEC LES ÉTUDES SUR LE TERRAIN**

Les études sur le terrain que nous avons pu trouver pour faire cette comparaison sont celles que Kinetrics avait réalisées dans les postes de « Richview T.S. » et de « Strachan T.S. », en Ontario, Canada, durant les périodes hivernales 1992 et 1994 respectivement. Même si les

objectifs fixés par ces études ne sont pas nécessairement pareils aux nôtres, nous avons jugé que les résultats obtenus pourraient être quand même utilisés à des fins de comparaison.

Le poste de « Strachan T.S. » se situe très proche de « Esplanade T.S. » où s'est produite la panne électrique due à un problème d'accumulation de pollution lors d'une rafale de vent. Ces deux postes se trouvent dans la même situation, c'est-à-dire, ils se situent à proximité d'une autoroute qui est surélevée par rapport à son emplacement comme nous le démontre la Figure V.18. De ce fait, la principale source de pollution est le salage des routes. Quant au poste de « Richview T.S. », il est situé dans la région proche du lac Ontario comme nous le démontre la Figure V.19. Il s'agit d'une région considérée comme urbaine dont la source de pollution est la même qu'à « Strachan T.S. »

L'étude dans le poste de « Strachan » a été effectuée sur trois types d'isolateurs : « NGK distribution Post », « NKG 25 kip Suspension » et « LAPP RG Station Post », pour une période de six mois, allant de novembre 1993 jusqu'en avril 1994. Les résultats de l'étude sont présentés à la Figure V.20. À « Richview T.S. », l'étude a été effectuée durant une période de cinq (5) mois, allant de décembre 1991 jusqu'à fin avril 1992, sur trois types d'isolateurs également : « Station Post », « NKG aerodynamic » et « LAPP Bell-shape ». En outre, la présence ou non de haute tension aux bornes de l'isolateur « Station Post » a été prise en considération dans l'étude. Les résultats de l'étude sont présentés à la Figure V.21.

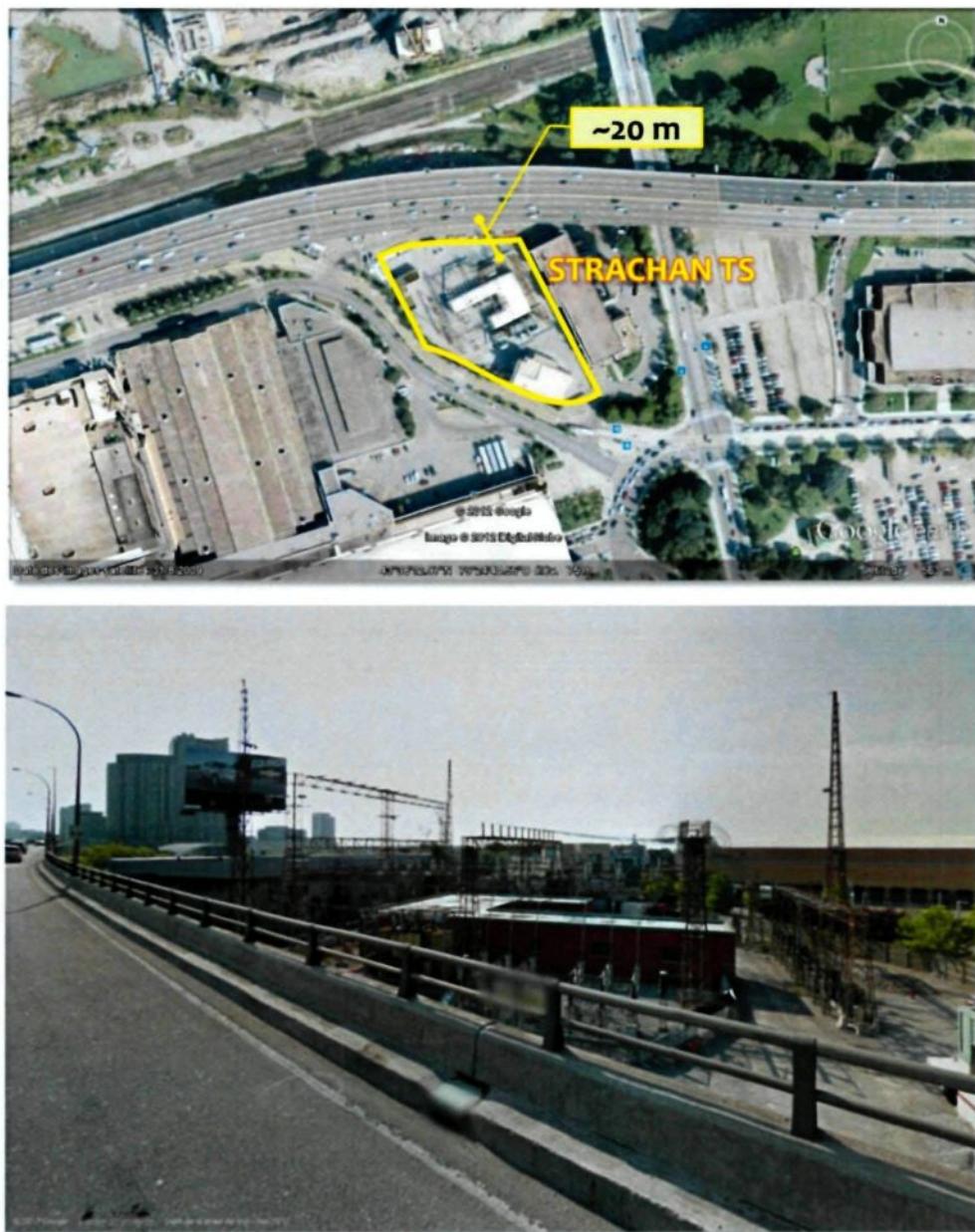


Figure V.18: Emplacement du poste de « Strachan T.S. » (gracieuseté Google)



Figure V.19: Emplacement du poste de « Richview T.S. » (gracieuseté Google)

Selon les données recueillies durant ces deux (2) études, les comparaisons que pouvons faire avec nos résultats seront limitées aux trois points suivants :

- le ratio du taux d'accumulation de pollution des surfaces supérieure et inférieure;
- l'effet de la force diélectrophorétique;
- l'influence du profil de la surface des isolateurs.

Les résultats de l'étude à « Strachan T.S. » seront utilisés pour le premier point et pour les deux derniers points, nous allons nous servir des résultats de l'étude à « Richview T.S. »

### V.5.1 Comparaison par rapport au ratio $ESDD_t/ESDD_b$

La Figure V.20 nous illustre les variations de l'ESDD, de la température et du niveau de précipitation durant l'hiver 1994. Les mesures de l'ESDD ont été prises sur base hebdomadaire, une période d'accumulation relativement courte pour des essais à l'extérieur, et les données météorologiques, la température et le niveau de précipitation, ont été relevées quotidiennement. Notons que les mesures sur l'ESDD ont été prises séparément pour la surface supérieure et la surface inférieure afin de pouvoir les comparer. Quant au niveau de la précipitation journalière, celui-ci a été divisé en deux sortes dépendamment si la précipitation s'est produite à une température supérieure ou inférieure à -1°C. Bien que l'étude ait été réalisée sur trois types d'isolateurs, nos observations et analyses porteront uniquement sur les isolateurs de type NGK 25 kip en suspension, étant donné qu'ils sont formés du même disque d'isolateur que nous avons utilisé pour les expérimentations dans la soufflerie réfrigérée et dans la chambre climatique.

Tel que démontré à la Figure V.20, il est possible de faire une comparaison sur la façon dont l'accumulation se produit sur chacune des surfaces de l'isolateur. Comme nous pouvons le constater, l'ESDD est plus élevé sur la surface inférieure que la surface supérieure, dans la plupart des cas, pour les isolateurs de type NGK 25 kip en suspension; ce qui va en quelque sorte à l'encontre de ce que nous avons trouvé expérimentalement dans la soufflerie réfrigérée et dans la chambre climatique. Par contre, en analysant ces résultats, nous croyons pouvoir trouver une explication à cette contradiction.

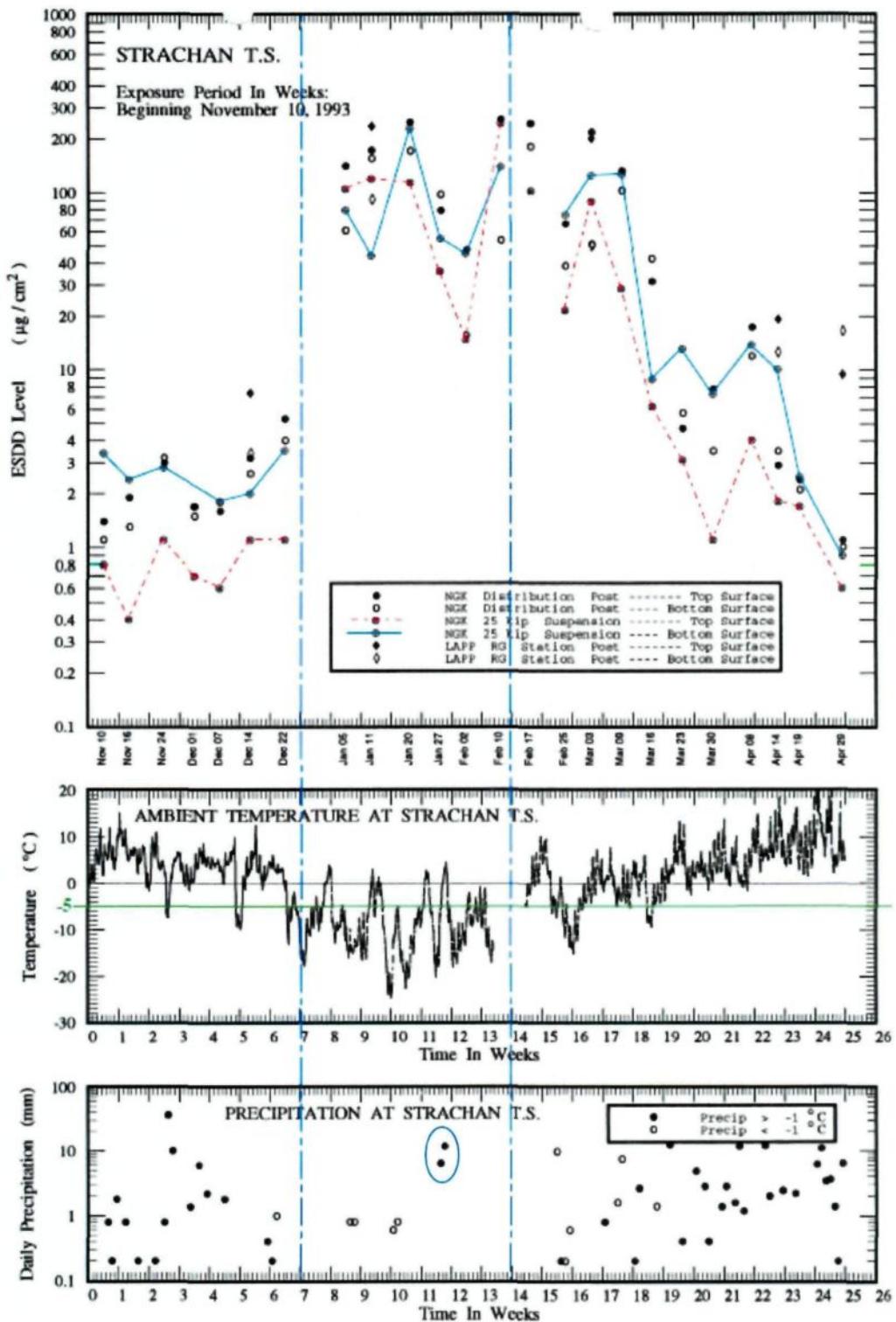


Figure V.20: Données relatives au taux de pollution sur les isolateurs à « Strachan T.S. » (gracieuseté Kinectrics)

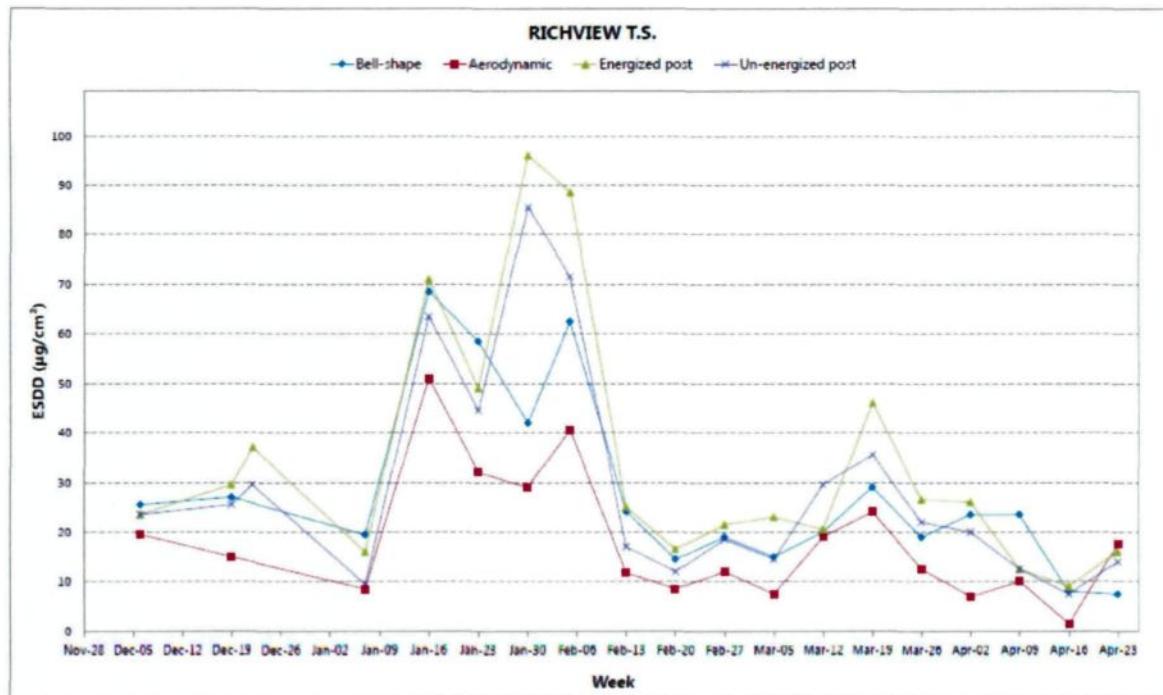


Figure V.21: ESDD moyenne (surfaces supérieure et inférieure) à « Richview T.S. » [Chisholm et al., 1993]

En prenant comme référence la température, les résultats peuvent être regroupés en deux classes distinctes dépendamment des périodes. Une classe, que nous allons nommer A, contenant les périodes durant lesquelles la température moyenne hebdomadaire est supérieure à  $-5^{\circ}\text{C}$  – il s'agit des périodes de part et d'autres des deux (2) lignes verticales, c'est-à-dire, les semaines du 10 novembre au 22 décembre 1993 et les semaines du 17 février au 29 avril 1994 – et une autre classe, que nous allons nommer B, contenant les périodes durant lesquelles la température moyenne hebdomadaire est inférieure à  $-5^{\circ}\text{C}$ . Ces périodes sont comprises à l'intérieur des deux lignes verticales, c'est-à-dire, les semaines du 5 janvier au 10 février 1994. De cette classification, nous pouvons remarquer que pour les résultats de la classe A, l'ESDD mesurée sur la surface inférieure est nettement plus élevée que sur la surface

supérieure peu importe la semaine. Par contre, pour les résultats de la classe B, le nombre de fois où l'*ESDD* de la surface inférieure dépassait celui de la surface supérieure est à parité. Autrement dit, pour les six (6) semaines appartenant à cette classe, la moitié seulement correspond à un niveau de pollution plus importante sur la surface inférieure que sur la surface supérieure. L'explication que nous pouvons avancer est qu'au-delà de  $-5^{\circ}\text{C}$ , il y a l'effet d'auto-nettoyage qui se produit sur la surface supérieure à cause de la fonte de neige ou de glace transportant les particules de pollution dissoutes dans l'eau qui ruisselle sur cette partie de la surface [Farzaneh et Chisholm, 2009]. Ainsi, nous en déduisons que, si durant une semaine donnée la température moyenne hebdomadaire est supérieure à  $-5^{\circ}\text{C}$ , on peut s'attendre à ce qu'il y ait plus d'accumulation de pollution sur la surface inférieure de l'isolateur que sur la surface supérieure. Et puisque dans notre étude nous avons pris comme hypothèse qu'il n'y a pas d'auto-nettoyage étant donné que les expériences dans la soufflerie réfrigérée et dans la chambre climatique se sont déroulées à  $-10^{\circ}\text{C}$  et  $-5^{\circ}\text{C}$  respectivement, cela expliquerait en partie la contradiction avec nos résultats.

Par ailleurs, la température à elle seule ne pourrait pas expliquer entièrement cette contradiction. Tel que reporté par Chisholm et al. [1993], le vent et les précipitations affectent principalement l'accumulation de pollution sur les surfaces d'isolateurs. Si nous revenons à la classification précédente démontrée sur la Figure V.20, nous pouvons noter que les résultats appartenant à la classe A sont caractérisés par des précipitations abondantes et que ces dernières se sont produites le plus souvent à une température supérieure à  $-1^{\circ}\text{C}$ . Quant aux résultats de la classe B, ils sont caractérisés par des précipitations clairsemées dont la majorité

s'est produites à une température inférieure à  $-1^{\circ}\text{C}$ . Vue la quantité énorme de précipitation qui est tombée à une température plus clémence dans la classe A, l'effet de l'auto-nettoyage de la surface supérieure serait encore accentué, ce qui fait en sorte que le taux d'accumulation mesuré sur cette surface après une période d'une semaine est plus faible que sur la surface inférieure.

Dans la classe B, nous constatons que durant les semaines du 5 janvier, 11 janvier et 10 février 1994, l'ESDD mesurée sur la surface supérieure est plus élevée que sur la surface inférieure. Selon la Figure V.20, la semaine du 5 janvier est précédée d'une semaine sans précipitation et d'une température moyenne inférieure à  $-5^{\circ}\text{C}$ , et durant la semaine, on peut en compter seulement deux journées de précipitation inférieure à  $-1^{\circ}\text{C}$ . Durant la semaine du 11 janvier, aucune précipitation n'est tombée. De même durant la semaine du 10 février, il n'y avait pas de précipitation enregistrée, ni la semaine antérieure non plus. Nous croyons alors pouvoir affirmer qu'en raison de ces facteurs, il n'y avait pas d'auto-nettoyage, ce qui a fait en sorte que plus de pollution s'est accumulée sur la surface supérieure par rapport à la surface inférieure durant ces périodes. Et par effet même, les résultats que nous avons obtenus dans la soufflerie réfrigérée et dans la chambre climatique viennent corroborer cette hypothèse.

En tenant compte de la même hypothèse, le fait que l'ESDD mesurée est plus élevée sur la surface inférieure que sur la surface supérieure durant la semaine du 27 janvier 1994 s'explique facilement, car il est tombé plus de 10 mm de précipitation à une température supérieure à  $-1^{\circ}\text{C}$  durant deux jours consécutifs de la semaine même si la température moyenne de la

semaine est inférieure à  $-5^{\circ}\text{C}$ . Nous pouvons postuler également l'effet d'auto-nettoyage sur la surface supérieure suite à la fonte de neige ou de glace qui s'y est accumulée, lorsque la température a augmenté au-delà de  $-4^{\circ}\text{C}$ , en transportant les particules de pollution dissoutes dans l'eau qui ruisselle sur cette partie de la surface [Farzaneh et Chisholm, 2009]. Par contre, les résultats des semaines du 20 janvier et du 2 février 2004 semblent contredire cette hypothèse. En effet, durant la semaine du 20 janvier, deux (2) jours de précipitation au-dessous de  $-1^{\circ}\text{C}$  ont été enregistrés et la semaine du 2 février est caractérisé par l'absence de précipitation. Pour le moment, nous n'avons pas d'explication plausible à ce sujet, cependant, la connaissance de la vitesse du vent durant ces périodes pourrait apporter des éléments de réponse. Sur la Figure V.22, nous avons une représentation graphique des données sur la vitesse hebdomadaire du vent enregistrée à la station « Toronto Island A » qui est proche du poste « Strachan T.S. ». Ces données du vent, fournies par Environnement Canada, correspondent à la période de la semaine du 10 novembre 1993 jusqu'à la semaine du 29 avril 1994. De cette figure nous pouvons remarquer que durant la semaine du 20 janvier, la vitesse moyenne hebdomadaire du vent est de 23 km/h (6,3 m/s) et le maximum est de 44 km/h (12,2 m/s). Et pour la semaine du 2 février, la vitesse moyenne hebdomadaire du vent est de 19 km/h (5,2 m/s) et le maximum est de 52 km/h (14,4 m/s). Sous de telles conditions, normalement on doit s'attendre à avoir plus d'accumulation de pollution sur la surface supérieure que sur la surface inférieure comme c'est le cas durant la semaine du 10 février. Mais au contraire, c'est l'inverse qui s'est produit au cours des semaines du 20 janvier et du 2 février. Nous n'oserions prétendre que la vitesse excessive du vent à une certaine journée de

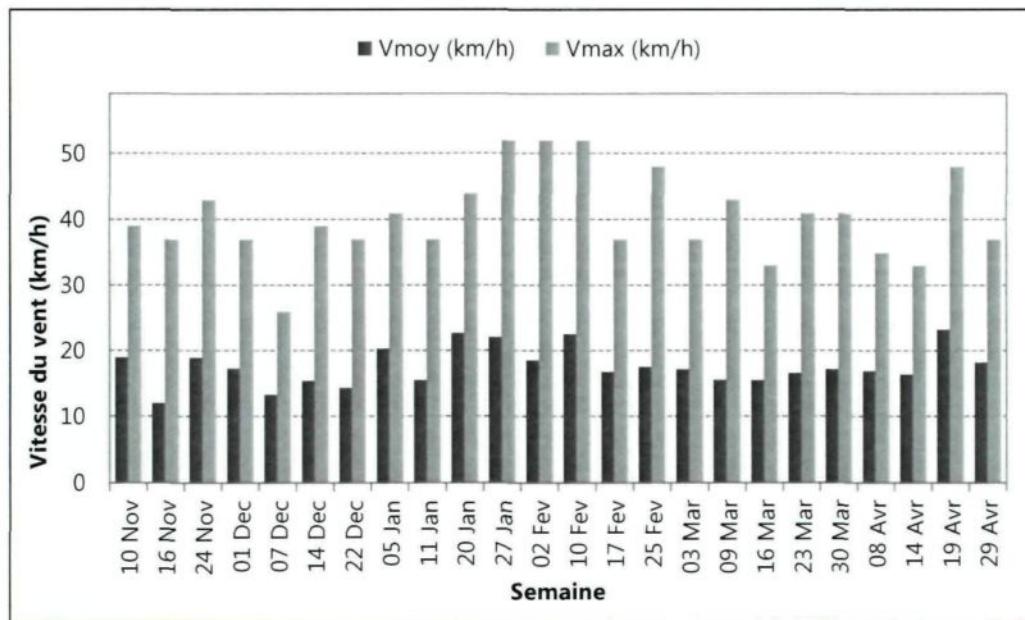


Figure V.22: Vitesses moyennes et maximales hebdomadaires du vent enregistrées à la station « Toronto Island A », Novembre 1993 – Avril 1994 [adapté d'Environnement Canada]

ces deux (2) semaines a pu jouer un rôle sur l'auto-nettoyage de la surface supérieure des isolateurs. En fait, certaines études [Rizk et al., 1972; R. Znaidi, 1993] menées dans le désert ont rapporté que l'effet de nettoyage dû au vent a fait en sorte que le dépôt de pollution observé était plus important sur la surface inférieure qui est à l'abri du vent que sur la surface supérieure qui est exposée au vent. Si l'on retient cette hypothèse dans le cas de la pollution hivernale, cela pourrait expliquer en partie le fait que, dans la majorité des cas, on a obtenu un taux d'accumulation de pollution plus élevé sur la surface inférieure des isolateurs que sur la surface supérieure lors de l'étude menée au poste de « Strachan T.S. ». En fait, d'après la Figure V.22, le pourcentage du nombre de semaines où la vitesse maximale du vent enregistrée dépassait les 36 km/h (10 m/s) est supérieur à 80% du nombre total des semaines de l'étude, soit 20 semaines sur 24.

En somme, les conditions climatiques dans lesquelles s'est déroulée l'étude à « Strachan T.S. » ne correspondaient pas tout à fait à des conditions dites hivernales à part durant certaines périodes, donc les résultats paraissent contradictoires aux nôtres. Par contre, l'hypothèse de l'auto-nettoyage qui se produit sur la surface supérieure sous de telles conditions semble expliquer la différence observée.

### **V.5.2 Comparaison par rapport à l'effet de la force diélectrophorétique**

Les résultats de l'étude à « Richview T.S. » tels que présentés par la Figure V.21 nous démontrent que, sur l'isolateur « Station Post », l'ESDD moyenne des deux surfaces supérieure et inférieure est, dans la plupart des cas, plus élevée lorsque de la haute tension est appliquée aux bornes des isolateurs. Toutefois, la différence observée n'est pas si énorme. En effet, si on compare les valeurs médianes, l'écart est d'environ 14% et pour les maximums l'écart est d'environ 12%. Notons que durant les périodes de cinq (5) mois d'études, la moyenne des vitesses du vent enregistrées hebdomadairement est environ 10 km/h, donc pas plus que 3 m/s. Avec nos résultats dans la chambre climatique, pour une vitesse de vent de 5 m/s, la moyenne de l'ESDD des deux surfaces est de  $21,4 \mu\text{g/cm}^2$  à 45 kVAC contre  $18,5 \mu\text{g/cm}^2$  en absence de tension. Ce qui donne un écart de 16% environ. Afin d'obtenir une comparaison plus détaillée par rapport à l'effet de la force diélectrophorétique, nous avons dressé le Tableau V.14 ci-après, montrant l'écart des valeurs médianes ou moyennes en présence et en absence de haute tension pour les surfaces supérieure et inférieure.

Du Tableau V.14, nous pouvons remarquer que pour la surface supérieure, l'écart est relativement important entre les valeurs médianes de l'*ESDD* avec et sans tension. Dans la chambre climatique à une vitesse de vent de 5 m/s, l'écart trouvé sur la même surface est aussi relativement important mais avec un degré moindre. Cette différence peut s'expliquer facilement avec l'analyse de la Figure V.13 faite précédemment. En effet, d'après ce que nos résultats ont démontré, l'écart entre les taux d'accumulation avec et sans tension sur la surface supérieure se réduit au fur et à mesure que la vitesse du vent augmente. Par conséquent, il est tout à fait normal que le pourcentage soit plus élevé dans le cas de « Richview T.S. » étant donné que la vitesse moyenne du vent était en-deçà de 5 m/s. Et compte tenu de ce qui précède, nous avons une confirmation du fait que la force diélectrophorétique n'a qu'un léger effet amplificateur sur l'*ESDD* de la surface supérieure en présence de conditions hivernales pour des vitesses de vent relativement faibles.

Pour la surface inférieure, nous pouvons constater que l'écart est aussi notable dans l'étude réalisée à « Richview T.S. ». Par contre, nos résultats dans la chambre climatique ont démontré que, lorsque la vitesse du vent est faible, l'*ESDD* est sensiblement le même peu

Tableau V.14: Valeurs médianes ou moyennes de l'*ESDD* ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )

Aspects des isolateurs lors de l'accumulation	Surface supérieure		Surface inférieure		Moyenne	
	Richview T.S.	Chambre climatique*	Richview T.S.	Chambre climatique*	Richview T.S.	Chambre climatique*
Avec haute tension	29	36,1	22	6,8	25	21,4
Sans tension	22	29,5	18	7,4	22	18,5
Écart (%)	32	22	22	-8	14	16

\* Pour une vitesse de vent de 5 m/s

importe si de la haute tension est appliquée ou non aux bornes des isolateurs. Cette contradiction pourrait être attribuée au fait que le processus d'accumulation sur la surface inférieure n'est pas le même dépendamment du profil de l'isolateur. À « Richview T.S. », les isolateurs concernés sont de type « Station Post » alors que dans notre étude nous avons un isolateur de type capot et tige. Selon toute vraisemblance, en présence de la haute tension, la distribution du champ électrique pourrait jouer un rôle important sur l'accumulation de pollution sur la surface inférieure même lorsque la vitesse du vent est faible.

### **V.5.3 Comparaison par rapport à l'influence de la forme des isolateurs**

En se basant sur le taux d'accumulation de pollution sur la surface totale (supérieure et inférieure) de l'isolateur, la Figure V.21 nous montre que l'*ESDD* moyenne est plus élevée sur les isolateurs de type « LAPP Bell-shape » que sur ceux de type « NGK aerodynamic ». Nos résultats de simulation selon le Tableau V.3 montrent plutôt que l'*ESDD* est pratiquement nul sur la surface supérieure de ces deux types d'isolateurs lorsque la vitesse de vent est faible (5 m/s et moins). Cette différence s'explique par le fait que nous avons considéré la surface totale sur la Figure V.21. En effet, en tenant compte uniquement de la surface supérieure, le rapport de Chisholm et al. [1993] dans le cadre de l'étude à « Richview T.S. » a mentionné que la valeur médiane de l'*ESDD* était de 6  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  pour les deux types d'isolateurs susmentionnés, alors que pour la surface inférieure, l'écart est nettement considérable (plus de 84% en faveur des isolateurs de type « LAPP Bell-shape »).

Ainsi, cette comparaison semble valider notre modèle numérique pour des vitesses de vent ne dépassant pas 5 m/s associées à des particules de 20 µm de MVD et de TSP égale à 30 µg/m<sup>3</sup>. Notons que les données sur la taille des particules ne sont pas disponibles pour l'étude à « Richview T.S. ». Par contre, les données recueillies sur le TSP montrent que la valeur médiane de la moyenne mesurée par semaine est de 28,6 µg/m<sup>3</sup>. Et comme il a été démontré par nos simulations numériques que l'ESDD était plus sensible à la moindre variation de MVD qu'à la variation de la TSP, nous supposons que la valeur de 6 µg/cm<sup>2</sup> mesurée à « Richview T.S. » devrait être due au fait que le MVD était légèrement différent de 20 µm.

## V.6 CONCLUSION

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté les résultats issus des simulations numériques et des expérimentations dans la soufflerie réfrigérée et dans la chambre climatique. Les résultats nous permettent de conclure qu'il existe une corrélation positive entre le taux d'accumulation de pollution et la vitesse du vent sous des conditions hivernales, et que la variation de l'ESDD en fonction de la vitesse du vent n'est pas linéaire, mais suit plutôt la loi de puissance. Avec les analyses et discussions, trois (3) modèles différents ont été établis pour représenter cette variation pour un isolateur de type capot et tige. D'après les comparaisons des résultats obtenus, nous pouvons ressortir les points communs suivants aux trois (3) modèles :

- ⇒ l'ESDD est plus élevée sur la surface supérieure que sur la surface inférieure de l'isolateur lorsqu'on considère qu'il n'y a pas d'auto-nettoyage;

- ⇒ il y a un accroissement rapide du taux journalier d'accumulation lorsque la vitesse du vent est élevée;
- ⇒ l'ESDD varie en fonction de la vitesse du vent selon une loi de puissance autre que la loi cubique.

En dernière analyse, la comparaison des résultats de la présente étude avec les résultats des études sur le terrain a permis de valider nos trois (3) modèles sur le fait que sous des conditions où la température moyenne hebdomadaire n'excède pas -5°C avec un niveau de précipitation faible, il y aura plus d'accumulation de pollution sur la surface supérieure de l'isolateur que sur la surface inférieure. Cette comparaison nous a permis aussi d'obtenir une validation partielle du modèle de la chambre climatique en présence de haute tension. Les résultats des études sur terrain à Richview et ceux de la présente étude s'accordent sur le point que la force diélectrophorétique a un léger effet amplificateur sur le taux d'accumulation de pollution, avec un changement minime sur l'ESDD de la surface inférieure qui approche les limites des procédures de mesurage. Finalement, il a été également possible de valider le modèle numérique à l'issue de cette comparaison même si cette validation n'est que partielle, en se limitant à des vitesses de vent qui n'excède pas 5 m/s associées à des particules de 20 µm de MVD et de TSP égale à 30 µg/m<sup>3</sup>.

## CHAPITRE VI

# CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET RECOMMANDATIONS POUR LES TRAVAUX FUTURS

### VI.1 CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Dans le cadre de ce projet de thèse, l'objectif fixé était d'étudier la variation du taux d'accumulation de pollution en fonction de la vitesse du vent sous des conditions hivernales. La réalisation d'une telle étude a nécessité le développement de nouvelles méthodes pour simuler le processus d'accumulation de pollution hivernale. Parmi les trois (3) catégories de méthodes de simulation évoquées dans le chapitre II sur la revue de littérature, nous avons opté pour le développement d'une méthode de simulation numérique par ordinateur et d'une méthode d'accumulation artificielle en laboratoire.

#### ❖ *Conclusions générales concernant la simulation numérique par ordinateur*

De la méthodologie utilisée pour la simulation par ordinateur, nous en concluons qu'il est possible d'adapter un modèle existant de l'accumulation de glace sur un câble pour simuler l'accumulation de pollution hivernale sur un disque d'isolateur. Grâce à la modularité de la structure générale du modèle existant, l'adaptation peut se faire facilement en modifiant quelques modules de calculs. Certains modules n'étaient même plus nécessaires. Le modèle en

2D de l'accumulation de pollution hivernale sur un isolateur est donc en quelque sorte une version simplifiée du modèle d'accumulation de glace sur un câble au point de vue structurelle. Il faut cependant tenir compte de certaines restrictions pour faire cette adaptation. Quant à l'implémentation du modèle en 2D, il a fallu juste effectuer des changements au niveau des classes correspondant aux modules de calculs qui nécessitaient des modifications et désactiver les classes correspondant aux modules qui n'étaient plus nécessaires.

Compte tenu des résultats de simulation numérique qui a été effectuée par la suite, nous en sommes venus aux conclusions suivantes :

- (1) Il y a une forte corrélation positive entre le taux journalier d'accumulation de pollution et la vitesse du vent sous des conditions hivernales.
- (2) Le modèle en 2D utilisé définit le taux d'accumulation de pollution hivernale, sur un disque d'isolateur sans tension, comme étant une fonction de puissance de la vitesse du vent selon l'expression  $ESDD = aV^b$ , où  $a$  et  $b$  sont des paramètres dont les valeurs sont conditionnées par la forme de l'isolateur, la taille des particules de pollution et la quantité totale de particules en suspension dans l'air.
- (3) La relation entre l' $ESDD$  et la vitesse du vent est très sensible à la moindre variation de la taille des particules de pollution.
- (4) L'influence de la concentration de polluants dans l'air sur le taux d'accumulation devient importante lorsque la vitesse du vent dépasse 15 m/s. Donc, la pollution sur les isolateurs est plus accentuée en hiver due à la combinaison du salage de route et d'un fort vent.

Enfin, le modèle en 2D a pu être validé partiellement suite à la comparaison avec les résultats d'une étude sur terrain. Les résultats obtenus, en utilisant cette approche, sont prometteurs et qu'on devrait s'y appuyer pour développer un modèle plus complet et représentatif en 3D.

❖ *Conclusions générales concernant l'accumulation artificielle en laboratoire*

Une nouvelle méthode expérimentale a été développée et mise en application dans le but de simuler en laboratoire le processus d'accumulation de pollution à la surface des isolateurs sous haute tension AC et ce, sous des conditions hivernales. Au meilleur de nos connaissances, il s'agit de la première réalisation d'un montage expérimental destiné à reproduire en laboratoire le processus naturel de contamination durant l'hiver. Le développement de cette méthode s'est basé, en premier lieu sur l'analyse approfondie des diverses techniques expérimentales existantes, lesquelles ont été développées pour simuler le processus de contamination pour les pollutions de type marine et industrielle. À l'issu de cette analyse, le concept derrière la méthode « Dry-Mixing » s'est avéré le mieux approprié pour notre application. Ainsi, ce concept fût retenu comme base pour la conception de notre modèle physique. La deuxième étape du développement était la conception du générateur de pollution, lequel est composé d'un disperseur de poudre de kaolin et d'un atomiseur d'eau salée selon le concept de base. Différents types de disperseur de kaolin ont été fabriqués et testés au cours de cette étape, sans toutefois donner de résultats satisfaisants du point de vue fonctionnement. Nous avons donc opté pour l'achat du SAG 410L, qui est un générateur d'aérosols solides que l'on utilise généralement pour disperser de poudres sèches dans les

procédés industriels ou les travaux de contrôle de qualité. L'acquisition de cet appareil nous a permis enfin de mettre en place le montage expérimental. Des essais de contamination ont pu être effectués par la suite dans la soufflerie réfrigérée ainsi qu'à l'intérieur de la chambre climatique de la CIGELE afin d'analyser le fonctionnement du montage et de définir ses paramètres d'utilisation. Ainsi, les effets du vent sur le taux d'accumulation de pollution ont pu être étudiés en présence de conditions hivernales de même que l'influence de la haute tension AC dans le processus d'accumulation.

En considération de l'analyse des résultats obtenus, les principales conclusions qui en découlent sont les suivantes :

- (5) Le taux d'accumulation de pollution est nettement plus élevé sur la surface supérieure que sur la surface inférieure du disque lorsqu'il n'y a pas d'autonettoyage. Autrement dit, la pollution s'accumule plus rapidement sur la surface supérieure des isolateurs sous des conditions hivernales.
- (6) Les deux modèles physiques (modèle de la soufflerie réfrigérée et celle de la chambre climatique) définissent l'*ESDD* comme étant une fonction de puissance de la vitesse du vent autre que la fonction cubique selon l'expression  $ESDD = aV^b$ , où *a* et *b* sont des paramètres dont les valeurs dépendent des conditions expérimentales telles que la durée de l'accumulation, la température, la pression d'air du gicleur, le débit, la concentration de la saumure et la tension appliquée. En absence de tension électrique, la valeur obtenue de l'exposant *b* est sensiblement identique pour les deux (2) surfaces du disque.

- (7) Lorsque de la haute tension AC est appliquée aux bornes de l'isolateur, la force diélectrophorétique a pour effet d'augmenter le taux d'accumulation de pollution sur la surface supérieure seulement lorsque la vitesse du vent est faible, contrairement sur la surface inférieure où son influence est négligeable pour de faible vitesse du vent, mais devient importante à mesure que la vitesse du vent s'intensifie.
- (8) La répétitivité des résultats et les validations partielles obtenues indiquent que les deux (2) modèles physiques qui ont été développés et utilisés dans le cadre de cette étude permettent de simuler adéquatement l'accumulation de pollution sur les isolateurs sous des conditions hivernales. Toutefois, des ajustements sont requis et d'autres expériences doivent être réalisées afin d'obtenir une validation complète.

Par ailleurs, les résultats expérimentaux obtenus nous ont permis d'étudier les effets du vent sur le taux d'accumulation de pollution sous des conditions hivernales ainsi que d'analyser l'influence de la haute tension AC dans le processus d'accumulation. Et au point de vue pratique, les investigations que nous avons menées apportent une contribution aux travaux ayant été déjà entrepris à la CIGELE et chez Kinectrics pour améliorer les connaissances sur la pollution hivernale. Elles proposent, entre autres, une nouvelle méthode de pré-contamination pour ce type de pollution afin de mieux répondre aux besoins de l'étude de la performance des isolateurs sous des conditions hivernales. De même, les résultats obtenus peuvent contribuer à l'élaboration de critères de prédiction et de modèles mathématiques pour une meilleure coordination des périodes de nettoyage et de maintenance des isolateurs durant l'hiver.

Pour terminer, les trois (3) modèles de simulation développés dans la présente étude s'accordent sur le fait qu'il y a un accroissement rapide du taux d'accumulation de pollution sur les isolateurs lorsque la vitesse du vent est élevée. Ainsi donc, sous des conditions hivernales caractérisées par de forts vents, le salage des routes constitue une menace potentielle et pratique pour les installations électriques à l'extérieur.

## VI.2 RECOMMANDATIONS

Les résultats obtenus au cours de la présente étude ont contribué à une meilleure compréhension du processus d'accumulation de pollution sur les isolateurs sous des conditions hivernales. Ces résultats ont aussi permis d'analyser l'effet du vent sur le taux d'accumulation. À la lumière de ce qui précède, les modèles de simulation n'étaient qu'à leur première étape de développement. Cependant, nous n'avons pas pu étudier tous leurs aspects. Cela revient à dire qu'il faudrait mener d'autres travaux pour les conduire à un niveau de développement plus évolué. Ainsi pour les travaux à venir, les recommandations suivantes seraient de mise.

### ❖ *Recommandations sur la simulation par ordinateur*

Tout d'abord, au niveau de la méthodologie pour simuler l'accumulation de pollution, il faudrait développer un modèle en 3D en se basant sur le même principe utilisé dans le développement du modèle en 2D. Autrement dit, partir du principe sur la détermination de la trajectoire des particules de poussière en suspension dans un écoulement d'air. Sauf qu'au lieu de développer soi-même un modèle numérique pour l'écoulement d'air dont la réalisation serait probablement très complexe en 3D, on pourrait utiliser un logiciel comme Ansys Fluent,

par exemple, pour modéliser directement l'écoulement. À ce moment, on aurait besoin de la modélisation géométrique de l'isolateur qu'on peut réaliser facilement avec n'importe quel logiciel de modélisation. À titre d'exemple, sur la Figure VI.1, nous avons un modèle de disque d'isolateur réalisé avec SolidWorks. Ensuite, il faudrait envisager aussi d'intégrer la force diélectrophorétique dans l'équation du mouvement afin d'avoir un modèle en 3D plus complet qui tient compte de la présence de la haute tension AC aux bornes de l'isolateur. Pour ce faire, il faudrait probablement faire appel à un autre logiciel de modélisation pour calculer la distribution du champ électrique en 3D autour de l'isolateur afin de faciliter le développement du modèle. De la même façon, on pourrait ajouter aussi la force électrostatique dans le cas d'une tension DC. Et un peu plus tard, il faudrait penser également à introduire la nature du matériau d'isolation pour que le modèle puisse tenir compte du type d'isolateur. Et d'après ce que nous avons mentionné précédemment, il faudrait également être en mesure d'évaluer le taux d'accumulation sur la surface inférieure avec le modèle. Une fois le développement complété, la prochaine étape serait d'établir le processus de validation du modèle en 3D obtenu et par la suite réaliser différentes simulations afin d'étudier la variation du taux d'accumulation de pollution en fonction de la vitesse du vent et, entre autre, analyser l'effet des paramètres qui peuvent influencer le processus d'accumulation.

Dans la même perspective, la prochaine recommandation serait de développer un modèle de simulation numérique afin d'étudier l'influence de la distance de l'autoroute par rapport à l'emplacement des réseaux électriques. Cela consiste à développer un modèle en 3D pour la phase de transport afin de pouvoir analyser l'effet de la distance sur les variations du MVD et



Figure VI.1 : Modèle géométrique de l'isolateur réalisé avec le logiciel SolidWorks

de la distribution statistique typique de la taille des particules se trouvant à proximité des isolateurs, lesquelles vont influencer le taux d'accumulation de pollution. En premier lieu, il serait peut-être bien de finaliser le modèle préliminaire en 2D que nous avons proposé pour une particule. Pour ce faire, il faudrait penser à développer un programme qui tient compte d'une distribution uniforme de flux de  $n$  particules qui se trouvent uniformément au départ autour d'un point milieu de coordonnées  $(\bar{x}_0, \bar{y}_0)$ . On pourrait considérer aussi une distribution statistique uniforme de la taille des particules avec une moyenne  $\bar{D}_0$  ou un  $MVD$ . Ensuite, le programme devrait calculer la trajectoire de chaque particule pour déterminer le nombre de particules qui vont se retrouver dans un volume de contrôle considéré comme le voisinage de l'isolateur, après avoir parcouru une distance  $x$ . Par la suite le  $MVD$  ou la distribution statistique de la taille de ces particules qui se trouvent dans le volume de contrôle sera déterminée et on établit leur relation en fonction de la distance. Après, on se servira de ce

MVD ou de cette distribution de taille des particules comme intrant au modèle de l'accumulation de pollution. D'où la nécessité de développer un modèle en 3D pour la phase de transport une fois le modèle en 2D complété.

Apparemment, les deux modèles (transport et accumulation) pourraient être développés indépendamment l'un de l'autre. Par contre, ils devraient être réunis de façon à pouvoir se compléter lors de l'implémentation afin qu'ils puissent former un seul modèle représentant le processus de pollution des isolateurs sous des conditions hivernales.

#### ❖ *Recommandations sur l'accumulation artificielle en laboratoire*

Concernant les études expérimentales qui faisaient appel à l'accumulation de pollution de façon artificielle en laboratoire, nous avons mentionné dans le chapitre précédent plusieurs points qui méritent d'être pris en considération dans les travaux à venir. À cet effet, les recommandations suivantes que nous considérons comme importantes mais ne sont pas pour autant exhaustives, permettront non seulement d'améliorer les modèles développés mais aussi d'approfondir davantage les connaissances sur le phénomène de pollution hivernale qui est encore moins connu jusqu'à présent par rapport aux autres types de pollution.

Premièrement, nous recommandons de compléter l'étude par la mesure de la NSDD. Pour ce faire, il faudrait élaborer une méthodologie plus efficace pour la prise de mesure. Certes, la filtration de l'eau qui a été utilisée pour laver l'isolateur est une bonne façon de faire sauf que son application a été remise en question lorsque la quantité de matière non soluble est importante. Étant données les ouvertures des pores qui sont très petites, le filtrage demande

beaucoup plus de temps, et par conséquent, la prise de mesure devient très longue et fastidieuse surtout s'il faut séparer la mesure pour les surfaces supérieure et inférieure de l'isolateur. Une alternative intéressante serait d'utiliser un turbidimètre qui mesure la lumière dispersée par les particules en suspension (turbidité) avec un angle de 90° par rapport au faisceau de lumière incident. En se servant de cet appareil, il serait possible d'établir rapidement la relation entre la *NSDD* et la turbidité ou l'indice de la présence de particules en suspension dans l'eau de lavage.

Deuxièmement, il faudrait valider l'hypothèse selon laquelle les paramètres *a* et *b* des modèles empiriques trouvés ne dépendent pas de la quantité de particules de kaolin émises. Pour cela, il faudrait mener des expériences, soit dans la soufflerie réfrigérée, soit dans la chambre climatique, au cours desquelles on fait varier la vitesse de la courroie du générateur de poudre. À partir des résultats obtenus, on pourrait établir les courbes de variation de l'*ESDD* en fonction de la vitesse du vent et vérifier si effectivement les paramètres *a* et *b* demeurent inchangés. Pour mieux représenter les résultats, il serait convenable de déterminer au préalable la relation entre la vitesse de la courroie et la quantité de kaolin émise. Bien qu'une calibration existe déjà pour cet appareil, le fait de prolonger la buse du générateur par un tube en cuivre avec un rayon de courbure modifierait certainement cette calibration.

Notre troisième recommandation serait à propos de certaines mesures manquantes. Tout d'abord, il y a la mesure de la taille réelle des particules qui serait nécessaire à des fins de validation. Actuellement, il existe différentes techniques qu'on pourrait utiliser pour effectuer

cette mesure, et à notre connaissance, la CIGELE s'est même dotée dernièrement d'un équipement très sophistiqué, justement pour mesurer la taille moyenne d'une distribution de particules en suspension. Ensuite, dans la soufflerie réfrigérée, il faudrait refaire quelques expériences pour prendre les mesures de l'*ESDD* sur la surface inférieure du disque. Cela permettrait de calculer le ratio *ESDD<sub>t</sub>/ESDD<sub>b</sub>*. Et sur la surface supérieure, il faudrait mesurer séparément l'*ESDD* sur les bords vertical et horizontal du disque afin de valider l'hypothèse émise sur l'influence de la pente de la surface.

Quatrièmement, il serait intéressant aussi à l'avenir de mener des travaux pour étudier l'influence des autres paramètres qui n'ont pas été considérés dans la présente étude, sur la variation de l'*ESDD* en fonction du vent. Parmi ces paramètres, nous avons la température, la concentration de la saumure qui représente la quantité de sel épandu sur les routes durant l'hiver, le type d'isolateur incluant la forme et la nature du matériau isolant, l'orientation de l'isolateur, la distance de l'emplacement de ce dernier par rapport à la source de pollution, et la nature de la tension appliquée qui fera intervenir l'utilisation d'une source haute tension à courant continu positif et négatif.

Pour terminer, nous recommandons fortement à l'avenir de porter le nombre minimal d'essais à dix (10) pour chaque valeur de paramètre étudié. Cela améliorera davantage la répétitivité des essais et minimisera les effets des perturbations que nous avons constatés au niveau des résultats.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Akbar M. et F. Zedan**, « Performance of HV Transmission Line Insulators in Desert Conditions, Part III, Pollution Measurements at a Coastal Site in the Eastern Region of Saudi Arabia », IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 1, pp. 429 – 436, janvier 1991.
- Alston L.L. et S. Zoledziowski**, « Growth of Discharges on Polluted Insulation », Proceedings of IEE, Vol. 110, No. 7, pp. 1260 – 1266, juillet 1963.
- Arabani M.P. et A.R. Shirani**, « An artificial neural network modeling of ESDD », Cigré 35th session, Paris, Paper no. 33-101, 1994.
- Beauséjour Y.**, « Insulator Contamination Study for Distribution Systems », CEA Report for Project 75-05, 1981.
- Besztercey G. et G.G. Karady**, « An Artificial Contamination Method for Composite Insulator », IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.15, No.2, avril 2000.
- Blomqvist G.**, « Air-borne Transport of De-icing Salt and Damage to Pine and Spruce Trees in a Roadside Environment », Licentiate thesis TRITA-AMI-LIC 2044, Division of Land and Water Resources, Department of Civil and Environmental Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, 25 pp., 1999.
- CEI 1245**, « Essais de pollution artificielle sur isolateurs haute tension destinés aux réseaux à courant continu », Première édition, 1993.
- CEI 60507**, « Essais sous pollution artificielle des isolateurs pour haute tension destinés aux réseaux à courant alternatif », Deuxième édition, 1991.
- Cherney E.A.**, « Flashover Performance of Artificially Contaminated and Iced Long Rod Transmission Line Insulators », IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, février 1980.
- Chisholm W.A., T. Jarv et Y.T. Tam**, « Determination of Insulator Contamination Levels from Environmental Measurements », Report No. 92-264-K, avril 1993.
- Chisholm W.A., P.G. Buchan et T. Jarv**, « Accurate Measurement of Low Insulator Contamination Levels », IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 3, juillet 1994.

**Chisholm W. A., K.G. Ringler, C.C. Erven, M.A. Green, O. Melo, Y. Tam, O. Nigol, J. Kuffel, A. Boyer, I.K. Pavasars, F.X. Macedo, J.K. Sabiston et R.B. Caputo**, « The Cold Fog Test », IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, pp. 1874 – 1880, 1996.

**CIGRE Task Force 33.04.01**, « Polluted Insulators: A Review of Current Knowledge », CIGRE Brochure No. 158, juin 2000.

**CIGRE Task Force 33.04.07**, « Natural and Artificial Ageing and Pollution Testing of Polymeric Insulators », Technical Brochure 142, Paris: CIGRE, 1999.

**Cimador A. et S. Vitet**, « La pollution des isolateurs externes », Journal Épure, extrait du No. 27, Paris, juillet 1990.

**Duchesne M.**, « Conception du montage électrique pour l'analyse de l'accumulation de pollution sur l'isolateur sous haute tension », Rapport final, 6GIN781 Stage-Projet II, Université du Québec à Chicoutimi, Été 2006.

**Eklund A., I. Gutman et R. Hartings**, « Dust Cycle Method: Fast Pollution Accumulation on Silicone Rubber/EPDM Insulators », in Proceedings of IEEE, International Symposium on Electric Power Engineering , Stockholm Power Tech, Vol. « High- Voltage Technology », pp. 293 – 297, juin 18 – 22, 1995.

**Ely C.H.A., R. G. Kingston et P. J. Lambeth**, « Artificial and Natural Pollution Tests on Outdoor 400 kV Substation Insulators », Proceedings of the IEE, Vol. 118, No. 1, pp. 99 – 109, janvier 1971.

**Engelbrecht C.S., S.M. Berlijn, B. Engström, R. Hartings et K. Halsan**, « Dimensioning of Insulators for Salt Pollution: A Novel Procedure and a Laboratory Test Method », Cigré 33-4-01, Session 2002.

**Engelbrecht C.S., R. Hartings, B. Engström, D. Hübinette et K. Halsan**, « The Dry-Salt-Layer Method, a Laboratory Pollution Test Method for Marine Pollution: Its Repeatability and a Comparison of Field and Laboratory Results », XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands 2003.

**Environnement Canada**, « National Climate Data and Information Archive »  
[http://www.climate.weatheroffice.gc.ca/climateData/canada\\_e.html](http://www.climate.weatheroffice.gc.ca/climateData/canada_e.html)  
(Dernière consultation décembre 2012)

**Farzaneh M., T. Baker, A. Bernstorf, K. Brown, W.A. Chisholm, C. de Tourreil, J.F. Drapeau, S. Fikke, J.M. George, E. Gnandt, T. Grisham, I. Gutman, R. Hartings, R. Kremer, G. Powell, L. Rolfseng, T. Rozek, D.L. Ruff, D. Shaffner, V. Sklenicka, R. Sundararajan et J. Yu**, « Insulator Icing Test Methods and Procedures », IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 4, octobre 2003.

**Farzaneh M. et W.A. Chisholm**, « Insulators for Icing and Polluted Environments », IEEE Press Series on Power Engineering, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, USA, 2009.

**Fikke S.M.**, « Possible Effects of Contaminated Ice on Insulator Strength », 5th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Tokyo, 1990.

**Forrest J.S.**, « The Electrical Characteristics of 132 kV Line Insulators under Various Weather Conditions », IEE Journal, Vol. 79, pp. 401-423, 1936.

**Forrest J.S.**, « The Performance of High Voltage Insulators in Polluted Atmospheres », Conference Paper IEEE Winter Meeting, New York, 1969.

**Fu P.**, « Modelling and simulation of the ice accretion process on fixed or rotating cylindrical objects by the boundary element method », Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi, 2004.

**Gerstik A.K., A.V. Korsunser et N.K. Nikolskii**, « The Effect of Fouling on Insulators for HVDC Overhead Lines », Direct Current, 1957.

**Gorur R.S., E.A. Cherney et J.T. Burnham**, « Outdoor Insulators », Ravi S. Gorur Inc., Phoenix, Arizona 85044, USA, 1999.

**Hall J.F. et F.P. Mauldin**, « Wind Tunnel Studies of the Insulator Contamination Process », IEEE Transactions on Electrical Insulation , Vol. EI - 16 , No. 3, pp.180 – 188, juin 1981.

**Pidd H.**, « India blackouts leave 700 million without power », The Guardian, 31 juillet 2012.  
<http://www.guardian.co.uk/world/2012/jul/31/india-blackout-electricity-power-cuts>  
(Dernière consultation décembre 2012)

**Hydro One Networks**, « Leave to Construct Underground Transmission Line from John TS to Esplanade TS », Ontario Energy Board docket EB-2004-0436, S92 Downtown Cables Application, 2004.

**Hylten-Cavallius N., S. Annstrand, H. Witt et V. Madzarevie**, « Insulation Requirements, Corona Losses, and Corona Interference for HVDC Lines », IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 83, No. 5, pp. 500-507, 1964.

**IEC/TS 60815**, « Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions », Edition 1.0, 2008.

**IEEE Standard 4**, « IEEE Standard Techniques for High Voltage Testing », Piscataway, NJ: IEEE Press, 1995.

**Kawai M.**, « AC Flashover Test at Project UHV on Ice-coated Insulators », IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, 1970.

**Keyence**, « Mouvement des microparticules et pollution électrostatique », Guide sur l'électricité statique et les ioniseurs.

<http://www.ag2m.fr/images/stories/technique%20dionisation.pdf>

(Dernière consultation décembre 2012)

**Kimoto I., K. Kito et T. Takatori**, « Antipollution Design Criteria for Line and Station Insulators », IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Paper 71 TP 649 PWR, 1971.

**Kimoto I., T. Fujimura et K. Naito**, « Performance of Insulators for Direct Current Transmission Line under Polluted Condition », IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 92, No. 3, pp. 943-949, 1973.

**Langmuir I.P. et K.B. Blodgett**, « Mathematical Investigation of Water Droplet Trajectories », Program Press 196, Vol. 10, Report No. RL-224, 1945.

**Looms J.S.T**, « Insulators for HIGH VOLTAGES », Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom, 1988.

**Lundmark A. et B. Olofsson**, « Chloride Deposition and Distribution in Soils along a Deiced Highway – Assessment Using Different Methods of Measurement », Water Air Soil Pollution, Vol. 182, pp. 173-185, janvier 2007.

**Matsuoka R., K. Kondo, K. Naito et M. Ishii**, « Influence of non-soluble contaminants on the flashover voltage of artificially contaminated insulators », IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.11, No.1, janvier 1996.

**McComber P. et G. Touzot**, « Calculation of the Impingement of Cloud Droplets in a Cylinder by the Finite-Element Method », Journal of the Atmospheric Sciences, Vol. 38, mai 1981.

**Mizuno Y., H. Nakamura et K. Naito**, « Dynamic Simulation of Risk of Flashover of Contaminated Ceramic Insulators », IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 3, pp. 1292-1298, juillet 1997.

**NGK Insulators LTD.**, « Study of Pollution Problem », Technical Note 68069, Mizuho, Nagoya, Japan, 1968.

**Office québécois de la langue française**, « Pollution », 2004.

[http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id\\_Fiche=8358493](http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=8358493)

(dernière consultation décembre 2012)

**Rizk F.A.M, A.A. El-Sarky, A.A. Assaad et M.M. Awad**, « Comparative tests on contaminated insulators with reference to desert conditions », Cigré 24th session, Paris, Paper no. 33-03, 28 août–6 septembre, 1972.

**Rizk F.A.M.**, « Application of dimensional analysis to flashover characteristics of polluted insulators », IEE Proc. 117, pp. 2257–2260, 1970.

**Salam M.A., H. Ahmad, S.A. Fuad, A.S. Ahmad, T. Tamsir, M.A.M. Piah, Z. Buntat, Z. Saadom et R. Budin**, « Development of Mathematical Relation between ESDD and Wind Velocity for a Contaminated Insulator in Malaysia », Proceedings of The 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, juin 2000.

**Salam M.A., H. Goswami et Z. Nadir**, « Determination of Equivalent Salt Deposit Density Using Wind Velocity for a Contaminated Insulator », Journal of Electrostatics 63, pp. 37-44, 2005.

**Sugawara N., S. Watanabe et K. Hokari**, « Flashover Performance of Transmission Line Insulators covered with Salt-Contaminated Ice and Icicles », 7th International Symposium on High Voltage Engineering, Dresden, No. 44.10, 1991.

**Taniguchi Y., N. Arai et Y. Imano**, « Natural Contamination Test of Insulators at Noto Testing Station Near Japan Sea », IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, No. 1, janvier/février 1979.

**Vosloo W.L. et J.P. Holtzhausen**, « Insulator pollution and wetting processes at severe coastal site », XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands, 2003.

**Vuckvic Z. et Z. Zdravkovic**, « Effect of Polluted Snow and Ice Accretions on High Voltage Transmission Line Insulators », 5th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Tokyo, 1990.

**Walshe D.E.J.**, « Wind Tunnel Experiments on the Pollution of Suspended High Voltage Insulators », National Physical Laboratory, Teddington, England, Aero Rep. 1083, 1963.

Wikipédia, Loi de Stokes

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Loi\\_de\\_Stokes](http://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_de_Stokes) (dernière consultation décembre 2012)

**Wu D. et S. Su Zhiyi**, « The Correlation Factor Between DC and AC Pollution Levels: Review and Proposal », in Proceedings of 10th International Symposium on High Voltage Engineering, Montreal, Vol. 3, pp. 253-256, août 1997.

**Znaidi R.**, « Composite insulators: Results of outdoor and laboratory experiments in Tunisia », Proc. of the International Workshop on Non-Ceramic Outdoor Insulation, Société des Électriciens et des Électroniciens (SEE), Paris, 15-16 avril, 1993.

## ANNEXE I

### DONNÉES TECHNIQUES DU GÉNÉRATEUR DE POUDRE (MODÈLE SAG 410 DE TOPAS-GMBH)



#### Description

Le SAG 410 est un disperseur de poudres sèches d'usage général que l'on peut utiliser pour une large gamme d'applications dans le domaine des aérosols et des poudres, des procédés industriels et des travaux de contrôle de qualité. La technique de dispersion des poussières sèches et des poudres comprend deux étapes : l'apport en continu de matériau au disperseur et la dispersion du matériau sous forme d'aérosol.

Une méthode éprouvée de mesure de la quantité de poudre envoyée vers le disperseur consiste à utiliser une courroie à pignons dentés. Les espaces bien définis entre les dents

garantissent un apport constant et reproductible de poudre même pour de faibles taux d'alimentation. La concentration en particules de l'aérosol en sortie peut être facilement ajustée sur une large gamme en modifiant la vitesse de la courroie d'alimentation.

La poudre est prélevée sur la courroie par une buse d'éjection (similaire à la norme DIN ISO 5011). Un grattoir spécialement conçu garantit un remplissage régulier des espaces de la courroie et minimise l'influence du niveau de la poudre dans le réservoir sur le débit massique d'aérosol.

## **Applications**

- ⇒ Mesure d'efficacité des filtres;
- ⇒ Recherche sur les aérosols;
- ⇒ Études sur l'inhalation et la toxicologie;
- ⇒ Procédés d'optimisation de combustion;
- ⇒ Visualisation de flux, applications LDV et PIV;
- ⇒ Procédés de mélange et de revêtement;
- ⇒ Performance, évaluation et calibration des échantillonneurs et contrôleurs de poussières.

## **Principaux avantages**

- ⇒ Taux d'alimentation constant et reproductible sur un large gamme – convient à de nombreuses applications;

- ⇒ Mesure très précise et constante de la poudre, presque indépendante du niveau de poudre dans le réservoir;
- ⇒ Remplissage en cours de fonctionnement sans aucun effet sur la concentration en aérosol – idéal pour les études prolongées;
- ⇒ Hautes concentrations même à bas débit – accélère les tests en applications bas débit;
- ⇒ Matériau facile à nettoyer et à changer;
- ⇒ Les unités de dispersion interchangeables permettent à un unique instrument d'avoir une gamme en sortie de 1 à 6 000 g/h;
- ⇒ Des télécommandes sont disponibles pour les contrôles manuels ou informatisés.

### **Principe de fonctionnement**

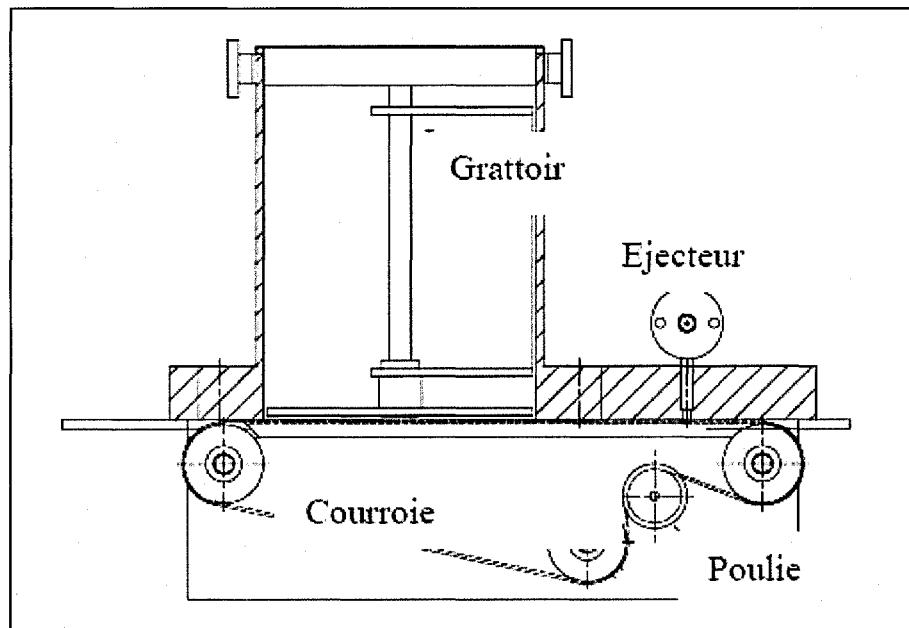
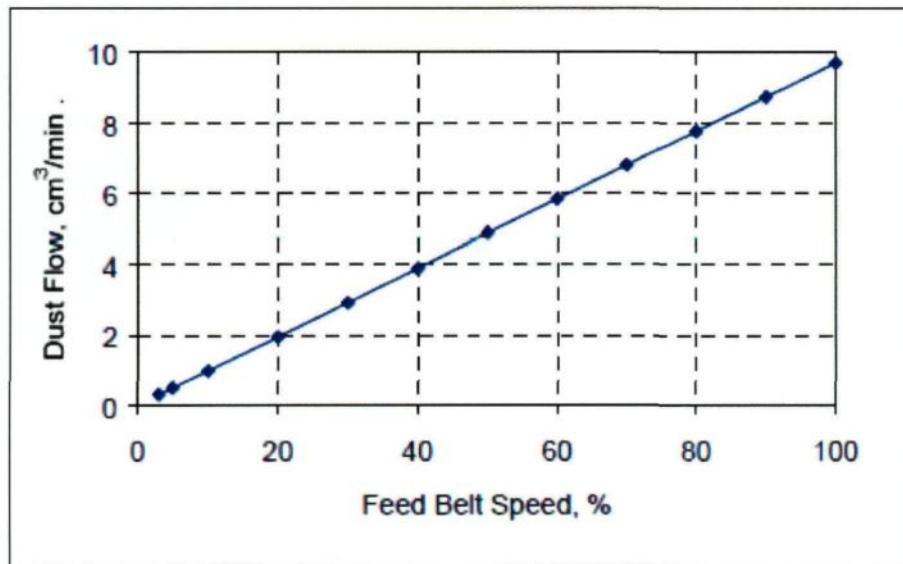


Schéma de l'unité de dispersion SAG 410

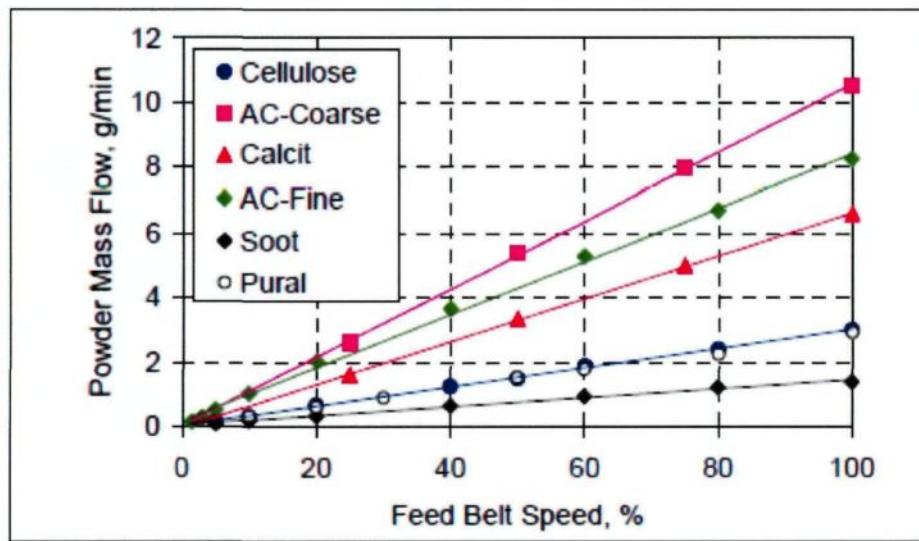
## Calibration

Le rendement en masse spécifique du SAG se détermine facilement. L'utilisateur peut ajuster le débit volumique de poussière en contrôlant la vitesse de la courroie d'alimentation. Le diagramme suivant démontre l'évolution du débit volumique de poussière par rapport à la vitesse de la courroie d'alimentation.



Débit volumique/vitesse de courroie (SAG 410)

Le débit massique du matériau solide dépend de sa densité moyenne. On peut facilement la déterminer en mesurant la masse du produit fourni sur une durée spécifique à différentes vitesses de la courroie. Le diagramme suivant démontre des exemples d'une telle calibration. Lorsque cette dernière est finie, l'utilisateur peut facilement ajuster le SAG au rendement massique désiré.



Débit massique/vitesse de courroie d'alimentation déterminé pour différentes poudres (Modèle SAG.410)

## Spécifications

Type de particules	Poudres sèches non collantes
Réservoir à poudre	400 cm <sup>3</sup> (SAG 410 et 410L), 1 420 cm <sup>3</sup> (SAG 410H)
Durée de fonctionnement sans rechargement	0,8 ... 44 h (SAG 410)
Alimentation en air comprimé	Max. 6 bar (600 kPa)
Alimentation électrique	100 ... 260 Vca / 47 ... 63 Hz
Dimensions	L 320 x 1 400 x H 320 mm
Poids	12 kg

## Gamme d'alimentation

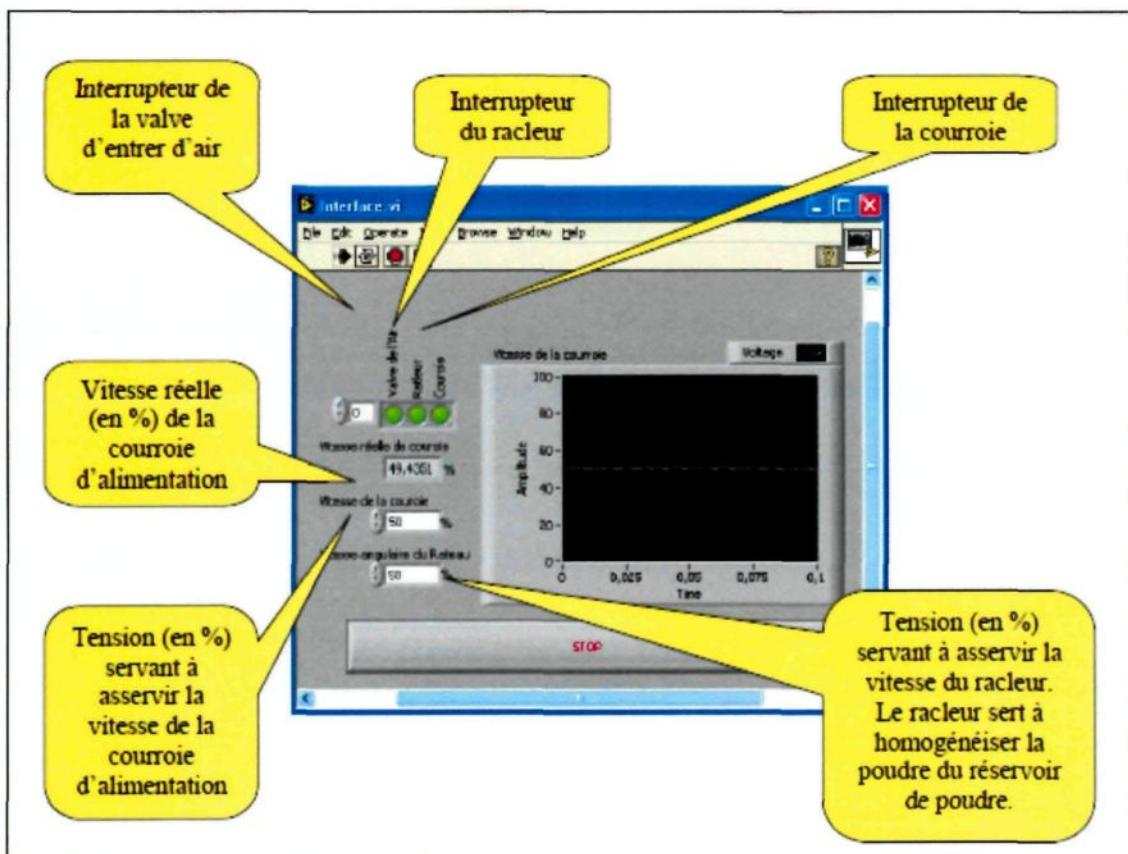
Trois modèles sont disponibles pour le SAG 410 avec différentes gammes de dosage. Le tableau suivant résume les performances de chaque modèle :

Modèle SAG	410L	410	410H
Débit volumique cm <sup>3</sup> /h	2 ... 260	9 ... 520	120 ... 6 487
Débit massique g/h*	2 ... 260	9 ... 490	114 ... 6 162
Débit d'aérosol m <sup>3</sup> /h*	1 ... 4	1 ... 4	5 ... 20
Concentration de poudre g/m <sup>3</sup> *	0,5 ... 245	2 ... 490	6 ... 1 230

\* Dépend de la densité moyenne, les données dans le tableau sont valables pour SAE Fine 0,95 g/cm<sup>3</sup>

### Interface de commande graphique

Il est possible de créer une interface analogique sur un tableau de bord composé de boutons physiques.



## ANNEXE II

### DONNÉES TECHNIQUES DU CONDUCTIMÈTRE (MODÈLE SC72 DE YOKOGAWA)



#### Description

Compact, facile à utiliser, et étanche, le SC72 est conçu spécifiquement pour répondre aux besoins à la fois du terrain et en laboratoire. Ce conductimètre portable comprend des fonctionnalités avancées telles que la mémoire de données, l'alarme, et l'autodiagnostic des fonctions. Combiné avec une large variété d'électrodes, le SC72 offre la souplesse nécessaire pour répondre aux exigences de presque toutes les applications de la conductivité.

#### Caractéristiques

- ⇒ Étanche à l'eau (IP67), boîtier et gaines de connecteurs scellés ;

- ⇒ Sélection automatique de la plage permettant de mesurer une conductivité de 0 à 2 000 mS/cm;
- ⇒ Affichage large, facile à lire;
- ⇒ Compensation automatique de la température (courbe de NaCl ou coefficient défini par l'utilisateur);
- ⇒ Autodiagnostic avertissant les conditions de défaut;
- ⇒ Arrêt automatique prolongeant la durée de vie de la batterie;
- ⇒ 300 points de mémoire de données (enregistre la valeur de la conductivité, température, date et heure);
- ⇒ Fonction d'alarme sonore.

## Spécifications

<b>Plages de mesures</b>	
Conductivité	0 ... 2 000 mS/cm (dépendant de la sonde choisie)
Résistivité	0 ... 40,0 MΩ (sonde de haute pureté seulement)
Température	0 ... 80°C
<b>Affichage</b>	
LCD numérique	
<b>Résolution</b>	
Conductivité	0,001 µS/cm (plage de 0 à 2 µS/cm)
Résistivité	0,1 MΩ
Température	0,1°C
<b>Répétabilité</b>	
±1% de la plage à pleine échelle	
<b>Température d'utilisation</b>	
0 ... 80°C	
<b>Température ambiante</b>	
0 ... 50°C	
<b>Alimentation électrique</b>	
Deux (2) piles alcalines AA	

### ANNEXE III

#### DONNÉES TECHNIQUES DE L'HYGROMÈTRE (MODÈLE TH550 DE DICKSON)



#### Spécifications

##### Plages de mesures

Température	-30°C ... 50°C
Humidité	0% ... 95% HR (sans condensation)

Point de rosée	-30°C ... 50°C
----------------	----------------

Affichage	LCD numérique
-----------	---------------

##### Résolution

Humidité	1% RH
Température	1°C

<b>Précision</b>	
Température	±1°C
Humidité	±2% RH de 0 ... 60 %, ±3 % RH de 61 ... 95% à 23°C
Point de rosée	±2°C
<b>Capteurs</b>	
Humidité	Film mince de condensateur
Température	Thermistance
<b>Affichage</b>	LCD numérique
<b>Taux d'échantillonnage</b>	Approximativement 1 par seconde
<b>Temps de réponse moyen</b>	5 secondes pour aller jusqu'à 60 % de pleine échelle dans l'air circulant à 4,6 m/s
<b>Conditions ambiantes d'opérations</b>	0°C ... 50°C, 0 ... 90% RH
<b>Dimensions (L x P x H)</b>	15,88 cm x 6,35 cm x 4,48 cm
<b>Dimensions de la sonde</b>	2,34 cm de diamètre, 15,0 cm de long sur un câble de 15,2 cm
<b>Alimentation électrique</b>	Pile 9 V
<b>Poids</b>	0,3 kg

## ANNEXE IV

### PROCÉDURES POUR LA PHASE D'ACCUMULATION

#### Préparation

Dépendamment de l'endroit où les expériences vont se dérouler, la préparation est un peu différente. De ce fait, nous allons décrire séparément les procédures à suivre pour la soufflerie réfrigérée et la chambre climatique.

##### ❖ *Dans la soufflerie réfrigérée*

Pour les expériences qui se déroulent dans la soufflerie réfrigérée, l'ordre des préparatifs est tel que mentionné dans la liste suivante :

- ⇒ préparer une feuille de mesure (voir Annexe VI) pour faciliter la collecte des données;
- ⇒ mesurer la conductivité de l'eau dans le réservoir n°4 et ajouter du sel ou de l'eau déionisée le cas échéant pour l'ajuster;
- ⇒ ouvrir les vannes pour envoyer l'eau du réservoir n°4 vers le tunnel;
- ⇒ chauffer le gicleur n°2 en actionnant l'élément chauffant;
- ⇒ envoyer l'air vers le gicleur en ajustant la pression à 276 kPa (40 psi);
- ⇒ démarrer le tunnel avec une fréquence de 20 Hz pour le ventilateur, et régler la température à -10°C;

- ⇒ laver l'échantillon de disque d'isolateur avec de l'eau distillée en portant des gants chirurgicaux en tout temps pour éviter de contaminer la surface de l'isolateur;
- ⇒ préparer l'eau de lavage : 500 ml d'eau distillée + 100 ml d'alcool;
- ⇒ s'assurer que l'eau du réservoir n°4 arrive bien dans le tunnel. Pour ce faire, déverser l'eau provenant des conduits, mesurer la conductivité et la comparer avec celle du réservoir n°4;
- ⇒ faire la mise au point du générateur de poudre SAG 410L : pression d'air à 2 bars, inspecter la quantité de poudre, lancer le programme qui commande le SAG 410L. Entrer la valeur 50 pour le racleur et 50 pour la vitesse de la courroie. Ensuite, cliquer successivement sur les trois boutons pour que le générateur de pollution démarre. Les trois boutons doivent être verts et la courbe de vitesse doit indiquer 50 (voir Annexe I pour le pilotage du SAG 410L à l'aide de l'interface de commande graphique). Par la suite, couper l'envoi de poudre en désactivant le dernier bouton à droite. Les deux autres doivent rester verts.

❖ *Dans la chambre climatique*

Pour les expériences qui se déroulent dans la chambre climatique, la liste des préparatifs est la suivante :

- ⇒ préparer une feuille de mesure (voir Annexe VI) pour faciliter la collecte des données;
- ⇒ démarrer le système de refroidissement pour refroidir la chambre climatique à la température souhaitée. Dépendamment de la température initiale de la chambre, cette étape pourrait prendre une heure. Garder la porte de la chambre bien fermée;

- ⇒ chauffer le gicleur et le conduit d'eau à l'intérieur de la chambre;
- ⇒ envoyer l'air vers le gicleur et ajuster la pression à 276 kPa (40 psi);
- ⇒ s'assurer que la valve du débitmètre soit fermée. La vanne installée après le débitmètre doit être également maintenue sur la position fermée;
- ⇒ mesurer la conductivité de l'eau dans le réservoir n°4 et l'ajuster le cas échéant;
- ⇒ ouvrir les vannes spécifiques à l'envoi de l'eau du réservoir n°4 dans le conduit principal de la chambre climatique;
- ⇒ s'assurer que l'eau du réservoir n°4 arrive bien à l'entrée du débitmètre. Pour ce faire, déverser l'eau provenant du conduit principal de la chambre (celui qui est relié au réservoir n°4), mesurer la conductivité et comparer cette dernière avec celle du réservoir n°4;
- ⇒ laver l'échantillon du disque d'isolateur avec l'eau distillée en portant des gants chirurgicaux en tout temps pour éviter de contaminer la surface de l'isolateur;
- ⇒ préparer l'eau de lavage : 500 ml d'eau distillée + 100 ml d'alcool;
- ⇒ faire la mise au point du générateur de poudre SAG 410L comme dans le cas de la soufflerie réfrigérée;
- ⇒ ajuster le niveau de tension à 45 kVAC le cas échéant.

## Phase d'accumulation

Les procédures à suivre pour réaliser l'accumulation sont également différentes dépendamment de l'endroit où se déroulent les expériences. De ce fait, nous allons décrire séparément les procédures à suivre dans la soufflerie réfrigérée et dans la chambre climatique.

### ❖ *Dans la soufflerie réfrigérée*

Avant d'installer l'isolateur dans la section de test de la soufflerie, il est nécessaire d'ajuster au préalable le débit de l'eau salée à 30 ml/min en tournant le bouton de réglage du débitmètre dans le sens antihoraire. Après que le débit s'est stabilisé, maintenir la position du bouton et couper l'arrivée d'eau du gicleur en fermant la vanne qui est installée directement après le gicleur. Lorsqu'il n'y a plus d'eau qui sort du gicleur, réaliser l'accumulation en suivant la procédure suivante :

- ⇒ installer l'isolateur dans la section de test;
- ⇒ ajuster la vitesse du vent à la valeur souhaitée;
- ⇒ envoyer l'eau salée vers le gicleur en ouvrant la vanne;
- ⇒ attendre que l'eau salée arrive au gicleur, environ 10 secondes;
- ⇒ dès que le brouillard de gouttelettes d'eau commence à sortir du gicleur, activer l'envoi de poudre en cliquant sur le dernier bouton à droite sur l'interface de commande graphique du SAG 410L;
- ⇒ démarrer le chronomètre pour mesurer le temps d'accumulation;
- ⇒ maintenir le débit d'eau salée à 30 ml/min en agissant sur le bouton de réglage du débitmètre si nécessaire.

À la fin de la période d'accumulation fixée :

- ⇒ couper l'envoi de poudre en désactivant le dernier bouton à droite sur l'interface de commande;
- ⇒ fermer la vanne pour l'entrée d'eau salée;
- ⇒ diminuer la fréquence du ventilateur à 5 Hz;
- ⇒ désinstaller l'isolateur afin d'effectuer des mesures en portant un masque respiratoire et des gants chirurgicaux avant d'entrer dans la chambre de test. Aussi, porter attention à ne pas toucher les surfaces de l'isolateur afin de ne perdre aucune pollution.

Avant de procéder à la prochaine accumulation, le conduit de poudre doit être purgé en y envoyant un jet d'air comprimé avec une pression d'au moins 414 kPa (60 psi). Ensuite installer le prochain isolateur dans la section de test et suivre le reste des étapes susmentionnées.

❖ *Dans la chambre climatique*

Dans la chambre climatique, des ajustements sont aussi nécessaires avant de commencer la première accumulation. Il faut tout d'abord stabiliser le débit d'eau salée à 60 ml/min. Pour ce faire, ouvrir complètement la valve du débitmètre. Ensuite, mettre la vanne à la position ouverte pour envoyer l'eau salée vers le gicleur. Dès que le brouillard de gouttelettes d'eau sort du gicleur, tourner progressivement le bouton de réglage du débitmètre dans le sens horaire jusqu'à ce que le débit indiqué soit de 60 ml/min. Une fois le débit stabilisé, couper l'entrée

d'eau en fermant seulement la vanne. Lorsque le gicleur n'émet plus de brouillard, installer les trois disques d'isolateur et suivre la procédure suivante pour réaliser l'accumulation.

Pour les essais hors tension :

- ⇒ bien fermer la porte de la chambre;
- ⇒ ajuster la vitesse du vent à la valeur souhaitée;
- ⇒ envoyer l'eau salée vers le gicleur en ouvrant la vanne;
- ⇒ attendre que l'eau salée arrive au gicleur;
- ⇒ dès que le brouillard de gouttelettes d'eau sort du gicleur, activer l'envoi de poudre en cliquant sur le dernier bouton à droite sur l'interface de commande graphique du SAG 410L;
- ⇒ démarrer le chronomètre pour mesurer le temps d'accumulation;
- ⇒ maintenir le débit d'eau salée à 60 ml/min en agissant sur le bouton de réglage du débitmètre si nécessaire.

Après que la période d'accumulation fixée est écoulée :

- ⇒ fermer la vanne pour l'entrée d'eau salée;
- ⇒ couper l'envoi de poudre en désactivant le dernier bouton à droite sur l'interface de commande;
- ⇒ arrêter le ventilateur;
- ⇒ désinstaller l'isolateur afin d'effectuer des mesures en portant un masque respiratoire et des gants chirurgicaux avant d'entrer dans la chambre climatique. Aussi, porter

attention à ne pas toucher les surfaces de l'isolateur afin de ne perdre aucune pollution.

Avant de procéder à la prochaine accumulation, le conduit de poudre doit être purgé en y injectant un jet d'air comprimé avec une pression d'au moins 414 kPa (60 psi). Ensuite procéder à l'installation du prochain isolateur au milieu et suivre le reste des étapes susmentionnées.

Pour les essais sous tension, quelques précautions supplémentaires doivent être ajoutées :

- ⇒ bien fermer la porte de la chambre;
- ⇒ brancher le câble de sécurité de la porte;
- ⇒ ajuster la vitesse du vent à la valeur souhaitée;
- ⇒ mettre les isolateurs sous tension;
- ⇒ envoyer l'eau salée vers le gicleur en ouvrant la vanne;
- ⇒ attendre que l'eau salée arrive au gicleur;
- ⇒ dès que le brouillard de gouttelettes d'eau sort du gicleur, activer l'envoi de poudre en cliquant sur le dernier bouton à droite sur l'interface de commande graphique du SAG 410L;
- ⇒ démarrer le chronomètre pour mesurer le temps d'accumulation;
- ⇒ maintenir le débit d'eau salée à 60 ml/min en agissant sur le bouton de réglage du débitmètre si nécessaire.

À la fin de la période d'accumulation :

- ⇒ mettre les isolateurs hors tension;

- ⇒ arrêter le ventilateur;
- ⇒ fermer la vanne pour l'entrée d'eau salée;
- ⇒ couper l'envoi de poudre en désactivant le dernier bouton à droite sur l'interface de commande;
- ⇒ débrancher le câble de sécurité de la porte;
- ⇒ mettre la perche de mise à la terre sur la borne de traversée pour décharger complètement le montage;
- ⇒ désinstaller l'isolateur de test pour effectuer des mesures en portant un masque respiratoire et des gants chirurgicaux avant d'entrer dans la chambre climatique. Aussi, porter attention à ne pas toucher les surfaces de l'isolateur afin de ne perdre aucune pollution.

Avant de procéder à la prochaine accumulation, le conduit de poudre doit être purgé en y injectant un jet d'air comprimé avec une pression d'au moins 414 kPa (60 psi). Ensuite procéder à l'installation du prochain isolateur au milieu, ôter de la borne de traversée la perche de mise à la terre et suivre le reste des étapes susmentionnées.

## ANNEXE V

### TECHNIQUE POUR LA PRISE DE MESURES DE L'ESDD

La technique utilisée pour la prise de mesures de l'ESDD est la technique du coup de torchon qui consiste à:

- ⇒ immerger un torchon J dans l'eau de lavage préparé préalablement. Mesurer la conductivité de l'ensemble avec le conductimètre et noter sa valeur dans la feuille de mesure (voir Annexe VI). La valeur mesurée ne doit pas dépasser 1 µS/m, une valeur qui représente une ESDD de  $0,017 \mu\text{S}/(\text{A.cm}^2)$  où A est l'aire de la surface isolante nettoyée. Toutefois, cette valeur résiduelle sera soustraite lors du calcul, de sorte que la variation de la conductivité de l'eau de lavage reflète l'ESDD actuelle ;
- ⇒ commencer en premier à laver la surface supérieure de la jupe en y versant l'eau de lavage. Prendre soin de ne pas toucher le capot. Ensuite essuyer complètement cette surface supérieure en y appliquant un coup de torchon jusqu'à ce que tous les contaminants soient enlevés;
- ⇒ remettre le torchon dans le récipient où l'on a versé l'eau de lavage en le remuant et le secouant délicatement;
- ⇒ prendre garde de ne pas perdre de l'eau. La quantité doit rester sensiblement inchangée avant et après le lavage;
- ⇒ mesurer à nouveau la conductivité de l'ensemble et noter sa valeur dans la feuille de mesure;

- ⇒ passer ensuite un coup de torchon sur la surface inférieure de la jupe. Encore une fois, prendre soin de ne pas toucher à la tige;
- ⇒ remettre le torchon dans le récipient avec l'eau de lavage;
- ⇒ remesurer la conductivité de l'ensemble et noter sa valeur dans la feuille de mesure;
- ⇒ pour mesurer la constante de température, verser toute l'eau de lavage dans un récipient muni d'un couvercle. Placer le tout dans un réfrigérateur pour le refroidir à -10°C. Ensuite, mesurer de nouveau la conductivité.

## **ANNEXE VI**

### **MODÈLE DE FEUILLE DE MESURE**

Afin de faciliter la collecte des données lors des expériences, il est recommandé de préparer à l'avance des feuilles de mesure. Dans cette annexe, nous présentons un modèle que nous avons utilisé. Il faut noter que ce modèle présenté n'est qu'à titre d'exemple et n'empêche pas à l'expérimentateur de créer son propre modèle de feuille de mesure.

Date : \_\_\_\_\_

Vitesse de la courroie du SAG 410L (%) :

Tension appliquée (kV) :

Pré-mesures	Réservoir no.	Endroit :
Conductivité (mS/cm)		
Température (°C)		

Expérience no.			
Mesures de l'ESDD	Initial, avec le chiffon	Après essuyage	
		Surface sup.	Surface inf.
Conductivité (mS/cm)			
Température (°C)			

Expérience no.			
Mesures de l'ESDD	Initial, avec le chiffon	Après essuyage	
		Surface sup.	Surface inf.
Conductivité (mS/cm)			
Température (°C)			