

## TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 HUMIDIFICATION .....	3
1.1 Quel est le besoin : pourquoi humidifier.....	3
1.2 Processus d'humidification .....	4
1.2.1 Humidificateur isotherme .....	4
1.2.2 Humidification de l'air dans un conduit d'air .....	8
1.2.3 Pratique dans l'industrie .....	11
CHAPITRE 2 DÉROULEMENT DE L'ÉTUDE .....	13
2.1 Objectif .....	13
2.2 Méthodologie .....	13
2.2.1 Essais préliminaires d'injection de vapeur dans une gaine de ventilation.....	13
2.2.2 Établir un plan d'expériences .....	14
2.2.3 Concevoir un banc d'essai.....	14
2.2.4 Réaliser les essais expérimentaux.....	14
2.2.5 Analyse des résultats et élaboration de l'algorithme de prédiction de la DMSAC.....	14
CHAPITRE 3 ANALYSE PRÉLIMINAIRE DU PHÉNOMÈNE D'INJECTION DE VAPEUR SATURÉE DANS UNE CONDUITE DE VENTILATION.....	15
3.1 DMSAC .....	15
3.2 Homogénéité de l'écoulement d'air humidifié .....	16
CHAPITRE 4 HYPOTHÈSES QUANT AUX PRINCIPAUX PARAMÈTRES INFLUENÇANT LA DMSAC .....	19
4.1 Humidité de l'air (RH, W) .....	19
4.2 Température de l'air.....	19
4.3 Vitesse de l'écoulement d'air.....	20
4.4 Rampe d'injection de vapeur saturée.....	20
4.4.1 Qualité de dispersion de vapeur de la rampe d'injection .....	20
CHAPITRE 5 PLAN D'EXPÉRIENCES.....	23
5.1 Cadre et limitations de l'étude .....	23
5.1.1 Écoulement d'air .....	23
5.1.2 Configurations des rampes d'injection de vapeur: entraxes entre les CVDV.....	24
5.1.3 DMSAC .....	25
5.2 Plan d'expériences.....	25
CHAPITRE 6 RÉALISATION DE L'ÉTUDE : ÉQUIPEMENTS CVCA ET OPÉRATIONS.....	27

6.1	Équipement CVCA: le banc d'essai .....	27
6.1.1	Généralités .....	27
6.1.2	Composantes mécaniques du banc d'essai .....	29
6.2	Instrumentation .....	38
6.2.1	Capteurs .....	38
6.2.2	Mesure de la vitesse de l'écoulement d'air .....	40
6.2.3	Contrôle des conditions expérimentales .....	41
CHAPITRE 7    MÉTHODE EXPÉRIMENTALE .....		45
7.1	Généralités .....	45
7.2	Procédure expérimentale .....	45
7.2.1	Ajustements initiaux .....	45
7.2.2	Préparation pour la prise d'une donnée expérimentale .....	46
CHAPITRE 8    RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX .....		51
8.1	Rampe E3 .....	51
8.2	Rampe E6 .....	52
8.3	Rampe E8 .....	52
8.4	Rampe E12 .....	53
8.5	Rampe E24 .....	53
CHAPITRE 9    ALGORITHME DE PRÉDICTION DE LA DMSAC .....		55
9.1	Étape de conception de l'algorithme .....	55
9.2	Construction de la base de données .....	56
9.2.1	Regrouper les données expérimentales selon la rampe .....	56
9.2.2	Choix des données expérimentales utilisées pour les régressions .....	56
9.2.3	Base de données .....	58
9.3	Méthode de régression .....	62
9.3.1	Outil de régression .....	62
9.3.2	Critères de régression .....	64
9.4	Choix des régressions .....	65
9.4.1	Présélection des types de fonction .....	65
9.4.2	Familles de fonctions présélectionnées .....	67
9.5	Résultats de régression .....	68
9.5.1	Présentation des résultats .....	68
9.6	Analyse des régressions de la DMSAC des fonctions présélectionnées .....	69
9.6.1	Rampe E3 .....	71
9.6.2	Rampe E6 .....	72
9.6.3	Rampe E8 .....	74
9.6.4	Rampe E12 .....	75
9.6.5	Rampe E24 .....	77
9.6.6	Comparaison des moyennes quadratiques, maximums et minimums des erreurs absolues .....	78
9.7	Modèle de prédiction de la DMSAC .....	80
9.7.1	Famille de fonction retenue .....	80
9.7.2	Précision du modèle de prédiction .....	80

9.7.3	Analyse des causes d'écarts entre les DMSAC calculées et mesurées.....	81
9.7.4	Analyse des résultats de prédiction de la DMSAC.....	81
CHAPITRE 10	APPLICATION DU MODÈLE DE PRÉDICTION DE LA DMSAC À LA CONCEPTION DES RAMPES D'INJECTION DE VAPEUR .....	85
10.1	Calcul du nombre de CVDV requises.....	85
10.2	Disposition des œillets sur les CVDV .....	86
CHAPITRE 11	LIMITATIONS ET SOURCES D'ERREURS DU MODÈLE .....	89
11.1	Condition d'utilisation .....	89
11.2	Sources d'erreurs des prédictions de la DMSAC .....	89
11.2.1	Erreurs de mesure .....	90
11.2.2	Rampe d'injection .....	91
11.2.3	Fidélité du modèle de prédiction de la DMSAC par rapport aux données expérimentales .....	92
CHAPITRE 12	RECOMMANDATIONS .....	95
12.1	Banc d'essai.....	95
12.1.1	Équipement CVCA.....	95
12.1.2	Instrumentation et mesure.....	95
12.2	Calibration du banc d'essai.....	96
12.2.1	Mesure du débit de vapeur injectée .....	96
12.2.2	Calcul du débit massique de vapeur injectée .....	97
12.3	Taille de l'échantillonnage.....	97
12.4	Régressions .....	97
CONCLUSION	.....	99
BIBLIOGRAPHIE	.....	151



## LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 5.1	Propriétés de l'air durant l'étude.....24
Tableau 5.2	Spécifications des rampes d'injection de vapeur.....24
Tableau 5.3	Plan d'expériences : variation d'humidité relative .....25
Tableau 6.1	Composantes du banc d'essai.....28
Tableau 6.2	Étalonnage capteur d'humidité relative et de température SHC80 .....39
Tableau 6.3	Stabilité des mesures des capteurs d'humidité relative .....40
Tableau 6.4	Vitesse de l'écoulement d'air à une température de 12,8°C en fonction de la pression dynamique ou de la colonne d'eau.....41
Tableau 7.1	Plage de $RH_e$ en fonction des conditions climatiques extérieures .....46
Tableau 7.2	Incrément de déplacement du chariot amovible en fonction de sa position.....49
Tableau 7.3	Tolérance de la DMSAC.....49
Tableau 8.1	Données expérimentales obtenues avec la rampe E3 .....51
Tableau 8.2	Données expérimentales obtenues avec la rampe E6 .....52
Tableau 8.3	Données expérimentales obtenues avec la rampe E8 .....52
Tableau 8.4	Données expérimentales obtenues avec la rampe E12 .....53
Tableau 8.5	Données expérimentales obtenues avec la rampe E24 .....53
Tableau 9.1	Condition limite: ajout de points à DMSAC nulle.....57
Tableau 9.2	Base de données pour la rampe E3 .....58
Tableau 9.3	Base de données pour la rampe E6 .....59
Tableau 9.4	Base de données pour la rampe E8 .....60
Tableau 9.5	Base de données pour la rampe E12 .....61
Tableau 9.6	Base de données pour la rampe E24 .....62

## XVIII

Tableau 9.7	Familles de fonctions présélectionnées.....	68
Tableau 9.8	Erreurs fonctions présélectionnées rampe E3 .....	71
Tableau 9.9	Erreurs fonctions présélectionnées rampe E6 .....	72
Tableau 9.10	Erreurs fonctions présélectionnées rampe E8 .....	74
Tableau 9.11	Erreurs fonctions présélectionnées rampe E12 .....	75
Tableau 9.12	Erreurs fonctions présélectionnées rampe E24 .....	77
Tableau 9.13	Tableau récapitulatif des erreurs moyennes quadratiques .....	78
Tableau 9.14	Coefficients du modèle théorique selon l'entraxe entre les CVDV .....	80
Tableau 9.15	Prédictions des DMSAC de la fonction retenue .....	82

## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Diagramme psychrométrique et états psychrométriques équivalents.....3
Figure 1.2	États psychrométriques lors du processus d'humidification de l'air .....5
Figure 1.3	Humidification pente de la droite du processus.....5
Figure 1.4	Rampe d'injection de vapeur saturée .....7
Figure 1.5	Conduites verticales de dispersion de vapeur (CVDV) .....7
Figure 1.6	Œillet d'injection de vapeur .....8
Figure 1.7:	Humidificateur à vapeur saturée .....9
Figure 1.8	Humidificateur à vapeur saturée .....10
Figure 3.1	Spécifications du grillage.....16
Figure 6.1	Schématique du banc d'essai.....27
Figure 6.2	Banc d'essai.....28
Figure 6.3	Chaudière électrique à vapeur.....32
Figure 6.4	Humidificateur à vapeur saturée .....32
Figure 6.5	Humidificateur à vapeur .....33
Figure 6.6	Rampe d'injection E6 .....35
Figure 6.7	Rampe d'injection E3 .....35
Figure 6.8	Chariot amovible.....36
Figure 6.9	Membrane du chariot amovible .....37
Figure 7.1	Valve à bille manuelle .....47
Figure 9.1	Exemple de résultats de régressions pour la rampe E6.....63
Figure 9.2	Critères de régression.....64
Figure 9.4	Résultat improbable : isoplèthes de la DMSAC non monotones.....66

Figure 9.5	Résultat plausible : isoplèthes de la DMSAC monotones .....	67
Figure 9.6	Comparaison entre DMSAC prédite par la fonction C3 et DMSAC mesurées avec la rampe E3 .....	69

## LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

$C_{p\text{ air}}$ :	Capacité calorifique de l'air = 1,005 kJ/kg°C
$C_{p\text{ vapeur}}$ :	Capacité calorifique de l'eau gazeuse = 1,8255 kJ/kg°C
CVCA :	Chauffage Ventilation et Conditionnement d'Air
CVDV :	Conduites Verticales de Dispersion de Vapeur
DMEO :	Distance maximum entre les œillets
DMSAC :	<b>D</b> istance <b>M</b> inimum <b>S</b> ans <b>A</b> ccumulation de <b>C</b> ondensation
$DMSAC_i$ :	Distance prédite inférieur à la distance disponible en aval de la rampe d'injection
$DMSAC_s$ :	Distance prédite supérieur à la distance disponible en aval de la rampe d'injection
$E_s$ :	Entraxe supérieur, configuration de rampe admettant une distance sans accumulation de condensation supérieure à la DMSAC requise
$E_i$ :	Entraxe inférieur, configuration de rampe admettant une distance sans accumulation de condensation inférieure à la DMSAC requise
$\Delta h$ :	Différence d'enthalpie (kJ/kg)
$h_f$ :	Enthalpie finale (après humidification) de l'air humide (kJ/kg)
$h_{fg}$ :	Enthalpie de vaporisation (kJ/kg)
$h_g$ :	Enthalpie à l'état gazeux (kJ/kg)
$h_i$ :	Enthalpie initiale (avant humidification) de l'air humide (kJ/kg)
$m_a$ :	Masse d'air (kg/h)
$M_a$ :	Masse molaire d'air = 28,8 g/mol
$m_v$ :	Masse de vapeur (kg/h)
$M_v$ :	Masse molaire de vapeur = 18 g/mol

## XXII

$P_d$ :	Pression dynamique
$P_s$ :	Pression statique
$P_t$ :	Pression totale
$P_v$ :	Pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air
$P_{vsat}$ :	Pression partielle de la vapeur d'eau saturée dans l'air
$RH_e$ :	Humidité relative à l'entrée (%)
$RH_s$ :	Humidité relative à la sortie (%)
$T_e$ :	Température de l'air à l'entrée (°C)
$T_s$ :	Température de l'air après humidification (°C)
$v$ :	Vitesse de l'air
$W_e$ :	Humidité spécifique de l'air à l'entrée
$W_s$ :	Humidité spécifique de l'air à la sortie

## LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

K :	Température en Kelvin
kPa :	Kilo Pascals
lbm/h :	Débit massique; livres de vapeur par heure
pcm :	Débit volumique (pied <sup>3</sup> /minute)
ppm :	Vitesse (pied/minute)
PSI :	Livre /pouce <sup>2</sup> «Pounds per Square Inch»
Q :	Énergie (kJ)
wc :	Pression notée en pouces de colonne d'eau « <u>W</u> ater <u>C</u> olumn»
" :	Distance en pouces



## INTRODUCTION

L'industrie CVCA assure le conditionnement de l'air ambiant destiné aux occupants d'immeubles résidentiels, commerciaux et institutionnels. Il importe d'assurer un environnement intérieur à température adéquate, sans air contaminé et à taux d'humidité suffisant. Le maintien d'un taux d'humidité suffisant sera à la base de la présente recherche. L'humidité relative est généralement employée dans l'industrie CVCA. Elle peut être variée de plusieurs façons. La variation de la température de l'air humide entraîne aussi une variation de l'humidité relative. Également, la variation, à température constante, de la masse d'eau dissoute dans l'air entraînera aussi une variation de l'humidité relative. La déshumidification consiste à retirer une certaine masse d'eau dissoute dans l'air alors que l'humidification ajoute de l'eau à l'air.

L'humidification est réalisée avec l'utilisation des humidificateurs. Plusieurs types sont décrits dans la littérature, mentionnons les deux grandes familles que sont les adiabatiques et les isothermes. L'humidification adiabatique consiste à évaporer l'eau à température ambiante, l'énergie de vaporisation de cette eau étant puisée dans l'air. Les humidificateurs adiabatiques causent alors une baisse de la température de l'air lors du processus d'humidification. Les humidificateurs isothermes injectent de la vapeur saturée dans l'air afin d'augmenter sa teneur en eau. La variation d'enthalpie est faible lors du processus d'humidification et c'est pourquoi ce processus est qualifié d'isotherme.

Lorsque la vapeur saturée est injectée dans l'air, une fraction aura tendance à condenser. La conception des humidificateurs isothermes nécessite une attention particulière afin d'éviter d'endommager les autres composantes du système CVCA. La problématique de condensation et la conception des humidificateurs isothermes sera mise à l'étude dans la présente recherche.



# CHAPITRE 1

## HUMIDIFICATION

### 1.1 Quel est le besoin : pourquoi humidifier

Le confort humain nécessite un minimum d'humidité de l'air ambiant. Ce minimum est, selon ASHRAE Fundamentals (2009, p.9.12), établi à l'équivalent d'un point de rosée de 2°C (35,6°F), ce qui équivaut à une humidité relative minimum de 28% à 22°C et 49% à 12.8°C tel qu'illustré sur la Figure 1.1. Les calculs détaillés des états psychrométriques équivalents sont fournis en ANNEXE I.

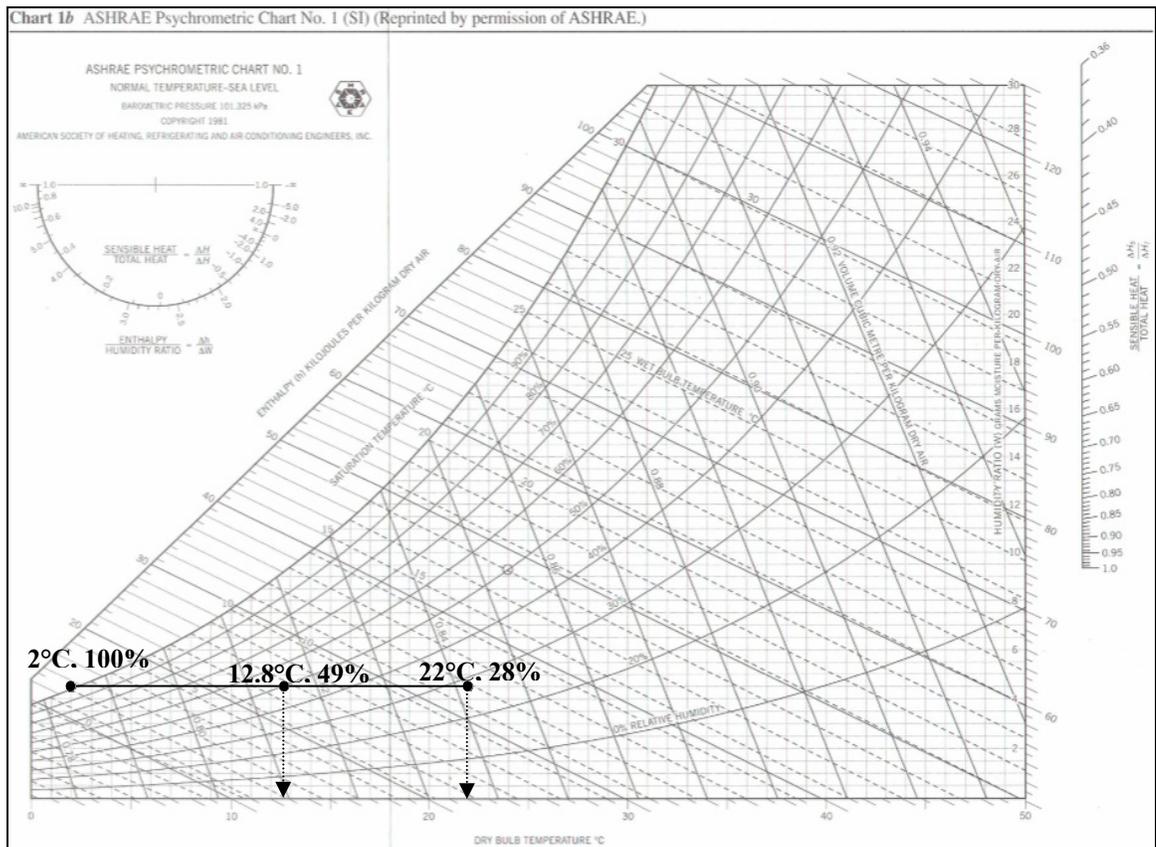


Figure 1.1 Diagramme psychrométrique et états psychrométriques équivalents  
Adaptée de ASHRAE Psychrometric Chart No.1 (1981)

L'humidité maximum est établie à un point de rosé de 16.8°C selon ASHRAE Fundamentals (2009, p. 9.12). L'humidification est requise afin de garder l'humidité de l'air au-dessus des valeurs minimums. L'air doit être humidifié lorsque l'air extérieur est sec, par exemple dans les régions arides, et lorsque les températures extérieures sont basses, alors que le système CVCA chauffe l'air occasionnant une baisse de son humidité relative. Les humidificateurs font donc partie intégrante des systèmes CVCA afin de maintenir l'humidité de l'air ambiant dans la plage considérée confortable.

Selon ASHRAE handbook (2012, 22.2), le maintien d'un taux d'humidité minimum permet aussi de réduire l'accumulation de l'électricité statique et de conserver certains matériaux.

## **1.2 Processus d'humidification**

### **1.2.1 Humidificateur isotherme**

Les humidificateurs sont constitués d'un générateur de vapeur, et d'une rampe d'injection de vapeur permettant d'uniformément injecter la vapeur dans l'air. L'humidification de l'air avec de la vapeur saturée à la pression statique de l'air est, selon ASHRAE handbook (2012, 22.5), un processus quasi isotherme, tel qu'illustré sur la Figure 1.2 et la Figure 1.3, les calculs des deux états psychrométriques étant présentés en ANNEXE I. Ce type de système d'humidification est par conséquent qualifié d'isotherme. Ils sont principalement utilisés dans les bâtiments afin de fournir une qualité d'air ambiant pour les êtres humains et parfois pour certains procédés industriels. C'est ce type d'humidificateur qui sera traité dans cette recherche.

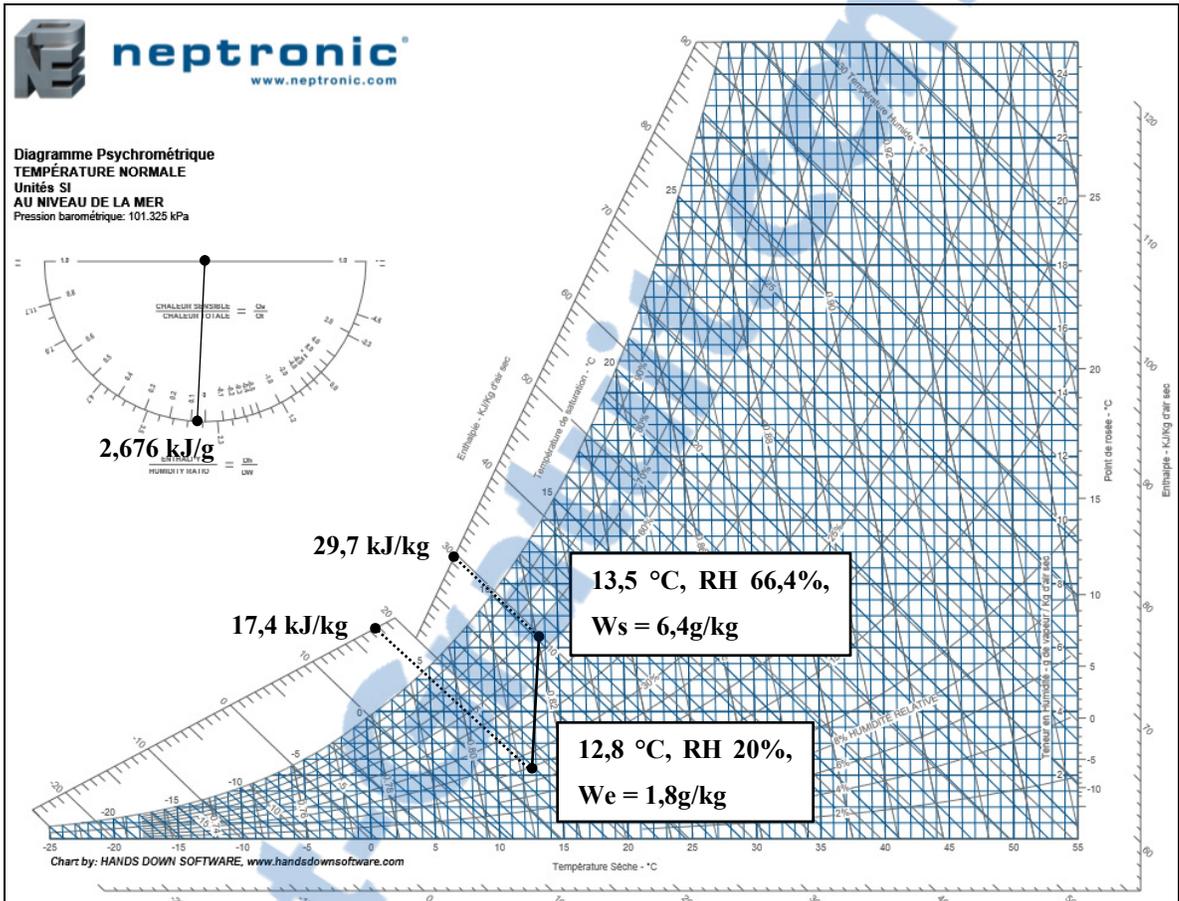


Figure 1.2 États psychométriques lors du processus d'humidification de l'air  
 Adaptée de Nepronic (2014)

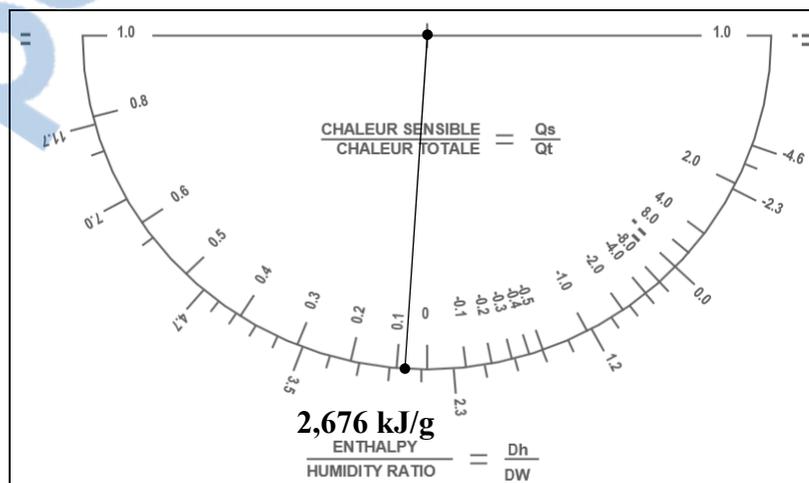


Figure 1.3 Humidification pente de la droite du processus  
 Adaptée de ASHRAE Handbook—Fundamentals (2009,1.11)

Il est à noter que certaines régions, plutôt arides, nécessitent l'humidification de l'air et ce lors de températures extérieures élevées. Lors de l'opération des systèmes CVCA dans ces régions, il peut y avoir climatisation et humidification simultanément. L'utilisation d'un humidificateur adiabatique est préconisée pour ce type d'application car l'humidification de l'air par évaporation naturelle de l'eau entraîne une baisse de la température de l'air. Cette diminution est due au fait que l'enthalpie totale demeure quasi constante ce qui entraîne une baisse de température de l'air humide.

### **1.2.1.1 Générateur de vapeur**

L'humidificateur est un système qui génère la vapeur saturée et qui la disperse dans l'air à humidifier. Il est composé d'un générateur de vapeur saturée, d'une rampe d'injection de vapeur ainsi que de l'équipement permettant d'acheminer la vapeur entre ces deux composants. Il existe deux types de générateurs de vapeur saturée:

- générateur de vapeur atmosphérique;
- générateur de vapeur pressurisée.

Le rôle de l'humidificateur dans le système d'humidification est de générer la vapeur saturée et d'en contrôler le débit massique. Cette vapeur est alors acheminée à la rampe d'injection de vapeur qui la dispersera dans l'air.

### **1.2.1.2 Rampe d'injection de vapeur saturée**

Les rampes d'injection de vapeur sont installées dans les gaines de ventilation, ou dans les centrales de traitement d'air. Elles permettent de distribuer la vapeur saturée dans l'écoulement d'air. Il existe plusieurs types de rampes d'injection de vapeur qui peuvent être classifiées comme chemisées et non chemisées. Les rampes avec conduites de distribution de vapeur chemisées nécessitent l'apport de vapeur pressurisé. Ces rampes sont horizontales et préchauffées avant l'injection de la vapeur. Les rampes non chemisées peuvent être soit horizontales et inclinées ou verticales. La présente recherche sera réalisée uniquement avec l'utilisation de tubes verticaux de dispersion de vapeur. Elle est constituée d'un collecteur et

de conduites verticales de dispersion de vapeur (CVDV). La vapeur saturée est acheminée au collecteur qui la distribue uniformément aux CVDV.

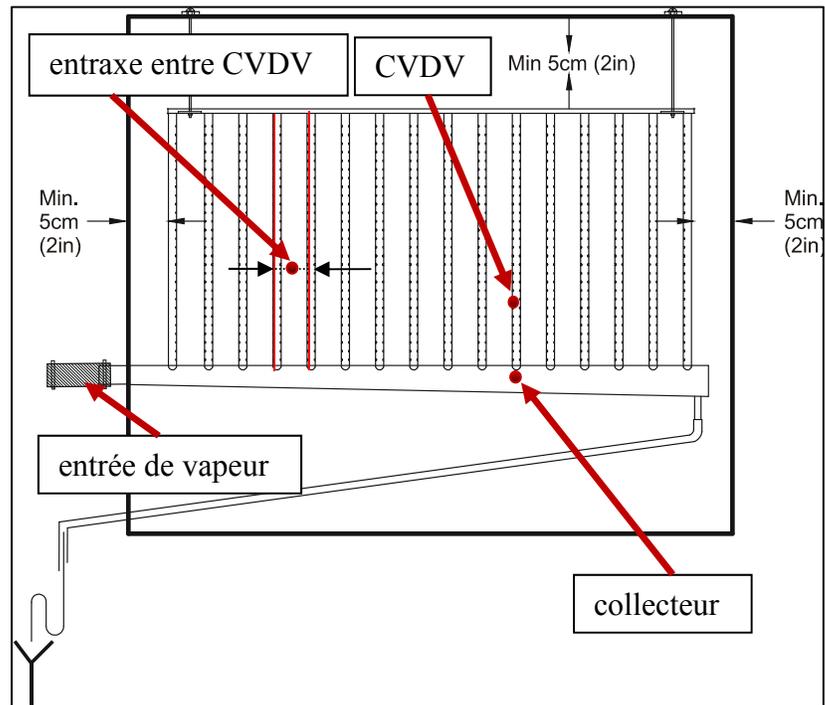


Figure 1.4 Rampe d'injection de vapeur saturée  
Adaptée de Neptronic (2013)

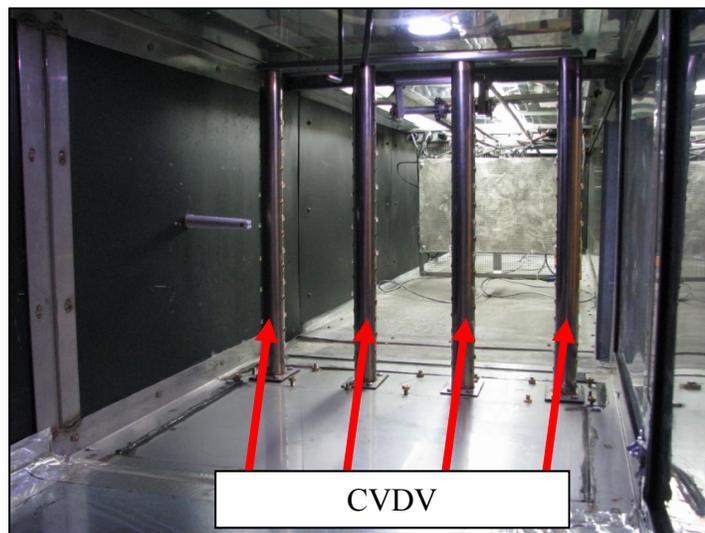


Figure 1.5 Conduites verticales de dispersion de  
vapeur (CVDV)

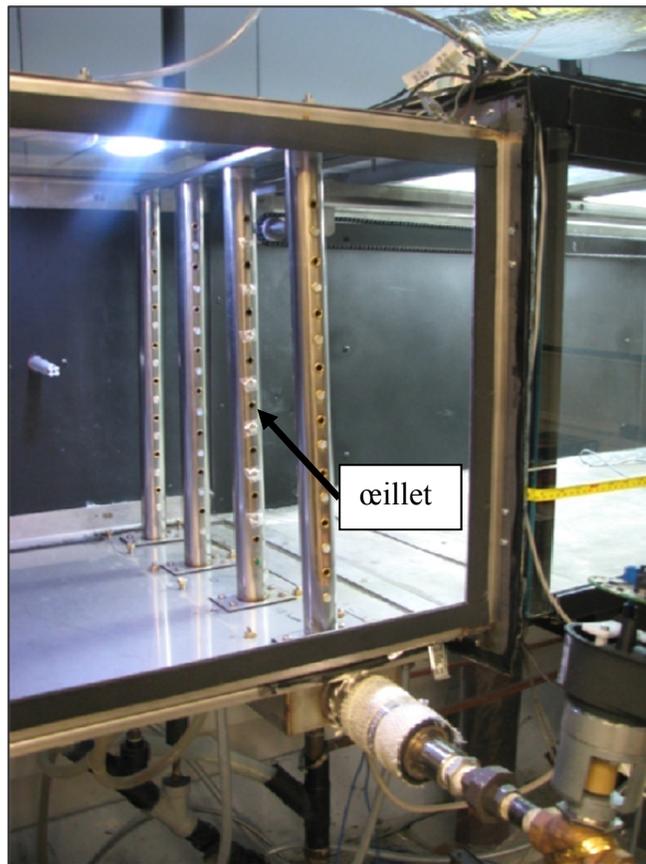


Figure 1.6 Œillet d'injection de vapeur

Ces CVDV sont munies d'œillets permettant à la vapeur d'être acheminée à l'écoulement d'air. Ces œillets sont orientés horizontalement et perpendiculairement à la direction de l'écoulement d'air. Ils sont équidistants entre eux sur chaque côté des CVDV. Les rangés d'œillets se faisant face, les œillets sont intercalés de façon à maximiser la dispersion de la vapeur.

## 1.2.2 Humidification de l'air dans un conduit d'air

### 1.2.2.1 Vapeur saturée

Les propriétés de la vapeur produite par le générateur de vapeur dépendent du type de système d'humidification isotherme. Pour les systèmes utilisant des générateurs de vapeur

atmosphérique, la pression de la vapeur est considéré constante en tous points de l'humidificateur tant au niveau du générateur lui-même qu'à la rampe d'injection soit à la pression statique de la conduite d'air. Pour les générateurs de vapeur pressurisée, la détente de la vapeur saturée pressurisée s'effectue en aval de la valve de contrôle du débit massique de vapeur, voir la Figure 1.7, principalement dans le collecteur. Ce collecteur peut être considéré comme une tuyère permettant la détente de la vapeur à la pression statique de la conduite de ventilation. De ce fait, peu importe le type de générateur de vapeur utilisé, les propriétés de la vapeur saturée au collecteur demeurent les mêmes, la pression statique au collecteur étant équivalente à celle dans la conduite d'air.

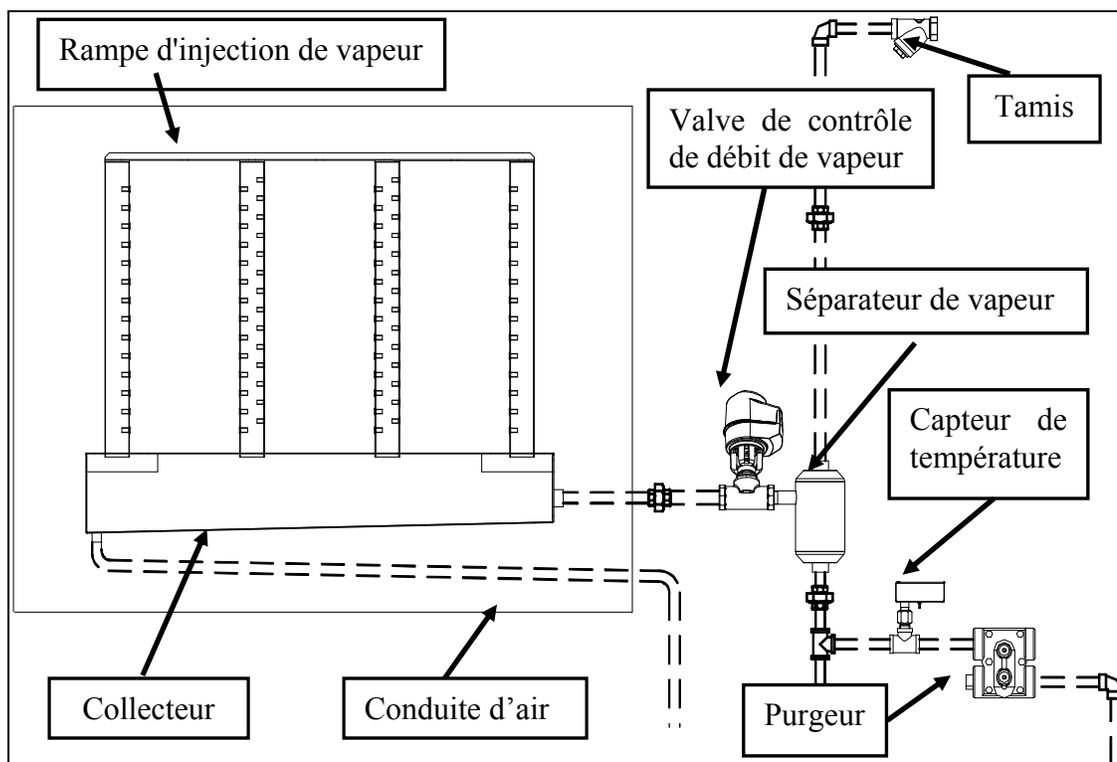


Figure 1.7: Humidificateur à vapeur saturée  
Adaptée de Neptonic (2013)

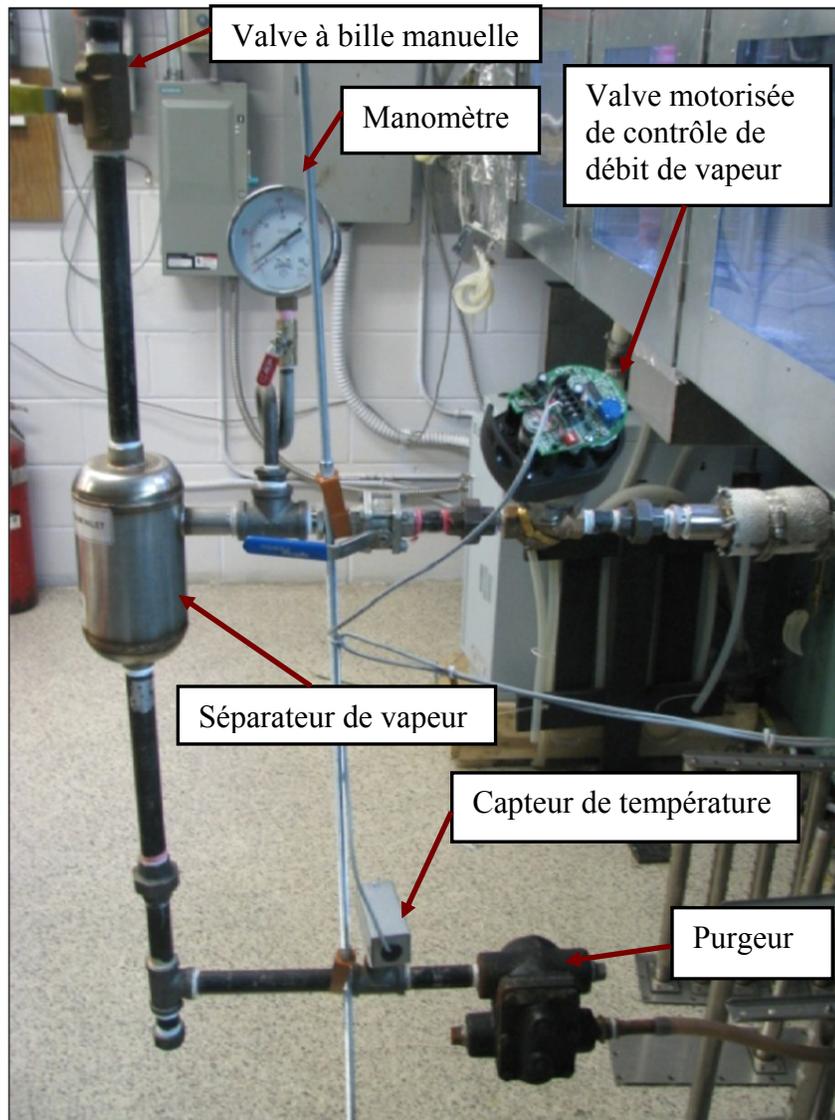


Figure 1.8 Humidificateur à vapeur saturée

### 1.2.2.2 Injection de la vapeur saturée dans l'air

Lors de l'humidification de l'air, la vapeur saturée est à une température de  $100^{\circ}\text{C}$  au moment de son passage de la rampe d'injection à l'écoulement d'air. Lorsque cette vapeur entre en contact avec l'air qui est à température inférieure, elle condense et donc devient visible, mais demeure en suspension dans l'écoulement d'air. Cette vapeur condensée qui est qualifiée de brouillard demeure visible durant le processus d'absorption par l'air pendant un

certain moment donc sur une certaine distance. On peut assumer que lorsque ce brouillard n'est plus visible, la vapeur saturée est alors complètement absorbée par l'air.

### **Brouillard**

Le brouillard est défini comme étant de la vapeur condensée, sous forme de fines gouttelettes en suspension dans l'air.

### **Distance d'absorption de la vapeur**

La distance d'absorption est la distance entre le lieu d'injection de la vapeur saturée, la rampe d'injection, et l'endroit où cette vapeur injectée n'est plus visible en suspension dans l'air humidifié.

### **1.2.3 Pratique dans l'industrie**

La configuration de la rampe d'injection de vapeur doit prévenir toute accumulation de condensation de vapeur sur les surfaces internes de la conduite d'air. On qualifie de surface tout équipement CVCA ou composantes de la conduite d'air étant en contact avec l'air humidifié et perpendiculaire à son écoulement. Le processus d'absorption de la vapeur saturée par l'air est influencé par les paramètres de l'écoulement d'air, par le débit massique de vapeur saturée injectée et par la configuration de la rampe d'injection de vapeur. La vapeur étant injectée dans l'air en écoulement, son absorption par l'air évolue sur une certaine distance. De ce fait, si la distance disponible (sans présence d'équipement ou parois de conduite) en aval de la rampe d'injection n'est pas suffisante, la vapeur injectée condensera sur les surfaces et l'accumulation de cette condensation entrainera évidemment une détérioration prématurée de l'équipement CVCA mouillé.

La distance minimum sans accumulation de condensation (DMSAC) est définie comme étant la distance en aval de la rampe d'injection de vapeur à laquelle aucune composante du système CVCA ne pourra être mouillée par la vapeur condensée.

Dans l'industrie de l'humidification, certains manufacturiers de rampes d'injection de vapeur saturée publient des prédictions de DMSAC. Ces prédictions sont fonction de l'augmentation de l'humidité relative de l'air ainsi que de la configuration de la rampe d'injection de vapeur donc indirectement de l'entraxe entre chaque conduite verticale de dispersion de vapeur (CVDV). L'entraxe entre ces CVDV est le paramètre contrôlant la qualité de la dispersion de la vapeur. La configuration de la rampe d'injection est le seul paramètre dont dispose le manufacturier de rampe d'injection afin de modifier la DMSAC, les autres paramètres étant imposés par la conception du système CVCA tels le débit massique de vapeur et d'air ainsi que l'espace disponible en aval de la rampe d'injection (qui doit être supérieur à la DMSAC). En pratique, les utilisateurs doutent de la validité de ces prédictions car il est courant d'observer de la condensation sur des surfaces en aval de la rampe d'injection. Les prédictions sont disponibles mais aucunement documentées, pour cause de secret industriel.

Dans l'industrie, les devis spécifient une température de l'air de 12,8 °C (55 °F) dans les gaines de ventilation et dans les centrales de traitement d'air. La vitesse de l'écoulement d'air dans les centrales de traitement d'air est généralement autour de 2,54 m/s (500 ppm) afin de réduire la perte de pression due aux filtres et aux serpentins et aussi pour atténuer l'entraînement de la condensation, formée sur les serpentins de climatisation, par l'écoulement d'air.

## **CHAPITRE 2**

### **DÉROULEMENT DE L'ÉTUDE**

#### **2.1 Objectif**

Le but de cette étude est d'établir un algorithme permettant de prédire la DMSAC en fonction du débit massique de vapeur saturée, des paramètres de l'écoulement d'air et de la configuration des rampes d'injection de vapeur installées dans des centrales de traitement d'air.

#### **2.2 Méthodologie**

Les étapes brièvement décrites ci-dessous permettront d'établir l'algorithme de prédiction de la DMSAC.

##### **2.2.1 Essais préliminaires d'injection de vapeur dans une gaine de ventilation**

Les essais préalablement réalisés permettront d'analyser le comportement du mélange air-vapeur avant que la vapeur soit complètement absorbée par l'air. Il importe de connaître les phénomènes occasionnés par l'injection de vapeur dans l'air et de l'absorption de la vapeur par l'air. Les essais expérimentaux préliminaires permettront de visualiser l'injection de vapeur saturée dans l'air et ainsi visualiser plusieurs phénomènes inattendus puisque théoriquement imprévisibles.

L'hypothèse des principaux paramètres ayant une incidence sur la DMSAC est posée suite à l'analyse des essais préliminaires.

### **2.2.2 Établir un plan d'expériences**

Le plan d'expériences devra permettre de quantifier l'incidence des paramètres précédemment établis sur la DMSAC. Ce plan d'expériences constitue la campagne de mesure afin d'obtenir les données expérimentales.

### **2.2.3 Concevoir un banc d'essai**

Afin de procéder à la campagne de mesure, le banc d'essai doit être conçu et aménagé. Il devra permettre de contrôler certains paramètres et d'en mesurer d'autres.

### **2.2.4 Réaliser les essais expérimentaux**

Cette section consiste à procéder aux différentes expérimentations du plan d'expériences. Les séquences de manipulations seront détaillées dans cette section.

### **2.2.5 Analyse des résultats et élaboration de l'algorithme de prédiction de la DMSAC**

Suite à l'obtention des données expérimentales, un algorithme pourra alors être élaboré afin de permettre la prédiction de la DMSAC en fonction des paramètres mesurés. Il sera alors utilisé afin de concevoir les rampes d'injection de vapeur de sorte que leur conception préviendra toute accumulation de condensation à l'intérieur de l'espace disponible dans les conduits de ventilation ou dans les centrales de traitement d'air. La prédiction de la DMSAC est le but de cette étude.

## CHAPITRE 3

### ANALYSE PRÉLIMINAIRE DU PHÉNOMÈNE D'INJECTION DE VAPEUR SATURÉE DANS UNE CONDUITE DE VENTILATION

Préalablement et en marge de la présente étude, des essais préliminaires d'injection de vapeur saturée dans l'air en écoulement ont été réalisés et les observations suivantes ont été recueillies.

#### 3.1 DMSAC

À la sortie de la vapeur saturée des œillets de la rampe d'injection, la condensation de la vapeur saturée est observée lors du contact de celle-ci avec l'air. Il se forme alors une trainée de condensation en suspension, visible à l'œil nu, qualifiée de brouillard. Si ce même brouillard entre en contact avec une surface à la même température que l'air et perpendiculaire au vecteur de son écoulement, il peut se produire deux phénomènes :

- La condensation s'accumule sur la surface. La distance séparant cette surface de la rampe d'injection de vapeur est donc inférieure à la DMSAC.
- La condensation ne s'accumule pas sur la surface et ce même si le brouillard entre en contact avec la surface et reste visible en aval de cette surface. La distance séparant cette surface de la rampe d'injection de vapeur est donc supérieure à la DMSAC mais inférieure à la distance d'absorption, le brouillard étant toujours visible donc non absorbée par l'air.

Il a aussi été observé que plus la surface en contact avec le brouillard est étroite, plus la condensation a tendance à s'y accumuler. Ce phénomène peut être illustré par un essai à débit volumique d'air et à température constante. Deux échantillons, une plaque pleine de 2 cm x 2 cm et un grillage de 2 cm x 2 cm ayant les spécifications telles qu'illustrées à la Figure 3.1 sont placés côte à côte dans la gaine de ventilation à une distance de la rampe d'injection de

vapeur inférieure à la distance d'absorption donc en contact avec le brouillard. En augmentant progressivement le débit massique de vapeur afin d'augmenter la densité du brouillard, la condensation commencera à s'accumuler sur le grillage alors qu'aucune condensation ne se forme sur la surface pleine.

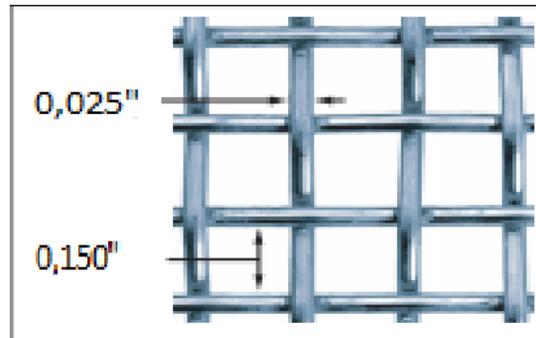


Figure 3.1 Spécifications du grillage  
Tirée de McMaster-Carr (2013)

De cet essai, on en déduit que le choix de la surface permettant de détecter l'accumulation de condensation, afin de mesurer la DMSAC, aura une incidence sur les résultats expérimentaux. Son choix devra être représentatif de la surface la plus étroite pouvant être rencontrée dans une gaine de ventilation ou une centrale de traitement d'air. Les filtres d'air, faits de fibres de verre, de coton ou de polypropylène, sont les surfaces les plus étroites rencontrées dans les centrales de traitement d'air. Le capteur permettant de détecter l'accumulation de condensation devra donc être munie d'une membrane dont les fibres sont semblables à celles qui composent les filtres d'air.

### 3.2 Homogénéité de l'écoulement d'air humidifié

Suite à l'absorption de la vapeur dans l'air, l'humidité relative n'est pas pour autant homogène dans la section de la gaine de ventilation. Les premiers essais expérimentaux ont dû être refaits car le capteur d'humidité relative était trop près de la rampe d'injection, même étant en aval de la distance d'absorption. En positionnant d'autres capteurs d'humidité en aval du premier, on constate que l'humidité relative diminue avec l'augmentation de la distance entre

la position du capteur d'humidité et la rampe d'injection, signe d'homogénéisation progressive. L'humidité de l'air humidifié n'étant pas homogène, elle peut donc être une source d'erreur pour le calcul du bilan massique de l'air humidifié.



## CHAPITRE 4

### HYPOTHÈSES QUANT AUX PRINCIPAUX PARAMÈTRES INFLUENÇANT LA DMSAC

Suite aux essais préliminaires de mesure de la DMSAC, les paramètres suivants sont choisis comme étant influents sur la DMSAC. Ils seront donc considérés pour l'élaboration du plan d'expériences.

#### 4.1 Humidité de l'air (RH, W)

L'humidité est un paramètre intrinsèque de l'air qui peut être exprimé en humidité relative ou en humidité spécifique. Il prend en compte le débit massique d'air, la température de l'air ainsi que le débit massique de vapeur dissoute dans l'air. En injectant de la vapeur saturée dans l'air, il y aura donc augmentation de l'humidité relative ( $RH_s$ ) et spécifique ( $W_s$ ) de l'air. Les manufacturiers de rampes d'injection de vapeur utilisent l'humidité relative pour calculer la DMSAC mais puisque l'injection de vapeur chaude augmente légèrement la température de l'air, l'humidité spécifique est préconisée afin de minimiser le nombre de paramètres influençant la DMSAC. Les paramètres  $RH_e$ ,  $RH_s$ ,  $W_e$ ,  $W_s$  seront considérés lors de l'élaboration du plan d'expériences. On pourra alors établir l'effet de l'augmentation de l'humidité de l'air sur la DMSAC. Les mesures d'humidité de l'air en amont ( $RH_e$ ) et en aval ( $RH_s$ ) de la rampe d'injection seront des composantes des données expérimentales.

#### 4.2 Température de l'air

Dans le cadre de l'étude, la température sera considérée uniquement pour le calcul de l'humidité spécifique  $W$ . La température avant humidification  $T_e$  sera maintenue à 12.8 °C (55°F), température minimum de consigne dans l'industrie du CVCA, telle que discutée à la

section 1.2.3. Cette température minimum maximise la DMSAC d'une configuration donnée de rampe d'injection de vapeur pour un débit massique de vapeur préalablement fixé.

### **4.3 Vitesse de l'écoulement d'air**

Ce paramètre sera maintenu constant à 2,54 m/s (500 ppm) lors des essais expérimentaux puisqu'il est généralement maintenu dans les centrales de traitement d'air tel que discuté à la section 1.2.3. Par conséquent, même si ce paramètre n'est pas variable dans le plan d'expériences, il serait intéressant d'effectuer quelques tests expérimentaux à différentes vitesses afin de voir son effet sur la DMSAC.

### **4.4 Rampe d'injection de vapeur saturée**

La configuration de la rampe d'injection de vapeur peut aussi faire varier la DMSAC. La configuration de la rampe modifie le nombre et la disposition des œillets ce qui influence la finesse de la dispersion de l'injection de la vapeur.

#### **4.4.1 Indice de dispersion de la vapeur injectée par la rampe d'injection**

L'indice de dispersion de la vapeur injectée peut être comparé à la finesse d'un maillage par éléments finis, les œillets étant représentés par les nœuds. L'amélioration de l'indice de dispersion est fonction de la distance moyenne des œillets adjacents.

Cet indice de dispersion de la vapeur injectée peut être amélioré de deux façons:

- Augmenter le nombre de CVDV en réduisant l'entraxe entre celles-ci;
- Augmenter le nombre d'œillets par CVDV en réduisant la distance entre eux.

##### **4.4.1.1 Entraxe des CVDV**

Le nombre de CVDV influence la qualité de la dispersion de la vapeur injectée. Le nombre de CVDV est déterminé en fonction de l'entraxe entre les CVDV, illustré à la Figure 1.4, et

l'espace disponible dans la gaine ou la centrale de traitement d'air. La valeur minimum pour l'entraxe des CVDV est fixée à 7,6 cm (3"), configuration permettant une excellente dispersion de la vapeur tout en évitant d'importantes pertes de charges au ventilateur causées par l'obstruction de l'écoulement d'air par la rampe d'injection de vapeur. Cette obstruction est restreinte à une réduction de moitié de la section de la conduite d'air.

#### **4.4.1.2 Distance entre les œillets**

De chaque côté d'une CVDC, les œillets sont équidistants et leur nombre dépend de la distance entre eux. La réduction de cette équidistance augmente le nombre total d'œillets. En pratique, le nombre total d'œillets installés sur une rampe est déterminé par le débit massique maximum de vapeur injectée par celle-ci, le débit massique de vapeur maximum par œillet étant fixé à 0,45 kg/h (1 lbm/h). La distance entre les œillets est donc une conséquence du nombre de CVDV et du débit massique de vapeur maximum de la rampe d'injection de vapeur.

Puisque en pratique la distance entre les CVDV est toujours supérieure à celle entre les œillets, son effet sur la DMSAC est plus dominant. L'entraxe entre les CVDV sera donc uniquement considéré afin de quantifier la qualité de la dispersion de la vapeur et sera le paramètre des données expérimentales représentant la dispersion. Par conséquent, l'entraxe entre les CVDV doit toujours être supérieur à la distance entre les œillets. Cette condition devra être respectée dans la conception des rampes d'injection de vapeur.



## CHAPITRE 5

### PLAN D'EXPÉRIENCES

Le plan d'expériences de la campagne de mesure est basé sur les combinaisons des paramètres de l'écoulement de l'air ainsi que ceux de l'injection de vapeur permettant de procéder aux différentes mesures de la DMSAC. Certaines contraintes seront imposées afin de réaliser les essais expérimentaux dans des conditions d'opération rencontrées dans l'industrie du CVCA. Le chapitre suivant fait l'état des limitations de la variation des paramètres des données expérimentales. Certains seront maintenus constant, d'autres varieront. Afin de limiter le nombre de combinaison soit la durée de la campagne de test, il importe de limiter la plage de valeurs possibles des différents paramètres.

#### 5.1 Cadre et limitations de l'étude

Certaines restrictions ont été imposées aux paramètres influençant la DMSAC de l'étude afin de réduire la quantité d'essais expérimentaux à effectuer.

##### 5.1.1 Écoulement d'air

Tel que déjà mentionné, la température de l'air en amont de la rampe d'injection de vapeur ainsi que la vitesse de l'écoulement d'air doivent respecter les conditions d'opération rencontrées dans l'industrie. L'humidité de l'air à l'entrée,  $RH_e$  ou  $W_e$ , dépend des conditions de l'air extérieur et l'humidité de l'air humidifié,  $RH_s$  ou  $W_s$ , ne pourra pas dépasser 85%. Ces limites sont résumées dans le Tableau 5.1.

Tableau 5.1 Propriétés de l'air durant l'étude

Température	Vitesse	Humidité relative	
		Amont de l'humidificateur	Aval de l'humidificateur
12,8 °C (55°F)	2,54 m/s (500 ppm)	10% à 60%	< 85%

### 5.1.2 Configurations des rampes d'injection de vapeur: entraxes entre les CVDV

Les dimensions du conduit de ventilation, limitées par le banc d'essai, sont de 61 cm (24") de largeur par 51 cm (20") de hauteur. Les rampes d'injection de vapeur sont constituées de CVDV verticales de 3,5 cm (1.4") de diamètre extérieur ayant une épaisseur de paroi de 0,9 mm (0.035"). Les CVDV étant disposés uniformément sur la largeur du conduit de ventilation, leur quantité par rampe d'injection est aussi fonction de la largeur. Les spécifications des différentes rampes d'injection de vapeur utilisées durant l'étude sont présentées au Tableau 5.2. Les rampes sont identifiées par la lettre «E» suivi de la dimension, notée en pouces, de l'entraxe entre les CVDV.

Tableau 5.2 Spécifications des rampes d'injection de vapeur

Identification de la rampe d'injection	Entraxe entre les CVDV cm (")	Quantité de CVDV	Nombre d'œillets	Entraxe moyen entre les œillets cm (")
<b>E3</b>	7,6 (3)	7	67	7,6 (3)
<b>E6</b>	15,2 (6)	4	48	7,6 (3)
<b>E8</b>	20,3 (8)	3	34	7,6 (3)
<b>E12</b>	30,5 (12)	2	45	5,1 (2)
<b>E24</b>	61 (24)	1	32	2,5 (1)

À des fins d'extrapolation des résultats expérimentaux pour une conduite d'air de plus grandes dimensions, la distance entre la paroi de la conduite et les CVDV aux extrémités doit équivaloir à la moitié de l'entraxe entre les CVDV. L'expérimentation sera alors

représentative de l'injection de vapeur sur une fraction d'une conduite d'air de dimensions beaucoup plus grandes, munie d'une rampe avec entraxe entre les CVDV de même dimension. Tel que discuté dans la section 4.4.1.2, l'entraxe entre les CVDV sera égal ou supérieur à la distance entre les œillets.

### 5.1.3 DMSAC

La valeur de la DMSAC est déterminée sur l'échelle de mesure installée sur la partie vitrée de la conduite de ventilation. Cette partie vitrée mesure 305 cm (120") donc la DMSAC maximale doit être inférieure à celle-ci. La DMSAC minimum est fixée à 13 cm (5") puisqu'il n'est pas possible de la mesurer en deçà de cette valeur avec le banc d'essai. De plus, dans les systèmes CVCA, l'espace disponible en aval de la rampe d'injection est toujours supérieure à 13 cm (5"). La DMSAC constitue la troisième composante de la donnée expérimentale.

## 5.2 Plan d'expériences

Le plan d'expériences suivant est défini afin de réaliser l'étude. La DMSAC sera mesurée, pour chacune des cinq différentes configurations de rampe d'injection de vapeur, selon différentes variations d'humidités de l'air, la température et la vitesse de l'air demeurant constantes.

Tableau 5.3 Plan d'expériences : variation d'humidité relative

Mesure de la DMSAC					
RH <sub>e</sub> (%)	RH <sub>s</sub> (%)				
	40	50	60	70	80
20					
30					
40					
50	-				
60		-			

Une donnée expérimentale sera composée des paramètres suivants:

- Entraxe entre les CVDV;
- $W_e$ ;
- $W_s$ ;
- DMSAC.

## CHAPITRE 6

### RÉALISATION DE L'ÉTUDE : ÉQUIPEMENTS CVCA ET OPÉRATIONS

Pour réaliser l'étude, un banc d'essai a été mis sur pied ainsi que l'instrumentation nécessaire à son opération et aux prises de mesures expérimentales.

#### 6.1 Équipement CVCA: le banc d'essai

##### 6.1.1 Généralités

La Figure 6.1 représente la schématique de système CVCA soit le banc d'essai. Toutes les composantes y sont identifiées. Le Tableau 6.1 permet d'associer les identifiants aux composantes mécaniques définies à la section 6.1.2.

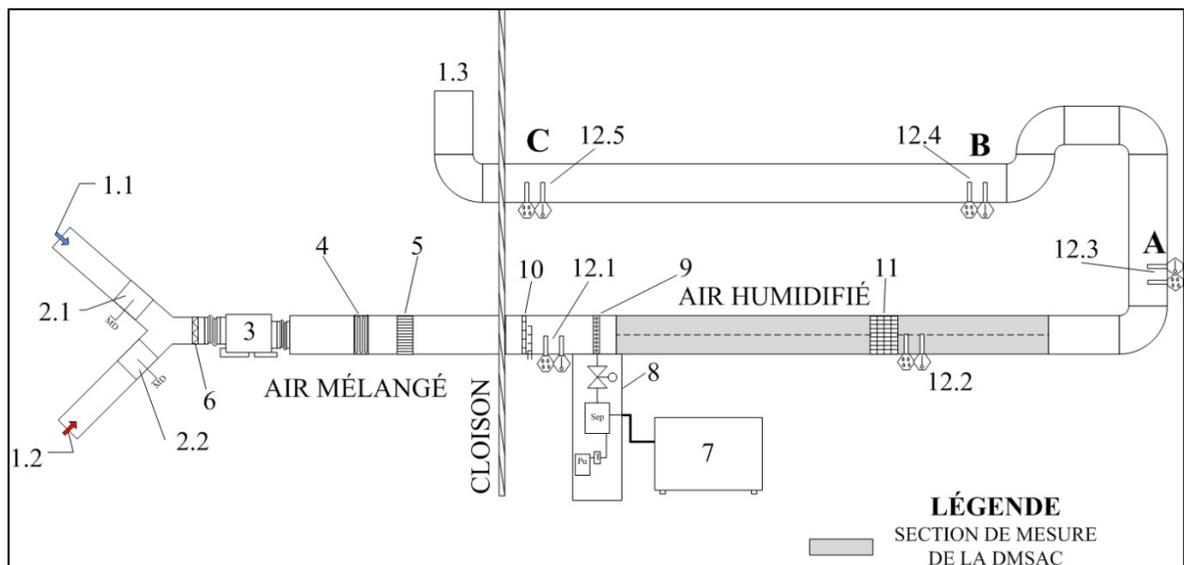


Figure 6.1 Schématique du banc d'essai



Tableau 6.1 Composantes du banc d'essai

Section	Identifiant	Description	
Air	1.1	Entrée d'air extérieur	
	1.2	Entrée d'air intérieur	
	1.3	Sortie d'air	
Volets Motorisés	2.1	Volet motorisé d'air extérieur	
	2.2	Volet motorisé d'air intérieur	
Mécanique CVCA	3	Ventilateur à débit d'air variable	
	4	Serpentin électrique (chauffage)	
	5	Redresseur d'écoulement d'air	
	6	Filtres	
Humidificateur	7	Chaudière modulante à vapeur pressurisée	
	8	Composantes de vapeur de l'humidificateur	
	9	Rampe d'injection de vapeur	
Instrumentation	10	Station de mesure de débit d'air	
	11	Chariot amovible : capteur d'accumulation de condensation	
	12	<b>Hygromètre / Thermomètre</b>	<b>Position</b>
	12.1	Capteur %RH/T entrée	Amont de l'humidificateur
	12.2	Capteur %RH/T grille	20 cm (8") en aval de la membrane du chariot amovible
	12.3	Capteur %RH/T A	Position A
	12.4	Capteur %RH/T B	Position B
	12.5	Capteur %RH/T C	Position C

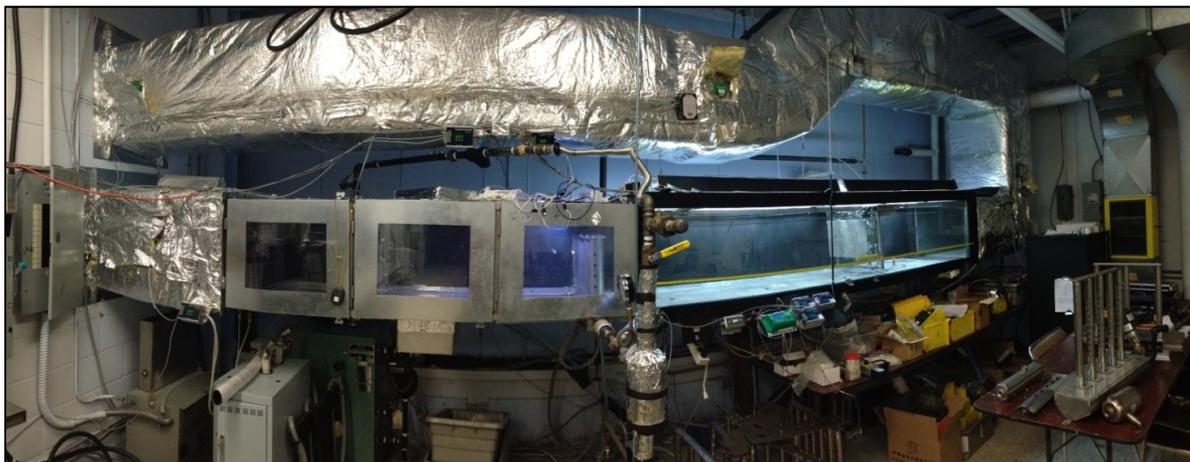


Figure 6.2 Banc d'essai

## **6.1.2 Composantes mécaniques du banc d'essai**

Le banc d'essai est constitué des composantes mécaniques suivantes, dont les spécifications complètes sont disponibles en ANNEXE II:

- conduite d'air isolée;
- ventilateur à vitesse variable;
- filtres;
- volets motorisés;
- serpentin électrique;
- redresseur d'écoulement d'air;
- station de mesure de débit d'air;
- chaudière à vapeur modulante;
- humidificateur à vapeur vive constitué des composantes de vapeur et de la rampe d'injection de vapeur;
- chariot amovible permettant de capter l'accumulation de condensation et mesurer la DMSAC.

### **6.1.2.1 Conduite d'air isolée**

La conduite d'air est de forme rectangulaire ayant une section de 51 cm (20") de hauteur et de 61 cm (24") de largeur. La conduite est isolée, à l'exception de la zone d'observation de l'accumulation de la condensation (zone de mesure de la DMSAC), afin de minimiser le transfert de chaleur entre l'air ambiant du laboratoire et l'air humidifié.

### **6.1.2.2 Ventilateur à débit d'air variable**

Le ventilateur permet l'écoulement d'air et le variateur de fréquence permet de contrôler le débit et la vitesse de l'air. Il peut faire varier la vitesse de 1,0 m/s (200 ppm) à 6,35 m/s (1250 ppm), le ventilateur ayant une capacité maximale d'environ 1982 l/s (4200 pcm). De

futurs essais expérimentaux pourront alors être effectués à différentes vitesses d'écoulement d'air.

#### **6.1.2.3 Volets motorisés**

Les volets motorisés sont positionnés en amont du ventilateur. Ils contrôlent le mélange d'air intérieur et extérieur et sont opérés simultanément l'un à l'inverse de l'autre. La proportion d'ouverture d'un des volets entraîne nécessairement la fermeture, à la même proportion, de l'autre volet. Sans utilisation du serpentin électrique, ces volets motorisés permettent de contrôler la température de l'entrée d'air ( $T_e$ ) sans affecter le débit d'air.

#### **6.1.2.4 Serpentin électrique**

Le serpentin électrique permet de préchauffer l'air d'entrée. Par conséquent, lorsque le serpentin électrique chauffe l'air, la proportion du mélange d'air en air frais extérieur est augmentée afin de maintenir la température du mélange d'air constant, ce qui aura comme effet de diminuer l'humidité du mélange d'air. Ce préchauffage de l'air permet donc de diminuer l'humidité relative de l'air à l'entrée.

#### **6.1.2.5 Redresseur d'écoulement d'air**

Le redresseur d'écoulement d'air, dont les spécifications sont fournies en ANNEXE II, est conforme à la norme ASHRAE - Standard method for laboratory airflow (1992). Selon cette norme, ce redresseur doit être installé en amont de la station de mesure de débit d'air afin d'assurer un écoulement d'air à vitesse établie, nécessaire à la validité des mesures de pression totale et statique prises à la station de mesure de débit d'air.

### 6.1.2.6 Station de mesure de débit d'air

La station de mesure de débit capte à la fois la pression totale  $P_t$  et la pression statique  $P_s$ , qui permettent de déterminer la pression dynamique  $P_d$ . La relation entre celles-ci étant illustrée dans l'équation ci-dessous :

$$P_t = P_s + P_d \quad (6.1)$$

Selon le manufacturier de la station de débit d'air, AirFlow Monitor, les points de prise de pression totale ( $P_t$ ) et statique ( $P_s$ ) sont positionnés selon la règle log-Tchebycheff permettant de mesurer une valeur moyenne de la pression dynamique avec une précision minimum de  $\pm 2\%$  de la valeur réelle. Il y a deux ports permettant de mesurer individuellement les pressions  $P_t$  et  $P_s$ . Les spécifications de la station de mesure sont présentées en ANNEXE II. La pression ( $P_d$ ) peut donc y être directement mesurée à l'aide d'un transducteur à différentiel de pression.

### 6.1.2.7 Humidificateur à vapeur vive

L'humidificateur génère la vapeur saturée pressurisée comme source d'humidité et l'injecte dans l'air. Il est constitué d'un générateur de vapeur pressurisée, la chaudière à vapeur, de composantes de vapeur permettant la détente et le contrôle du débit de vapeur ainsi que de la rampe d'injection de vapeur.

#### Chaudière à vapeur

La chaudière à vapeur génère la vapeur pressurisée qui sera utilisée comme source d'humidité. Illustré à la Figure 6.3, elle est fabriquée par Chromalox et commercialisé au Canada sous la bannière Etirex. Son débit massique maximal est de 108 kg/h (238 lbm/h). La pression de vapeur peut atteindre 690 kPa (100 PSI) au maximum. La chaudière est munie d'un contrôleur permettant de fixer manuellement le débit massique de vapeur généré. La plage de modulation est de 1 :100. Elle est également munie de limiteur de haute et basse pression afin de maintenir la pression dans une plage de variation qui de 138 à 276 kPa (20 à 40 PSI) pour tous les essais expérimentaux.

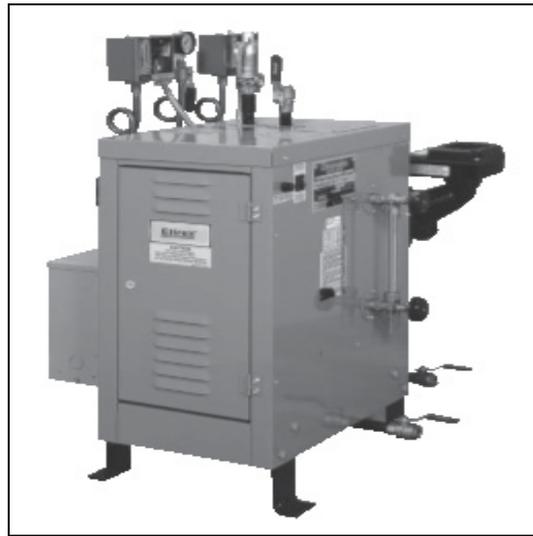


Figure 6.3 Chaudière électrique à vapeur  
Tirée de Etirex (2013)

### Composantes de vapeur de l'humidificateur

La Figure 6.4 est une illustration générique d'un humidificateur à vapeur tandis que la Figure 6.5 est une illustration de celui installé sur le banc d'essai.

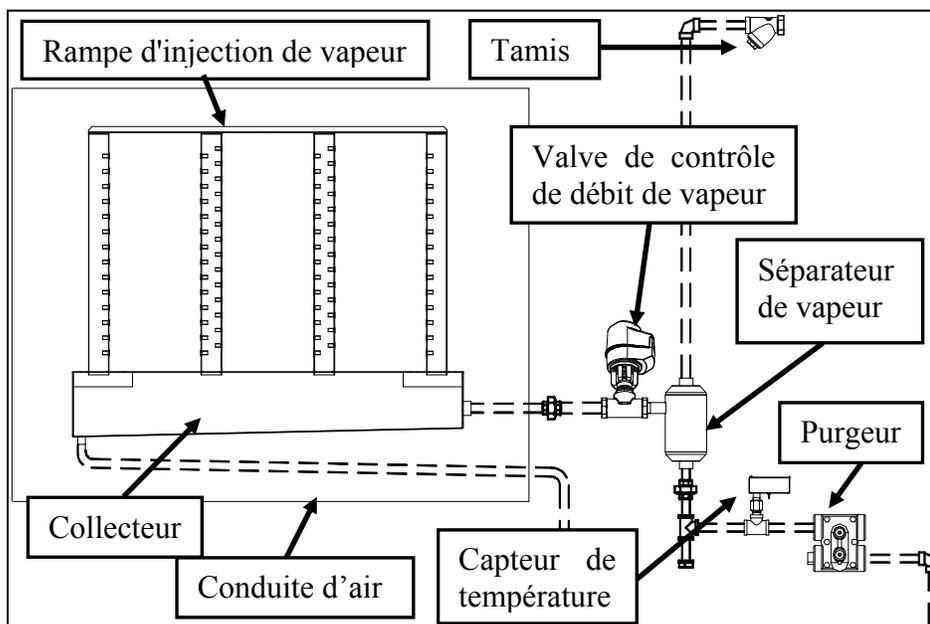


Figure 6.4 Humidificateur à vapeur saturée  
Adaptée de Neptonic (2013)

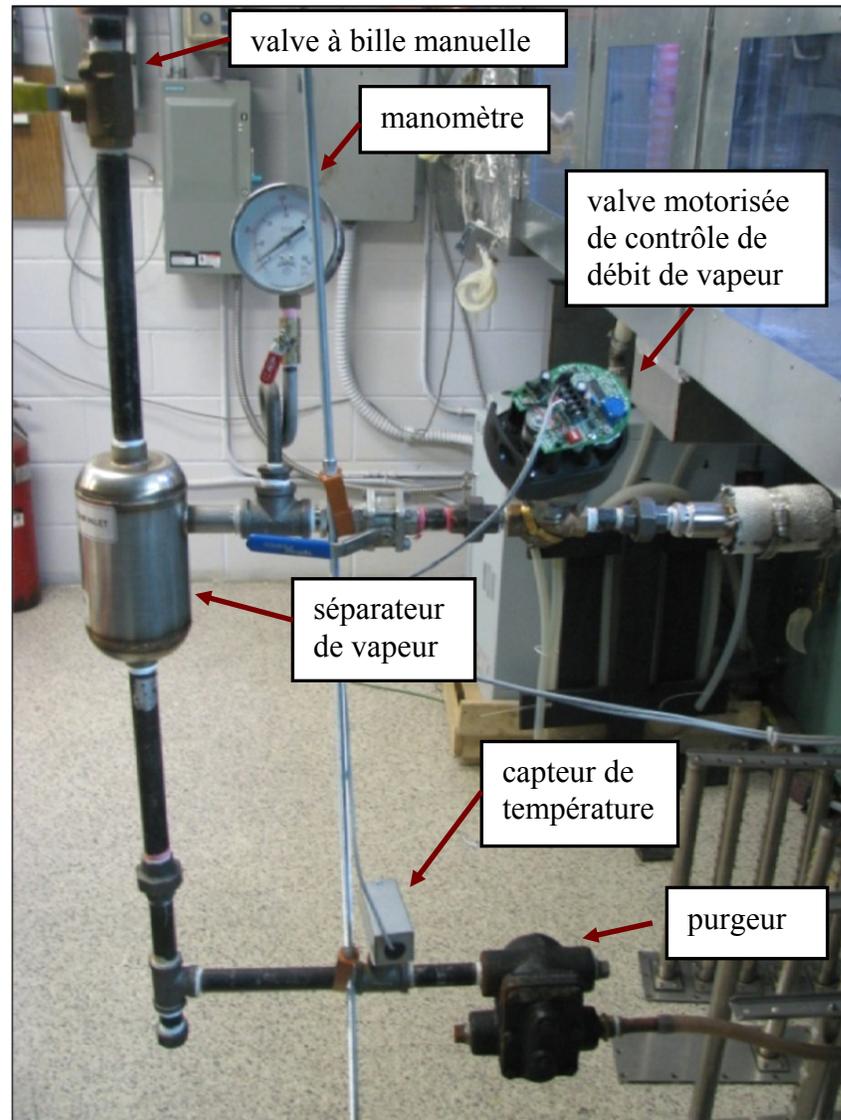


Figure 6.5 Humidificateur à vapeur

Les principales composantes de vapeur, illustrés sur la Figure 6.4 et Figure 6.5 sont le séparateur de vapeur, le purgeur, la valve motorisée de contrôle de débit de vapeur ainsi que de la rampe d'injection de vapeur.

### **Séparateur de vapeur**

Lorsque la vapeur circule dans le réseau, du condensat est généré sur la paroi internes de la tuyauterie pour cause de transfert de chaleur. De ce fait, un écoulement de vapeur entraîne

nécessairement une partie de ce condensat. Le séparateur de vapeur est un dispositif installé en amont de la valve de contrôle de débit de vapeur permettant d'y acheminer uniquement de la vapeur tout en dirigeant le condensat généré dans la tuyauterie vers le purgeur de vapeur.

### **Purgeur**

Le purgeur de vapeur achemine le condensat de la conduite de vapeur vers le retour de condensat tout en maintenant la vapeur dans le réseau de vapeur. Un purgeur à flotte thermostatique ne génère pas de fuite de vapeur au retour de condensat.

### **Valve motorisée de contrôle de débit de vapeur**

La valve motorisée contrôle le débit massique de vapeur injecté dans l'air. Afin de le maintenir constant, le débattement ainsi que la pression de vapeur en amont de cette valve doivent être maintenus constants. Durant la campagne de mesure, la pression de vapeur saturée maintenue en amont de la valve de contrôle n'était pas la même pour toutes les données recueillies. Cette pression, maintenue constante pendant un essai, a varié de 35 à 140 kPa (5,1 à 20,3 PSI), lorsque la valve de contrôle était en position ouverte.

### **Valve à bille manuelle**

Afin de contrôler la variation de  $RH_s$  dans la plage  $\pm 0,5\%$ , une valve à bille manuelle installée en amont de la valve de contrôle de vapeur permet de maintenir la pression de vapeur constante, la chaudière ayant une plage de variation de pression minimum trop élevée pour respecter la variation de la valeur de  $RH_s$  en deçà de  $\pm 0,5\%$ . Cette valve manuelle est en quelque sorte un ajustement précis en réponse à de faibles variations de pression de la vapeur générée par la chaudière à vapeur qui sont principalement dues au remplissage de la chaudière en eau froide.

## Rampe d'injection de vapeur



Figure 6.6 Rampe d'injection E6



Figure 6.7 Rampe d'injection E3

La rampe d'injection est constituée d'un collecteur et des CVDV. Le collecteur de la rampe assure la détente de la vapeur pressurisée jusqu'à la pression statique de l'air dans le conduit de ventilation par l'augmentation de la section de la conduite de vapeur. Le collecteur du

banc d'essai est conçu de façon à permettre de changer aisément la configuration de la rampe d'injection. Cinq différentes têtes interchangeables, chacune étant munies du nombre de CVDV correspondant aux configurations des rampes présentées au Tableau 5.2, permettront de faire varier l'entraxe entre les CVDV lors des essais expérimentaux. La pression statique de vapeur n'atteint jamais plus d'un demi-pouce de colonne d'eau (0,5" w.c.) soit environ 125 Pa à l'intérieur du collecteur. L'injection de vapeur est perpendiculaire à l'écoulement d'air. Cette configuration permet d'éviter la condensation de la vapeur injectée sur les parois extérieures des CVDV, la vapeur ne pouvant entrer en contact avec celles-ci. De plus, l'installation d'œillets de chaque côté des CVDV permet une dispersion plus uniforme de la vapeur.

#### 6.1.2.8 Chariot amovible : Capteur d'accumulation de condensation

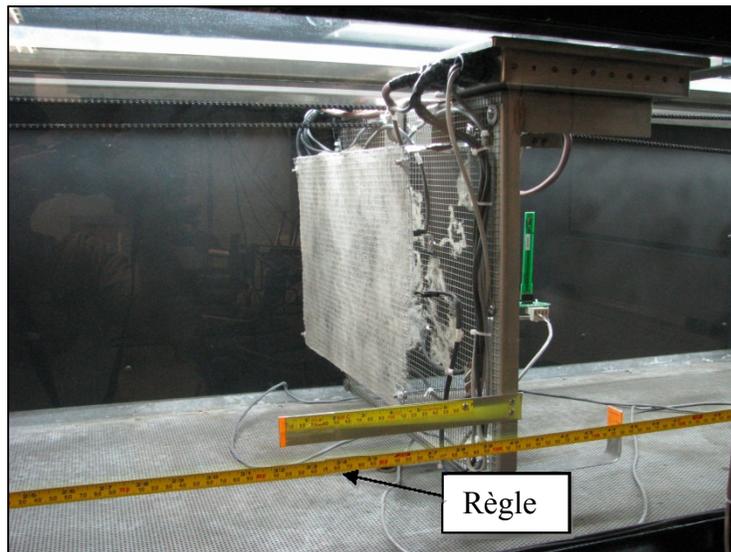


Figure 6.8 Chariot amovible



Figure 6.9 Membrane du chariot amovible

Le chariot amovible, illustré à la Figure 6.8, est muni d'une membrane à fibres fines, illustrée à la Figure 6.9, qui permet au brouillard de s'accumuler jusqu'à ce qu'une accumulation de condensation, requise pour mesurer la DMSAC, devienne visible. Un dispositif manuel permet de déplacer le chariot sur toute la section vitrée du conduit de ventilation. Lors des essais expérimentaux, lorsque l'accumulation de condensation commence à être visible sur la membrane, la distance entre celle-ci et la rampe d'injection est la DMSAC. La mesure de la DMSAC est obtenue sur la règle disposée sur la paroi vitrée du conduit de ventilation, la référence correspondant à la position de la rampe d'injection de vapeur.

## **6.2 Instrumentation**

### **6.2.1 Capteurs**

#### **6.2.1.1 Capteur de température**

Les capteurs de température utilisés sont des SHC80 fabriqués par Neptronic. Ils mesurent également l'humidité relative. La précision de ce capteur est de  $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ . Tel qu'illustré sur la schématique du banc d'essai, Figure 6.1, un capteur est installé en amont de l'humidificateur et quatre capteurs sont installés en aval de l'humidificateur. Tous les capteurs sont installés au centre de la conduite d'air.

#### **6.2.1.2 Capteur de pression**

La vitesse de l'écoulement d'air sera calculée à partir de la pression dynamique ( $P_d$ ) de l'air qui est mesurée par un transducteur à membrane de type ACI A/DP2-13 ayant une précision de  $\pm 3\%$  de 25 kPa (0.1" wc) donc  $\pm 0.75$  kPa. En reliant les prises de pression statique et totale de la station de débit d'air aux ports correspondant du transducteur, les différentes pressions sont appliquées de chaque côté de la membrane interne du transducteur permettant ainsi de mesurer le différentiel de pression. La pression dynamique est ainsi mesurée.

#### **6.2.1.3 Capteur d'humidité relative**

Les capteurs d'humidité relative étant les mêmes que ceux de température, les mesures d'humidité et de température sont effectuées au mêmes endroit et au même moment. Cela est nécessaire pour le calcul de l'humidité spécifique ( $W_e$  et  $W_s$ ). La précision du capteur est de  $\pm 3\%$  RH. Les capteurs d'humidité sont positionnés au centre du conduit et localisés aux positions illustrées sur la Figure 6.1. La présence de plusieurs capteurs d'humidité en aval de la rampe permet de mesurer l'évolution de l'homogénéité du mélange et ainsi s'assurer que la mesure de l'humidité relative après humidification ne soit pas faussée par la qualité du mélange. L'hypothèse que l'écoulement d'air en amont de l'humidificateur, identifié 12.1 à

la Figure 6.1, soit homogène est posée puisque l'air est mélangée lors de son passage dans le ventilateur.

### Étalonnage des capteurs d'humidité relative

Les capteurs d'humidité relative ont été étalonnés à l'aide d'un hygromètre du manufacturier Rotronic dont les spécifications figurent en ANNEXE II. Le Tableau 6.2 contient les données d'étalonnage des capteurs d'humidité relative SHC80 utilisés lors des essais expérimentaux. La variation maximale d'humidité relative mesurée est de 4,0%.

Tableau 6.2 Étalonnage capteur d'humidité relative et de température SHC80

Position capteur	Capteur		Variation : (Rot - SHC80)
	SHC80	Hygromatic Rotronic	
Humidité relative (%)			
12,1	35,1	36,3	1,2
12,4	84	80	-4,0
	92,4	92	-0,4
	88	86,5	-1,5
	56	52,7	-3,3
	38,5	40,7	-2,2
12,5	39	39,3	0,3
	62	62,3	0,3
	75,5	75	-0,5
	90,5	91,5	1

### Stabilité des mesures des capteurs d'humidité et de température

Les résultats présentés dans le Tableau 6.3 ont été mesurés sans humidification à une vitesse de l'écoulement d'air de 2,54 m/s (500 ppm). Puisque l'hypothèse de l'homogénéité du mélange d'air est supposée en amont de la rampe d'injection, l'absence d'injection de vapeur propage ce mélange homogène à tous les capteurs d'humidité et de température. Les calculs d'humidité spécifique témoignent des erreurs de mesure de par l'écart entre les valeurs obtenues par les différents capteurs sur le même échantillon d'écoulement d'air.

Tableau 6.3 Stabilité des mesures des capteurs d'humidité relative

Position des capteurs														
Entrée			Sortie											
12,1			12,2			12,3			12,4			12,5		
RH %	T °C	W <sub>e</sub> g/kg	RH %	T °C	W <sub>s</sub> g/kg	RH %	T °C	W <sub>s</sub> g/kg	RH %	T °C	W <sub>s</sub> g/kg	RH %	T °C	W <sub>s</sub> g/kg
17,4	12,7	1,57	17	14,6	1,74	15,7	13,7	1,51	18	14,4	1,82	16,7	13,9	1,63
37,4	13	3,46	38,6	13,5	3,69	37,7	13,2	3,53	38,2	14,3	3,84	36,6	14	3,61
48,7	12,9	4,48	49,2	13,1	4,59	48,4	12,8	4,42	48,1	13,8	4,69	46,7	13,4	4,44
58,2	12,8	5,33	57,4	13,1	5,36	57,7	12,8	5,28	57,1	13,8	5,58	55,6	13,4	5,29
45,5	12,1	3,97	47,1	12,8	4,30	45,8	12,3	4,05	44,6	13,7	4,32	42,8	13,4	4,06
24,9	12,1	2,16	26,1	12,9	2,39	25	12,3	2,20	26,2	13,4	2,48	24,9	13,1	2,31

### 6.2.2 Mesure de la vitesse de l'écoulement d'air

Avec la pression dynamique  $P_d$  et la température de l'air, la vitesse de l'écoulement d'air peut être calculée en utilisant la loi de Bernoulli :

$$\left(\frac{P_T}{\rho g}\right) + z_1 = z_2 + \left(\frac{P_s}{\rho g}\right) + \left(\frac{v^2}{2g}\right) \quad (6.2)$$

Et la relation entre les vitesses de l'équation

$$P_t = P_s + P_d \quad (6.3)$$

où les constantes  $z_1$  et  $z_2$  sont nulles. La densité de l'air est fonction de la température et de la pression statique. La température de l'air étant maintenue à 12.8°C, sa masse volumique est de 1,235 kg/m<sup>3</sup> (0,077 lbm/ft<sup>3</sup>) à la pression standard de 101,3 kPa. Afin de déterminer la vitesse de l'air, le Tableau 6.4 met en relation  $P_d$  et  $v$ .

Tableau 6.4 Vitesse de l'écoulement d'air à une température de 12,8°C en fonction de la pression dynamique ou de la colonne d'eau

$P_d$ (Pa)	v (m/s)	v ppm	$P_d$ (Pa)	v (m/s)	v ppm
0,00	0,00	0	12,95	4,58	902
0,50	0,90	177	13,45	4,67	919
1,00	1,27	250	13,95	4,75	936
1,49	1,56	306	14,45	4,84	952
1,99	1,80	354	14,95	4,92	968
2,49	2,01	395	15,44	5,00	984
2,99	2,20	433	15,94	5,08	1000
3,49	2,38	468	16,44	5,16	1016
3,99	2,54	500	16,94	5,24	1031
4,48	2,69	530	17,44	5,31	1046
4,98	2,84	559	17,93	5,39	1061
5,48	2,98	586	18,43	5,46	1076
5,98	3,11	612	18,93	5,54	1090
6,48	3,24	638	19,43	5,61	1104
6,97	3,36	662	19,93	5,68	1118
7,47	3,48	685	20,43	5,75	1132
7,97	3,59	707	20,92	5,82	1146
8,47	3,70	729	21,42	5,89	1159
8,97	3,81	750	21,92	5,96	1173
9,47	3,92	771	22,42	6,03	1186
9,96	4,02	791	22,92	6,09	1199
10,46	4,12	810	23,41	6,16	1212
10,96	4,21	829	23,91	6,22	1225
11,46	4,31	848	24,41	6,29	1238
11,96	4,40	866	24,91	6,35	1250
12,45	4,49	884	25,41	6,41	1263

### 6.2.3 Contrôle des conditions expérimentales

Le banc d'essai permet de contrôler certains paramètres de l'écoulement d'air et de l'injection de vapeur. Certains paramètres ne seront pas contrôlés telle l'humidité relative de l'air à l'entrée ( $RH_e$ ) ainsi que la température de l'air humidifié à la sortie ( $T_s$ ).

### 6.2.3.1 Contrôle de la température de l'air à l'entrée

La température l'air à l'entrée est contrôlée par les volets motorisés. La température de l'air extérieur doit par conséquent être inférieure à la température de consigne, soit 12.8°C (55°F), la température intérieure étant constante autour de 22°C (72°F). Puisque la température de l'air extérieur est variable, la température de l'air mélangé est maintenue par la boucle de contrôle du thermostat soumis à une température de consigne qui module l'ouverture des volets motorisés. La boucle de contrôle utilise le capteur de température situé en amont de la rampe d'injection de vapeur, 12.1 de la Figure 6.1, pour mesurer la température existante et la comparer avec la consigne fixée au thermostat. Une fois la température stabilisée, la variation de température lue par le capteur est d'environ  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ .

Il est à noter que le banc d'essai n'est pas équipé d'un système de refroidissement. Par conséquent, afin maintenir la température de consigne de l'air à 12,8 °C (55°F), la température de l'air extérieur doit être nécessairement être inférieure à cette température de consigne.

### 6.2.3.2 Contrôle de la vitesse de l'écoulement d'air

La variation de la vitesse de l'air est assurée par le variateur de fréquence du ventilateur. La vitesse de l'air peut varier de 1m/s (200 ppm) à 6,35 m/s (1250 ppm) mais sera maintenue à 2,54 m/s (500 ppm) tout au long de campagne de mesure. La précision de la vitesse de l'air est de  $2,54 \pm 0,1$  m/s ( $500 \pm 20$  ppm).

### 6.2.3.3 Contrôle du débit massique de vapeur injectée ( $RH_s$ , $W_s$ )

Le débit massique de vapeur injectée est contrôlé par la valve de contrôle de débit de vapeur de l'humidificateur. Afin de maintenir ce débit constant, le débattement de la valve de contrôle de vapeur et la pression de vapeur en amont de cette valve doivent être maintenus constants. La capacité de vapeur générée par la chaudière doit toujours être légèrement supérieur à celle injectée afin de pallier les pertes par transfert de chaleur à travers les

conduites et d'éviter une baisse de pression en amont de la valve de contrôle de vapeur due au remplissage de la chaudière en eau froide.

La pression de vapeur générée est sujette à une variation de pression en raison de la plage de pression d'opération de la chaudière. La chaudière est ajustée de sorte que la pression de vapeur générée oscille entre 138 kPa et 276 kPa (20 PSI et 40 PSI). La chaudière démarre lorsque la pression atteint 138 kPa (20 PSI) et s'éteint lorsque la pression atteint 276 kPa (40 PSI). Des essais préliminaires ont été réalisés avec un régulateur de pression de vapeur mais les résultats démontrent qu'une pression de vapeur de 103 kPa (15 PSI) en aval de celui-ci et en amont de la valve de contrôle du débit de vapeur ne peut être maintenue constante avec une telle variation de pression en amont du régulateur.

Afin de maintenir la pression de vapeur constante en amont de la valve de contrôle de vapeur un manomètre, servant de lecture de pression, ainsi qu'une valve à bille manuelle sont installés en amont de la valve de contrôle de vapeur tel qu'illustré sur la Figure 6.5. La variation est principalement causée par le remplissage en eau froide de la chaudière. De plus, l'expérimentateur peut à tout moment faire varier la pression de vapeur en amont de la valve de contrôle de vapeur avec la valve à bille manuelle.

En résumé, la valeur de  $RH_s$  visée est maintenue constante ( $\pm 0.5\%RH$ ) lors des tests en maintenant constante la pression en amont de la valve de contrôle de vapeur, la capacité de vapeur injectée étant contrôlée par l'ouverture de celle-ci.



## CHAPITRE 7

### MÉTHODE EXPÉRIMENTALE

#### 7.1 Généralités

Tel que préalablement mentionné à la section 5.2, les tests expérimentaux sont réalisés de façon à mesurer la DMSAC en fonction des paramètres expérimentaux suivants :

- Humidité relative à l'entrée ( $RH_e$ ) ou humidité spécifique à l'entrée ( $W_e$ );
- Humidité relative à la sortie ( $RH_s$ ) ou humidité spécifique à la sortie ( $W_s$ );
- Entraxe entre les CVDV.

Les différentes combinaisons de ces trois paramètres expérimentaux effectuées avec chacune des cinq différentes rampes d'injection constitueront la campagne de mesure.

#### 7.2 Procédure expérimentale

Afin de procéder à la mesure des données expérimentales, le banc d'essai doit d'abord être en régime permanent, c'est-à-dire que tous les paramètres à contrôler sont constants dans le temps. Pour ce faire, on doit initialement ajuster le banc d'essai aux conditions expérimentales constantes.

##### 7.2.1 Ajustements initiaux

- Installer la rampe d'injection de vapeur fixant ainsi le paramètre de l'entraxe des CVDV;
- Maintenir une vitesse de l'écoulement d'air de 2,54 m/s (500 ppm) en ajustant la fréquence du courant électrique au ventilateur;
- Maintenir une température de consigne à l'entrée de 12,8°C (55°F).

## 7.2.2 Préparation pour la prise d'une donnée expérimentale

### 7.2.2.1 $RH_e$

L'humidité relative à l'entrée ( $RH_e$ ) est fonction des conditions climatiques extérieures. Des essais préliminaires de température extérieure en fonction de l'humidité relative mesurée à 12,8°C (55°F) ont été compilés et le Tableau 7.1 est un aperçu des valeurs de  $RH_e$  en fonction des conditions extérieures.

Tableau 7.1 Plage de  $RH_e$  en fonction des conditions climatiques extérieures

Températures extérieures (°C)	Conditions climatiques	$RH_e$ (%)
Autour de -10	Sec sans neige	Autour de 15 à 20
-5 à 0	Sec sans neige	Autour de 25 à 35
0 à 8	Sec sans pluie	35 à 45
0 à 8	Pluvieux et humide	45 à 60

Le paramètre  $RH_e$  n'est pas précisément contrôlé mais uniquement mesuré et noté. Afin de varier ce paramètre durant la campagne de mesure, les essais expérimentaux doivent être effectués durant différentes conditions climatiques extérieures. Il est cependant possible de légèrement diminuer ce paramètre en utilisant le serpentin électrique tel que discuté à la section 6.1.2.4.

### 7.2.2.2 $RH_s$

Dépendamment de la valeur de  $RH_e$  mesurée, quelques valeurs de  $RH_s$  peuvent être considérées pour la prise d'autres données expérimentales. Un incrément de 10% sur  $RH_s$  permettra d'obtenir suffisamment de données expérimentales.

La  $RH_s$  visée est contrôlée par le débit massique de vapeur généré par la chaudière. La variation de ce débit est contrôlée par le débattement de la soupape de la valve de contrôle de débit de vapeur de l'humidificateur. La position de la soupape est maintenue constante, en utilisant un potentiomètre relié à l'actuateur de la valve motorisée, afin de maintenir le débit massique constant.

Afin de maintenir la valeur visée de  $RH_s$  tout au long d'un essai, il importe de maintenir cette valeur stable à  $\pm 0.5\%$ . Cette précision est possible à maintenir tout au long de la campagne de mesure en maintenant la pression de vapeur en amont de la valve de contrôle de vapeur constante à  $\pm 3,45$  KPa (0.5 PSI) grâce à l'utilisation de la valve à bille manuelle.

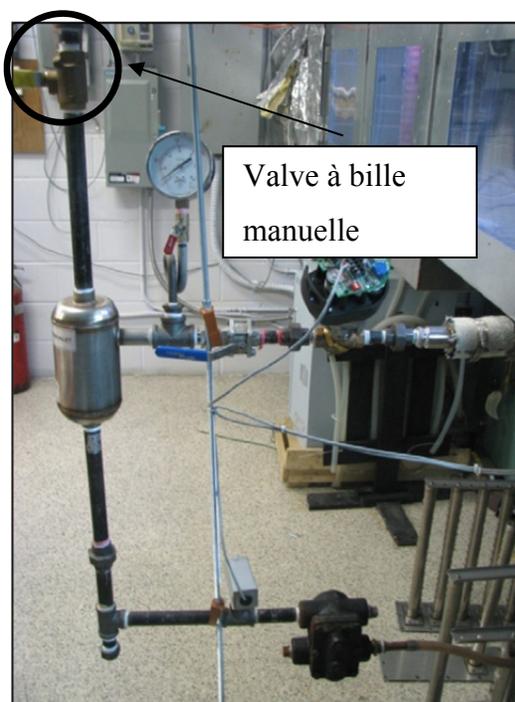


Figure 7.1 Valve à bille manuelle

### 7.2.2.3 Mesure de la DMSAC

La mesure de la DMSAC doit être effectuée lorsque l'humidité relative en aval de la rampe d'injection est constante. La membrane est déplacée vers la rampe par le biais du chariot

amovible jusqu'à ce que l'accumulation de condensation soit détectée sur la membrane. La distance entre la membrane et la rampe d'injection est la DMSAC. La séquence de manipulations suivante permet de mesurer la DMSAC :

1. Positionnement initial du chariot amovible;
2. Déplacement du chariot amovible selon l'incrément d'avance du Tableau 7.2;
3. Attente de cinq minutes et vérification de présence d'accumulation de condensation sur la membrane;
4. Si aucune condensation n'est détectée visuellement sur la membrane, retour à l'étape 2. Par contre, si de la condensation est détectée, alors la position du chariot amovible correspond à la DMSAC.

Les étapes 2 et 3 sont répétées jusqu'à la détection d'accumulation de condensation sur la membrane. Lorsque l'accumulation de condensation est visuellement détectée sur la membrane, la distance entre la rampe d'injection et la position actuelle du chariot amovible est définie comme étant la DMSAC. Une donnée expérimentale, composée de l'entraxe entre les CVDV, de l'augmentation de l'humidité relative de  $RH_e$  à  $RH_s$  et de la DMSAC mesurée est alors obtenue et ce en fonction des conditions expérimentales préalablement fixées et discutées.

### **Positionnement initial du chariot amovible**

La position initiale du chariot amovible doit être supérieure à la DMSAC donc aucune accumulation de condensation ne doit être visible sur la membrane après un délai de 5 minutes. L'expérience acquise lors des essais préliminaires démontre que sous les mêmes conditions expérimentales, il n'y en aura pas ultérieurement à ce délai.

### **Déplacement du chariot amovible**

Le chariot amovible est déplacé en direction de la rampe d'injection de vapeur afin de mesurer la DMSAC. Suite à un déplacement, un délai est nécessaire afin de permettre l'accumulation de condensation. Ce déplacement, fonction de la distance entre le chariot et la rampe d'injection de vapeur, est régi par l'incrément de déplacement du chariot spécifié au Tableau 7.2, afin d'accélérer le temps requis pour mesurer la DMSAC.

Tableau 7.2 Incrément de déplacement du chariot amovible en fonction de sa position

<b>Distance entre le chariot amovible et la rampe d'injection mm (")</b>	<b>Incrément de déplacement mm (")</b>
Plus de 1219 (48)	76 (3)
610 (24) à 1219 (48)	51 (2)
457 (18) à 610 (24)	38 (1.5)
9 (229) à 457 (18)	25 (1)
76 (3) à 9 (229)	13 (0.5)

Puisque la DMSAC est établie selon une incrémentation de la position du chariot, sa valeur réelle est comprise entre la position actuelle et la précédente. On peut donc en déduire la résolution de la mesure de la DMSAC illustrée au Tableau 7.3.

Tableau 7.3 Résolution de la DMSAC

<b>DMSAC mm (")</b>	<b>Tolérance mm (")</b>
Plus de 1219 (48)	-0/+76 (3)
610 (24) à 1219 (48)	-0/+51 (2)
457 (18) à 610 (24)	-0/+38 (1.5)
9 (229) à 457 (18)	-0/+25 (1)
76 (3) à 9 (229)	-0/+13 (0.5)



## CHAPITRE 8

### RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Les résultats expérimentaux sont présentés séparément pour chacune des rampes. Les mesures expérimentales sont les températures mesurées en °C, les humidités relatives mesurées en % (RH) et les DMSAC mesurées en pouces. Les humidités spécifiques (W) sont calculées d'après les mesures d'humidités relatives et de température telles que décrit à la l'ANNEXE I.

#### 8.1 Rampe E3

Tableau 8.1 Données expérimentales obtenues avec la rampe E3

Position															DMSAC (")	Note sur l'accumulation de la condensation
Entré (12.1)			Grille (12.2)			A (12.3)			B (12.4)			C (12.5)				
RH (%)	T (°C)	W (g/kg)	RH (%)	T (°C)	W (g/kg)	RH (%)	T (°C)	W (g/kg)	RH (%)	T (°C)	W (g/kg)	RH (%)	T (°C)	W (g/kg)		
15,9	13,7	1,53	48,2	18,8	6,49	39,0	17,4	4,79	36,9	17,8	4,65			0,00	6	début
18,2	12,9	1,67	71,7	17,9	9,16	52,6	16,5	6,12	51,9	17,1	6,27			0,00	6	début
19,4	12,9	1,78	85,2	18,9	11,63	61,5	16,9	7,35	59,4	17,5	7,38			0,00	7	début
20,0	12,8	1,82	97,7	18,7	13,21	83,8	16,9	10,06	72,3	17,2	8,83	67,2	16,7	7,94	14,5	début
20,6	12,9	1,89	98,7	18,3	13,01	96,0	17,7	12,17	75,4	17,8	9,58	69,3	17,2	8,46	84	uniforme
18,9	12,8	1,72	99,4	19,0	13,70	93,3	17,1	11,37	76,2	17,3	9,38	71,5	16,8	8,51	24	uniforme
19,2	12,9	1,76	99,1	19,7	14,28	98,9	17,7	12,54	81,5	17,5	10,17	78,5	16,9	9,42	60	uniforme
61,1	12,6	5,52	87,2	14,9	9,20	77,7	14,4	7,92	75,7	15,5	8,29	73,6	15,1	7,85	5	début
58,0	13,2	5,45	91,3	15,7	10,16	79,7	15,0	8,45	77,7	16,0	8,79	76,0	15,6	8,38	5,5	début
58,9	12,5	5,28	94,6	15,5	10,40	83,6	14,5	8,59	81,8	15,7	9,09	79,6	15,2	8,55	6	début
40,7	13,1	3,79	81,7	15,6	9,02	62,8	14,9	6,60	60,3	15,9	6,76	57,5	15,5	6,28	3,5	début
41,7	12,8	3,81	82,2	15,4	8,95	67,3	14,5	6,90	65,7	15,9	7,37	62,7	15,5	6,85	4	début
44,6	12,1	3,89	94,9	15,6	10,50	82,6	14,3	8,37	77,8	15,4	8,47	72,8	15,0	7,71	10	début
34,5	12,1	3,00	95,2	15,9	10,74	94,4	14,9	9,97	78,6	15,7	8,73	75,6	15,1	8,07	54	uniforme

## 8.2 Rampe E6

Tableau 8.2 Données expérimentales obtenues avec la rampe E6

Position															DMSAC (°)	Note sur l'accumulation de la condensation
Entré (12.1)			Grille (12.2)			A (12.3)			B (12.4)			C (12.5)				
RH (%)	T (°C)	W (g/kg)	RH (%)	T (°C)	W (g/kg)	RH (%)	T (°C)	W (g/kg)	RH (%)	T (°C)	W (g/kg)	RH (%)	T (°C)	W (g/kg)		
17,4	12,7	1,57	80,3	17,2	9,82	49,7	15,4	5,38	49,8	16,1	5,64	46,8	15,5	5,10	7,0	début
17,2	12,7	1,55	83,7	17,2	10,25	58,8	15,5	6,42	56,2	16,2	6,42	52,7	15,7	5,82	9,5	début
18,9	12,8	1,72	96,5	17,5	12,08	83,5	15,9	9,40	77,9	16,5	9,11	74,5	16,0	8,43	22,0	début
17,9	12,8	1,63	96,3	17,2	11,82	88,2	16,4	10,26	83,4	16,8	9,95	79,6	16,3	9,19	60,0	uniforme
59,7	12,8	5,46	88,8	14,8	9,31	72,9	13,9	7,19	71,8	15,1	7,66	69,4	14,7	7,21	9,5	début
60,9	12,6	5,50	90,0	14,4	9,20	83,2	13,9	8,22	80,3	15,2	8,63	77,2	14,7	8,03	22,0	début
60,6	12,5	5,44	90,6	14,9	9,57	89,5	14,0	8,91	84,4	15,2	9,08	80,7	14,8	8,45	48,0	uniforme
49,4	11,6	4,17	86,3	13,8	8,47	71,3	13,2	6,71	71,5	14,3	7,24	69,4	13,9	6,84	12,0	début
51,0	12,5	4,57	59,7	14,3	6,03	85,3	13,8	8,37	84,0	15,1	8,98	81,7	0,0	8,50	19,0	début
29,8	12,6	2,68	87,4	14,9	9,22	75,9	14,3	7,69	75,7	15,5	8,29	73,6	15,1	7,85	16,5	début
32,9	12,5	2,94	89,7	14,3	9,10	75,1	13,8	7,36	76,0	14,8	7,95	74,1	14,5	7,60	13,0	début
32,3	12,1	2,81	89,6	14,4	9,15	77,0	13,9	7,60	77,4	15,2	8,32	75,1	14,8	7,86	14,0	début
26,6	13,4	2,52	78,1	15,2	8,39	59,5	14,5	6,09	59,1	15,6	6,50	57,5	15,1	6,12	5,5	début
25,2	13,4	2,39	79,3	15,6	8,75	69,1	14,9	7,27	68,5	16,1	7,79	66,3	15,7	7,34	18,5	début
45,6	13,0	4,22	92,0	15,0	9,78	80,5	14,3	8,16	81,8	15,5	8,97	80,2	15,1	8,56	13,0	début
42,9	12,1	3,74	91,9	14,6	9,52	80,9	13,8	7,93	82,2	15,1	8,78	80,0	14,7	8,32	13,5	début
43,3	13,2	4,06	85,7	14,4	8,75	80,2	14,0	7,97	81,2	15,2	8,73	79,4	14,8	8,31	17,5	début

## 8.3 Rampe E8

Tableau 8.3 Données expérimentales obtenues avec la rampe E8

Position															DMSAC (°)	Note sur l'accumulation de la condensation
Entré (12.1)			Grille (12.2)			A (12.3)			B (12.4)			C (12.5)				
RH (%)	T (°C)	W (g/kg)	RH (%)	T (°C)	W (g/kg)	RH (%)	T (°C)	W (g/kg)	RH (%)	T (°C)	W (g/kg)	RH (%)	T (°C)	W (g/kg)		
18,7	13,1	1,73	44,2	16,5	5,13	44,0	15,6	4,82	44,3	16,3	5,08	41,8	15,7	4,61	7	début
19,8	13,2	1,85	71,6	17,1	8,69	57,0	16,2	6,51	53,0	16,7	6,25	50,1	16,0	5,64	11	début
17,2	12,4	1,52	93,7	17,2	11,49	72,8	15,1	7,76	69,9	15,8	7,80	61,1	15,4	6,63	17	début
18,7	12,7	1,69	98,0	18,0	12,67	84,7	15,6	9,35	73,5	16,2	8,42	69,6	15,7	7,71	24	début
21,6	13,3	2,03	98,8	18,0	12,77	94,0	16,7	11,17	81,2	17,0	9,81	76,9	16,5	8,99	42	début
58,4	12,8	5,34	89,3	14,3	9,06	78,6	13,8	7,71	75,5	14,9	7,95	72,6	14,6	7,49	21	début
59,7	12,7	5,43	93,7	14,4	9,58	92,8	13,9	9,18	83,7	15,1	8,94	80,1	14,6	8,28	37,5	début

## 8.4 Rampe E12

Tableau 8.4 Données expérimentales obtenues avec la rampe E12

Position															DMSAC (°)	Note sur l'accumulation de la condensation
Entré (12.1)			Grille (12.2)			A (12.3)			B (12.4)			C (12.5)				
RH (%)	T (°C)	W (g/kg)	RH (%)	T (°C)	W (g/kg)	RH (%)	T (°C)	W (g/kg)	RH (%)	T (°C)	W (g/kg)	RH (%)	T (°C)	W (g/kg)		
17,9	13,6	1,72	19,0	16,0	2,13	36,6	15,8	4,06	42,9	16,5	4,98	40,3	15,9	4,50	10	début
17,8	13,9	1,74	20,4	16,4	2,34	43,1	16,2	4,91	50,5	16,8	5,99	48,6	16,3	5,58	12	début
19,4	13,3	1,82	44,9	15,8	4,99	66,9	15,5	7,32	70,7	16,4	8,20	69,6	15,9	7,81	30	début
20,8	12,5	1,86	31,6	14,9	3,30	56,9	14,7	5,90	63,3	15,7	7,01	60,7	15,2	6,50	20	début
20,3	12,8	1,85	70,4	15,7	7,80	68,1	15,1	7,26	74,4	16,1	8,47	75,2	15,6	8,29	44	début
23,2	12,7	2,10	86,2	15,9	9,71	83,5	15,5	9,16	78,1	16,1	8,90	78,2	15,6	8,62	72	uniforme
39,6	12,1	3,45	41,6	12,8	3,80	50,7	13,1	4,73	54,1	14,1	5,39	52,5	13,9	5,16	11,5	début
38,7	12,6	3,48	44,9	13,3	4,24	54,2	13,2	5,09	58,2	14,4	5,92	56,4	14,1	5,62	17	début
41,5	11,8	3,55	58,1	12,9	5,35	66,9	12,8	6,13	67,9	14,0	6,73	65,9	13,8	6,45	25	début
39,5	12,4	3,51	77,3	13,7	7,53	80,4	13,5	7,73	74,5	14,7	7,74	72,5	14,3	7,34	53	début
50,2	12,7	4,56	53,5	13,4	5,09	60,5	13,4	5,76	63,3	14,5	6,48	61,8	14,1	6,16	16	début
56,8	13,0	5,27	59,0	13,5	5,65	66,7	13,6	6,44	68,8	14,7	7,14	67,2	14,4	6,84	15,5	début
57,5	13,8	5,62	75,1	13,8	7,36	77,5	13,6	7,50	76,0	14,8	7,95	74,2	14,4	7,56	38	début
57,6	12,7	5,24	88,3	14,0	8,79	86,5	13,6	8,38	82,0	14,8	8,59	80,9	14,5	8,31	63	début

## 8.5 Rampe E24

Tableau 8.5 Données expérimentales obtenues avec la rampe E24

Position															DMSAC (°)	Note sur l'accumulation de la condensation
Entré (12.1)			Grille (12.2)			A (12.3)			B (12.4)			C (12.5)				
RH (%)	T (°C)	W (g/kg)	RH (%)	T (°C)	W (g/kg)	RH (%)	T (°C)	W (g/kg)	RH (%)	T (°C)	W (g/kg)	RH (%)	T (°C)	W (g/kg)		
37,5	12,5	3,35	71,7	13,8	7,02	71,1	13,5	6,83	52,2	14,4	5,30	47,7	14,0	4,72	39	début
35,9	13,4	3,41	86,4	15,1	9,24	86,6	14,9	9,14	58,7	15,5	6,41	52,6	14,8	5,48	65	début
41,1	11,9	3,53	-	-	-	65,0	12,8	5,95	57,0	13,7	5,53	53,1	13,4	5,05	16	uniforme
49,5	12,6	4,46	72,4	13,7	7,04	60,2	13,2	5,66	53,6	14,1	5,34	51,3	13,8	5,01	20	début
48,2	13,0	4,46	79,4	14,1	7,94	76,5	13,8	7,50	59,3	14,8	6,19	55,5	14,1	5,53	38	début
51,3	12,1	4,48	84,5	13,4	8,08	81,4	13,4	7,78	66,4	14,1	6,63	61,0	13,5	5,85	63	début



## CHAPITRE 9

### ALGORITHME DE PRÉDICTION DE LA DMSAC

Suite aux essais expérimentaux, les données obtenues permettront de concevoir un algorithme de prédiction de la DMSAC. Elle est fonction de l'humidité spécifique de l'air avant et après humidification ainsi que de la configuration de la rampe d'injection soit l'entraxe entre les CVDV. Une prédiction ne sera valable que pour un écoulement d'air à une vitesse de 2.54 m/s (500 ppm) et à une température de 12,8 °C (55°F) soit les mêmes conditions que celles des essais expérimentaux. Ces résultats permettront de déterminer l'entraxe maximum entre les CVDV afin que la DMSAC soit inférieure à la distance disponible en aval de cette rampe.

#### 9.1 Étape de conception de l'algorithme

La régression sera la méthode mathématique utilisée, à partir des données expérimentales, afin de déterminer le modèle théorique de l'effet des humidités spécifiques sur la DMSAC. Les étapes suivantes sont nécessaires à l'obtention de cet algorithme:

- Construire la base de données à partir des résultats expérimentaux;
- Déterminer la méthode de régression;
- Effectuer les régressions à partir de familles de fonctions;
- Déterminer le modèle théorique, donc choisir une famille de fonction;
- Construire l'algorithme de prédiction de la DMSAC.

## **9.2 Construction de la base de données**

### **9.2.1 Regrouper les données expérimentales selon la rampe**

Les données expérimentales sont fonction de l'entraxe entre les CVDV et elles seront regroupées selon celui qui leur est associé. Il y aura alors cinq groupes de données expérimentales. Les régressions seront effectuées sur chacun des groupes, permettant ainsi de réduire les données à trois variables ce qui simplifie le calcul des régressions. Les données expérimentales de chacun des groupes seront alors exprimées sous la forme :

$$(W_e, W_s, \text{DMSAC});$$

### **9.2.2 Choix des données expérimentales utilisées pour les régressions**

#### **9.2.2.1 Traitement et choix des données expérimentales**

Pour chaque essai expérimental, l'humidité spécifique à l'entrée  $W_e$  est déterminée en un seul point car la composition de l'air, suite à son passage à travers le ventilateur, est considérée homogène. Par contre, plusieurs valeurs de  $W_s$  sont déterminées en aval de la rampe d'injection. La valeur de  $W_s$  évolue entre les positions 12.2 et 12.5, ce qui confirme l'évolution de l'homogénéité des propriétés de l'air humidifié. La valeur de  $W_s$  à la position 12.5, où l'humidité de l'air est considérée la plus homogène, sera utilisée pour les données expérimentales. Si la valeur de  $W_s$  n'est pas disponible pour la position 12.5, celle à la position 12.4 sera alors utilisée.

Les données expérimentales présentant les caractéristiques suivantes sont éliminées :

- mesures de la DMSAC faisant mention de présence de condensation uniformément sur la membrane, notées uniforme dans la colonne «Note sur l'accumulation de condensation» des tableaux des résultats expérimentaux du CHAPITRE 8;
- mesures de la DMSAC supérieur à 213 cm (7').

Les données figurant des valeurs de DMSAC supérieur à 213 cm sont éliminées car celles-ci sont mesurées avec présence de condensation uniformément sur toute la membrane. La DMSAC est mesurée lorsque l'accumulation de condensation est détectée sur une portion de la membrane. Les mesures de la DMSAC prises avec un début de condensation sur une partie de la membrane seront considérées valables.

### 9.2.2.2 Condition limite: ajout de points à DMSAC nulle

Les régressions effectuées uniquement avec les données expérimentales peuvent donner des résultats aberrants de la DMSAC. Pour les compléter, il importe d'ajouter à la base de données des points à DMSAC nulle pour toute combinaison de  $W_e$  et  $W_s$  de même valeur. Ces points reflètent l'impossibilité d'obtenir des résultats positifs non nuls de la DMSAC sans variation de l'humidité spécifique. L'ajout de ces points améliore les régressions car les courbes isoplèthes de la DMSAC ne croisent pas la courbe correspondant à  $W_e = W_s$  du graphique de  $W_e$  en fonction de  $W_s$ .

Les points du Tableau 9.1 ont été ajoutés pour compléter les bases de données expérimentales correspondant aux différentes configurations de rampe d'injection.

Tableau 9.1 Condition limite: ajout de points à DMSAC nulle

Pt	$W_e$ (g/kg)	$W_s$ (g/kg)	DMSAC (pouces)	Pt	$W_e$ (g/kg)	$W_s$ (g/kg)	DMSAC (pouces)
1	0,5	0,5	0	10	5	5	0
2	1	1	0	11	5,5	5,5	0
3	1,5	1,5	0	12	6	6	0
4	2	2	0	13	6,5	6,5	0
5	2,5	2,5	0	14	7	7	0
6	3	3	0	15	7,5	7,5	0
7	3,5	3,5	0	16	8	8	0
8	4	4	0	17	8,5	8,5	0
9	4,5	4,5	0				

### 9.2.3 Base de données

Les bases de données ci-dessous ont été utilisées afin de développer l'algorithme de prédiction de la DMSAC.

#### 9.2.3.1 Base de données : rampe E3

Tableau 9.2 Base de données pour la rampe E3

<b>Données</b>	<b>W<sub>e</sub> (g/kg)</b>	<b>W<sub>s</sub> (g/kg)</b>	<b>DMSAC (")</b>
1	1,53	4,65	6
2	1,67	6,27	6
3	1,78	7,38	7
4	1,82	7,94	14,5
5	5,52	7,85	5
6	5,45	8,38	5,5
7	5,28	8,55	6
8	3,79	6,28	3,5
9	3,81	6,85	4
10	3,89	7,71	10
11	0,50	0,50	0
12	1,00	1,00	0
13	1,50	1,50	0
14	2,00	2,00	0
15	2,50	2,50	0
16	3,00	3,00	0
17	3,50	3,50	0
18	4,00	4,00	0
19	4,50	4,50	0
20	5,00	5,00	0
21	5,50	5,50	0
22	6,00	6,00	0
23	6,50	6,50	0
24	7,00	7,00	0
25	7,50	7,50	0
26	8,00	8,00	0
27	8,50	8,50	0

### 9.2.3.2 Base de données : rampe E6

Tableau 9.3 Base de données pour la rampe E6

<b>Données</b>	<b>W<sub>e</sub> (g/kg)</b>	<b>W<sub>s</sub> (g/kg)</b>	<b>DMSAC (°)</b>
1	1,57	5,10	7,0
2	1,55	5,82	9,5
3	1,72	8,43	22,0
4	5,46	7,21	9,5
5	5,50	8,03	22,0
6	4,17	6,84	12,0
7	4,57	8,50	19,0
8	2,68	7,85	16,5
9	2,94	7,60	13,0
10	2,81	7,86	14,0
11	2,52	6,12	5,5
12	2,39	7,34	18,5
13	4,22	8,56	13,0
14	3,74	8,32	13,5
15	4,06	8,31	17,5
16	0,50	0,50	0
17	1,00	1,00	0
18	1,50	1,50	0
19	2,00	2,00	0
20	2,50	2,50	0
21	3,00	3,00	0
22	3,50	3,50	0
23	4,00	4,00	0
24	4,50	4,50	0
25	5,00	5,00	0
26	5,50	5,50	0
27	6,00	6,00	0
28	6,50	6,50	0
29	7,00	7,00	0
30	7,50	7,50	0
31	8,00	8,00	0
32	8,50	8,50	0

### 9.2.3.3 Base de données : rampe E8

Tableau 9.4 Base de données pour la rampe E8

<b>Données</b>	<b>W<sub>e</sub> (g/kg)</b>	<b>W<sub>s</sub> (g/kg)</b>	<b>DMSAC (")</b>
1	1,73	4,61	7
2	1,85	5,64	11
3	1,52	6,63	17
4	1,69	7,71	24
5	2,03	8,99	42
6	5,34	7,49	21
7	5,43	8,28	37,5
8	0,50	0,50	0
9	1,00	1,00	0
10	1,50	1,50	0
11	2,00	2,00	0
12	2,50	2,50	0
13	3,00	3,00	0
14	3,50	3,50	0
15	4,00	4,00	0
16	4,50	4,50	0
17	5,00	5,00	0
18	5,50	5,50	0
19	6,00	6,00	0
20	6,50	6,50	0
21	7,00	7,00	0
22	7,50	7,50	0
23	8,00	8,00	0
24	8,50	8,50	0

### 9.2.3.4 Base de données : rampe E12

Tableau 9.5 Base de données pour la rampe E12

<b>Données</b>	<b>We (g/kg)</b>	<b>Ws (g/kg)</b>	<b>DMSAC (")</b>
1	1,72	4,50	10
2	1,72	5,58	12
3	1,81	7,81	30
4	1,84	6,50	20
5	1,83	8,29	44
6	3,42	5,16	11,5
7	3,45	5,62	17
8	3,51	6,45	25
9	3,48	7,34	53
10	4,51	6,16	16
11	5,21	6,84	15,5
12	5,56	7,56	38
13	5,18	8,31	63
14	0,50	0,50	0
15	1,50	1,50	0
16	2,50	2,50	0
17	3,50	3,50	0
18	4,50	4,50	0
19	5,50	5,50	0
20	6,50	6,50	0
21	7,50	7,50	0
22	8,50	8,50	0
23	9,50	9,50	0
24	10,50	10,50	0
25	11,50	11,50	0
26	12,50	12,50	0
27	13,50	13,50	0
28	14,50	14,50	0
29	15,50	15,50	0
30	16,50	16,50	0

### 9.2.3.5 Base de données : rampe E24

Tableau 9.6 Base de données pour la rampe E24

Données	$W_e$ (g/kg)	$W_s$ (g/kg)	DMSAC (")
1	3,35	4,72	39
2	3,41	5,48	65
3	4,46	5,01	20
4	4,46	5,53	38
5	4,48	5,85	63
6	0,50	0,50	0
7	1,00	1,00	0
8	1,50	1,50	0
9	2,00	2,00	0
10	2,50	2,50	0
11	3,00	3,00	0
12	3,50	3,50	0
13	4,00	4,00	0
14	4,50	4,50	0
15	5,00	5,00	0
16	5,50	5,50	0
17	6,00	6,00	0
18	6,50	6,50	0
19	7,00	7,00	0
20	7,50	7,50	0
21	8,00	8,00	0
22	8,50	8,50	0

## 9.3 Méthode de régression

Les équations permettant de calculer la prédiction de la DMSAC doivent être obtenues par régression.

### 9.3.1 Outil de régression

Ces régressions seront effectuées à l'aide du site internet [ZunZun.com](http://ZunZun.com) qui propose quelque 305 différentes familles de fonctions. Ce site permet d'effectuer, en ligne, la régression selon

toutes ces fonctions et de les ordonner selon la somme des erreurs absolues. La méthode d'utilisation de cet outil de régression est présentée en ANNEXE III.

Pour chacun des résultats de régression, les graphiques suivants sont fournis:

- surfaciques 3D;
- isoplèthes de la DMSAC;
- diagrammes d'erreurs absolues en fonction de la DMSAC;
- somme des erreurs absolues;
- erreur quadratique moyenne.

La Figure 9.1 est un exemple de fonctions résultantes de régressions obtenues avec la base de données de la rampe d'injection E6.

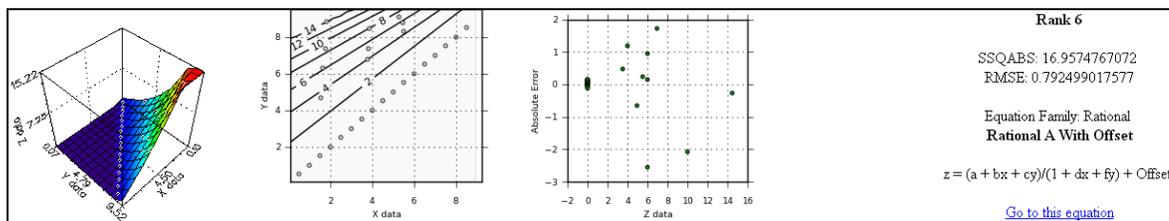


Figure 9.1 Exemple de résultats de régressions pour la rampe E6  
Tirée de ZunZun.com (2014)

Les étapes suivantes permettront d'effectuer les régressions et de sélectionner celles qui composeront l'algorithme de prédiction de la DMSAC:

- choix des points utilisés pour les régressions;
- choix du critère de régression;
- présélection des types de fonction conformément selon les résultats obtenus par régression;
- analyse des choix préliminaires et choix du type de fonction pour toutes les rampes d'injection;
- analyse des résultats de prédiction de la DMSAC obtenus par la fonction choisie.

### 9.3.2 Critères de régression

Afin de procéder aux régressions, le choix du critère est requis. Le site internet ZunZun.com propose plusieurs choix de critère de régression, illustrés à la Figure 9.2.

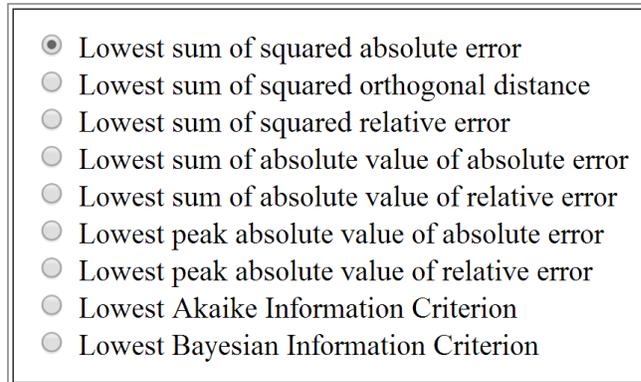
- 
- Lowest sum of squared absolute error
  - Lowest sum of squared orthogonal distance
  - Lowest sum of squared relative error
  - Lowest sum of absolute value of absolute error
  - Lowest sum of absolute value of relative error
  - Lowest peak absolute value of absolute error
  - Lowest peak absolute value of relative error
  - Lowest Akaike Information Criterion
  - Lowest Bayesian Information Criterion

Figure 9.2 Critères de régression  
Tirée de ZunZun.com (2014)

#### 9.3.2.1 Critère des moindres carrés

Le critère des moindres carrés permet de maximiser la fiabilité de la prédiction par rapport aux données expérimentales car elle minimise l'écart entre les mesures et la prédiction.

##### Critère des moindres carrés de l'erreur relative

L'erreur relative est le rapport entre l'erreur absolue et la valeur réelle. L'erreur relative ne décrit pas la grandeur d'une erreur absolue mais son rapport avec la valeur réelle. De ce fait, plus la valeur réelle est faible, plus le poids de son erreur absolue est important. Ce critère apporte donc beaucoup plus de poids aux erreurs associées aux faibles valeurs de la DMSAC, minimisant ainsi le poids des données mesurées expérimentalement par rapport aux points ajoutés à DMSAC nulle servant de condition limite. En pratique, la DMSAC requise est généralement supérieure à 20 cm (8") celle-ci étant déterminée selon l'espace disponible en aval de la rampe d'injection. De ce fait, les résultats de DMSAC supérieurs à 20 cm (8") sont

plus critiques. Les régressions obtenues par le critère des moindres carrés de l'erreur relative accordent plus de précision pour ces valeurs.

Les régressions préliminaires effectuées avec ce critère démontrent que les erreurs absolues sont beaucoup plus élevées que celles obtenues avec un critère utilisant l'erreur absolue. Ce critère ne sera donc pas considéré pour effectuer les régressions.

### **Critères des moindres carrés de l'erreur absolue**

Le critère de régression choisi est celui des moindres carrés de l'erreur absolue «lowest sum of squared absolute error». Ce critère est préféré car il minimise l'écart entre la DMSAC mesurée et celle obtenue par régression, et ce peu importe la valeur mesurée de la DMSAC.

## **9.4 Choix des régressions**

Après régression des quelques 305 types de familles de fonctions proposées par l'outil de régression, celles-ci sont ordonnées selon la somme des erreurs absolues quadratiques. Ce critère de sélection n'est pas suffisant car il priorise certaines fonctions admettant des résultats improbables tel qu'illustrés sur la Figure 9.3.

### **9.4.1 Présélection des types de fonction**

Selon H. Journeaux (1993, p.353), «Il est donc important de disposer de critère de jugement qui justifient le choix et permettent à la communauté scientifique d'apprécier le résultat publié.». Afin d'obtenir des régressions admettant des résultats physiquement plausibles, d'autres critères de sélection doivent être imposés.

#### **9.4.1.1 Critère d'isoplèthes de la DMSAC monotones à pente positive**

En analysant les courbes isoplèthes de la DMSAC sur le graphique de la Figure 9.3, la même DMSAC est associée à deux valeurs de  $W_s$  pour la même valeur de  $W_e$ . Durant les mêmes

conditions expérimentales, il est physiquement impossible d'obtenir la même DMSAC pour différentes variations de l'humidité spécifique car l'augmentation du débit massique de vapeur entraîne nécessairement une augmentation de la DMSAC. Les isoplèthes de la DMSAC en fonction de  $W_e$  et  $W_s$  doivent donc être monotones, c'est-à-dire que la polarité de leurs pentes ne varie pas sur la plage de valeur des humidités spécifiques possibles, et positives. Le critère d'isoplèthes à pente positive de la DMSAC en fonction de  $W_e$  et  $W_s$  est donc imposé.

En guise d'exemple, deux fonctions dont les résultats sont présentés à la Figure 9.3 et à la Figure 9.4 ont été obtenus par le critère des moindres carrés à partir des mêmes données. En examinant les courbes isoplèthes de la DMSAC de la Figure 9.3, leurs significations n'est pas physique puisque pour les mêmes valeurs de  $W_s$  et de DMSAC, différentes valeurs de  $W_e$  peuvent être associées, alors que, pour les mêmes conditions expérimentales, une variation du débit massique de vapeur injectée doit nécessairement faire varier la DMSAC.

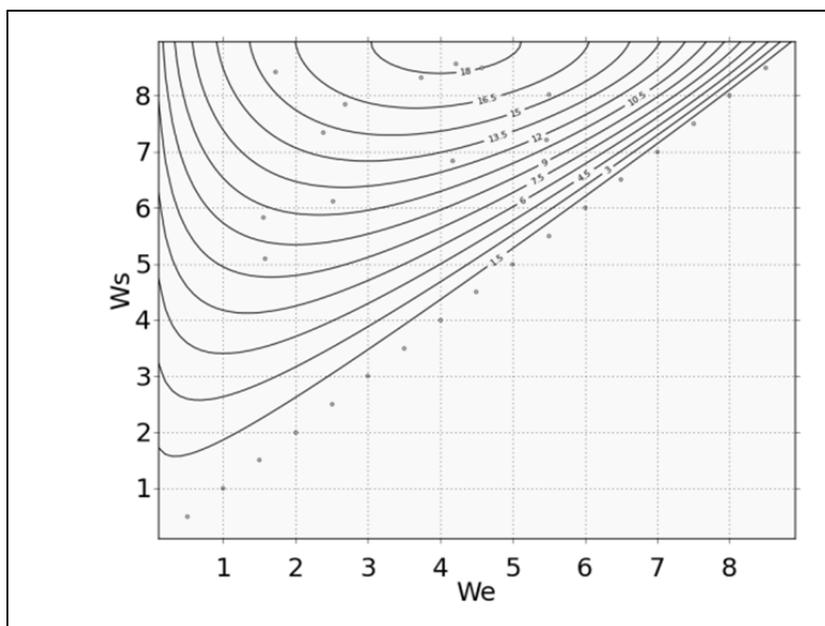


Figure 9.3 Résultat improbable : isoplèthes de la DMSAC non monotones

Tirée de ZunZun.com (2014)

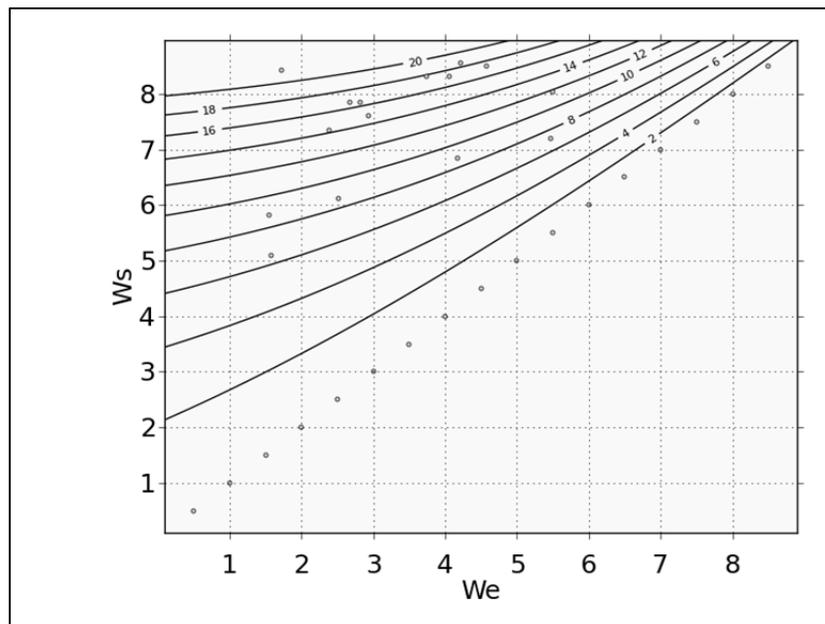


Figure 9.4 Résultat plausible : isoplèthes de la DMSAC  
monotones  
Tirée de ZunZun.com (2014)

#### 9.4.1.2 Conformité des régressions indépendamment de la configuration de la rampe d'injection

L'évolution de l'absorption de la vapeur dans l'air est quantifiée par la DMSAC. Les mécanismes physiques régissant cette évolution sont valables pour toutes les configurations de rampe d'injection. Les types de fonctions étant censés prédire l'effet de  $W_e$  et  $W_s$  sur la DMSAC, les résultats des régressions doivent par conséquent avoir la même tendance, indépendamment de la configuration des rampes d'injection. Par conséquent, un type de fonction est sélectionné uniquement si tous les résultats de régressions pour toutes les configurations de rampes proposent des isoplèthes de la DMSAC monotones à pentes positives.

#### 9.4.2 Familles de fonctions présélectionnées

Les fonctions obtenues par régression de la DMSAC admettant des isoplèthes de la DMSAC monotones à pentes positives pour chacune des configurations de rampe d'injection ont été

recensées. Uniquement quatre types de fonction sont conformes aux critères préalablement définis. La somme et la moyenne quadratique des erreurs absolues ont été compilés afin de quantifier la précision des régressions par rapport aux résultats expérimentaux.

Les familles de fonctions présélectionnées sont présentées au Tableau 9.7

Tableau 9.7 Familles de fonctions présélectionnées

Désignation	Nom de la famille de fonction	Équation caractéristique de la famille de fonction
A	Simple Equation 36	$DMSAC = a \cdot (e^{b \cdot W_e} - e^{c \cdot W_s}) + \text{décalage} \quad (9.1)$
B	Power D	$DMSAC = a \cdot W_e^b + c \cdot W_s^d + \text{décalage} \quad (9.2)$
C	Rational M	$DMSAC = \frac{a + b \cdot e^{W_e} + c \cdot e^{W_s}}{1 + d \cdot e^{W_e} + f \cdot e^{W_s}} + \text{décalage} \quad (9.3)$
D	Monkey Saddle B	$DMSAC = a \cdot W_s^3 - b \cdot W_s \cdot W_e^2 + \text{décalage} \quad (9.4)$

## 9.5 Résultats de régression

Pour chacune des familles de fonction, les coefficients des fonctions sont obtenus par régression et ils sont différents pour chacune des configurations de rampe d'injection, admettant une équation unique pour chacune d'elles. Les résultats sont présentés aux ANNEXE IV, V, VI, VII et VIII.

### 9.5.1 Présentation des résultats

Pour chaque régression, les résultats sont présentés sous forme graphique permettant de visuellement apprécier l'écart entre les DMSAC mesurées et calculées. Ils sont construits tels que l'abscisse représente les valeurs expérimentales de la DMSAC pour les combinaisons de

We et  $W_s$ . L'ordonné représente les valeurs de la DMSAC prédites à ces mêmes combinaisons de We et  $W_s$ . La différence d'ordonné entre un point, soit une DMSAC calculée, et la droite  $x=y$  représente l'écart de la valeur calculée par rapport à la mesure expérimentale. La Figure 9.5 est un exemple de graphique représentant les résultats de régression pour la rampe E3 avec la fonction C (Rational M).

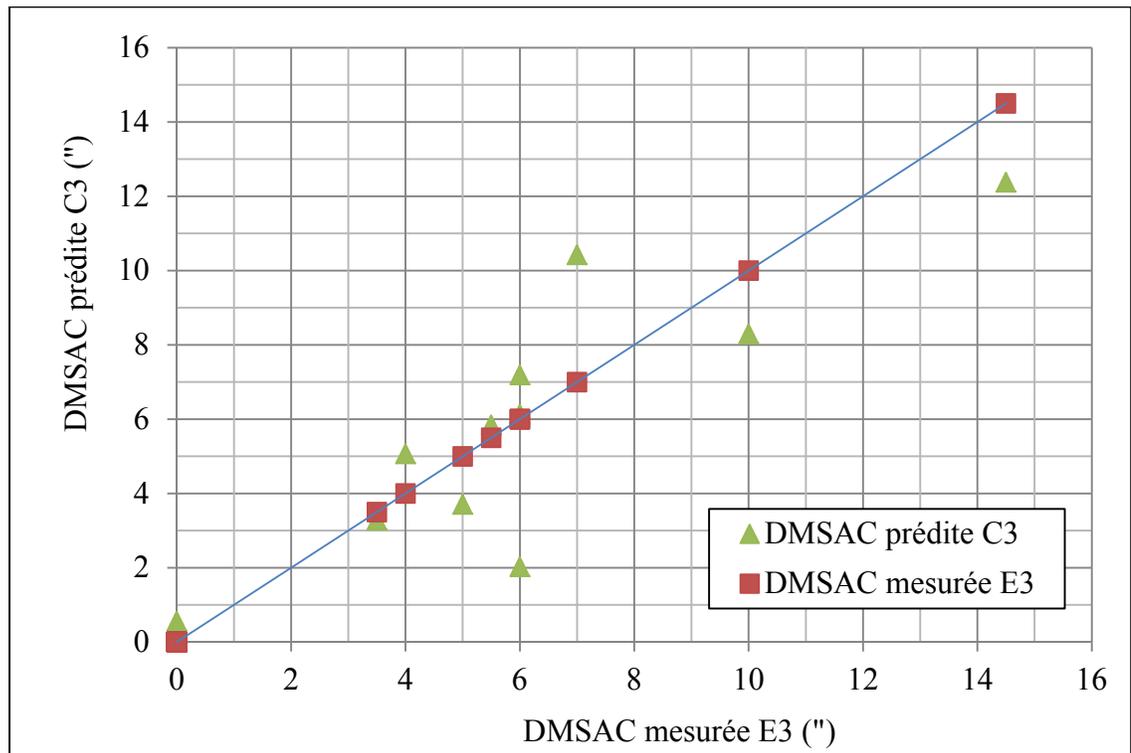


Figure 9.5 Comparaison entre DMSAC prédite par la fonction C3 et DMSAC mesurées avec la rampe E3

## 9.6 Analyse des régressions de la DMSAC des fonctions présélectionnées

Pour chacune des équations de prédiction de la DMSAC pour une configuration de rampe définie, les valeurs réelles et absolues de l'écart entre la DMSAC mesurée et calculée sont compilées dans un tableau. De plus, les moyennes quadratiques, maximums et minimums de ces erreurs y sont aussi compilées.

On définit chacune des fonctions en deux champs: le premier étant la lettre référant au type de fonction et le deuxième l'entraxe entre les CVDV. Par exemple, la régression obtenue de la fonction Simple 36 (A) pour la rampe E3 est identifiée A3.

## 9.6.1 Rampe E3

Tableau 9.8 Erreurs fonctions présélectionnées rampe E3

Points	Humidités spécifiques		DMSAC (")								
			Mesurées	Prédites				Erreurs			
	We (g/kg)	Ws (g/kg)		A3	B3	C3	D3	A3	B3	C3	D3
1	1,53	4,65	6	4,7	4,6	2,0	2,1	-1,3	-1,4	-4,0	-3,9
2	1,67	6,27	6	7,5	7,6	6,1	5,3	1,5	1,6	0,1	-0,7
3	1,78	7,38	7	9,8	9,8	10,4	8,8	2,8	2,8	3,4	1,8
4	1,82	7,94	14,5	11,0	11,1	12,4	11,0	-3,5	-3,4	-2,1	-3,5
5	5,52	7,85	5	4,9	4,8	3,7	5,5	-0,1	-0,2	-1,3	0,5
6	5,45	8,38	5,5	6,3	6,2	5,8	7,7	0,8	0,7	0,3	2,2
7	5,28	8,55	6	7,0	6,9	7,2	8,8	1,0	0,9	1,2	2,8
8	3,79	6,28	3,5	4,5	4,5	3,3	3,6	1,0	1,0	-0,2	0,1
9	3,81	6,85	4	5,6	5,7	5,1	5,1	1,6	1,7	1,1	1,1
10	3,89	7,71	10	7,4	7,5	8,3	7,9	-2,6	-2,5	-1,7	-2,1
11	0,50	0,50	0	0,0	0,2	0,6	0,0	0,0	0,2	0,6	0,0
12	1,00	1,00	0	0,0	0,1	0,5	0,0	0,0	0,1	0,5	0,0
13	1,50	1,50	0	0,0	0,1	0,5	0,0	0,0	0,1	0,5	0,0
14	2,00	2,00	0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0
15	2,50	2,50	0	0,0	-0,1	0,4	0,0	0,0	-0,1	0,4	0,0
16	3,00	3,00	0	0,0	-0,1	0,3	0,0	0,0	-0,1	0,3	0,0
17	3,50	3,50	0	0,0	-0,1	0,2	0,0	0,0	-0,1	0,2	0,0
18	4,00	4,00	0	-0,1	-0,2	0,2	-0,1	-0,1	-0,2	0,2	-0,1
19	4,50	4,50	0	-0,1	-0,2	0,1	-0,1	-0,1	-0,2	0,1	-0,1
20	5,00	5,00	0	-0,1	-0,2	0,1	-0,1	-0,1	-0,2	0,1	-0,1
21	5,50	5,50	0	-0,1	-0,2	0,0	-0,2	-0,1	-0,2	0,0	-0,2
22	6,00	6,00	0	-0,1	-0,2	0,0	-0,2	-0,1	-0,2	0,0	-0,2
23	6,50	6,50	0	-0,1	-0,1	0,0	-0,3	-0,1	-0,1	0,0	-0,3
24	7,00	7,00	0	-0,1	-0,1	0,0	-0,3	-0,1	-0,1	0,0	-0,3
25	7,50	7,50	0	-0,1	-0,1	0,0	-0,4	-0,1	-0,1	0,0	-0,4
26	8,00	8,00	0	-0,1	0,0	0,0	-0,5	-0,1	0,0	0,0	-0,5
27	8,50	8,50	0	-0,2	0,0	0,0	-0,6	-0,2	0,0	0,0	-0,6
		Moyenne quadratique	sur tous les points				1,15	1,16	1,23	1,37	
			sur les points de mesure				1,89	1,89	1,98	2,23	
			Minimum				-3,48	-3,44	-3,97	-3,92	
			Maximum				2,77	2,81	3,42	2,80	
			Maximum absolu				3,48	3,44	3,97	3,92	

La fonction A offre la plus faible moyenne quadratique des erreurs, légèrement inférieure à celle de la fonction B.

### 9.6.2 Rampe E6

Tableau 9.9 Erreurs fonctions présélectionnées rampe E6

Points	Humidités spécifiques		DMSAC (")								
	We (g/Kg)	Ws (g/Kg)	Mesurées	Prédites				Erreurs			
				A6	B6	C6	D6	A6	B6	C6	D6
1	1,57	5,10	7,0	6,5	5,8	4,6	5,0	-0,5	-1,2	-2,4	-2,0
2	1,55	5,82	9,5	8,7	8,2	7,7	7,4	-0,8	-1,3	-1,8	-2,1
3	1,72	8,43	22,0	21,5	20,6	17,5	22,3	-0,5	-1,4	-4,5	0,3
4	5,46	7,21	9,5	7,2	7,9	12,6	6,7	-2,3	-1,6	3,1	-2,8
5	5,50	8,03	22,0	11,7	12,1	16,0	11,1	-10,3	-9,9	-6,0	-10,9
6	4,17	6,84	12,0	8,8	9,5	12,0	8,2	-3,2	-2,5	0,0	-3,8
7	4,57	8,50	19,0	17,4	17,5	17,5	17,3	-1,6	-1,5	-1,5	-1,7
8	2,68	7,85	16,5	16,6	16,6	16,2	16,8	0,1	0,1	-0,3	0,3
9	2,94	7,60	13,0	14,8	15,0	15,4	14,7	1,8	2,0	2,4	1,7
10	2,81	7,86	14,0	16,5	16,5	16,2	16,6	2,5	2,5	2,2	2,6
11	2,52	6,12	5,5	8,6	8,7	9,0	7,7	3,1	3,2	3,5	2,2
12	2,39	7,34	18,5	14,2	14,2	14,6	14,0	-4,3	-4,3	-3,9	-4,5
13	4,22	8,56	13,0	18,6	18,6	17,7	18,7	5,6	5,6	4,7	5,7
14	3,74	8,32	13,5	17,9	18,0	17,3	18,1	4,4	4,5	3,8	4,6
15	4,03	7,95	15,0	14,9	15,4	16,4	14,8	-0,1	0,4	1,4	-0,2
16	4,06	8,31	17,5	17,2	17,4	17,2	17,2	-0,3	-0,1	-0,3	-0,3
17	0,50	0,50	0,0	0,2	0,0	0,1	0,4	0,2	0,0	0,1	0,4
18	1,00	1,00	0	0,2	0,1	0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	0,4
19	1,50	1,50	0	0,2	0,1	0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	0,4
20	2,00	2,00	0	0,2	0,2	0,1	0,4	0,2	0,2	0,1	0,4
21	2,50	2,50	0	0,2	0,3	0,1	0,5	0,2	0,3	0,1	0,5
22	3,00	3,00	0	0,2	0,4	0,1	0,5	0,2	0,4	0,1	0,5
23	3,50	3,50	0	0,3	0,6	0,1	0,5	0,3	0,6	0,1	0,5
24	4,00	4,00	0	0,3	0,7	0,1	0,5	0,3	0,7	0,1	0,5
25	4,50	4,50	0	0,3	0,8	0,1	0,5	0,3	0,8	0,1	0,5
26	5,00	5,00	0	0,3	0,8	0,1	0,6	0,3	0,8	0,1	0,6
27	5,50	5,50	0	0,4	0,9	0,1	0,6	0,4	0,9	0,1	0,6

Points	Humidités spécifiques		DMSAC (")								
			Mesurées	Prédites				Erreurs			
	We (g/Kg)	Ws (g/Kg)		A6	B6	C6	D6	A6	B6	C6	D6
28	6,00	6,00	0	0,4	0,9	0,0	0,7	0,4	0,9	0,0	0,7
29	6,50	6,50	0	0,5	0,8	0,0	0,7	0,5	0,8	0,0	0,7
30	7,00	7,00	0	0,5	0,7	0,0	0,8	0,5	0,7	0,0	0,8
31	7,50	7,50	0	0,6	0,6	0,0	0,9	0,6	0,6	0,0	0,9
32	8,00	8,00	0	0,7	0,3	0,0	1,0	0,7	0,3	0,0	1,0
33	8,50	8,50	0	0,8	0,0	-0,1	1,1	0,8	0,0	-0,1	1,1
		Moyenne quadratique	sur tous les points				2,56	2,53	2,15	2,74	
			sur les points de mesure				3,90	3,83	3,28	4,14	
				Minimum				-10,3	-9,9	-6,0	-10,9
				Maximum				5,6	5,6	4,7	5,7
				Maximum absolu				10,3	9,9	6,0	10,9

La fonction C offre la plus faible moyenne quadratique des erreurs. Elle obtient par contre un maximum plus élevé que toutes les autres fonctions alors qu'elle obtient un minimum plus faible que toutes les autres fonctions.

## 9.6.3 Rampe E8

Tableau 9.10 Erreurs fonctions présélectionnées rampe E8

Points	Humidités spécifiques		DMSAC (")								
			Mesurées	Prédites				Erreurs			
	We (g/kg)	Ws (g/kg)		A8	B8	C8	D8	A8	B8	C8	D8
1	1,73	4,61	7,0	5,7	4,3	3,0	5,7	-1,3	-2,7	-4,0	-1,3
2	1,85	5,64	11,0	9,8	9,0	7,1	10,9	-1,2	-2,0	-3,9	-0,1
3	1,52	6,63	17,0	16,3	16,2	15,2	18,7	-0,7	-0,8	-1,8	1,7
4	1,69	7,71	24,0	27,0	27,5	28,3	29,6	3,0	3,5	4,3	5,6
5	2,03	8,99	42,0	48,3	46,8	41,7	46,7	6,3	4,8	-0,3	4,7
6	5,34	7,49	21,0	16,4	18,8	23,9	14,8	-4,6	-2,2	2,9	-6,2
7	5,43	8,28	37,5	26,8	28,8	34,2	22,8	-10,7	-8,7	-3,3	-14,7
8	0,50	0,50	0,0	0,5	-0,4	0,5	0,0	0,5	-0,4	0,5	0,0
9	1,00	1,00	0,0	0,5	-0,4	0,5	0,0	0,5	-0,4	0,5	0,0
10	1,50	1,50	0,0	0,5	-0,3	0,5	0,0	0,5	-0,3	0,5	0,0
11	2,00	2,00	0,0	0,5	-0,2	0,5	0,0	0,5	-0,2	0,5	0,0
12	2,50	2,50	0,0	0,5	-0,1	0,5	0,1	0,5	-0,1	0,5	0,1
13	3,00	3,00	0,0	0,5	0,1	0,5	0,1	0,5	0,1	0,5	0,1
14	3,50	3,50	0,0	0,5	0,3	0,5	0,2	0,5	0,3	0,5	0,2
15	4,00	4,00	0,0	0,5	0,6	0,5	0,3	0,5	0,6	0,5	0,3
16	4,50	4,50	0,0	0,5	0,9	0,5	0,4	0,5	0,9	0,5	0,4
17	5,00	5,00	0,0	0,5	1,2	0,5	0,5	0,5	1,2	0,5	0,5
18	5,50	5,50	0,0	0,5	1,5	0,4	0,7	0,5	1,5	0,4	0,7
19	6,00	6,00	0,0	0,5	1,7	0,4	0,9	0,5	1,7	0,4	0,9
20	6,50	6,50	0,0	0,6	1,7	0,4	1,1	0,6	1,7	0,4	1,1
21	7,00	7,00	0,0	0,6	1,5	0,3	1,4	0,6	1,5	0,3	1,4
22	7,50	7,50	0,0	0,6	1,0	0,2	1,7	0,6	1,0	0,2	1,7
23	8,00	8,00	0,0	0,7	0,2	0,0	2,1	0,7	0,2	0,0	2,1
24	8,50	8,50	0,0	0,7	-1,2	-0,3	2,5	0,7	-1,2	-0,3	2,5
Moyenne quadratique			sur tous les points				2,84	2,45	1,76	3,70	
			sur les points de mesure				5,19	4,27	3,20	6,66	
			Minimum				-10,7	-8,7	-4,0	-14,7	
			Maximum				6,3	4,8	4,3	5,6	
			Maximum absolu				10,7	8,7	4,3	14,7	

La fonction C offre la plus faible moyenne quadratique des erreurs ainsi que la plus faible valeur de l'erreur toutes catégories confondues.

#### 9.6.4 Rampe E12

Tableau 9.11 Erreurs fonctions présélectionnées rampe E12

Points	Humidités spécifiques		DMSAC (")								
			Mesurées	Prédites				Erreurs			
	We (g/kg)	Ws (g/kg)		A12	B12	C12	D12	A12	B12	C12	D12
1	1,72	4,50	10,0	5,8	5,5	5,0	8,6	-4,2	-4,5	-5,0	-1,4
2	1,74	5,58	12,0	11,7	12,7	12,4	17,2	-0,3	0,7	0,4	5,2
3	1,82	7,81	30,0	44,2	45,7	44,5	49,5	14,2	15,7	14,5	19,5
4	1,86	6,50	20,0	20,5	22,8	24,1	27,7	0,5	2,8	4,1	7,7
5	1,85	8,29	44,0	57,9	57,0	50,5	59,4	13,9	13,0	6,5	15,4
6	3,45	5,16	11,5	6,4	8,3	7,7	8,3	-5,1	-3,2	-3,8	-3,2
7	3,48	5,62	17,0	9,4	11,9	11,8	12,0	-7,6	-5,1	-5,2	-5,0
8	3,55	6,45	25,0	17,2	20,9	22,6	20,5	-7,8	-4,1	-2,4	-4,5
9	3,51	7,34	53,0	30,9	34,9	37,1	33,4	-22,1	-18,1	-15,9	-19,6
10	4,56	6,16	16,0	10,7	14,7	16,6	11,7	-5,3	-1,3	0,6	-4,3
11	5,27	6,84	15,5	15,4	20,2	25,9	14,3	-0,1	4,7	10,4	-1,2
12	5,62	7,56	38,0	26,0	30,3	38,6	21,3	-12,0	-7,7	0,6	-16,7
13	5,24	8,31	63,0	49,0	50,3	50,3	38,0	-14,0	-12,7	-12,7	-25,0
14	0,50	0,50	0,0	0,0	-0,3	0,6	0,0	0,0	-0,3	0,6	0,0
15	1,00	1,00	0,0	0,0	-0,2	0,6	0,0	0,0	-0,2	0,6	0,0
16	1,50	1,50	0,0	0,0	-0,2	0,6	0,0	0,0	-0,2	0,6	0,0
17	2,00	2,00	0,0	0,0	-0,1	0,6	0,0	0,0	-0,1	0,6	0,0
18	2,50	2,50	0,0	0,0	0,1	0,6	0,0	0,0	0,1	0,6	0,0
19	3,00	3,00	0,0	0,0	0,4	0,6	0,0	0,0	0,4	0,6	0,0
20	3,50	3,50	0,0	0,0	0,8	0,6	0,0	0,0	0,8	0,6	0,0
21	4,00	4,00	0,0	-0,1	1,3	0,6	0,0	-0,1	1,3	0,6	0,0
22	4,50	4,50	0,0	-0,1	1,9	0,6	0,0	-0,1	1,9	0,6	0,0
23	5,00	5,00	0,0	-0,1	2,4	0,5	0,0	-0,1	2,4	0,5	0,0
24	5,50	5,50	0,0	-0,2	2,9	0,5	0,0	-0,2	2,9	0,5	0,0
25	6,00	6,00	0,0	-0,3	3,3	0,5	0,0	-0,3	3,3	0,5	0,0
26	6,50	6,50	0,0	-0,4	3,3	0,5	0,1	-0,4	3,3	0,5	0,1
27	7,00	7,00	0,0	-0,5	3,0	0,4	0,1	-0,5	3,0	0,4	0,1

Points	Humidités spécifiques		DMSAC (")								
			Mesurées	Prédites				Erreurs			
	We (g/kg)	Ws (g/kg)		A12	B12	C12	D12	A12	B12	C12	D12
28	7,50	7,50	0,0	-0,7	2,0	0,2	0,1	-0,7	2,0	0,2	0,1
29	8,00	8,00	0,0	-1,0	0,2	0,0	0,1	-1,0	0,2	0,0	0,1
30	8,50	8,50	0,0	-1,4	-2,6	-0,4	0,1	-1,4	-2,6	-0,4	0,1
Moyenne quadratique		sur tous les points					6,86	6,14	5,39	8,30	
		sur les points de mesure					10,41	9,07	8,16	12,61	
		Minimum					-22,1	-18,1	-15,9	-25,0	
		Maximum					14,2	15,7	14,5	19,5	
		Maximum absolu					22,1	18,1	15,9	25,0	

La fonction C offre la plus faible moyenne quadratique des erreurs. Elle obtient par contre un maximum légèrement plus élevé que la fonction A.

## 9.6.5 Rampe E24

Tableau 9.12 Erreurs fonctions présélectionnées rampe E24

Points	Humidités spécifiques		DMSAC (")								
			Mesurées	Prédites				Erreurs			
	We (g/kg)	Ws (g/kg)		A24	B24	C24	D24	A24	B24	C24	D24
1	3,35	4,72	39	36,1	36,0	36,2	35,9	-2,91	-2,97	-2,80	-3,05
2	3,41	5,48	65	67,0	67,1	67,1	70,1	2,02	2,14	2,06	5,06
3	4,46	5,01	20	19,3	19,6	19,9	18,0	-0,66	-0,37	-0,09	-2,01
4	4,46	5,53	38	42,7	42,9	43,4	40,9	4,70	4,90	5,40	2,87
5	4,48	5,85	63	59,3	58,9	58,4	57,3	-3,69	-4,06	-4,61	-5,69
6	0,50	0,50	0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,05	0,07	0,06	0,19
7	1,00	1,00	0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,05	0,07	0,06	0,19
8	1,50	1,50	0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,05	0,07	0,05	0,19
9	2,00	2,00	0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,05	0,06	0,05	0,19
10	2,50	2,50	0	0,0	0,1	0,0	0,2	0,05	0,05	0,04	0,19
11	3,00	3,00	0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,05	0,04	0,04	0,19
12	3,50	3,50	0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,05	0,03	0,03	0,19
13	4,00	4,00	0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,04	0,02	0,01	0,18
14	4,50	4,50	0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,04	0,01	0,00	0,18
15	5,00	5,00	0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,04	0,00	-0,01	0,17
16	5,50	5,50	0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,04	-0,01	-0,02	0,17
17	6,00	6,00	0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,03	-0,01	-0,03	0,16
18	6,50	6,50	0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,02	-0,02	-0,04	0,15
19	7,00	7,00	0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,01	-0,02	-0,04	0,14
20	7,50	7,50	0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,00	-0,01	-0,05	0,13
21	8,00	8,00	0	0,0	0,0	0,0	0,1	-0,01	0,00	-0,05	0,11
22	8,50	8,50	0	0,0	0,0	0,0	0,1	-0,03	0,01	-0,05	0,10
	Moyenne quadratique		sur tous les points				1,49	1,57	1,69	1,91	
			sur les points de mesure				3,12	3,29	3,54	3,99	
			Minimum				-3,69	-4,06	-4,61	-5,69	
			Maximum				4,70	4,90	5,40	5,06	
			Maximum absolu				4,70	4,90	5,40	5,69	

La fonction A offre les plus faibles valeurs de la moyenne quadratique, le maximum et le minimum des erreurs absolues.

### 9.6.6 Comparaison des moyennes quadratiques, maximums et minimums des erreurs absolues

Afin de comparer les familles de fonctions les unes aux autres, les moyennes quadratiques, maximums et minimums des erreurs absolues de chacune d'elles sont regroupés au Tableau 9.13 Tableau récapitulatif des erreurs moyennes quadratiques. Pour chaque famille de fonction, les moyennes des moyennes quadratiques, écarts maximums et minimums obtenues par configuration de la rampe sont calculées. Les valeurs minimums sont soulignées en vert alors que les maximums sont en saumon.

Tableau 9.13 Tableau récapitulatif des erreurs moyennes quadratiques

		Rampe	Famille de fonction				
			A	B	C	D	
<b>Moyenne quadratique</b>	<b>sur tous les points</b>	<b>E3</b>	1,154	1,157	1,229	1,369	
	<b>sur les points de mesure</b>		1,893	1,894	1,984	2,225	
	<b>Minimum réel</b>		-3,480	-3,445	-3,974	-3,920	
	<b>Maximum réel</b>		2,766	2,814	3,425	2,800	
	<b>Maximum absolu</b>		3,480	3,445	3,974	3,920	
<b>Moyenne quadratique</b>	<b>sur tous les points</b>		<b>E6</b>	2,559	2,532	2,151	2,738
	<b>sur les points de mesure</b>			3,901	3,833	3,281	4,140
	<b>Minimum réel</b>	-10,289		-9,902	-5,961	-10,857	
	<b>Maximum réel</b>	5,592		5,621	4,658	5,710	
	<b>Maximum absolu</b>	10,289		9,902	5,961	10,857	
<b>Moyenne quadratique</b>	<b>sur tous les points</b>	<b>E8</b>		2,842	2,446	1,765	3,703
	<b>sur les points de mesure</b>			5,193	4,271	3,201	6,658
	<b>Minimum réel</b>		-10,708	-8,717	-4,025	-14,656	
	<b>Maximum réel</b>		6,335	4,779	4,283	5,595	
	<b>Maximum absolu</b>		10,708	8,717	4,283	14,656	

		Rampe	Famille de fonction			
			A	B	C	D
<b>Moyenne quadratique</b>	<b>sur tous les points</b>	<b>E12</b>	6,861	6,142	5,387	8,304
	<b>sur les points de mesure</b>		10,407	9,068	8,163	12,614
	<b>Minimum réel</b>		-22,059	-18,134	-15,917	-25,035
	<b>Maximum réel</b>		14,154	15,661	14,523	19,500
	<b>Maximum absolu</b>		22,059	18,134	15,917	25,035
<b>Moyenne quadratique</b>	<b>sur tous les points</b>	<b>E24</b>	1,489	1,567	1,687	1,907
	<b>sur les points de mesure</b>		3,122	3,287	3,538	3,988
	<b>Minimum réel</b>		-3,691	-4,061	-4,615	-5,690
	<b>Maximum réel</b>		4,703	4,899	5,405	5,056
	<b>Maximum absolu</b>		4,703	4,899	5,405	5,690
<b>Moyenne quadratique</b>	<b>sur tous les points</b>	<b>Moyenne pour toutes les rampes</b>	2,981	2,769	2,444	3,604
	<b>sur les points de mesure</b>		4,903	4,471	4,033	5,925
	<b>Minimum réel</b>		-10,046	-8,852	-6,898	-12,031
	<b>Maximum réel</b>		6,710	6,755	6,459	7,732
	<b>Maximum absolu</b>		10,248	9,020	7,108	12,031
<b>Moyenne quadratique</b>	<b>sur tous les points</b>	<b>Moyenne pour les rampes E3, E6 et E8</b>	2,185	2,045	1,715	2,603
	<b>sur les points de mesure</b>		3,662	3,333	2,822	4,341
	<b>Minimum réel</b>		-8,159	-7,355	-4,653	-9,811
	<b>Maximum réel</b>		4,898	4,405	4,122	4,702
	<b>Maximum absolu</b>		8,159	7,355	4,739	9,811

## 9.7 Modèle de prédiction de la DMSAC

L'erreur quadratique moyenne est le critère de comparaison des estimateurs soit les familles de fonction. Ce critère permet donc de comparer les résultats de DMSAC calculés par les différentes familles de fonction.

### 9.7.1 Famille de fonction retenue

La famille de fonction permettant d'estimer au mieux la DMSAC est la C soit Rational M car la moyenne des erreurs quadratiques moyennes est la plus faible. Cette famille de fonction donne les meilleurs résultats pour les rampes E6, E8 et E12.

$$DMSAC = \frac{a + b \cdot e^{W_e} + c \cdot e^{W_s}}{1 + d \cdot e^{W_e} + f \cdot e^{W_s}} + \text{décalage} \quad (9.5)$$

Tableau 9.14 Coefficients du modèle théorique selon l'entraxe entre les CVDV

Coefficients	Rampe				
	E3	E6	E8	E12	E24
a	5,92E-01	9,13E-02	4,88E-01	5,75E-01	2,29E+01
b	-2,20E-02	-3,78E-02	-2,80E-02	-5,67E-02	-5,95E-01
c	2,02E-02	3,77E-02	2,79E-02	5,65E-02	8,98E-01
d	3,43E-02	-1,19E-03	-5,06E-04	-8,92E-04	8,26E-03
f	1,22E-03	1,93E-03	5,46E-04	8,69E-04	5,02E-03
décalage	0	0	0	0	-2,29E+01

### 9.7.2 Précision du modèle de prédiction

Les erreurs absolues du modèle par rapport aux données expérimentales sont généralement plus élevées pour les valeurs de  $W_s$  élevées. Elles ne sont pas nécessairement associées à l'écart entre  $W_e$  et  $W_s$ .

### **9.7.3 Analyse des causes d'écart entre les DMSAC calculées et mesurées**

La mesure de  $RH_s$  qui permet de calculer  $W_s$  est biaisée car l'homogénéité de l'humidité de l'air est supposée. En analysant les résultats expérimentaux, on peut constater que l'humidité relative de l'air ainsi que le calcul de  $W_s$  y étant associé, a tendance à décroître entre les sondes 12.2 et 12.5. Le phénomène amplifie plus  $W_s$  est élevé. Ceci est dû au manque d'homogénéité de l'humidité de l'air telle que discutée à la section 9.2.2.1. Ces erreurs de mesures peuvent affecter à la fois la validité du modèle théorique ainsi que l'écart entre les valeurs de DMSAC mesurées et prédites calculées associées aux mêmes valeurs d'humidité spécifique.

Il faut aussi prendre en compte la précision de la régression associée à chaque fonction utilisée. Ces fonctions calculent la DMSAC en fonction des paramètres  $W_e$  et  $W_s$  qui sont calculés avec les mesures de la température et de l'humidité de l'air et ce calcul est donc soumis aux erreurs de mesure.

### **9.7.4 Analyse des résultats de prédiction de la DMSAC**

Afin de valider le modèle, les résultats de DMSAC calculés par des fonctions caractéristiques sont analysés. Le Tableau 9.15 donne les résultats prédits de la DMSAC par les fonctions caractéristiques.

Tableau 9.15 Prédictions des DMSAC de la fonction retenue

Humidités spécifiques			DMSAC (")				
			Rampe				
We (g/kg)	Ws (g/kg)	$\Delta W$ (g/kg)	E3	E6	E8	E12	E24
1	2	1	0,6	0,3	0,6	0,8	3,5
1	3	2	0,8	0,7	1,0	1,5	12,2
1	4	3	1,4	1,9	1,9	3,4	31,4
1	5	4	2,8	4,4	4,2	7,8	64,6
1	6	5	5,5	8,6	9,6	17,2	102,9
1	7	6	9,4	13,3	19,4	32,0	131,2
1	8	7	12,9	16,6	31,8	47,0	145,8
2	3	1	0,7	0,6	0,8	1,3	8,6
2	4	2	1,2	1,7	1,8	3,1	27,7
2	5	3	2,4	4,2	4,1	7,6	61,2
2	6	4	4,9	8,5	9,5	17,1	100,5
2	7	5	8,7	13,2	19,3	31,9	129,9
2	8	6	12,4	16,6	31,8	47,0	145,3
3	4	1	0,7	1,3	1,4	2,4	18,8
3	5	2	1,7	3,9	3,8	7,0	52,6
3	6	3	3,8	8,3	9,2	16,7	94,1
3	7	4	7,4	13,1	19,2	31,7	126,3
3	8	5	11,4	16,6	31,7	47,0	143,7
4	5	1	0,8	3,0	2,9	5,4	33,5
4	6	2	2,2	7,7	8,6	15,6	78,6
4	7	3	5,1	12,9	18,8	31,2	117,3
4	8	4	9,2	16,5	31,6	46,8	139,6
5	6	1	0,8	6,0	6,6	12,3	47,0
5	7	2	2,6	12,2	17,7	29,7	96,0
5	8	3	5,9	16,2	31,1	46,4	129,0
6	7	1	0,9	9,9	14,2	24,9	55,1
6	8	2	2,8	15,5	29,8	45,2	104,6
7	8	1	0,9	13,0	25,5	40,9	58,9

On remarque une augmentation de la DMSAC en fonction de l'augmentation de l'entraxe entre les CVDV. Une augmentation de  $W_s$  occasionne toujours une augmentation de la DMSAC ce qui corrobore avec le critère précédemment imposé des isoplèthes de la DMSAC à pente positive. La DMSAC semble être linéairement proportionnelle à l'entraxe entre les

CVDV sauf pour celui de 24 pouces de la rampe E24. En comparant les isoplèthes de la fonction C à celles des autres fonctions, on remarque que la DMSAC est plus sensible aux variations d'humidité pour des valeurs de  $W_e$  supérieures à 6 g/kg.



## CHAPITRE 10

### APPLICATION DU MODÈLE DE PRÉDICTION DE LA DMSAC À LA CONCEPTION DES RAMPES D'INJECTION DE VAPEUR

La conception de la rampe d'injection de vapeur est réalisée avec le modèle de prédiction de la DMSAC afin d'éviter la formation de condensation. Elle est effectuée en deux étapes. La première étant de calculer la quantité minimum requise de CVDV. La seconde étape consiste à déterminer la disposition des œillets, définie à la section 1.2.1.2, sur chacune des CVDV.

#### 10.1 Calcul du nombre de CVDV requises

La quantité de CVDV requises est calculée selon l'entraxe maximum entre celles-ci et la largeur de la gaine de ventilation. Le modèle de prédiction de la DMSAC est utilisé afin de déterminer la quantité minimum de CVDV, soit la distance maximum entre chacune d'elles, admettant une DMSAC inférieure à la distance disponible en aval de la rampe d'injection. Les éléments suivants doivent d'abord être définis :

- Distance disponible en aval de la rampe d'injection de vapeur;
- Humidité spécifique de l'air à l'entrée ( $W_e$ );
- Humidité spécifique de l'air à la sortie ( $W_s$ ).

La distance disponible, notée DD, est obtenue sur les plans et devis d'installation du système CVCA. L'humidité spécifique à l'entrée est calculée à partir des propriétés de l'air à l'entrée mentionnées aux devis. L'humidité spécifique à la sortie est calculée selon le débit massique de vapeur injecté à l'air à l'entrée. Par la suite, à l'aide du modèle, il faut déterminer les valeurs d'entraxes entre les CVDV de 3", 6", 8" et 12", pour lesquels la DMSAC est soit supérieure, soit inférieure à la distance disponible. L'entraxe le plus élevé admettant une DMSAC inférieure, notée DMSAC<sub>i</sub>, est qualifié d'entraxe inférieur E<sub>i</sub>. L'entraxe le plus

faible admettant une DMSAC supérieure, notée  $DMSAC_s$ , est qualifié d'entraxe supérieur  $E_s$ .

Avec les valeurs de  $E_s$  et  $E_i$ , l'équation linéaire 10.1 calcule l'entraxe maximum permettant d'atteindre la DMSAC recherchée.

$$\text{Entraxe maximum} = M (DD - DMSAC_i) + E_i \quad (10.1)$$

où la pente  $M$  est obtenue avec l'Équation 10.2:

$$M = \frac{(E_s - E_i)}{(DMSAC_s - DMSAC_i)} \quad (10.2)$$

Avec l'entraxe maximum calculé, le nombre de CVDV installées sur la rampe d'injection peut être calculé en admettant une distance entre les CVDV des extrémités et la paroi de la gaine à la moitié de la valeur de l'entraxe minimum. L'équation 10.3 permet de calculer le nombre de CVDV :

$$Nb \text{ CVDV} = \frac{\text{largeur gaine}}{\text{Entraxe minimum}} \quad (10.3)$$

La valeur calculée du nombre de CVDV doit être arrondie à l'entier supérieur. Avec le nombre de CVDV calculé, l'entraxe entre chacune d'elles est obtenu avec l'équation 10.4 :

$$\text{Entraxe CVDV} = \frac{\text{largeur gaine}}{Nb \text{ CVDV}} \quad (10.4)$$

Afin de prévenir la condensation de la vapeur saturée lors de son injection, la rampe d'injection devra donc être composée d'une quantité de  $Nb \text{ CVDV}$  espacées d'une distance d'*Entraxe CVDV*.

## 10.2 Disposition des œillets sur les CVDV

Tel que discuté à la section 4.4.1.2, les œillets sont disposés sur les CVDV de sorte que l'équidistance entre ceux-ci ne puisse pas être supérieure à l'entraxe entre les CVDV. De plus, la quantité totale d'œillets doit maximiser le débit massique de vapeur pour chaque œillet à 0.45kg/h (1 lbm/h) tel que discuté à la section 4.4.1.2.

Les œillets sont équidistants et disposés de chaque côté des CVDV. La distance maximum entre les œillets (DMEO) est déterminée par la quantité minimum d'œillets par rampe soit :

$$DMEO = \frac{2 \times (Nb\ CVDV - 1) \times longueur\ CVDV \times 0.45\ kg/h}{Débit\ massique\ total\ (\frac{kg}{h})} \quad (10.5)$$

Tel que discuté à la section 4.4.1.2, la distance entre les œillets doit nécessairement être inférieure à l'entraxe entre les CVDV. Si cette distance maximum entre les œillets est supérieure à l'entraxe entre les CVDV, la distance entre les œillets devient alors équivalente à l'entraxe entre les CVDV.



## CHAPITRE 11

### LIMITATIONS ET SOURCES D'ERREURS DU MODÈLE

Le modèle proposé permet, en fonction d'une DMSAC limite, de concevoir les rampes d'injection de vapeur afin d'éviter de mouiller les équipements CVCA se trouvant en aval. Comme tout modèle de prédiction, il présente certaines limites d'utilisation et la précision des prédictions comportent des erreurs.

#### 11.1 Condition d'utilisation

Les rampes d'injection de vapeur peuvent être configurées à l'aide du modèle de prédiction de la DMSAC uniquement si celles-ci opèrent dans les mêmes conditions que celles des essais expérimentaux. L'écoulement d'air doit être à une température de 12.8°C (55°F) et à une vitesse de 2.54 m/s (500 ppm). De plus, l'humidité relative à la sortie ( $RH_s$ ) maximum est contrainte à 82% puisqu'aucune donnée n'a été mesurée au-delà de cette valeur.

#### 11.2 Sources d'erreurs des prédictions de la DMSAC

La précision des prédictions de la DMSAC peut être due aux erreurs de mesure des données expérimentales ou au manque de fidélité du modèle de prédiction à ces mêmes données. Les différentes catégories de sources d'erreurs sont les suivantes :

- erreurs de mesures;
- taille de l'échantillonnage des données expérimentales;
- configuration du banc d'essai;
- approximation des données expérimentales par régression.

### 11.2.1 Erreurs de mesure

Les erreurs de mesure de la DMSAC, de l'humidité et de la température de l'air sont affectées aux composants de la donnée expérimentale. Ces erreurs de mesure affectent alors les résultats de régression.

#### 11.2.1.1 DMSAC

Les mesures de la DMSAC sont sujettes à une erreur de mesure. Cette erreur de mesure est une combinaison de la lecture de la distance sur l'étalon et de la méthode expérimentale permettant la mesure de cette valeur. Tel que discuté à la section 7.2.2.3, l'incrément d'avance du chariot amovible induit une erreur de mesure de la valeur de la DMSAC liée à la méthode expérimentale.

#### 11.2.1.2 Humidité de l'air

La précision ou erreur prédite des capteurs d'humidité relative est de  $\pm 3\%$  à  $40\%$  et  $23^\circ\text{C}$  ( $73^\circ\text{F}$ ). L'étalonnage des capteurs réalisé à l'aide d'un étalon d'une précision de  $\pm 1\%$ , confirme cette précision, l'écart maximum atteignant  $4\%$ . L'humidité de l'air est mesurée uniquement au centre de la gaine de ventilation. D'après la discussion sur l'homogénéité de l'humidité de l'air à la sortie ( $\text{RH}_s$ ,  $W_s$ ) de la section 3.2, un biais de mesure de l'humidité à la sortie est induit par cette méthode de mesure.

Afin d'obtenir une meilleure mesure de l'humidité de l'air après humidification, une moyenne de la mesure de l'humidité de cet air, effectuée en plusieurs points tel un maillage, réduirait considérablement la variation de l'humidité entre les points de mesure en aval du lieu d'humidification en l'occurrence aux points de mesure 12.2, 12.3, 12.4 et 12.5 définis au Tableau 6.1. Les propriétés de l'air en amont de l'humidificateur à la position 12.1 sont considérées homogènes puisque l'air, ayant été entraîné par le ventilateur, est donc suffisamment mélangé.

### **11.2.1.3 Température de l'air**

Puisque les capteurs d'humidité relative mesurent également la température de l'air, cette mesure serait conjointement améliorée par l'application des recommandations faites pour les capteurs d'humidité. Le calcul des humidités spécifiques dépend également de cette mesure de la température.

### **11.2.2 Rampe d'injection**

Les configurations des rampes d'injection utilisées lors des essais expérimentaux peuvent être à l'origine de biais de mesure.

#### **11.2.2.1 Erreur de configuration de la rampe E8**

La rampe d'injection E8 n'a pas d'œillets installés sur les côtés opposés des CVDV aux extrémités dont les surfaces sont face aux parois extérieures de la conduite de ventilation. La dispersion de la vapeur est donc effectuée sur une largeur légèrement inférieure à 38 cm (15"). Les DMSAC mesurées peuvent alors être faussées en étant plus élevées car la dispersion de l'injection de vapeur n'est pas optimisée. Des œillets de dispersion de vapeur dirigés en direction des parois devraient être installés comme toutes les autres rampes d'injection. Le nombre total d'œillets de la rampe E8 est par ailleurs plus faible que pour la rampe E12 tel que discuté à la section 0 et présenté au Tableau 5.2.

#### **11.2.2.2 Effet de la quantité d'œillets par CVDV**

Le diamètre des œillets d'éjection de vapeur est le même tant pour les courtes que les longues CVDV. En réalité, le nombre d'œillets installés sur une rampe d'injection de vapeur est fonction du débit massique de vapeur injecté à l'écoulement d'air. Pour les tests expérimentaux réalisés sur une même rampe, le nombre d'œillets est toujours le même peu importe le débit massique de vapeur injecté à l'écoulement d'air. Ce nombre a été fixé selon le débit massique maximal de la rampe afin de ne pas excéder le débit massique maximal de

vapeur par œillet. De ce fait, puisque les essais expérimentaux sont effectués à différents débits massiques d'injection de vapeur, le débit massique de vapeur pour chaque œillet n'est pas le même d'un essai à l'autre. La trainée de brouillard à la sortie de chaque œillet est réduite en fonction du débit massique. Il aurait été plus précis de pouvoir modifier le nombre d'œillets par rampe d'injection selon la capacité de vapeur injection.

### **11.2.3 Fidélité du modèle de prédiction de la DMSAC par rapport aux données expérimentales**

Le processus d'obtention du modèle de prédiction de la DMSAC à partir des données expérimentales a un effet sur la fidélité des résultats. La taille de l'échantillonnage et la méthode de régression sont les principaux facteurs qui induisent un écart entre les valeurs approximées et mesurées.

#### **11.2.3.1 Taille de l'échantillonnage de mesures**

La taille de l'échantillonnage de mesures, soit la quantité de données expérimentales recueillies et utilisées pour effectuer les régressions, peut avoir un effet sur la fidélité des prédictions. L'augmentation de la quantité de données permettrait d'éliminer certaines données composées de mesures erronées donc de mieux sélectionner les données utilisées pour effectuer les régressions. La multiplication de données à paramètres similaires permet aussi de confirmer la répétabilité et la fiabilité de la méthode de mesure. De plus, le poids des données expérimentales augmenterait par rapport aux données ajoutées de condition limite. La précision de l'approximation de la DMSAC serait alors améliorée pour les combinaisons de  $W_e$  et  $W_s$  rencontrées lors des essais expérimentaux et typiquement rencontrées dans l'industrie.

#### **11.2.3.2 Régressions**

La méthode de régression influence aussi la fidélité des prédictions. Le choix de la famille de fonctions, nécessaire à la régression, limite la précision. Il est nécessaire de maximiser la

précision des mesures des paramètres afin d'obtenir des prédictions précises pour les cinq configurations de rampe. Les choix prédéfinis de familles de fonction offertes par l'outil de régression ZunZun.com utilisés et analysés dans le cadre de cette étude limite la précision des résultats de DMSAC.

### **11.2.3.3 Calculs**

Il faut aussi prendre en compte l'erreur de la valeur de la DMSAC obtenue par les fonctions obtenues par régression. Ces fonctions calculent la DMSAC en fonction des paramètres  $W_e$  et  $W_s$  qui sont calculés avec les mesures de la température et de l'humidité de l'air. Le calcul de ces paramètres est soumis aux erreurs de mesure de la température et de l'humidité relative de l'air. Les variations des valeurs de la DMSAC calculées à partir de ces paramètres peuvent aussi être calculées.



## CHAPITRE 12

### RECOMMANDATIONS

Les recommandations permettraient à de futures campagnes de mesures d'améliorer la fiabilité des mesures d'humidité et de température afin d'améliorer les prédictions de la DMSAC. Les recommandations sont principalement orientées au niveau de la gaine de ventilation de l'instrumentation de mesure et de la méthode d'approximation des données expérimentales.

#### 12.1 Banc d'essai

##### 12.1.1 Équipement CVCA

###### 12.1.1.1 Conduite d'air

Puisque les CVDV doivent être disposées uniformément sur toute la largeur de la conduite d'air, tel que discuté à la section 0, la largeur de celle-ci influence les possibilités d'entraxe entre les CVDV des rampes d'injection mis à l'essai. Il serait intéressant de réaliser d'autres campagnes de mesures avec une conduite d'air de plus grandes dimensions. Des configurations à entraxe plus élevé que 61 cm (24") pourraient être mises à l'essai. De plus, la validité des prédictions obtenues pour les rampes E12 et E24 pourrait être vérifiée. Une conduite d'air de section carrée de dimension minimum de 183 cm (72") est suggérée.

##### 12.1.2 Instrumentation et mesure

###### 12.1.2.1 Hygromètre

La précision des hygromètres devrait être augmentée à +/- 1% RH.

### **12.1.2.2 Mesures de l'humidité et de la température**

La lecture d'humidité relative et de température, en un point, est mesurée par le même capteur. Tel que discuté aux sections 3.2 et 11.2.1.2, les mesures de l'humidité et de la température sont biaisées par l'absence d'homogénéité des propriétés de l'air. Ces mesures doivent être obtenues en effectuant la moyenne de plusieurs mesures en différentes positions sur la section de la conduite de ventilation tel un maillage. Ce maillage de capteurs, disposés selon la règle log-Tchebycheff, doit être installé à deux positions différentes en aval de l'humidificateur afin de valider la mesure d'humidité moyenne. La comparaison des humidités spécifiques calculées avec la moyenne des mesures d'humidité relative et de température permet d'évaluer la précision de la méthode de mesure.

L'humidité relative moyenne pourrait aussi être mesurée suite à l'homogénéisation des propriétés de l'air sans en modifier la température, la pression et l'humidité. L'homogénéisation pourrait être assurée par un dispositif permettant de mélanger l'air installé en amont du point de mesure de l'humidité.

## **12.2 Calibration du banc d'essai**

La calibration du banc d'essai consiste à comparer la mesure calibrée du débit massique de vapeur injectée à sa valeur calculée d'après les mesures des propriétés de l'air, de vitesse d'air, de température d'air et d'humidité relative de l'air.

### **12.2.1 Mesure du débit de vapeur injectée**

Le débit massique de vapeur injectée doit préalablement être mesuré. Il est déterminé par le débit massique d'eau alimenté à la chaudière réduit du débit massique de condensât récupéré au purgeur de vapeur et au collecteur sous la rampe d'injection de vapeur. Les débits peuvent être calculés en mesurant les masses d'eau consommée et de condensat généré durant une période fixe. Ces mesures permettront de calibrer le banc d'essai.

### 12.2.2 Calcul du débit massique de vapeur injectée

La calibration du banc d'essai devrait être réalisée afin de permettre l'évaluation de la précision de l'instrumentation du banc d'essais. Elle permet de valider les valeurs d'humidité spécifique relatives aux données expérimentales. Cette calibration est effectuée par l'entremise du bilan massique d'injection de vapeur. Ce débit est calculé à partir des mesures d'humidité relative, de température et de vitesse de l'air. La comparaison du débit massique calculé par rapport à celui mesuré, tel que préalablement décrit à la précédente section, permet d'évaluer la précision de l'instrumentation du banc d'essai.

### 12.3 Taille de l'échantillonnage

L'augmentation de la quantité de données expérimentales pour chaque configuration de rampe d'injection améliorerait la fidélité des régressions. Les données erronées obtenues lors d'erreur de mesure pourraient être détectées et rejetées. Les régressions seraient plus précises sans l'influence des données erronées. La duplication des données, composées de paramètres semblables, permettrait une meilleure analyse afin de rejeter celles composées d'erreurs de mesure manifestement erronées par rapport aux données semblables.

### 12.4 Régressions

La méthode de régression peut être améliorée en plusieurs points. Les valeurs utilisées pour les régressions n'ont pas nécessairement tous le même poids. Certains points, tels ceux ajoutés à DMSAC nulle associés à la condition limite, ne sont pas aussi important que les données expérimentales elles-mêmes. Ce poids est aussi fonction de la précision de mesure de chaque donnée. La notion de pondération de chaque donnée peut améliorer la fiabilité des résultats de régression. L'augmentation de la quantité de données aurait sensiblement le même effet.

La méthode de régression est limitée aux familles de fonction proposées par l'outil de régression utilisé. D'autres essais de régression effectués sur des fonctions issues de l'analyse

des familles de fonctions proposées admettant les meilleurs résultats pourraient être envisagés. Une famille de fonction sur mesure adaptée spécifiquement au phénomène physique étudié donnerait probablement de meilleures prédictions de la DMSAC. L'étude des méthodes de régression est suggérée afin d'améliorer le modèle de prédiction de la DMSAC.

## CONCLUSION

L'humidification isotherme de l'air nécessite l'injection de la vapeur saturée dans une conduite de ventilation. La condensation de cette vapeur, lorsqu'accumulée, peut mouiller et endommager les équipements CVCA. Les rampes d'injection de vapeur doivent être conçues afin d'éviter l'accumulation de la condensation de la vapeur à l'intérieur de la conduite de ventilation.

La présente étude a permis de quantifier la distance, en aval de la rampe d'injection de vapeur, à partir de laquelle aucune surface ne pourra être mouillée. Cette distance, la DMSAC, est fonction de l'humidité de l'air avant humidification, de l'humidité de l'air humidifié et de la configuration de la rampe d'injection soit l'entraxe entre les CVDV.

Suite aux essais expérimentaux, un modèle de prédiction de la DMSAC a été réalisé. L'étude ayant été réalisée à température d'air avant humidification de 12.8°C (55°F) et à une vitesse de 2.54 m/s (500 ppm), les prédictions ne sont valables que pour ces mêmes conditions. Ce modèle permettra de concevoir les rampes d'injection de vapeur selon la distance disponible en aval de celle-ci, les humidités de l'air et les paramètres d'humidification.

Le modèle de prédiction comporte certaines limitations et des recommandations sont formulées afin que de futurs travaux de recherche améliorent sa précision.



## ANNEXE I

### RELATIONS PSYCHROMÉTRIQUES

La psychrométrie utilise les propriétés thermodynamiques afin de quantifier les propriétés et la composition de l'air humide. Cette section présente les relations entre les principales propriétés de l'air humide ainsi que les méthodes de calcul de certaines d'entre elles.

#### I.1 Calcul et relations entre les paramètres psychrométriques de l'air humide

L'air humide est constituée d'un mélange de vapeur d'eau et d'air sec toute deux à l'état gazeux. Selon ASHRAE Handbook—Fundamentals (2009,1.1), la vapeur d'eau et l'air sec, dans leur phase gazeuse, peuvent être considérés comme des gaz parfaits.

##### I.1.1 Loi des gaz parfaits

Ils sont donc soumis à la loi des gaz parfaits qui correspond à:

$$P \times V = n \times R \times T \quad (\text{A I-1})$$

où:

- $P$  = pression partielle du gaz (Pa);
- $V$  = Volume total du mélange de gaz ( $\text{m}^3$ );
- $n$  = nombre de moles du gaz (mol);
- $R$  = Constante universelle des gaz parfaits =  $8.314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$ ;
- $T$  = température du mélange(K).

##### I.1.2 Loi de Dalton

La loi de Dalton est énoncée comme suit: la pression d'un mélange de gaz est égale à la somme des pressions partielles des composants du mélange. On en déduit donc que:

$$P_{Air Humide} = P_{vapeur} + P_{Air Sec} \quad (A I-2)$$

### I.1.3 Loi D'Amagat

La loi d'Amagat est énoncée comme suit: Le volume d'un mélange de gaz est égal à la somme des volumes partiels des composants du mélange. On en déduit donc que:

$$V_{Air Humide} = V_{Vapeur} + V_{Air sec} \quad (A I-3)$$

Le volume partiel d'un gaz composant d'un mélange gazeux est défini comme étant le volume qu'occuperait ce gaz s'il était à la même pression et température que celles de ce mélange gazeux.

### I.1.4 Calcul de la masse d'un gaz dans un volume

La masse de gaz, dans un volume spécifique, est calculée selon la formule suivante:

$$m = n * M \quad (A I-4)$$

où

- $m$ = masse de gaz
- $n$ = nombre de moles
- $M$ =Masse Molaire du gaz

où

$M_v$ = masse moléculaire de l'eau = 18.02 g /mol d'après Herrmann et al. (2009, p.968)

$M_a$ = masse moléculaire de l'air sec= 28.97 g /mol d'après Herrmann et al. (2009, p.968)

### I.1.5 Calcul de la pression partielle de la vapeur d'eau à la saturation ( $P_{vsat}$ ) dans l'air

La pression de saturation de la vapeur d'eau correspond à la pression partielle de la quantité maximale de vapeur d'eau dissoute dans l'air à une température donnée. Pour des températures comprises entre 273 K et 473 K, la pression partielle de saturation de la vapeur

d'eau, donnée en Pa, peut être calculée selon l'équation A I-5 tirée de ASHRAE Handbook—Fundamentals (2009,1.2)

$$\ln(P_{vsat}) = \frac{C8}{T} + C9 + C10 \times T + C11 \times T^2 + C12 \times T^3 + \ln(C13) \quad (\text{A I-6})$$

Où les coefficients, tirés de ASHRAE Handbook—Fundamentals (2009,1.2), sont donnés au Tableau A I-1.

Tableau A I-1:  
Coefficients de  
l'équation A I-7

C8	5800,22
C9	1,391499
C10	-0,04864
C11	4,18E-05
C12	-1,4E-08
C13	6,545967

### I.1.6 Calcul de l'humidité relative (RH)

L'humidité relative correspond au ratio entre la pression de vapeur de l'eau dans l'air par rapport à la pression de saturation de cette vapeur d'eau dans l'air. L'humidité relative peut donc être exprimée selon la formule suivante:

$$RH = \frac{P_v}{P_{vsat}} \quad (\text{A I-8})$$

D'après l'équation de l'humidité relative, on peut calculer la pression partielle de l'eau dans l'air et donc calculer la masse d'eau correspondante.

### I.1.7 Calcul de l'humidité spécifique (W)

L'humidité spécifique de l'air (W), correspond au ratio de la masse d'eau dans l'air par rapport à la masse d'air, ASHRAE Handbook—Fundamentals (2009,1.8).

$$W = \frac{m_{vapeur}}{m_{air\ sec}} = \frac{m_v}{m_a} \quad (\text{A I-9})$$

Avec les relations précédemment énoncées et tel que mentionné dans ASHRAE Handbook—Fundamentals (2009,1.8), on peut en déduire que:

$$W = \frac{0.622 \times P_v}{P_{stat} - P_v} \quad (\text{A I-10})$$

Le calcul détaillé est présenté plus bas. Cette équation sera utile afin de déterminer le W en fonction des humidités relatives (RH) et des températures mesurées.

## I.2 Exemples de calculs

### I.2.1 Calcul de l'humidité spécifique W

D'après la loi des gaz parfait (A I-1), puisque V, R et T sont constants, on en déduit :

$$\frac{P_v}{n_v} = \frac{P_a}{n_a} \quad (\text{A I-11})$$

Par définition;

$$W = \frac{m_v}{m_a} \quad (\text{A I-12})$$

$$m_v = M_v n_v \quad (\text{A I-13})$$

$$m_a = M_a n_a \quad (\text{A I-14})$$

on obtient donc :

$$W = \frac{n_v M_v}{n_a M_a} = \frac{P_v M_v}{P_a M_a} \quad (\text{A I-15})$$

Où la pression statique  $P_s$  est calculée par :

$$P_s = P_v + P_a \quad (\text{A I-16})$$

Pression partiel de la vapeur est calculée par :

$$P_v = P_{vsat} \times RH \quad (\text{A I-17})$$

À partir des équations (A I-15), (A I-16) et (A I-17), on en déduit :

$$W = 0.622 \frac{P_v}{P_s - P_v} = 0.622 \frac{P_{vsat} \times RH}{(P_s - P_{vsat} \times RH)} \quad (\text{A I-18})$$

L'équation A I-19 est celle présentée par ASHRAE Handbook—Fundamentals (2009,1.8).

### I.2.1.1 Calcul des états psychrométriques lors du processus d'humidification de l'air avec la vapeur saturée à 100°C

L'air avant humidification est à une température  $T_e$  de 12,8°C (55°F) et à une humidité relative  $RH_e$  de 20% résultant une humidité absolue  $W_e$  de 1,8g/kg. On veut humidifier cet air avec de la vapeur saturée donc à 100°C (212°F) à un équivalent d'humidité relative  $RH_s$  de 70% à 12,8°C (55°F) résultant une humidité absolue  $W_s$  de 6,4 g/kg. Puisque l'enthalpie de la vapeur saturée est supérieure à celle de la vapeur à pression partielle absorbée par l'air, il y aura augmentation de l'enthalpie de l'air humide, résultant une augmentation de la température de cet air humidifié. Pour calculer cette augmentation de température, il faut procéder aux étapes suivantes:

1. Calculer la masse de vapeur saturée injectée dans l'air;
2. Calculer l'augmentation d'enthalpie de l'air humidifié;
3. Calculer l'augmentation de température de l'air humidifié;
4. Calculer l'humidité relative correspondante suite à l'augmentation de température.

#### I.2.1.1.1 Calcul de la masse de vapeur saturée injectée dans l'air

En prenant comme référence une masse de 1 kg d'air sec, on peut calculer la masse d'eau y étant dissoute par:

$$m_v = W_s - W_e \quad (\text{A I-20})$$

Dans le présent exemple, on obtient une masse de 4,6g de vapeur d'eau.

### I.2.1.1.2 Calcul de l'augmentation d'enthalpie de l'air humidifié

Afin de déterminer l'enthalpie de la vapeur à pression partielle, on doit d'abord approximer la température de l'air humidifié. Un calcul itératif modifiant cette enthalpie pourra être réalisé afin d'améliorer la précision. Ensuite, il suffit de calculer la différence d'énergie entre l'énergie interne de la vapeur saturée et celle à pression partielle de la masse de vapeur saturée par l'équation (A I-21):

$$\Delta Q = (h_{g \text{ eau } 100^{\circ}\text{C}} - h_{g \text{ eau } 12,8^{\circ}\text{C}}) * m_v \quad (\text{A I-21})$$

où

$h_{g \text{ eau } 100^{\circ}\text{C}} \approx 2676 \text{ kJ/kg}$ , tirée de ASHRAE Handbook—Fundamentals (2009,1.7);

$h_{g \text{ eau } 12,8^{\circ}\text{C}} \approx 2525 \text{ kJ/kg}$ , tirée de ASHRAE Handbook—Fundamentals (2009,1.6);

on obtient  $\Delta Q = 0,695 \text{ kJ}$ ;

### I.2.1.1.3 Calcul de l'augmentation de température de l'air après humidification

L'augmentation d'enthalpie sera distribuée à l'air humide. On peut calculer cette augmentation en isolant la variation de température  $\Delta T$  de l'équation (A I-22):

$$\Delta Q = (m_a * C_{p \text{ air}} * \Delta T) + (m_v * C_{p \text{ vapeur}} * \Delta T) \quad (\text{A I-22})$$

on en déduit l'équation (A I-23)

$$\Delta T = \frac{\Delta Q}{(m_a * C_{p \text{ air}}) + (m_v * C_{p \text{ vapeur}})} \quad (\text{A I-23})$$

où

$m_a = 1 \text{ kg}$ ;

$C_{p \text{ air}} = 1,005 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$

$C_{p \text{ vapeur}} = 1,8255 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$

On obtient alors une augmentation de température d'environ 0,7°C. La température de l'air humide est donc de 13,5°C. On peut refaire le calcul en utilisant les propriétés de la vapeur à pression partielle à 13,5°C.

#### I.2.1.1.4 Calcul de l'humidité relative après humidification

Avec les propriétés de l'air  $W_s = 6,4$  g/kg et 13,5°C, on peut calculer l'humidité relative résultante. On obtient une humidité relative  $RH_s$  de 67%.

#### I.2.1.2 Calcul pour utilisation du diagramme psychrométrique

Afin d'utiliser le diagramme psychrométrique de ASHRAE Handbook—Fundamentals (2009,1.11), il importe de calculer les paramètres  $\Delta h$  ( $Dh$  sur la Figure-A I.2.1.2-1), la variation d'enthalpie sensible de l'air humide, et  $\Delta W$  ( $DW$  sur la ), la variation du ratio d'humidité de l'air. Ceux-ci sont calculés comme suit:

$$\Delta h = h_f - h_i \quad (\text{A I-24})$$

Où

$$h_i = h_{fg \text{ air}} + W_e \times h_{fg \text{ eau } 12,8^\circ\text{C}} \quad (\text{A I-25})$$

$$h_f = h_{fg \text{ air}} + W_e \times h_{fg \text{ eau } 12,8^\circ\text{C}} + (W_s - W_e) \times h_{fg \text{ eau } 100^\circ\text{C}} \quad (\text{A I-26})$$

On peut donc en déduire l'équation (A I-27)

$$\Delta h = (W_s - W_e) \times h_{fg \text{ eau } 100^\circ\text{C}} \quad (\text{A I-27})$$

et calculer le ratio  $Dh/DW$  encadré en rouge à la Figure-A I.2.1.2-1 à partir de l'équation (A I-28).

$$\frac{\Delta h}{W_s - W_e} = h_{fg \text{ eau } 100^\circ\text{C}} = 2.676 \text{ kJ/g} \quad (\text{A I-28})$$

De ce fait, on peut obtenir la pente liée au phénomène d'humidification de l'air avec de la vapeur saturée à 100°C illustrée à la figure Figure-A I.2.1.2-1.

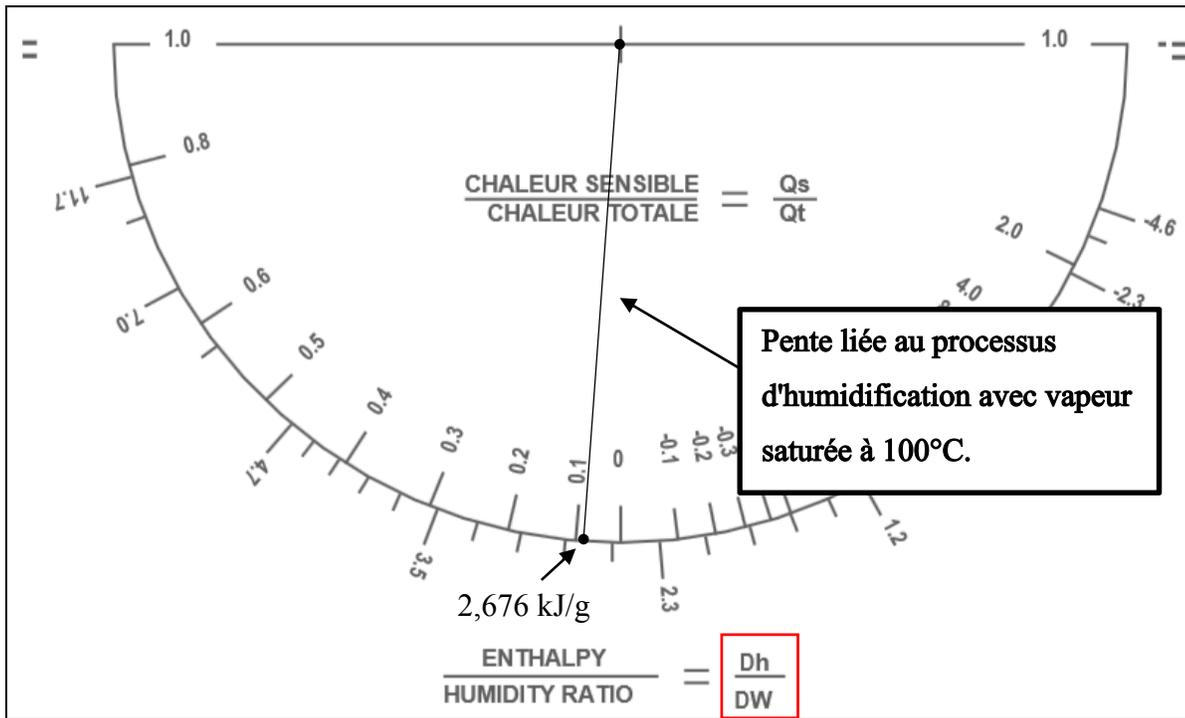


Figure-A I.2.1.2-1 Pente du processus d'humidification sur le diagramme psychrométrique  
Adaptée de ASHRAE Handbook—Fundamentals (2009,1.11)

## ANNEXE II

### SPÉCIFICATIONS DES ÉQUIPEMENTS CVCA

#### II.1 Station mesure débit d'air

FAN-Evaluator

---

Product Description

The FAN-E is a multi-point, self-averaging Pitot traverse station with integral air straightener-equalizer honeycomb cell, capable of continuously measuring fan discharges or ducted airflow with an accuracy of 2% or better. The FAN-E derives its high degree of measurement accuracy from a combination of precision sensor locations, honeycomb airflow processing, pneumatic averaging of

a large number of sensed airflow pressures, and patented "symmetrical averaging" (Patent No. 3,685,355), which requires that all stages in the averaging process occur at a point where there is a balanced array of sensors present, thereby assuring that each sensed pressure is given the same "equal weight" in the averaging process as other sensed pressures.

---

2% Certified Measurement Accuracy



*Air Monitor Corporation certifies that the FAN-Evaluator Airflow Measuring Station shown herein is licensed to bear the AMCA Certified Ratings Seal - Airflow Measurement Station Performance. The ratings shown are based on tests and procedures performed in accordance with AMCA Publication 611 and comply with the requirements of the AMCA Certified Ratings Program.*

*Performance ratings include the effect of an integral air equalizer-straightener cell in the AMS.*

Test Data

Model: FAN-E and FAN-E/SS  
Type: Differential Pressure

Conversion Formula:  $Velocity = 1096 \sqrt{\frac{AMS \text{ Velocity Pressure}}{Air \text{ Density}}}$

Sizes & Shapes Tested: 36" x 36" Rectangular; 36" dia. Circular  
Applicable Sizes Rated: Rectangular stations with cross-sectional areas between 4.5 and 18.0 square feet.  
Circular stations with cross-sectional areas between 3.5 and 14.1 square feet.

Test Setup: AMCA Standard 610, Figure 1

Test Results - Rectangular Stations

Reference Volume, ACFM	Reference Velocity, AFPM	% Accuracy	Airflow Resistance IN w.c.
35,838	3,982	1.72	.297
29,689	3,299	1.59	.225
24,616	2,735	1.51	.158
20,400	2,267	1.14	.089
14,434	1,604	0.84	.046
8,629	959	2.08	.021

Test Results - Circular Stations

Reference Volume, ACFM	Reference Velocity, AFPM	% Accuracy	Airflow Resistance IN w.c.
29,141	4,123	0.64	.272
24,275	3,434	- 0.17	.200
20,176	2,854	- 0.51	.112
14,550	2,058	- 0.77	.067
10,215	1,445	0.33	.038
8,672	1,227	1.24	.021

---

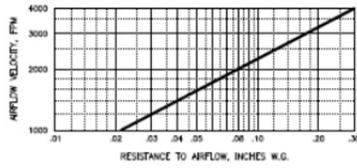
How It Works

**Log-Tchebycheff Sensor Location.** A high concentration of total and static pressure sensors positioned according to the log-Tchebycheff rule sense the multiple and varying flow components that constitute the airstream's velocity profile. The log-Tchebycheff's perimeter weighted sensor pattern is utilized to minimize the positive error (measurements greater than actual) caused by the failure to account for slower velocities at the duct wall when using traditional equal area sensor locations. Spacing of total pressure sensors is per *ASHRAE 1993 Fundamentals Handbook* which is summarized below. Since the static pressure across the station is relatively uniform, a lesser number of static pressure sensors are utilized to minimize unrecovered pressure drop.

Duct / Station Configuration	ASHRAE 1993 Fundamentals Handbook
Rectangular	25 or more points, maximum 6" or 8" apart, depending on duct size
Circular	11 to 30 points, along 2 or 3 diameters.

**Airflow Processing.** To assure extremely high levels of measuring accuracy (2% of actual flow or better) under extreme conditions caused by turbulent, rotating, and multi-directional airflows normally present near fan inlets or discharge ducts and directly downstream from duct elbows, transitions, etc., the FAN-E uses open, parallel cell, honeycomb panels to "process" the air into straightened flow just prior to the total pressure measurement plane. These honeycomb panels sharply reduce the need for long, straight runs of duct before and after the station to obtain accurate flow measurement.

**Negligible Airflow Resistance.** The FAN-E airflow measuring station is designed to function while producing a minimum of resistance to airflow, due to the unique honeycomb air straightener-equalizer section having a free area of 96.6%. The unique, non-restrictive characteristic of the FAN-E is seen in the Resistance vs. Airflow Velocity graph below. The values indicated are total resistance and do not include any allowances for static regain (a potential 20% reduction to the values).



**Fechheimer Pitot Flow Measurement.** The FAN-E operates on the Fechheimer Pitot derivative of the multi-point, self-averaging Pitot principle to measure the total and static pressure components of airflow. Total pressure sensing ports with patented (U.S. Patent No. 4,559,835) chamfered entrances, and Fechheimer pairs of offset static pressure sensing ports combine to minimize the effect of directional airflow. When located downstream of honeycomb airflow processing cell, the Fechheimer Pitot method is extremely effective at accurately measuring airflow in limited straight duct runs.

Figure-A II.1-1 Spécifications station de mesure de débit d'air  
Tirée de Air Monitor Corporation (2014)

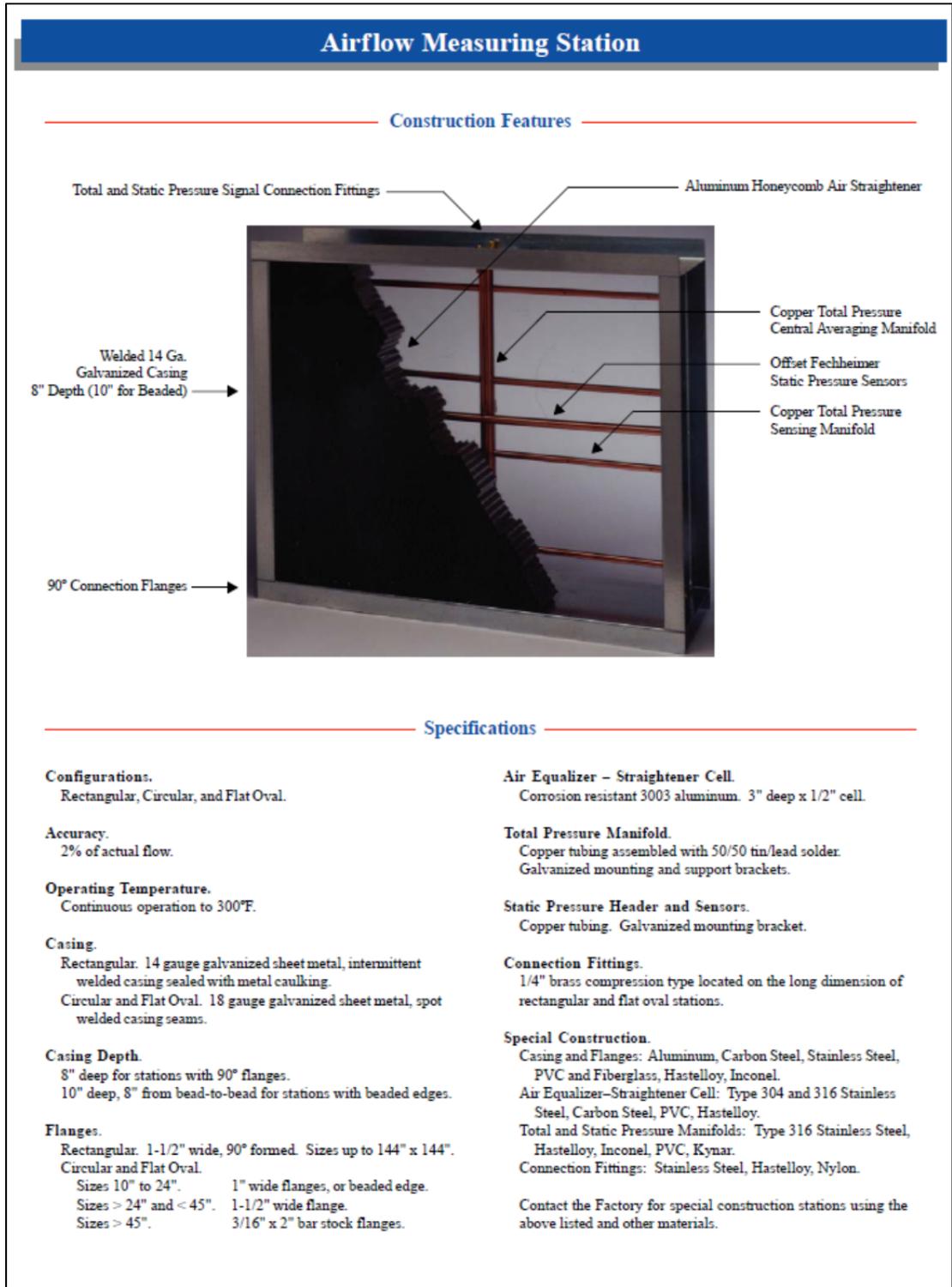


Figure-A II.1-2 Spécifications station de mesure de débit d'air  
Tirée de Air Monitor Corporation (2014)

## II.2 Transducteur de pression



# DP2

Differential Pressure (uni/bi-directional) with Pitot Tube Option



optional pitot tube

Field selectable ranges and outputs

Part #	Output	Zero Selectable	
A/DP2-1	+/- 1.0" w.c.	+/- 2.0"	N/A
A/DP2-2	+/- 0.5" w.c.	+/- 0.3"	N/A
A/DP2-3	+/- 0.25" w.c.	+/- 0.5"	N/A
A/DP2-4	0 to 0.25" w.c.	0 to 0.5"	0 to 0.4"
A/DP2-5	0 to 0.5" w.c.	0 to 0.4"	0 to 0.3"
A/DP2-6	0 to 1.0" w.c.	0 to 0.8"	0 to 0.5"
A/DP2-7	0 to 2.0" w.c.	0 to 2.5"	0 to 1.25"
A/DP2-8	0 to 3.0" w.c.	0 to 5.0"	0 to 4.0"
A/DP2-9	0 to 5.0" w.c.	0 to 4.0"	0 to 2.5"
A/DP2-10	0 to 10.0" w.c.	0 to 8.0"	0 to 5.0"
A/DP2-11	+/- 5" w.c.	+/- 2.5"	N/A
A/DP2-12	+/- 0.1" w.c.	+/- 0.2"	N/A
A/DP2-13	0 to 0.1" w.c.	0 to 0.2"	0 to 0.16"

**DP2**

The A/DP2 Series is a line of low differential pressure transmitters that are capable of sensing full scale ranges down to 0.1" of water column. Each ACI pressure transmitter utilizes a high quality ceramic capacitive sensor to provide long term stability and performance. Accuracy is +/- 0.3% of full scale over the compensated temperature range for most ranges (see specification chart) and this is critical for optimizing building pressure. In addition to the requested span, most units are capable of being field adjusted to a maximum of three additional spans by resetting the internal jumpers.

The A/DP2 Series is covered by ACI's Five (5) Year Limited Warranty, which is located in the front of ACI's Sensors & Transmitters catalog or can be found on ACI's web site, which is: [www.workaci.com](http://www.workaci.com).

H: 5,78" W: 3,66" D: 1,88"

\*\*\*\*\*

Made in the U.S.A.

Figure-A II 1 Spécifications transducteur de pression  
Tirée de ACI (2014)



II.3 Ventilateur

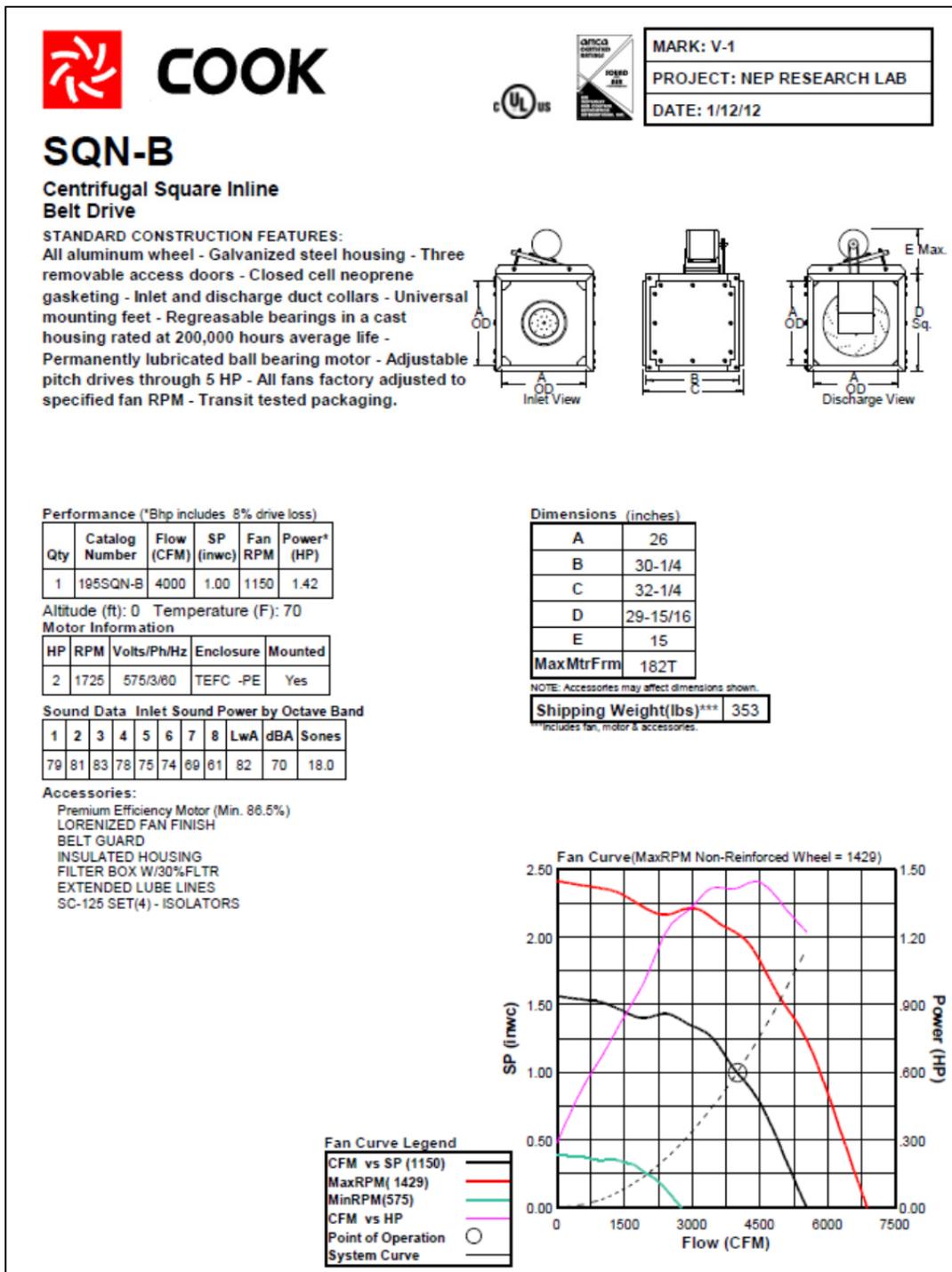


Figure-A II 3 Spécifications du ventilateur  
 Tirée de Loren Cook Company (2012)

## II.4 Serpentin électrique

				<b>Duct Heater Approval Drawings</b> All 1 heaters selected			
400 Boulevard Lebeau, Montreal, QC, Canada, H4N 1R6 Tel 1-800-361-2308 or 1-514-333-1433, Fax 1-514-333-3163 Visit us at <a href="http://www.neptronic.com">http://www.neptronic.com</a>				Date	04/03/2013	Rev. 1	
				Project Number	130630033	Canada	
				Project Name	Copy of training room test setup		
				Reference Number			
				Customer			
				Engineer	Patrick Victor		
				Submitted By	NEPTRONIC		
				Company			

Duct Heaters		Dimensions (in)						CFM	FPM	Electrical Data				Stages		Drawings	Thermostat		
Item	Qty	Heater			Control Box					P (kW)	VAC-Ph	I (A)	Ctrl V	Signal	Qty			kW	A
1	1	23.75	20.00	4.00	8.50	22.00	7.00	1667	506	14.00	600-3	13.47	24	Mod 0-10V	1X	14.00	13.47	M130630033-A E130630033-A	None

Figure-A II.4-1 Spécifications du serpentin électrique  
Tirée de Neptronic (2013)

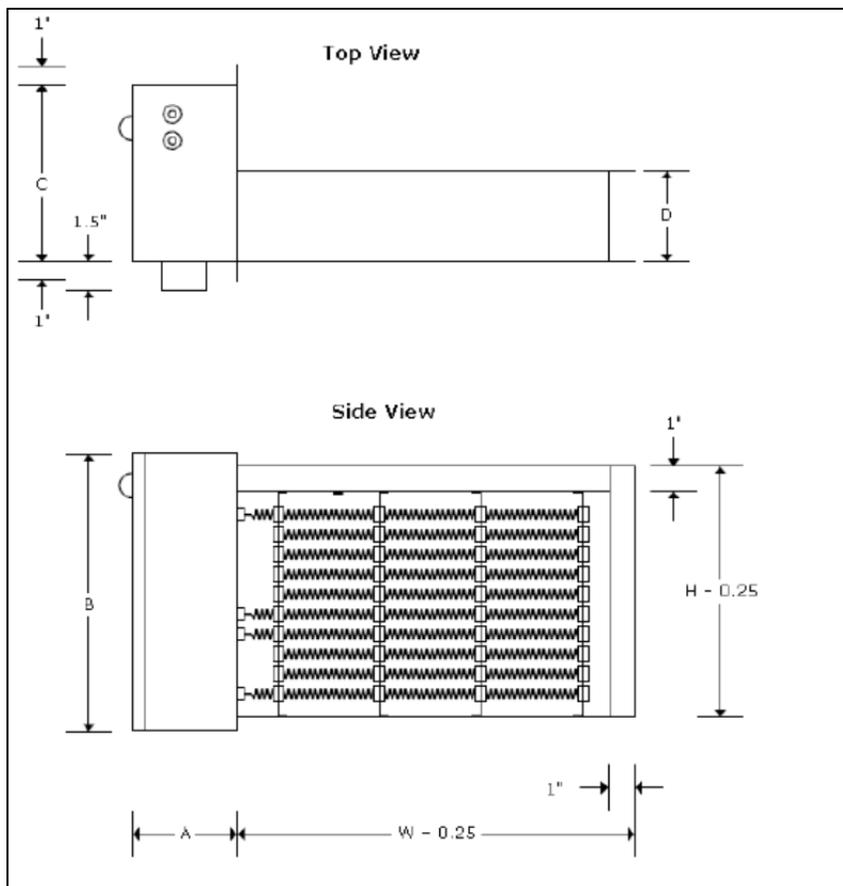


Figure-A II 4 Spécifications serpentin électrique  
Tirée de Neptronic (2013)

## II.5 Hygromètres

### II.5.1 Hygromètre Neptonic SHC80

<b>neptronic</b>		<b>Duct Humidity Sensor</b> Specification & Installation Instructions
	<b>Features:</b>	<b>SHC80</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Duct humidity sensor</li> <li>• Can be installed in association with Neptronic<sup>®</sup> room humidistat (HRO20)</li> <li>• Status LED:               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Normal mode: Blink once every 10 sec.</li> <li>○ Fault: Fast blinking. Outputs at 10Vdc.</li> </ul> </li> <li>• Built-in temperature sensor</li> </ul>	
<b>Technical Data</b>		<b>SHC80</b>
Power supply		24 Vac or Vdc ±10%
Power consumption		1 VA
Electrical connection		18 AWG minimum
Actual humidity output		0-10 Vdc (0-100 %RH)
Humidity sensor precision		±3% or better at 40 %RH and 23°C [73°F]
Relative Humidity range		0 to 100 %RH
Actual temperature output		0-10 Vdc (0-100°C)
Temperature sensor precision		±0.4°C or better
Operating temperature		-40°C to 80°C [-40°F to 176°F]
Weight		0.35lb [160g]

Figure-A II 5 Spécifications hygromètre Neptonic SHC080  
Tirée de Neptonic (2013)

## II.5.2 Hygromètre Rotronic Hygro Palm HP21

<b>7 Technical data</b>	
<b>7.1 Specifications</b>	
<b>General</b>	<b>HP21</b>
Device type	Humidity-temperature hand-held indicator with integral probe
Battery type	9 V alkaline
Low battery indication	Yes
<b>Humidity measurement</b>	<b>HP21</b>
Sensor	ROTRONIC Hygromer <sup>®</sup> M1-R
Measuring range	0...100 %RH
Measurement accuracy at 23 °C	±1.0 %RH
Repeatability	0.3 %RH
Long term stability	< 1 %RH / year
Sensor time constant	Typical 10 sec, 63% of a 35 to 80 %RH step change (1m/sec air flow at sensor)
<b>Temperature measurement</b>	<b>HP21</b>
Sensor	Pt100 RTD, IEC 751 1/3 class B
Measuring range	-10...60°C
Measurement accuracy at 23 °C	±0.2 °C
Repeatability	0.05°C
Long term stability	< 0.1°C / year
Sensor time constant	Typical 4 sec, 63% of a step change (1m/sec air flow at sensor)
<b>Calculated parameters</b>	<b>HP21</b>
Psychrometric calculations	Dew or frost point (user configurable setting)
<b>Start-up time and data refresh rate</b>	<b>HP21</b>
Start-up time	1.9s (typical)
Data refresh rate	1.7s (typical)
<b>Service connector</b>	<b>HP21</b>
Interface type	UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter)
Maximum service cable length	5 m (16.4 ft)
<b>General specifications</b>	<b>HP21</b>
Display	LC, 1 or 2 decimals resolution, backlight, trend, alarm and low battery indication
Probe material	Polycarbonate
Probe dust filter material	Polyethylene
Housing material	ABS
Housing protection grade	IP 40
Overall dimensions	270 x 70 x 30 mm (10.63 x 2.76 x 1.17")
Probe dimensions	80 x 15 mm (3.15 x 0.59")
Weight	About 198 g (7.0 oz)

Figure-A II 6 Spécifications hygromètre RotronicHygro Palm HP21  
Tirée de Rotronic (2013)

## ANNEXE III

### MÉTHODE D'UTILISATION DE L'OUTIL DE RÉGRESSION ZUNZUN.COM

Toutes les régressions ont été obtenues à l'aide du site internet zunzun.com. Cet outil est offert gratuitement, demeure performant et simple d'utilisation. Les étapes suivantes permettent d'effectuer les régressions sur tous les types de fonctions déjà configurés. L'outil permet également l'utilisation d'un type de fonction sur mesure.

- **Étape 1** : Faire le choix de la famille de fonction utilisée pour les régressions tel qu'illustré à la Figure-A III-1. Le choix permettant de trier tous les résultats de chacune des familles de fonction disponibles est illustré à la Figure-A III-2
- **Étape 2** : Entrer les spécifications du menu illustré à la Figure-A III-3
- **Étape 3** : Fournir les points expérimentaux qui permettront d'effectuer les régressions telles qu'illustrées à la Figure-A III-4
- **Étape 4** : faire le choix du critère de régression de la Figure-A III-5

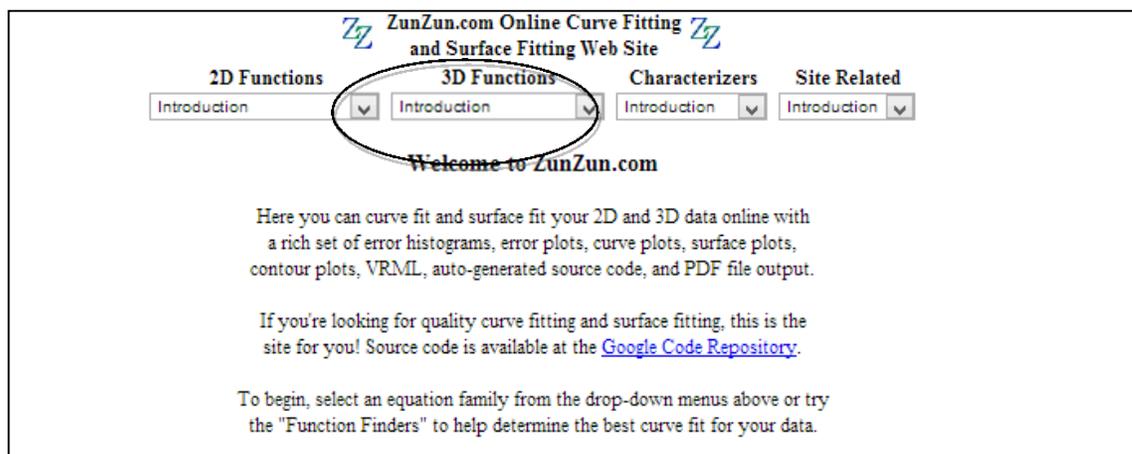


Figure-A III-1 Choix des familles de fonctions  
Tirée de ZunZun.com (2014)



Figure-A III-2 Choix de toutes les possibilités  
Tirée de ZunZun.com (2014)

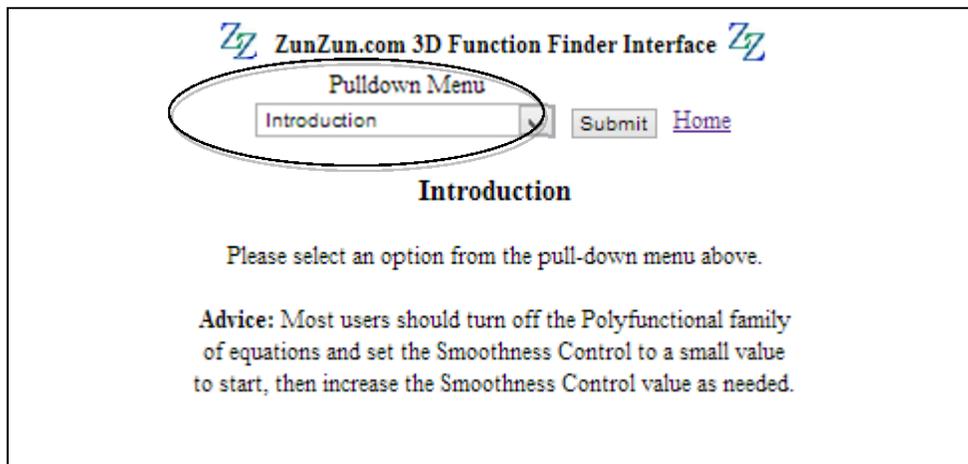


Figure-A III-3 Entrer les spécifications  
Tirée de ZunZun.com (2014)

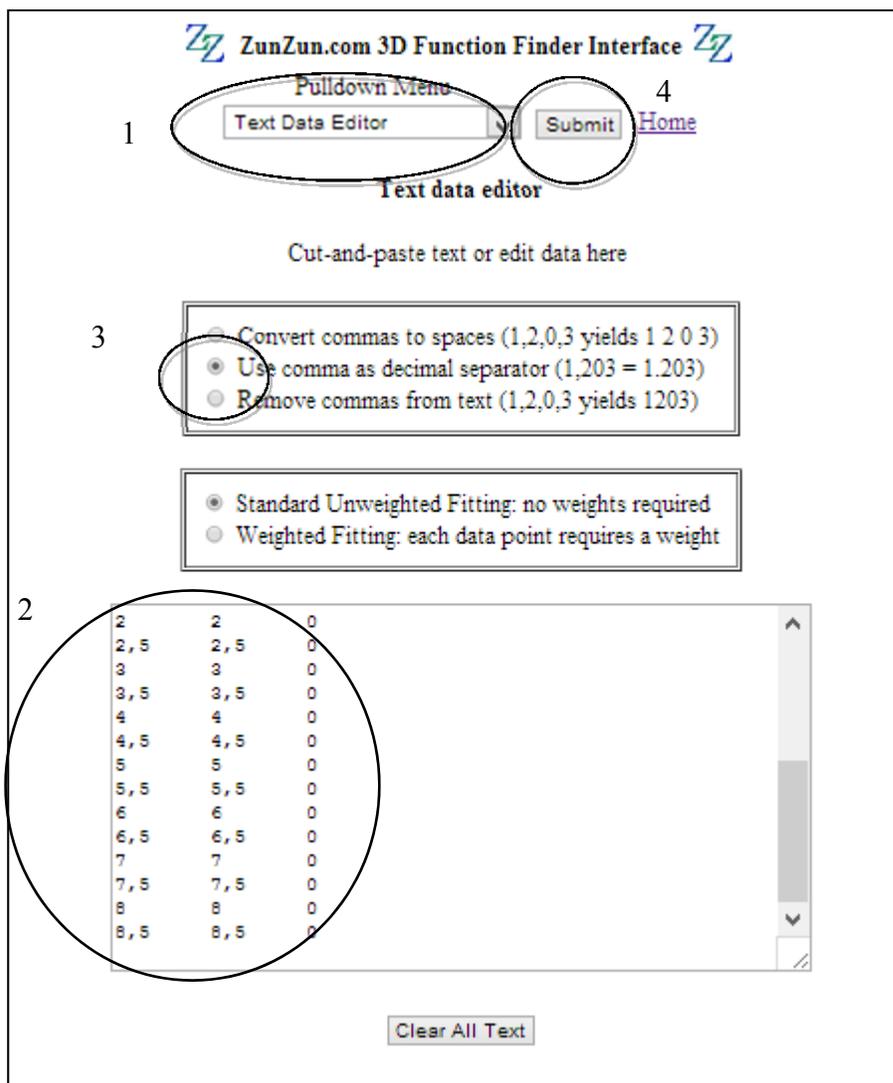


Figure-A III-4 Fournir les points expérimentaux  
Tirée de ZunZun.com (2014)

 **ZunZun.com 3D Function Finder Interface** 

Pulldown Menu

[Home](#)

**Fitting Target**

Here you can select the desired fitting target.

- Lowest sum of squared absolute error
- Lowest sum of squared orthogonal distance
- Lowest sum of squared relative error
- Lowest sum of absolute value of absolute error
- Lowest sum of absolute value of relative error
- Lowest peak absolute value of absolute error
- Lowest peak absolute value of relative error
- Lowest Akaike Information Criterion
- Lowest Bayesian Information Criterion

Figure-A III-5 Choix du critère de régression  
Tirée de ZunZun.com (2014)

## ANNEXE IV

**RÉSULTATS DE RÉGRESSIONS DES FAMILLES DE FONCTION  
PRÉSÉLECTIONNÉES POUR LA RAMPE E3**

## IV.1 Fonction A3

$$DMSAC = a \cdot (e^{b \cdot W_e} - e^{c \cdot W_s}) + \text{décalage} \quad (\text{A IV-29})$$

Somme des erreurs absolues = 3.594E+01

où:

- a = -1.15E+01;
- b = 9.73E-02;
- c = 9.67E-02;
- décalage = -1.0E-02.

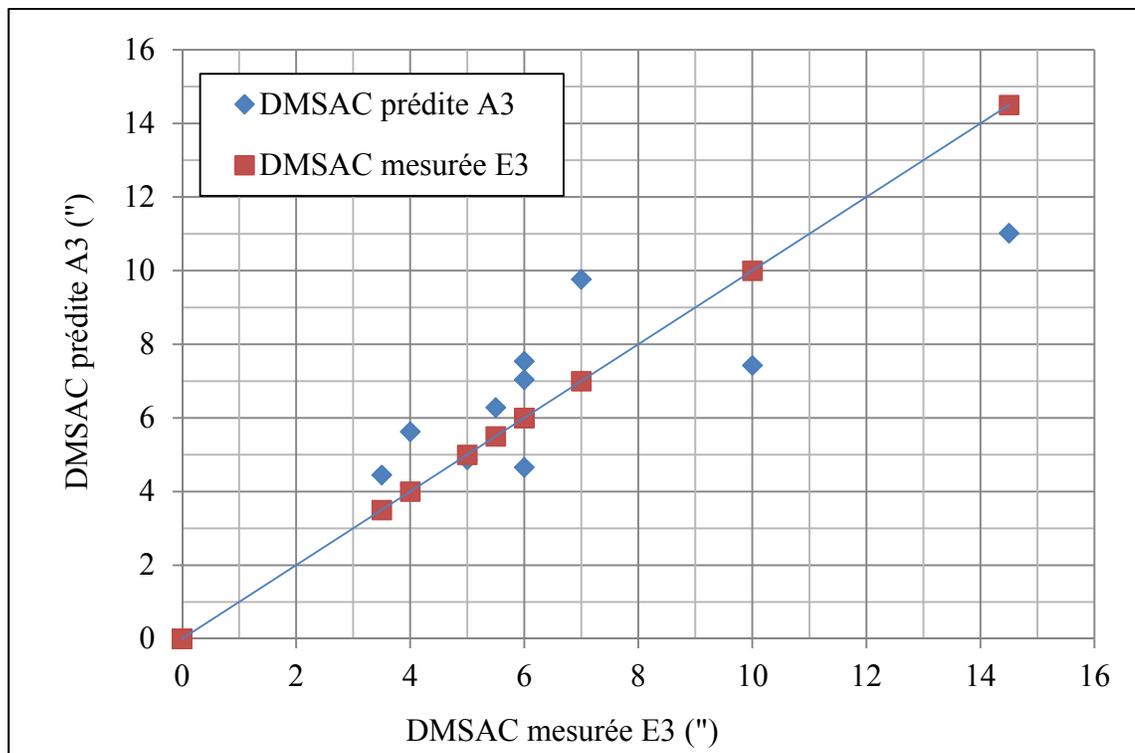


Figure-A IV.1-1 Comparaison entre DMSAC prédites par la fonction A3 et DMSAC mesurées avec la rampe E3

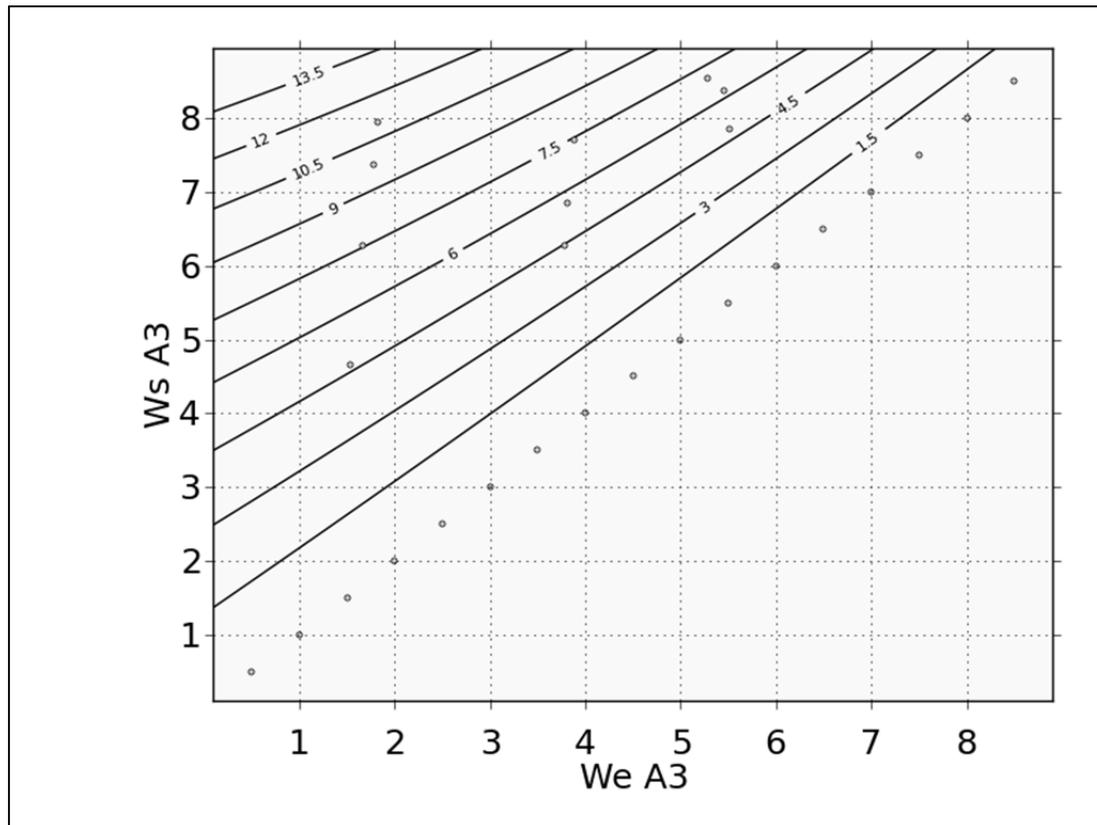


Figure-A IV.1-2 Isoplèthes fonction A3  
Tirée de ZunZun.com (2014)

## IV.2 Fonction B3

$$DMSAC = a \cdot W_e^b + c \cdot W_s^d + \text{décalage} \quad (\text{A IV-30})$$

Somme des erreurs absolues = 3.615E+01

où:

- $a = -7.01\text{E-}01$ ;
- $b = 1.40\text{E+}00$ ;
- $c = 5.54\text{E-}01$ ;
- $d = 1.50\text{E+}00$ ;
- $\text{décalage} = 2.8\text{E-}01$ .

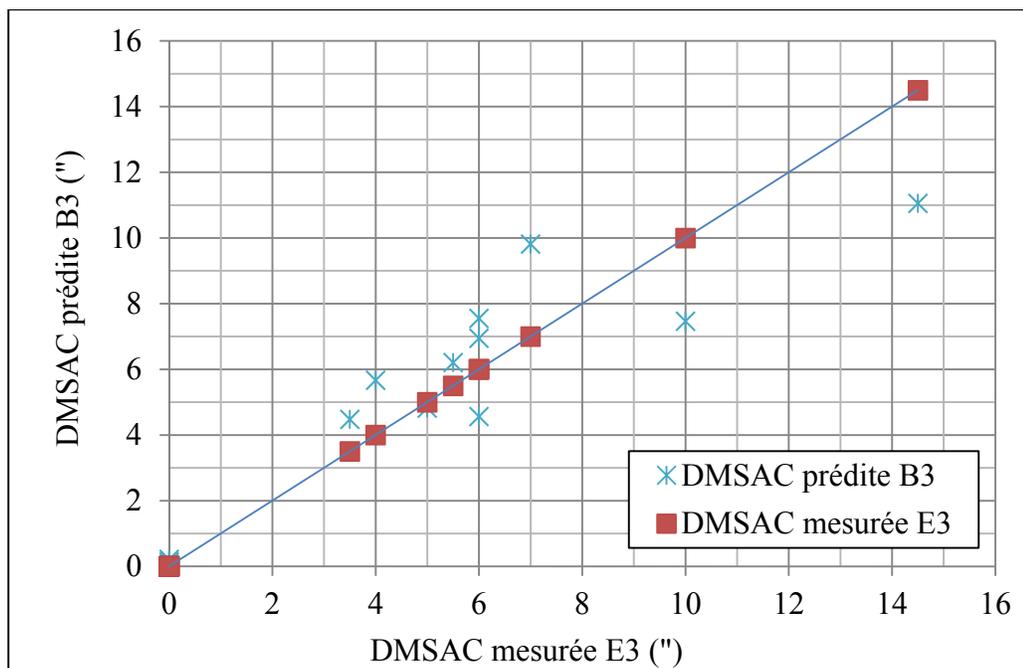


Figure-A IV.2-1 Comparaison entre DMSAC prédites par la fonction B3 et DMSAC mesurées avec la rampe E3

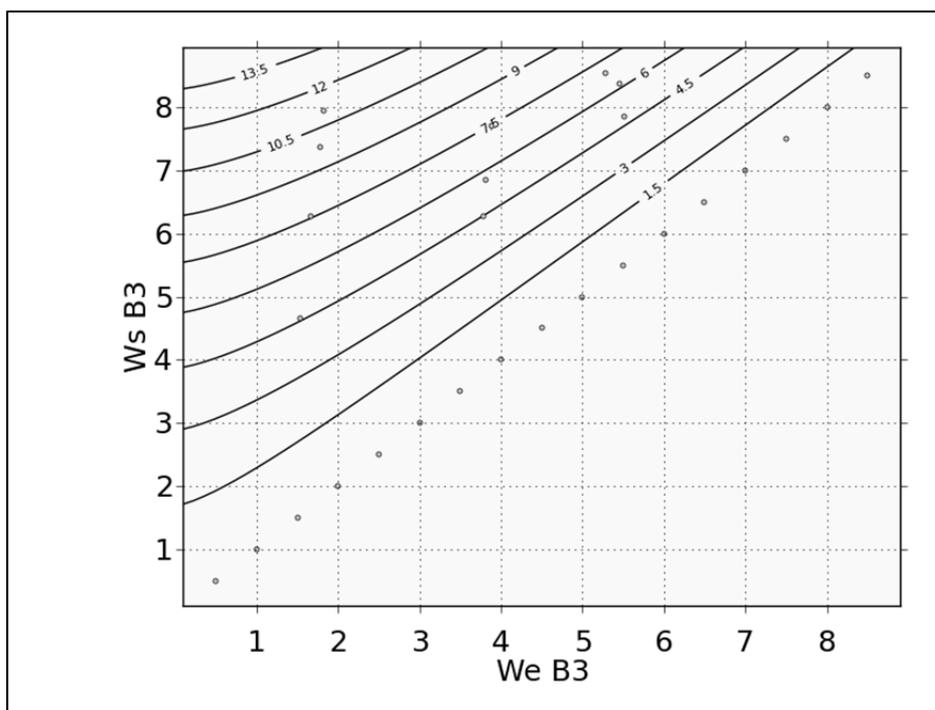


Figure-A IV.2-2 Isoplèthes fonction B3  
Tirée de ZunZun.com (2014)

### IV.3 Fonction C3

$$DMSAC = \frac{a + b \cdot e^{W_e} + c \cdot e^{W_s}}{1 + d \cdot e^{W_e} + f \cdot e^{W_s}} + \text{décalage} \quad (\text{A IV-31})$$

Somme des erreurs absolues = 4.0777696054508901E+01

où:

- a = 5.92E-01;
- b = -2.20E-02;
- c = 2.02E-02;
- d = 3.43E-02;
- f = 1.22E-03;
- décalage = 0.

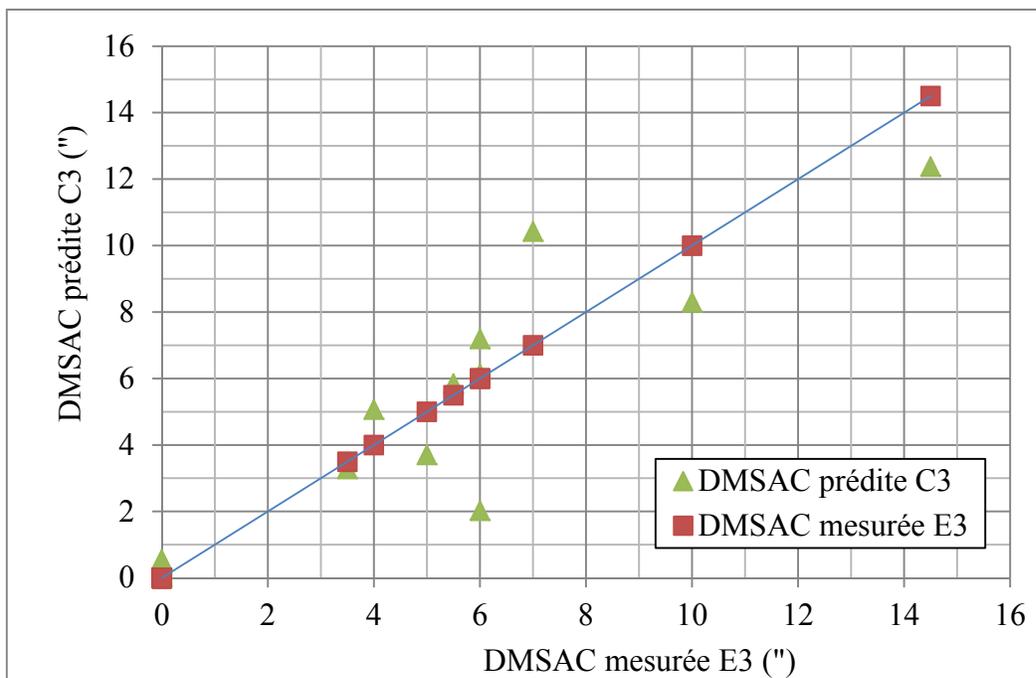


Figure-A IV.3-1 Comparaison entre DMSAC prédites par la fonction C3 et DMSAC mesurées avec la rampe E3

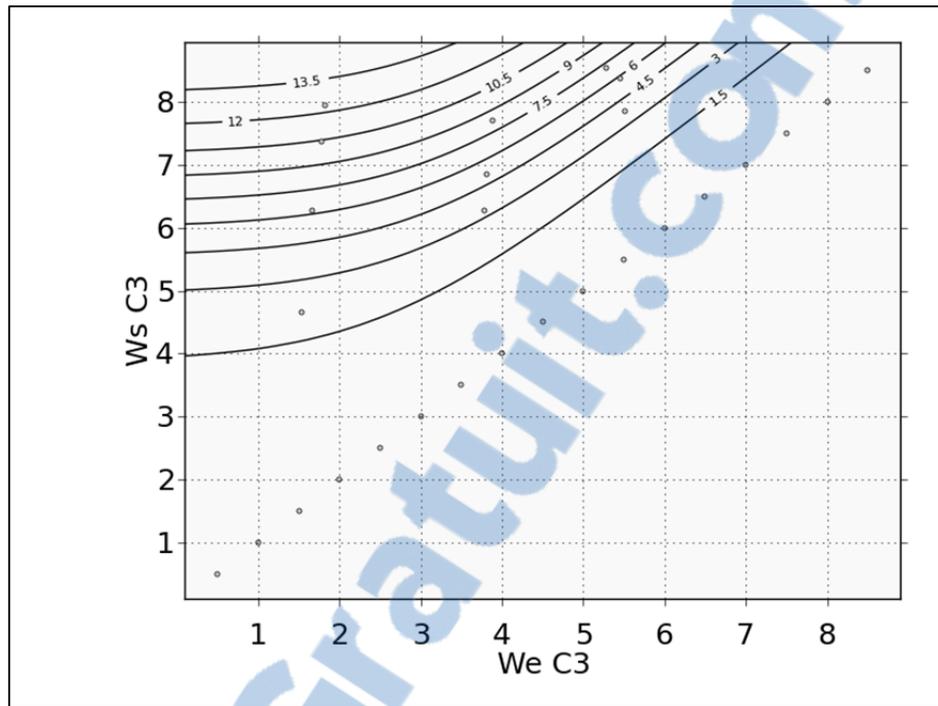


Figure-A IV.3-2 Isoplèthes fonction C3  
Tirée de ZunZun.com (2014)

#### IV.4 Fonction D3

$$DMSAC = a \cdot W_s^3 - b \cdot W_s \cdot W_e^2 + \text{décalage} \quad (\text{A IV-32})$$

Somme des erreurs absolues = 5.057E+01

où:

- a = 2.33E-02;
- b = 2.43E-02;
- décalage = 0.

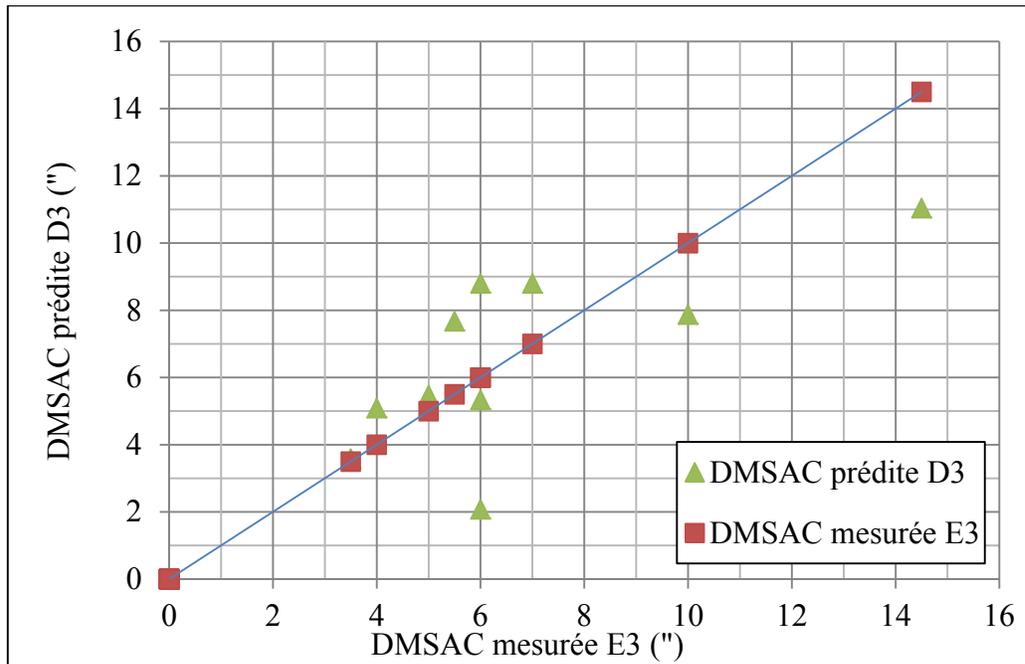


Figure-A IV.4-1 Comparaison entre DMSAC prédites par la fonction D3 et DMSAC mesurées avec la rampe E3

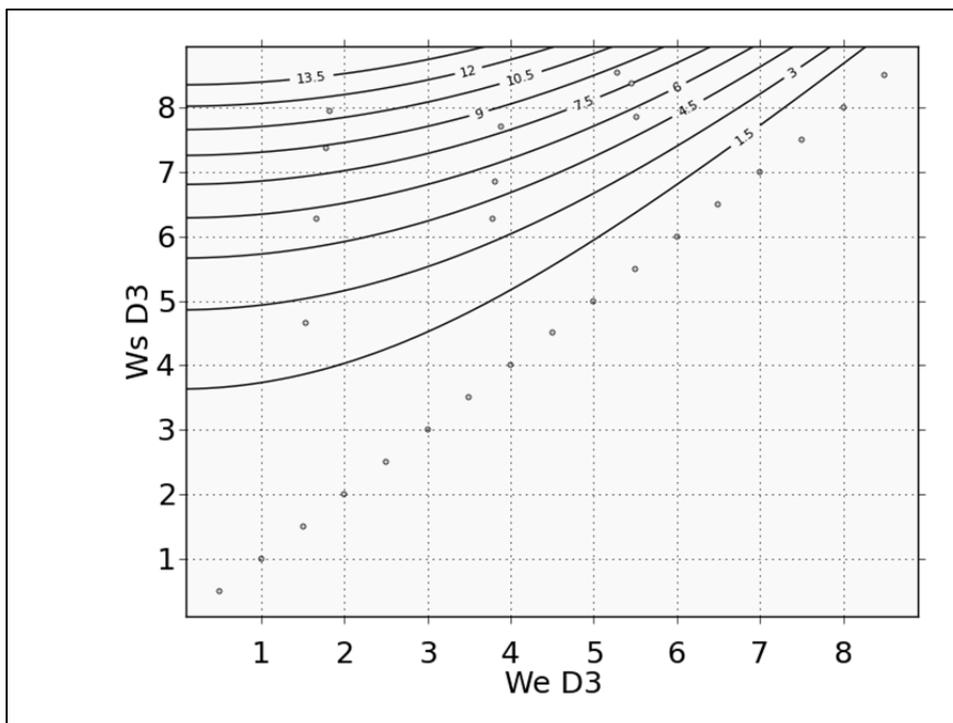


Figure-A IV.4-2 Isoplèthes fonction D3  
Tirée de ZunZun.com (2014)

## ANNEXE V

RÉSULTATS DE RÉGRESSIONS DES FAMILLES DE FONCTION  
PRÉSÉLECTIONNÉES POUR LA RAMPE E6

## V.1 Fonction A6

$$DMSAC = a \cdot (e^{b \cdot W_e} - e^{c \cdot W_s}) + \text{décalage} \quad (\text{A V-33})$$

Somme des erreurs absolues = 2.0476182707142667E+02

où:

- $a = -3.026E+00$ ;
- $b = 2.55E-01$ ;
- $c = 2.58E-01$ ;
- $\text{décalage} = 1.3E-01$ .

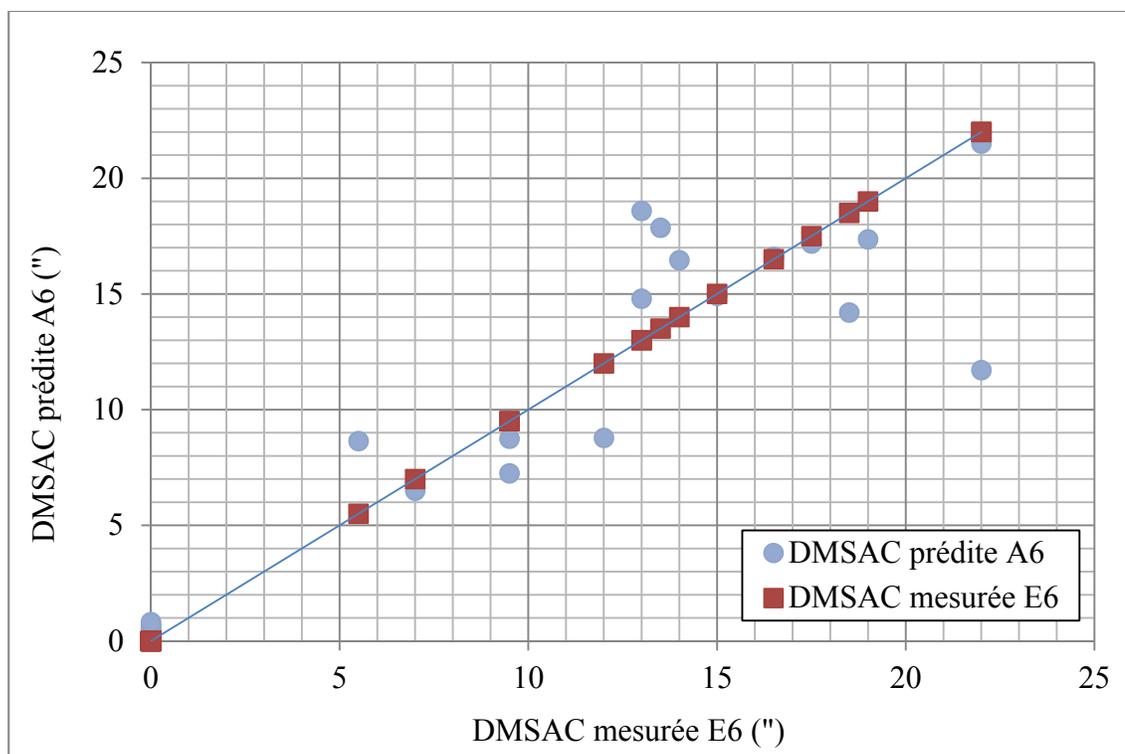


Figure-A V.1-1 Comparaison entre DMSAC prédites par la fonction A6 et DMSAC mesurées avec la rampe E6



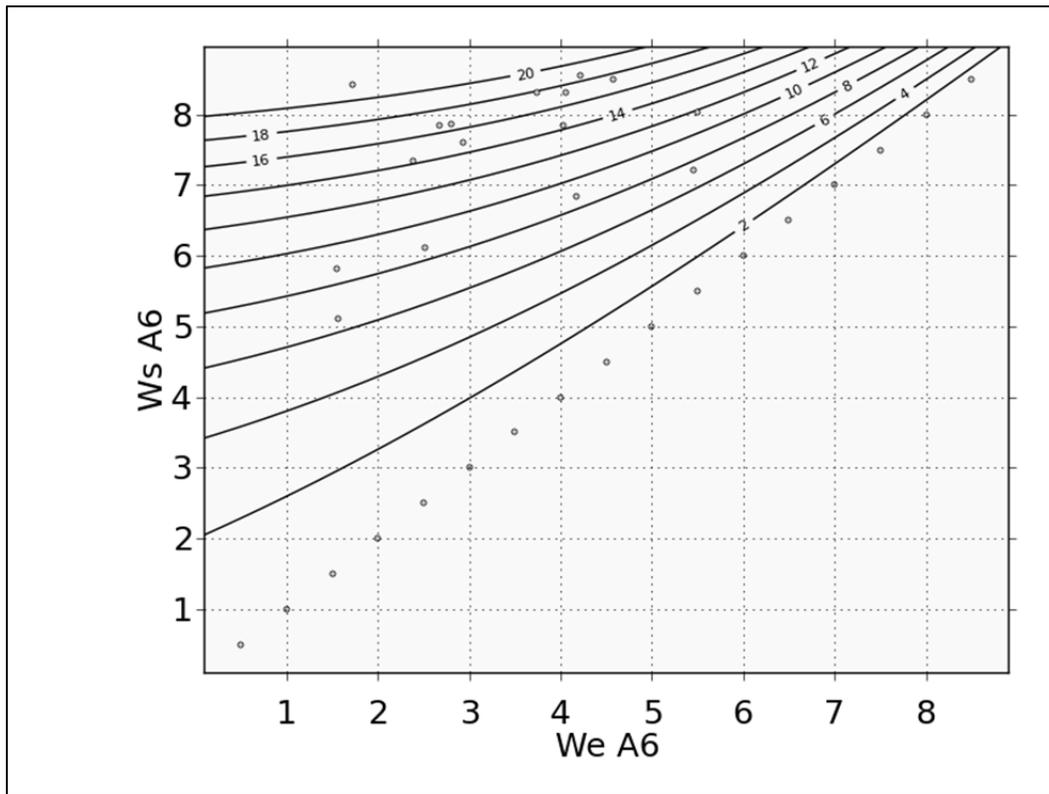


Figure-A V.1-2 Isoplèthes fonction A6  
Tirée de ZunZun.com (2014)

## V.2 Fonction B6

$$DMSAC = a \cdot W_e^b + c \cdot W_s^d + \text{décalage} \quad (\text{A V-34})$$

Somme des erreurs absolues = 2.114E+02

où:

- $a = -5.67\text{E-}02$ ;
- $b = 2.77\text{E+}00$ ;
- $c = 1.07\text{E-}01$ ;
- $d = 2.47\text{E+}00$ ;
- $\text{décalage} = 0$ .

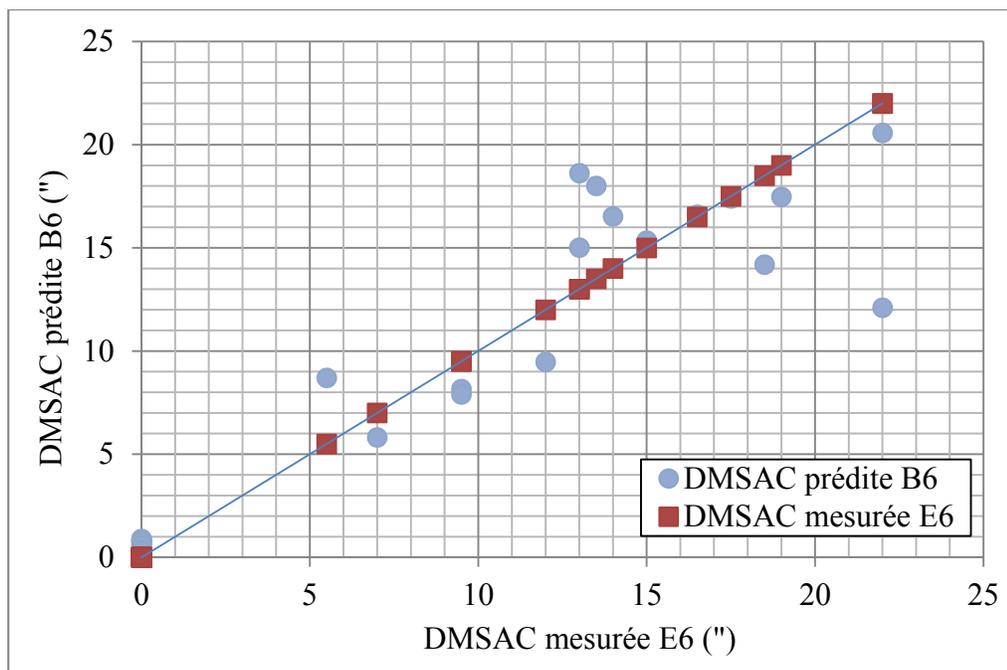


Figure-A V.2-1 Comparaison entre DMSAC prédites par la fonction B6 et DMSAC mesurées avec la rampe E6

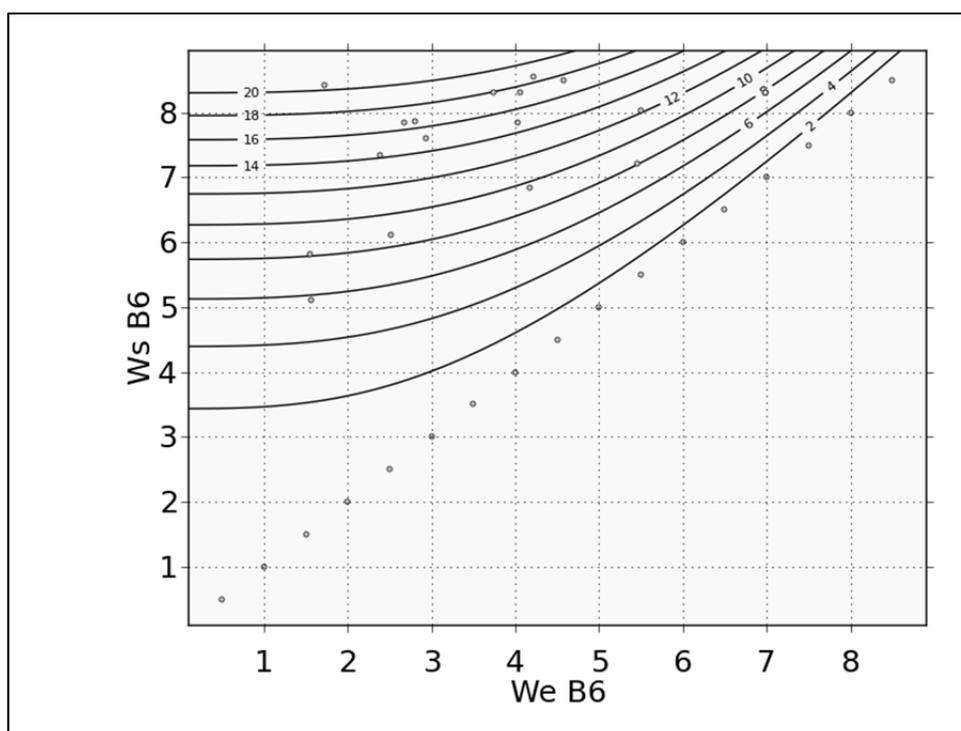


Figure-A V.2-2 Isoplèthes fonction B6  
Tirée de ZunZun.com (2014)

### V.3 Fonction C6

$$DMSAC = \frac{a + b \cdot e^{W_e} + c \cdot e^{W_s}}{1 + d \cdot e^{W_e} + f \cdot e^{W_s}} + \text{décalage} \quad (\text{A V-35})$$

Somme des erreurs absolues = 1.374E+02

où:

- a = 6.08E-02;
- b = -4.10E-02;
- c = 4.09E-02;
- d = -3.8E-04;
- f = 2.03E-03;
- décalage = 0.

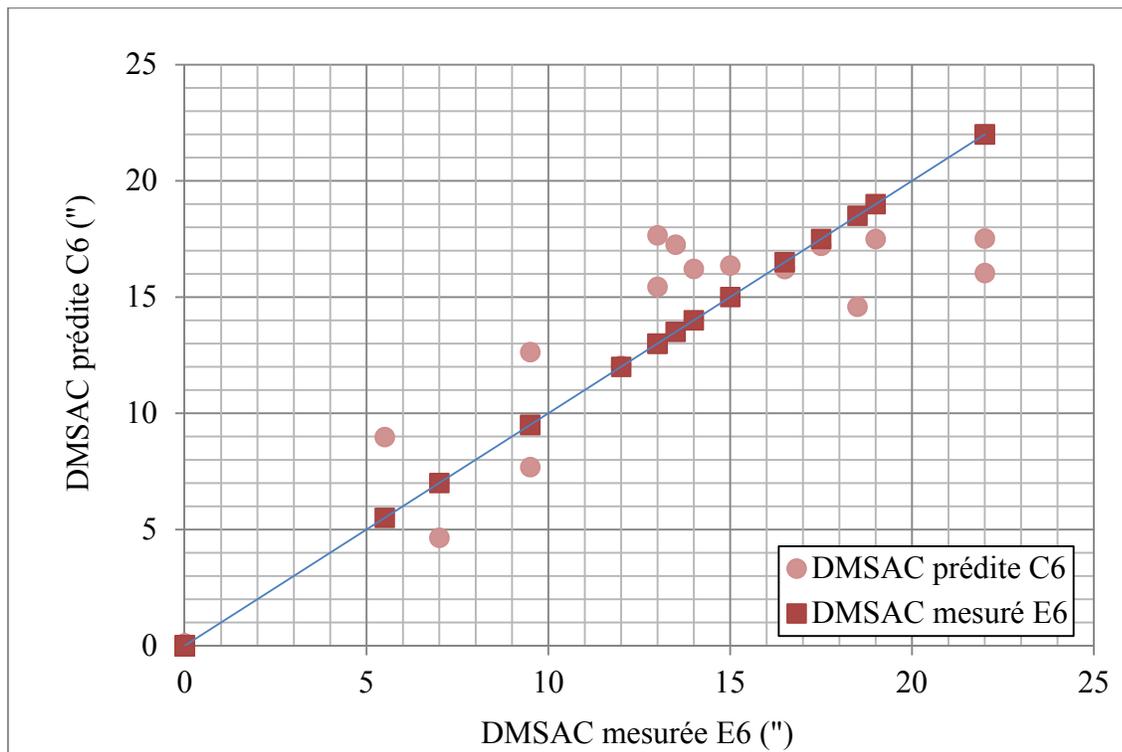


Figure-A V.3-1 Comparaison entre DMSAC prédites par la fonction C6 et DMSAC mesurées avec la rampe E6

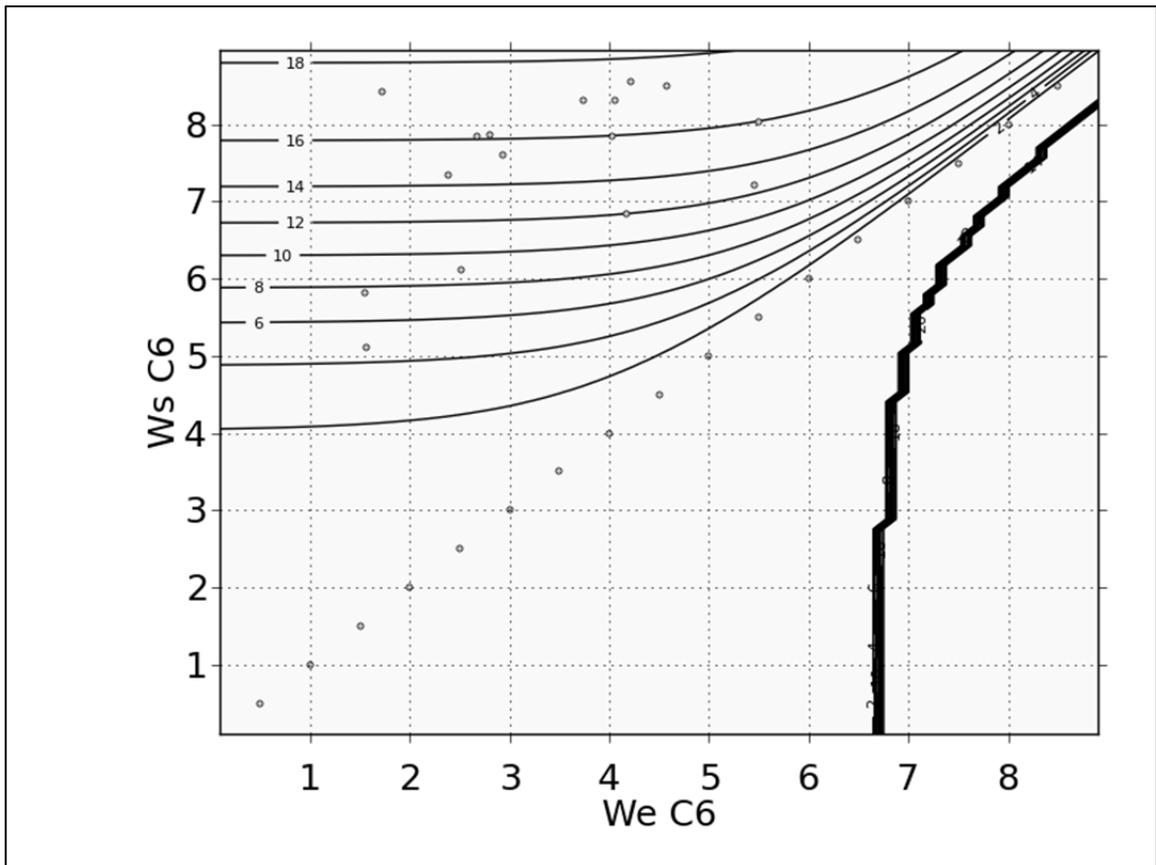


Figure-A V.3-2 Isoplèthes fonction C6  
Tirée de ZunZun.com (2014)

#### V.4 Fonction D6

$$DMSAC = a \cdot W_s^3 - b \cdot W_s \cdot W_e^2 + \text{décalage} \quad (\text{A V-36})$$

Somme des erreurs absolues = 2.357E+02

où:

- $a = 3.915\text{E-}02$ ;
- $b = 3.83\text{E-}02$ ;
- $\text{décalage} = 4.7\text{E-}01$ .

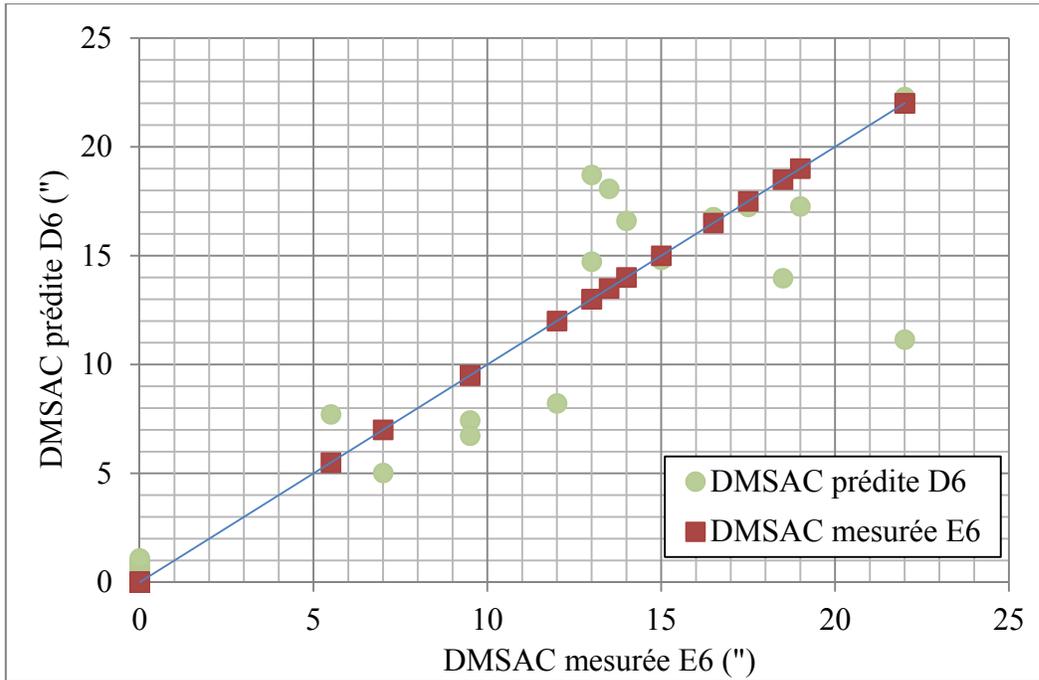


Figure-A V.4-1 Comparaison entre DMSAC prédites par la fonction D6 et DMSAC mesurées avec la rampe E6

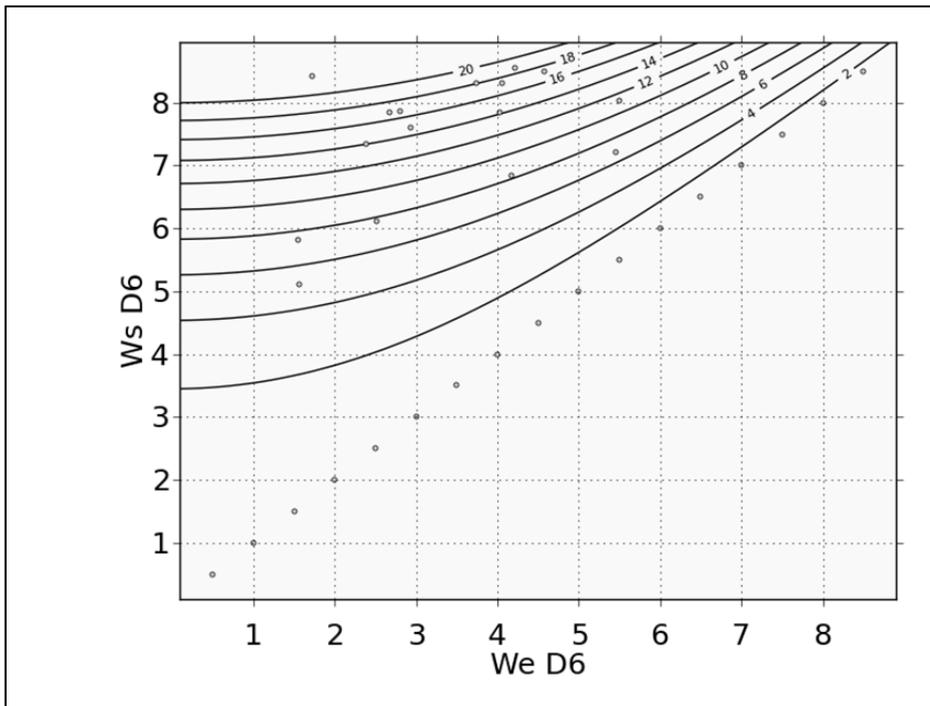


Figure-A V.4-2 Isoplèthes fonction D6  
Tirée de ZunZun.com (2014)

## ANNEXE VI

RÉSULTATS DE RÉGRESSIONS DES FAMILLES DE FONCTION  
PRÉSÉLECTIONNÉES POUR LA RAMPE E8

## VI.1 Fonction A8

$$DMSAC = a \cdot (e^{b \cdot W_e} - e^{c \cdot W_s}) + \text{décalage} \quad (\text{A VI-37})$$

Somme des erreurs absolues = 1.938E+02

où:

- $a = -9.34\text{E-}01$ ;
- $b = 4.43\text{E-}01$ ;
- $c = 4.43\text{E-}01$ ;
- $\text{décalage} = 4.9\text{E-}01$ .

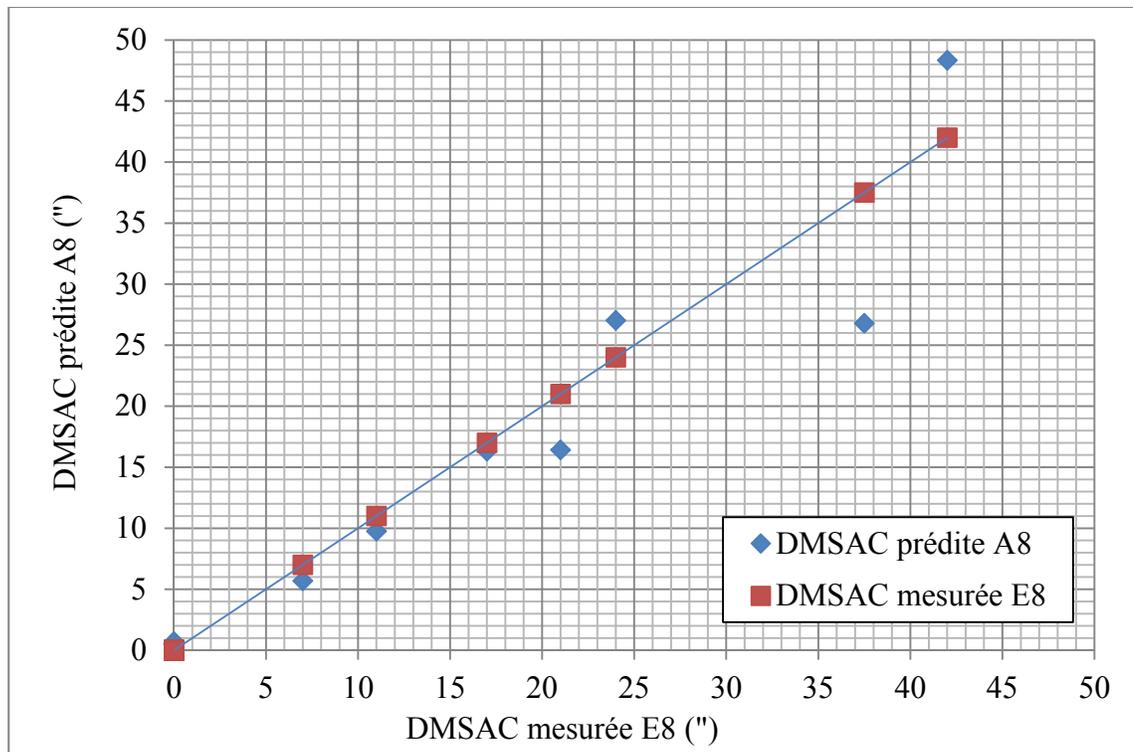


Figure-A VI.1-1 Comparaison entre DMSAC prédites par la fonction A8 et DMSAC mesurées avec la rampe E8

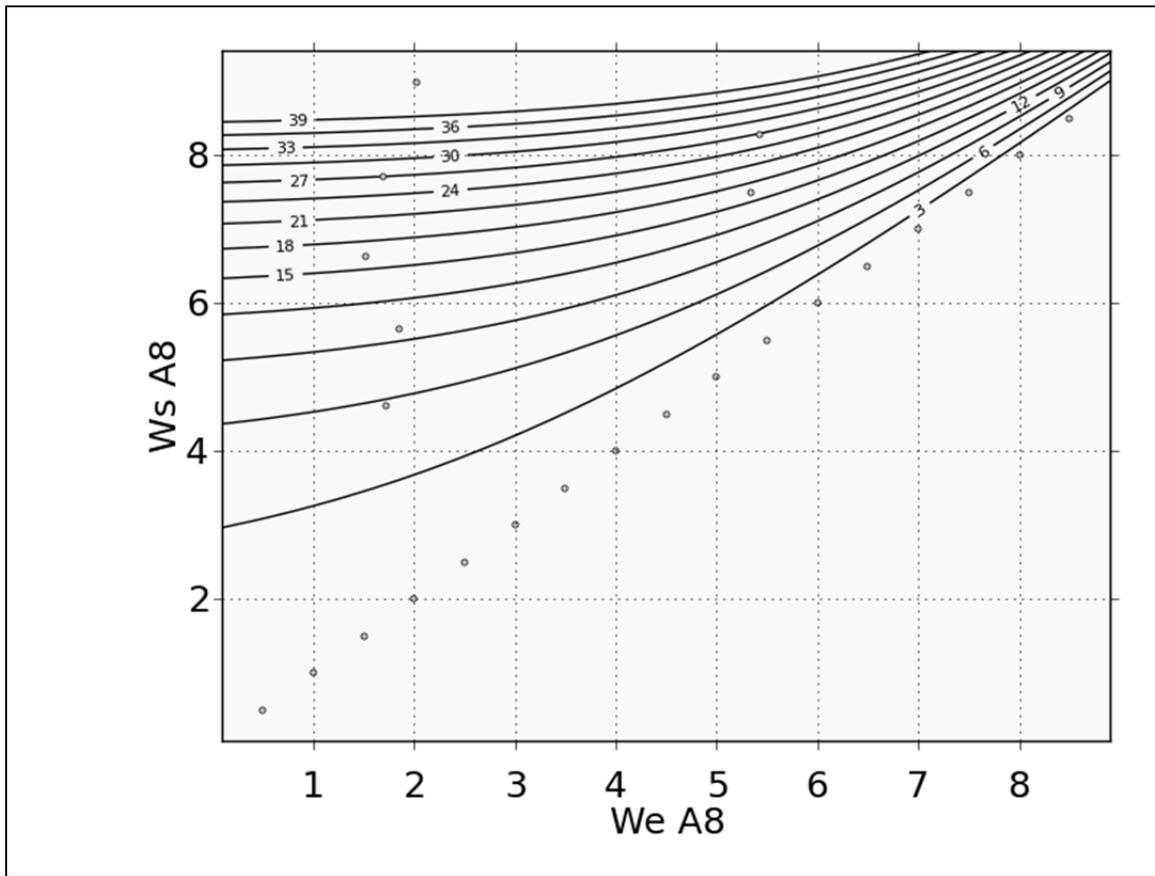


Figure-A VI.1-2 Isoplèthes fonction A8  
Tirée de ZunZun.com (2014)

## VI.2 Fonction B8

$$DMSAC = a \cdot W_e^b + c \cdot W_s^d + \text{décalage} \quad (\text{A VI-38})$$

Somme des erreurs absolues = 1.436E+02

où:

- $a = -6.751\text{E-}03$ ;
- $b = 4.06\text{E+}00$ ;
- $c = 2.443\text{E-}02$ ;
- $d = 3.45\text{E+}00$ ;
- $\text{décalage} = -4.0\text{E-}01$ .

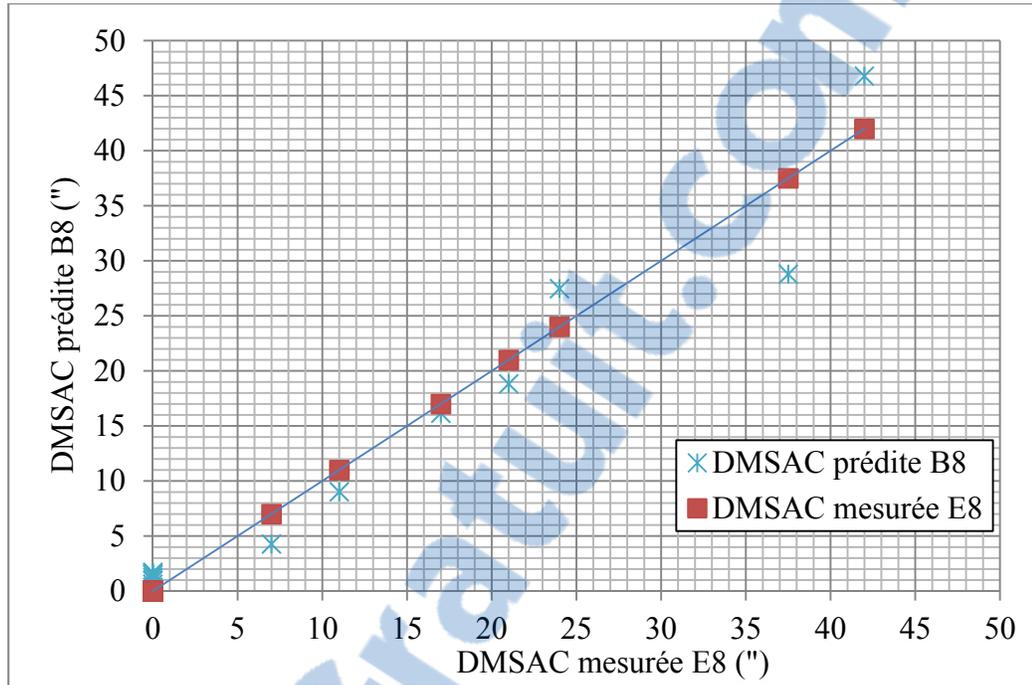


Figure-A VI.2-1 Comparaison entre DMSAC prédites par la fonction B8 et DMSAC mesurées avec la rampe E8

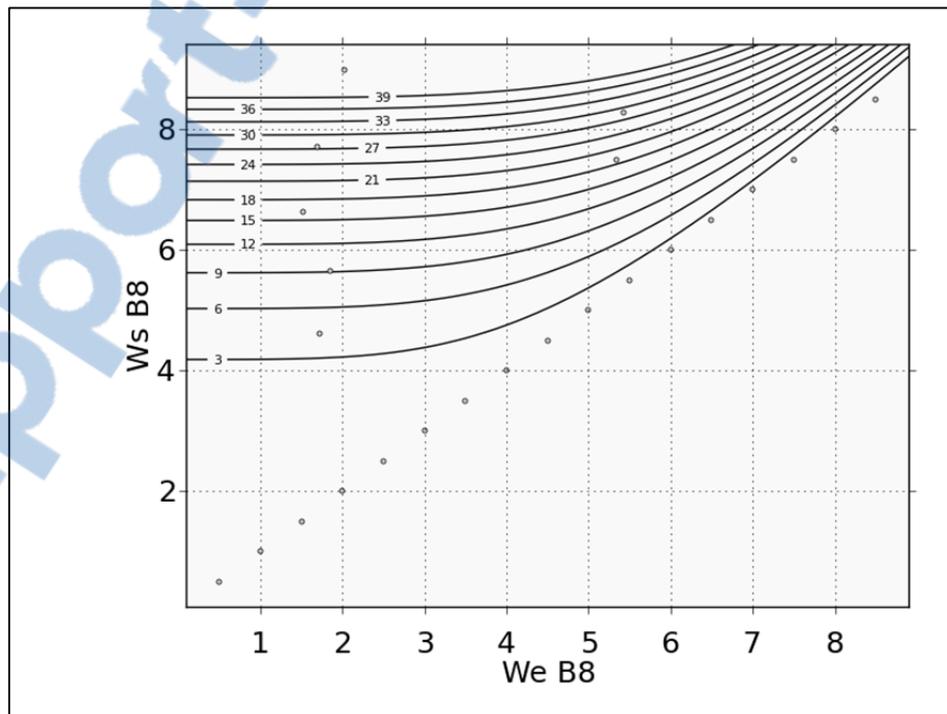


Figure-A VI.2-2 Isoplèthes fonction B8  
Tirée de ZunZun.com (2014)

### VI.3 Fonction C8

$$DMSAC = \frac{a + b \cdot e^{W_e} + c \cdot e^{W_s}}{1 + d \cdot e^{W_e} + f \cdot e^{W_s}} + \text{décalage} \quad (\text{A VI-39})$$

Somme des erreurs absolues = 7.47E+01

où:

- a = 4.88E-01;
- b = -2.80E-02;
- c = 2.79E-02;
- d = -5.06E-04;
- f = 5.46E-04;
- décalage = 0.

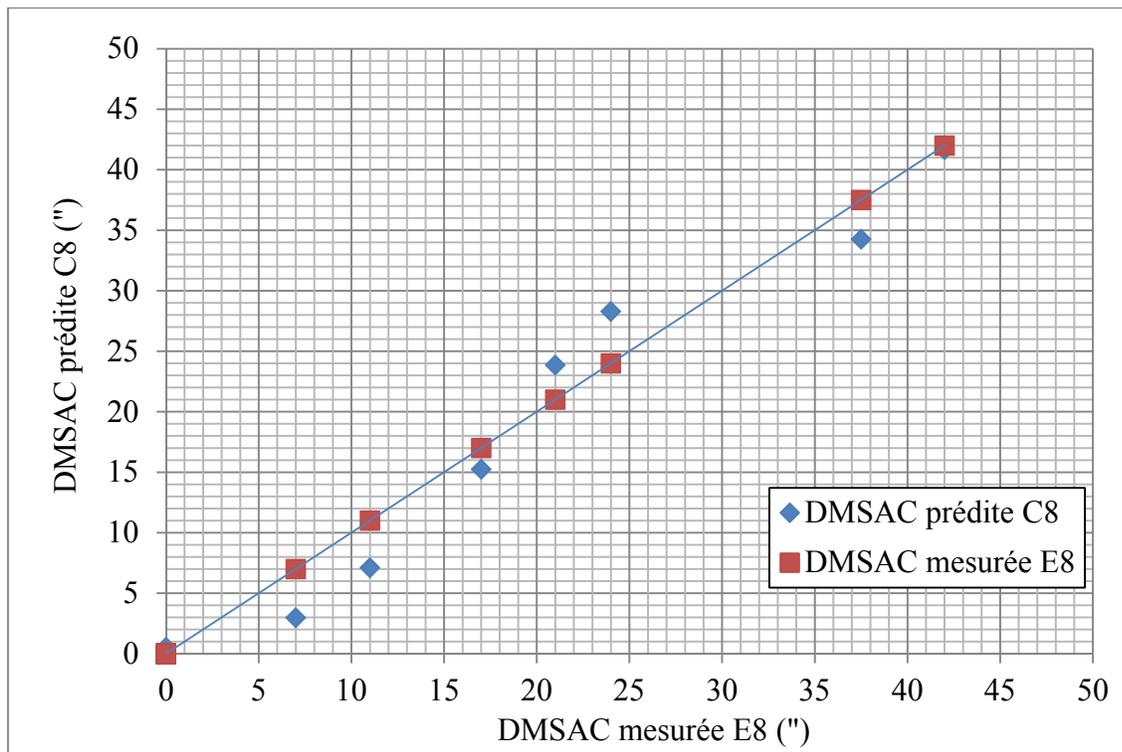


Figure-A VI.3-1 Comparaison entre DMSAC prédites par la fonction C8 et DMSAC mesurées avec la rampe E8

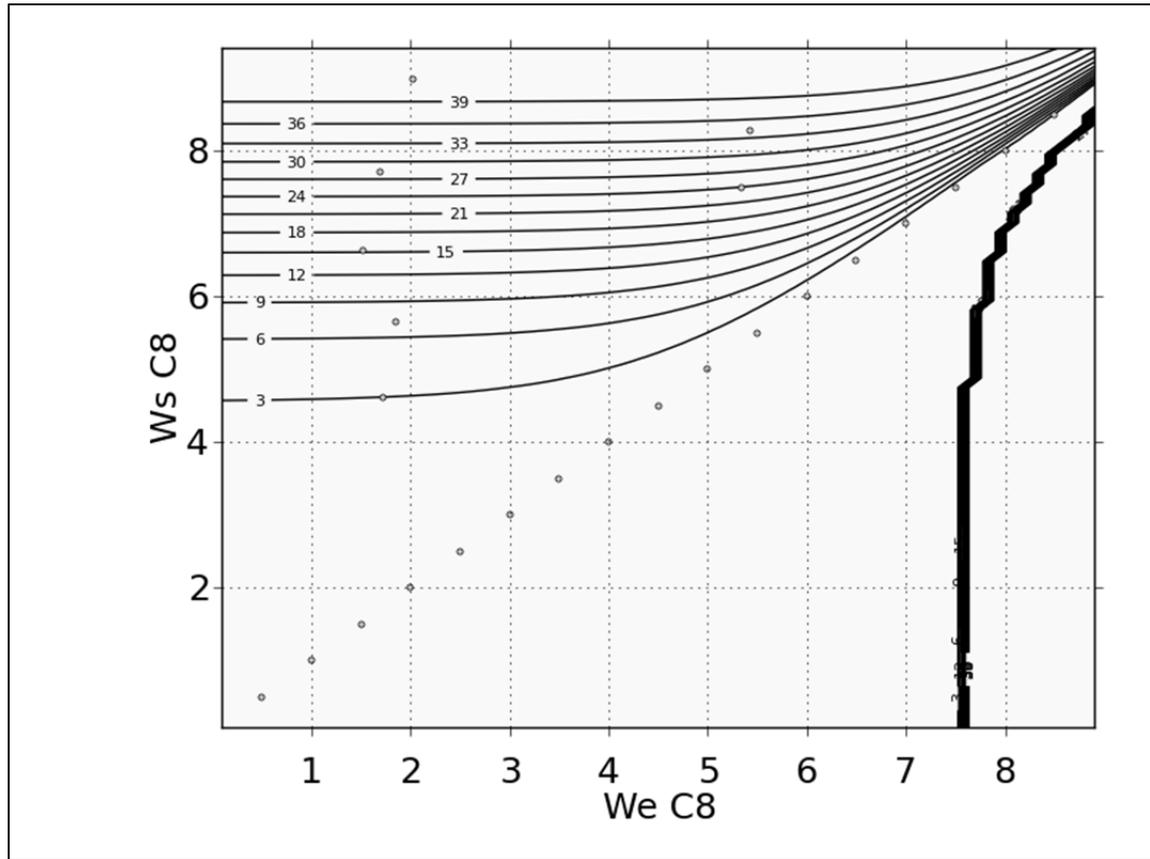


Figure-A VI.3-2 Isoplèthes fonction C8  
Tirée de ZunZun.com (2014)

#### VI.4 Fonction D8

$$DMSAC = a \cdot W_s^3 - b \cdot W_s \cdot W_e^2 + \text{décalage} \quad (\text{A VI-40})$$

Somme des erreurs absolues = 3.292E+02

où:

- $a = 6.75\text{E-}02$ ;
- $b = 6.34\text{E-}02$ ;
- décalage = 0.

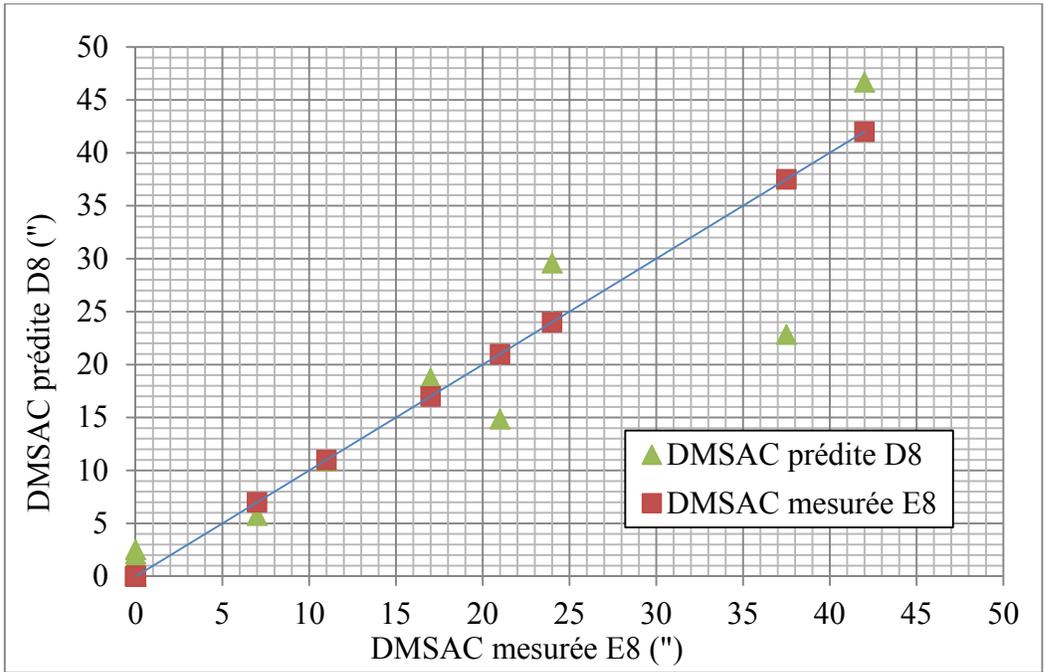


Figure-A VI.4-1 Comparaison entre DMSAC prédites par la fonction D8 et DMSAC mesurées avec la rampe E8

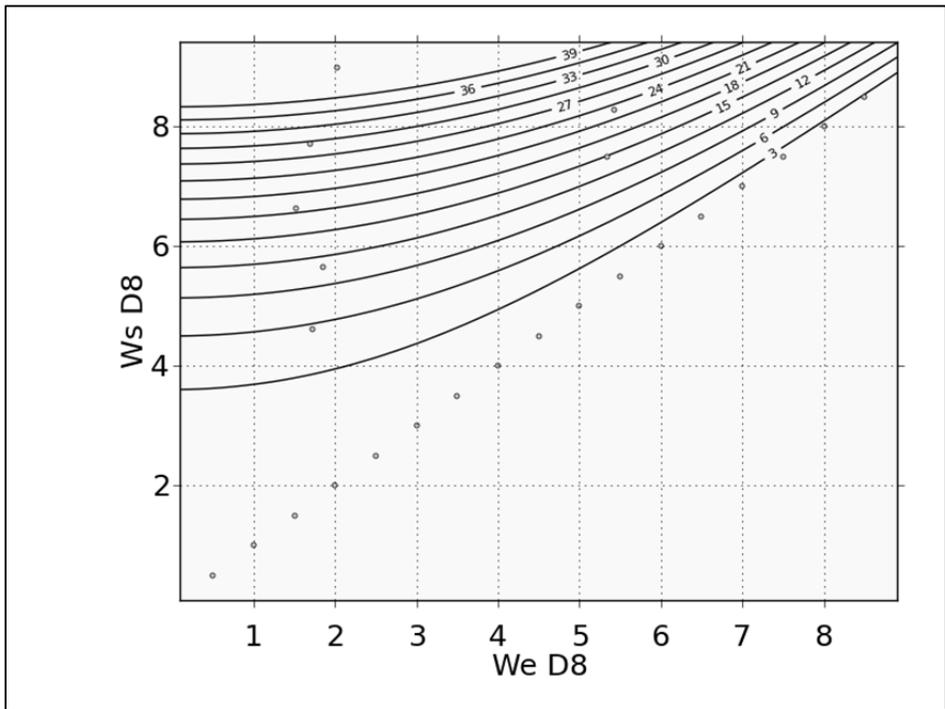


Figure-A VI.4-2 Isoplèthes fonction D8  
Tirée de ZunZun.com (2014)

## ANNEXE VII

RÉSULTATS DE RÉGRESSIONS DES FAMILLES DE FONCTION  
PRÉSÉLECTIONNÉES POUR LA RAMPE E12

## VII.1 Fonction A12

$$DMSAC = a \cdot (e^{b \cdot W_e} - e^{c \cdot W_s}) + \text{décalage} \quad (\text{A VII-41})$$

Somme des erreurs absolues = 1.2920E+03

où:

- a = -6.11E-01;
- b = 5.55E-01;
- c = 5.53E-01;
- décalage = 1.8E+00.

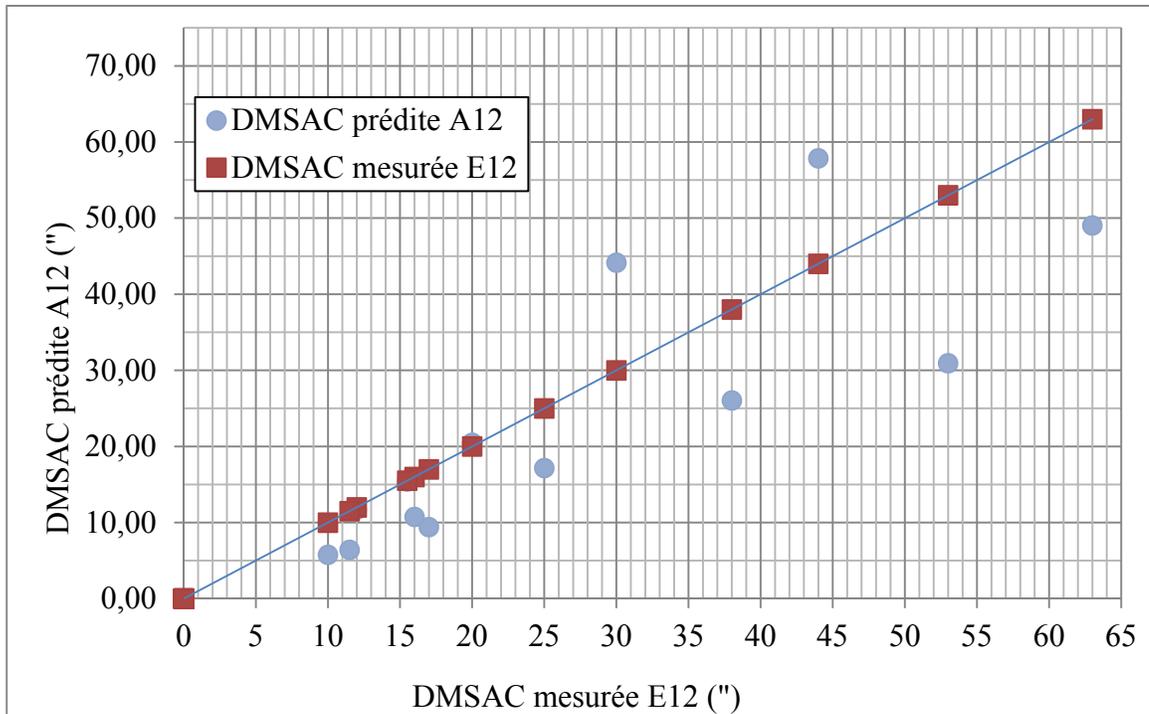


Figure-A VII.1-1 Comparaison entre DMSAC prédites par la fonction A12 et DMSAC mesurées avec la rampe E12

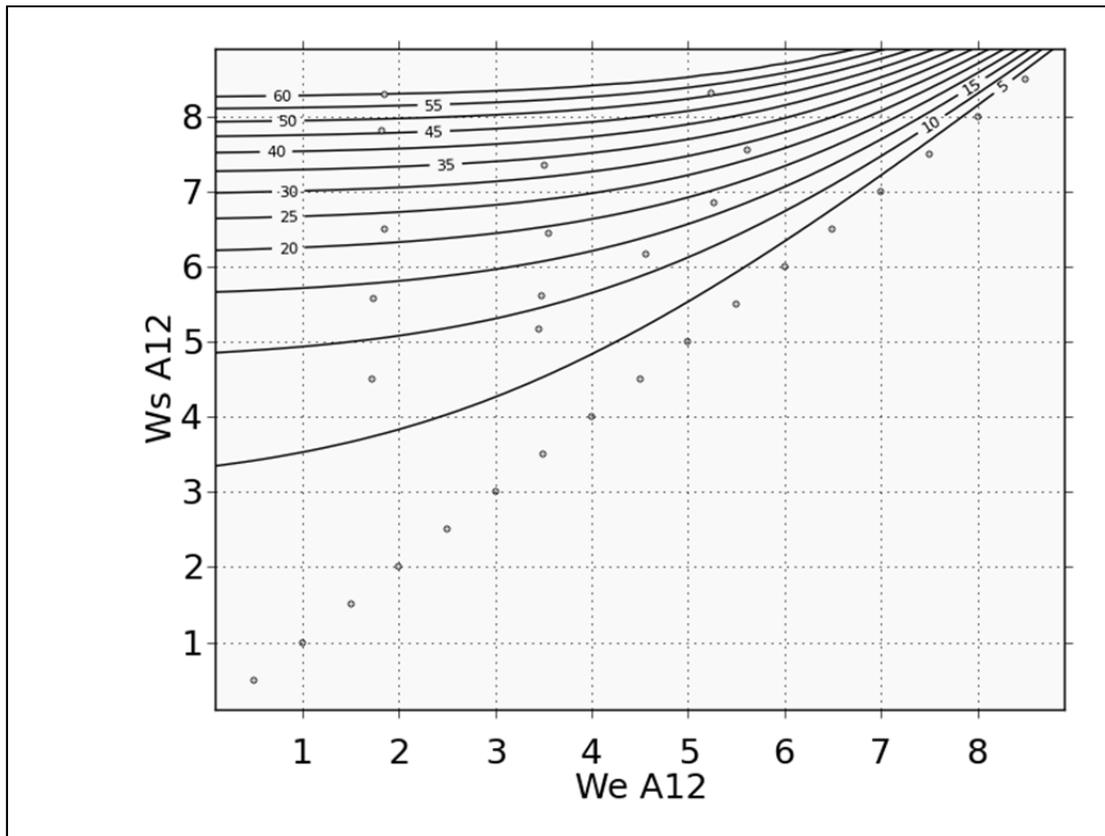


Figure-A VII.1-2 Isoplèthes fonction A12  
Tirée de ZunZun.com (2014)

## VII.2 Fonction B12

$$DMSAC = a \cdot W_e^b + c \cdot W_s^d + \text{décalage} \quad (\text{A VII-42})$$

Somme des erreurs absolues = 1.1169E+03

où:

- $a = -4.11\text{E-}03$ ;
- $b = 4.52\text{E+}00$ ;
- $c = 2.07\text{E-}02$ ;
- $d = 3.75\text{E+}00$ ;
- $\text{décalage} = -2.6\text{E-}01$ .

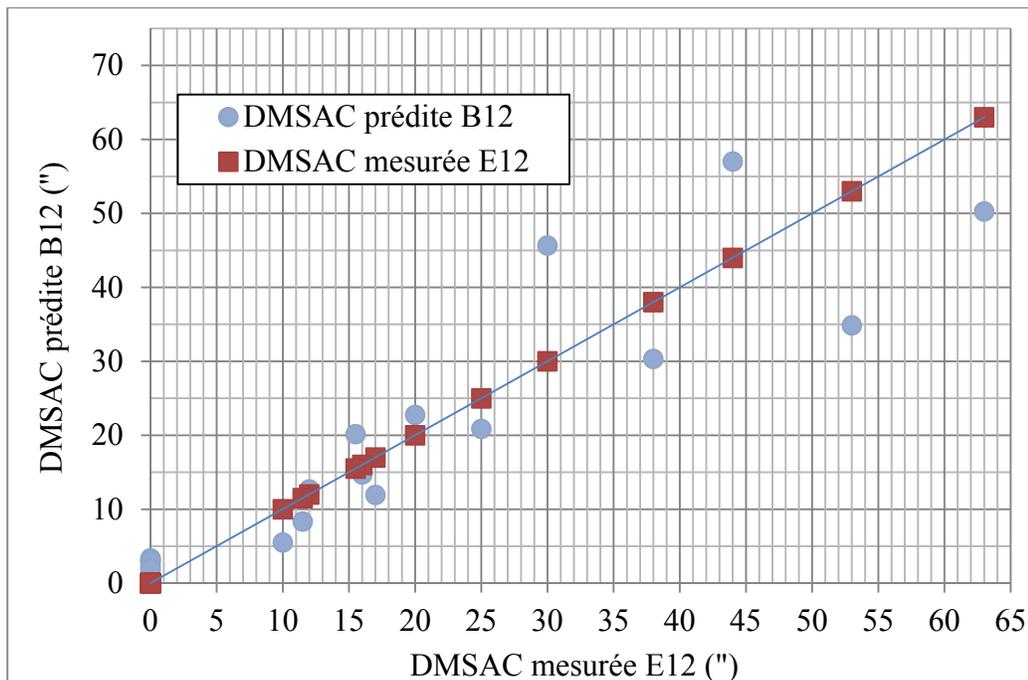


Figure-A VII.2-1 Comparaison entre DMSAC prédites par la fonction B12 et DMSAC mesurées avec la rampe E12

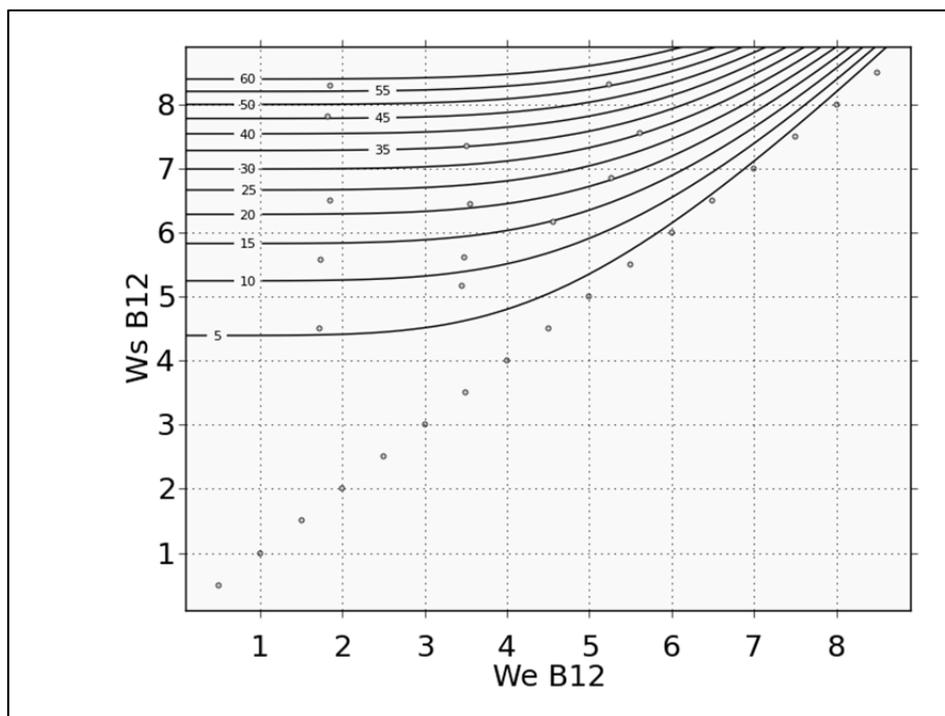


Figure-A VII.2-2 Isoplèthes fonction B12  
Tirée de ZunZun.com (2014)

### VII.3 Fonction C12

$$DMSAC = \frac{a + b \cdot e^{W_e} + c \cdot e^{W_s}}{1 + d \cdot e^{W_e} + f \cdot e^{W_s}} + \text{décalage} \quad (\text{A VII-43})$$

Somme des erreurs absolues = 8.733E+02

où:

- a = 5.75E-01;
- b = -5.665E-02;
- c = 5.65E-02;
- d = -8.92E-04;
- f = 8.69E-04;
- décalage = 0.

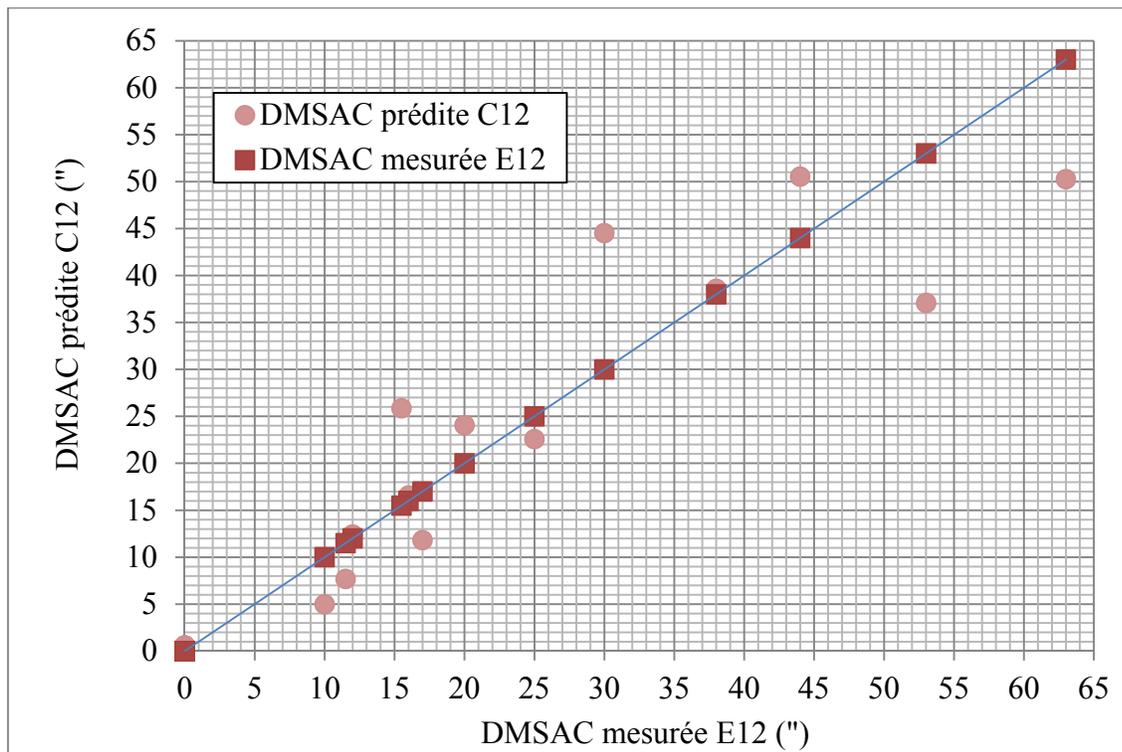


Figure-A VII.3-1 Comparaison entre DMSAC prédites par la fonction C12 et DMSAC mesurées avec la rampe E12

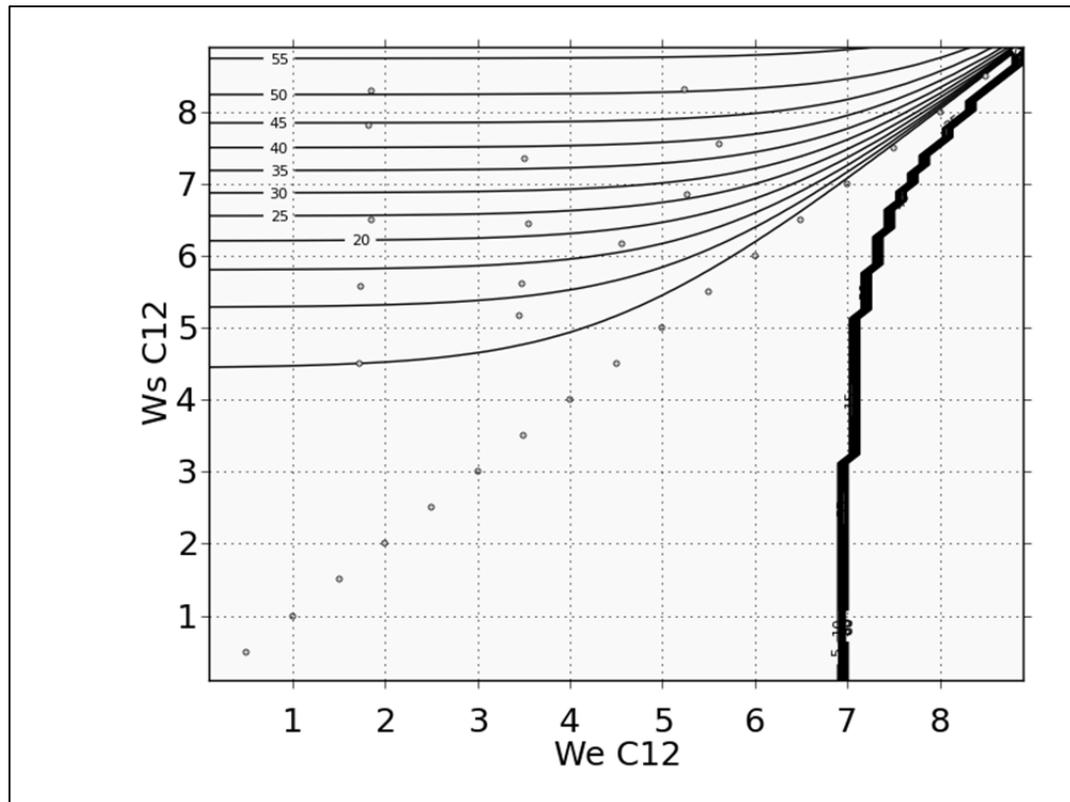


Figure-A VII.3-2 Isoplèthes fonction C12  
Tirée de ZunZun.com (2014)

#### VII.4 Fonction D12

$$DMSAC = a \cdot W_s^3 - b \cdot W_s \cdot W_e^2 + \text{décalage} \quad (\text{A VII-44})$$

Somme des erreurs absolues = 2.0204E+03

où:

- $a = 1.10\text{E-}01$ ;
- $b = 1.10\text{E-}01$ ;
- $\text{décalage} = 0$ .

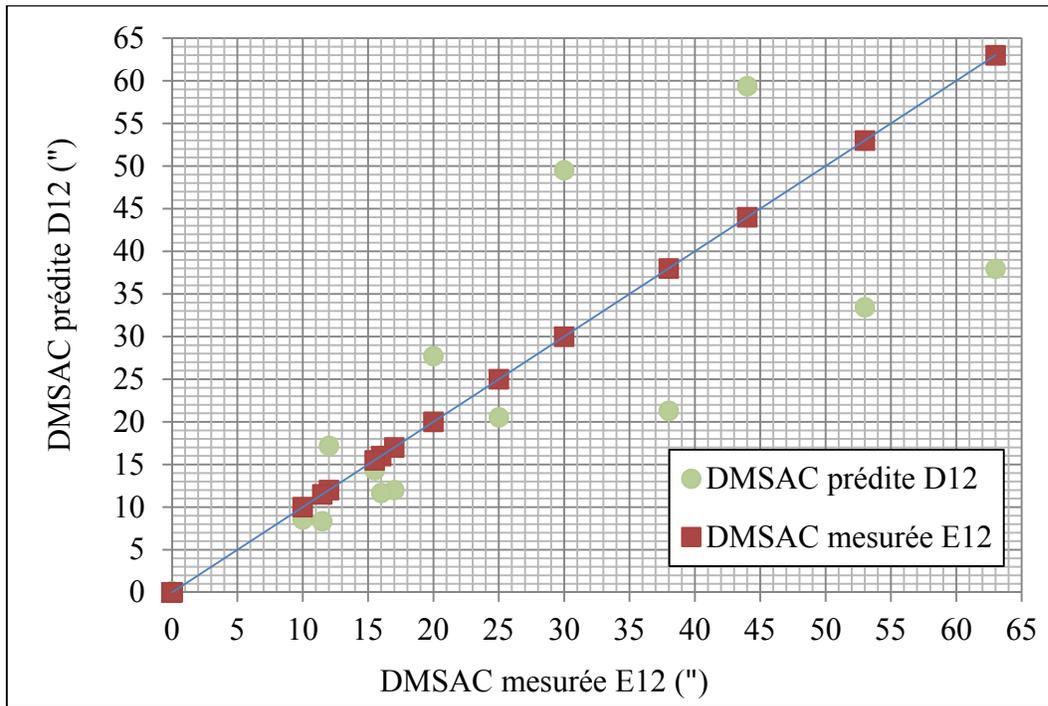


Figure-A VII.4-1 Comparaison entre DMSAC prédites par la fonction D12 et DMSAC mesurées avec la rampe E12

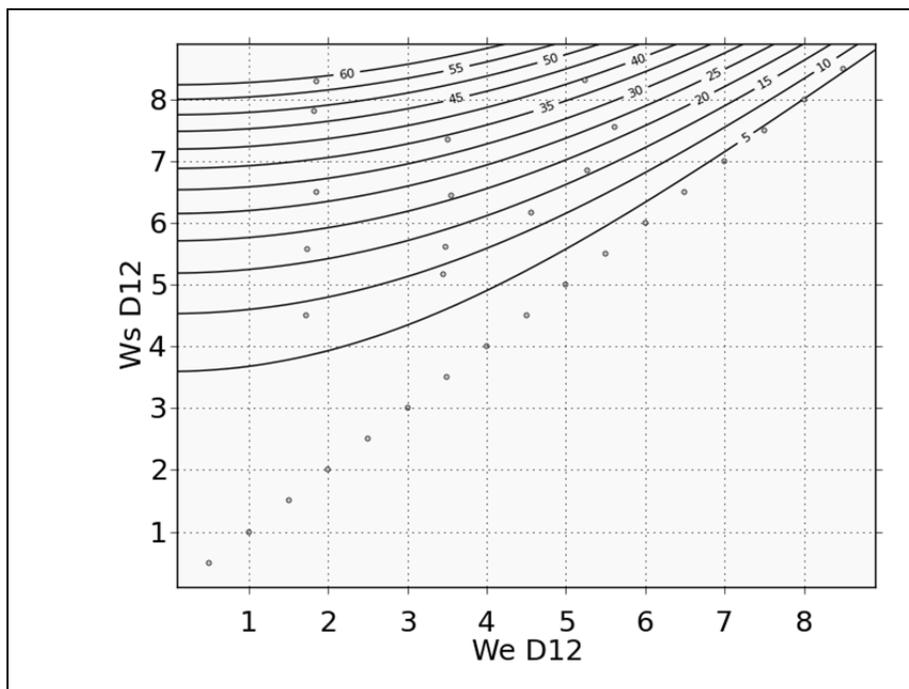


Figure-A VII.4-2 Isoplèthes fonction D12  
Tirée de ZunZun.com (2014)

## ANNEXE VIII

RÉSULTATS DE RÉGRESSIONS DES FAMILLES DE FONCTION  
PRÉSÉLECTIONNÉES POUR LA RAMPE E24

## VIII.1 Fonction A24

$$DMSAC = a \cdot (e^{b \cdot W_e} - e^{c \cdot W_s}) + \text{décalage} \quad (\text{A VIII-45})$$

Somme des erreurs absolues = 4.715E+01

où:

- $a = -1.0323\text{E}+01$ ;
- $b = 4.356\text{E}-01$ ;
- $c = 4.356\text{E}-01$ ;
- $\text{décalage} = 2.8\text{E}-02$ .

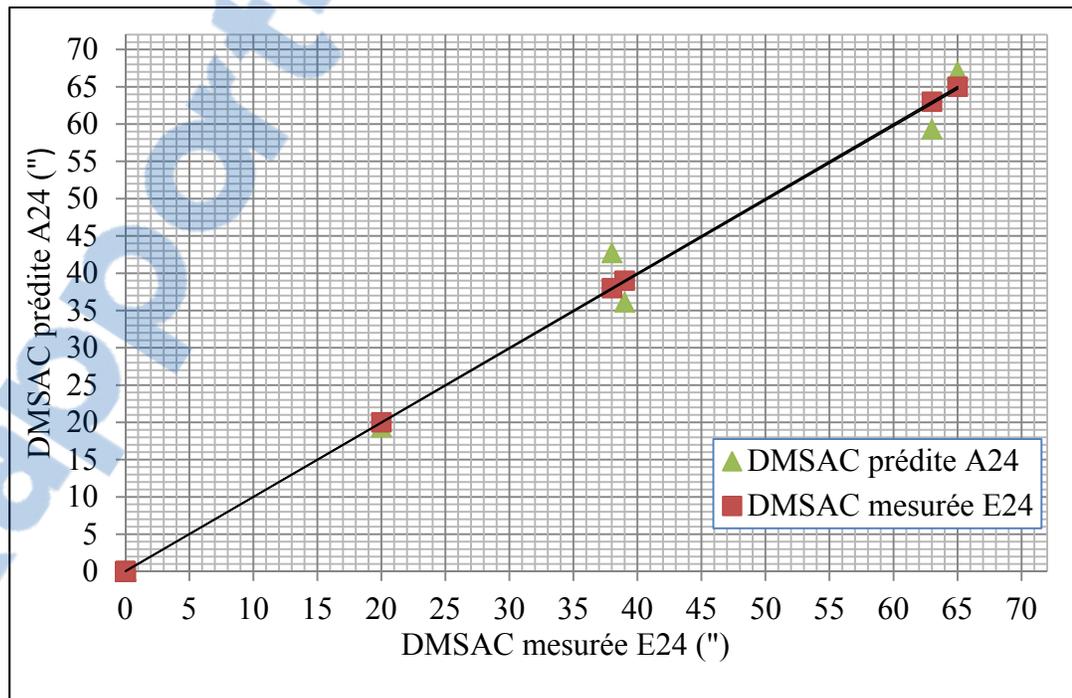


Figure-A VIII.1-1 Comparaison entre DMSAC prédites par la fonction A24 et DMSAC mesurées avec la rampe E24

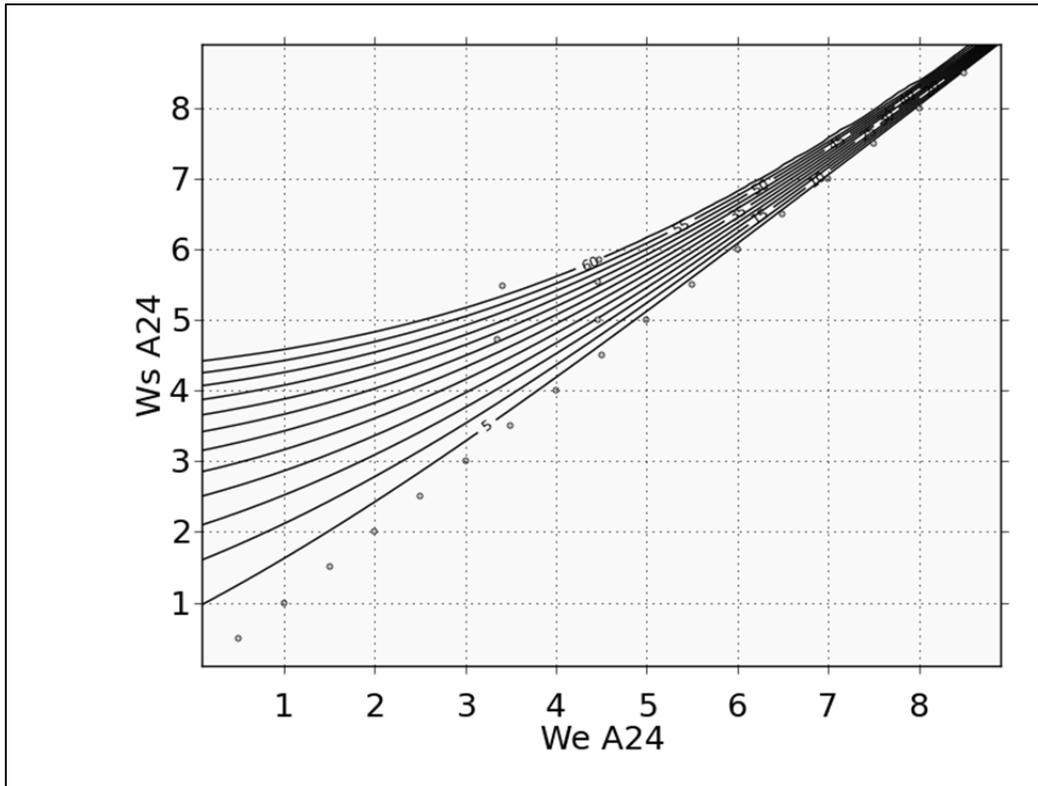


Figure-A VIII.1-2 Isoplèthes fonction A24  
Tirée de ZunZun.com (2014)

## VIII.2 Fonction B24

$$DMSAC = a \cdot W_e^b + c \cdot W_s^d + \text{décalage} \quad (\text{A VIII-46})$$

Somme des erreurs absolues : 5.26E+01

où:

- $a = -5.46\text{E-}01$ ;
- $b = 2.99\text{E+}00$ ;
- $c = 5.43\text{E-}01$ ;
- $d = 2.99\text{E+}00$ ;
- $\text{décalage} = 6.8\text{E-}02$ .

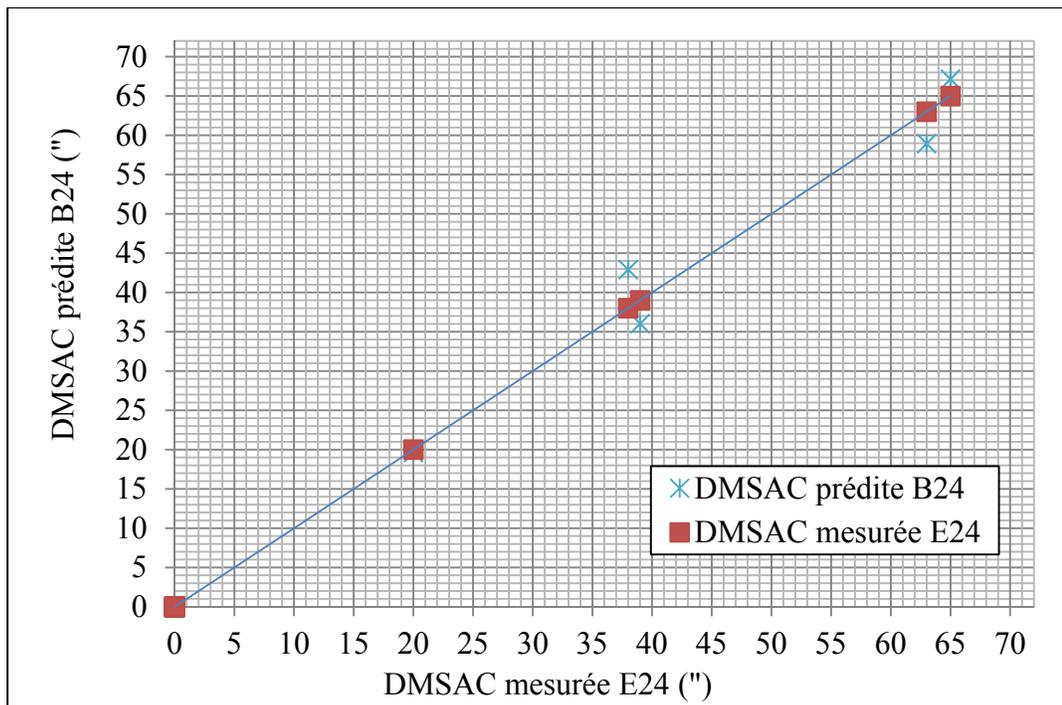


Figure-A VIII.2-1 Comparaison entre DMSAC prédite par la fonction B24 et DMSAC mesurées avec la rampe E24

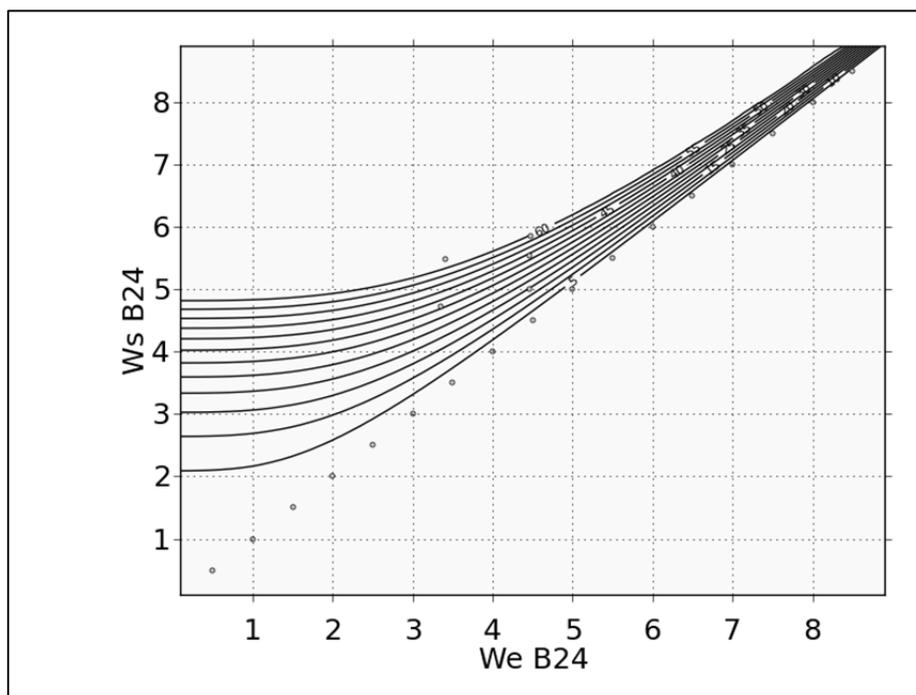


Figure-A VIII.2-2 Isoplèthes fonction B24  
Tirée de ZunZun.com (2014)

### VIII.3 Fonction C24

$$DMSAC = \frac{a + b \cdot e^{W_e} + c \cdot e^{W_s}}{1 + d \cdot e^{W_e} + f \cdot e^{W_s}} + \text{décalage} \quad (\text{A VIII-47})$$

où:

Somme des erreurs absolues : 6.15E+01

- $a = -4.714\text{E}+01$ ;
- $b = -1.164\text{E}+00$ ;
- $c = 5.417\text{E}-01$ ;
- $d = 8.406\text{E}-03$ ;
- $f = 4.7644\text{E}-03$ ;
- $\text{décalage} = 4.72\text{E}+01$ .

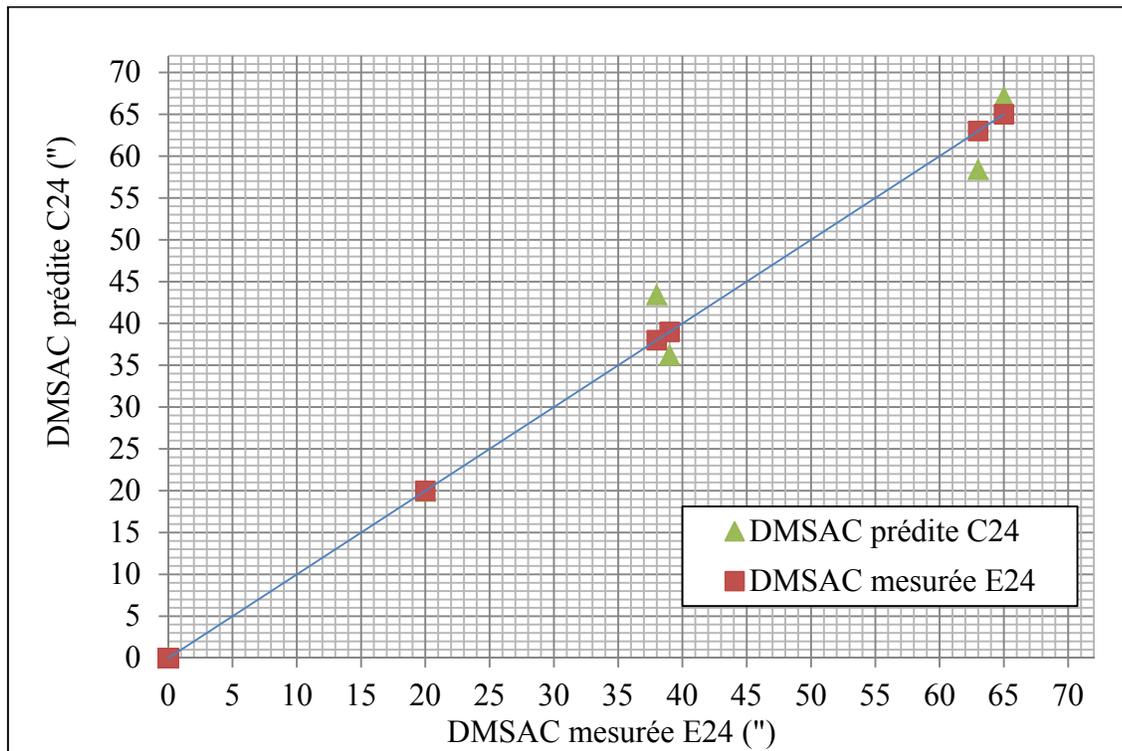


Figure-A VIII.3-1 Comparaison entre DMSAC prédites par la fonction C24 et DMSAC mesurées avec la rampe E24

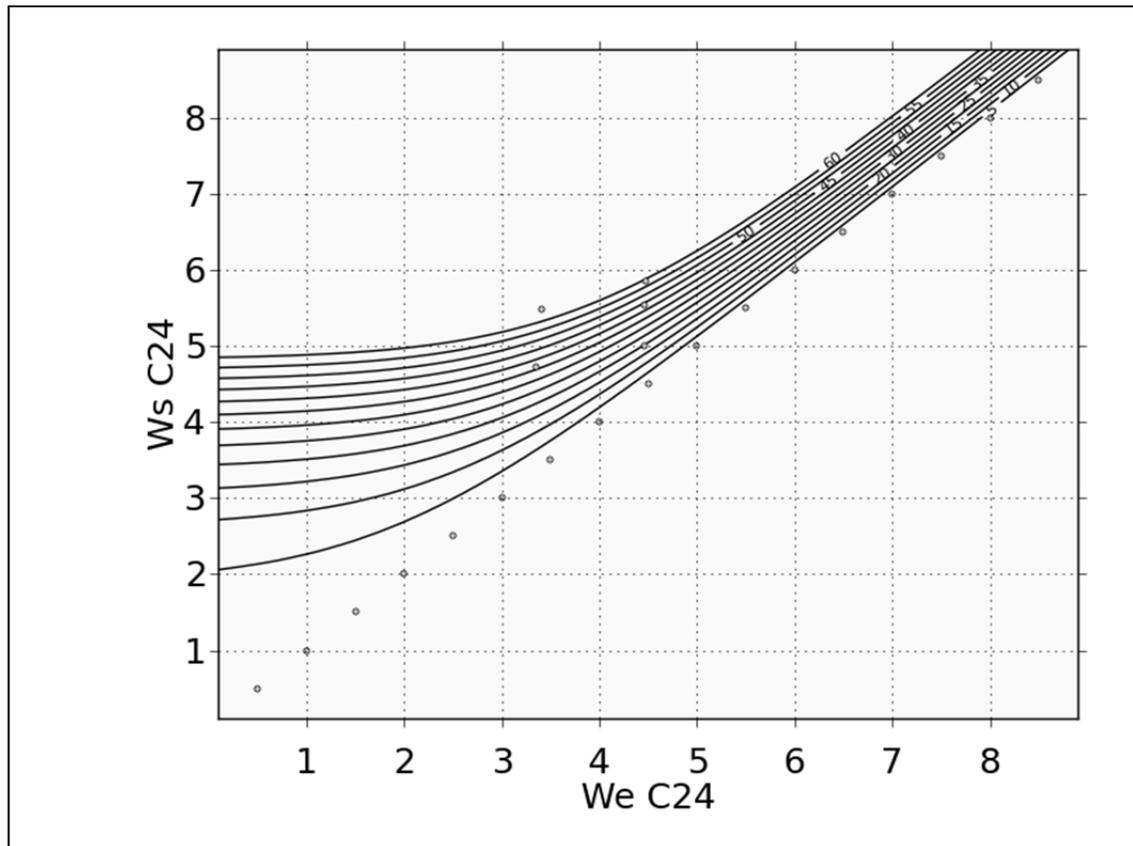


Figure-A VIII.3-2 Isoplèthes fonction C24  
Tirée de ZunZun.com (2014)

#### VIII.4 Fonction D24

$$DMSAC = a \cdot W_s^3 - b \cdot W_s \cdot W_e^2 + \text{décalage} \quad (\text{A VIII-48})$$

où:

Somme des erreurs absolues = 7.56E+01

- $a = 6.91\text{E-}01$ ;
- $b = 6.91\text{E-}01$ ;
- $\text{décalage} = 1.6\text{E-}01$ .

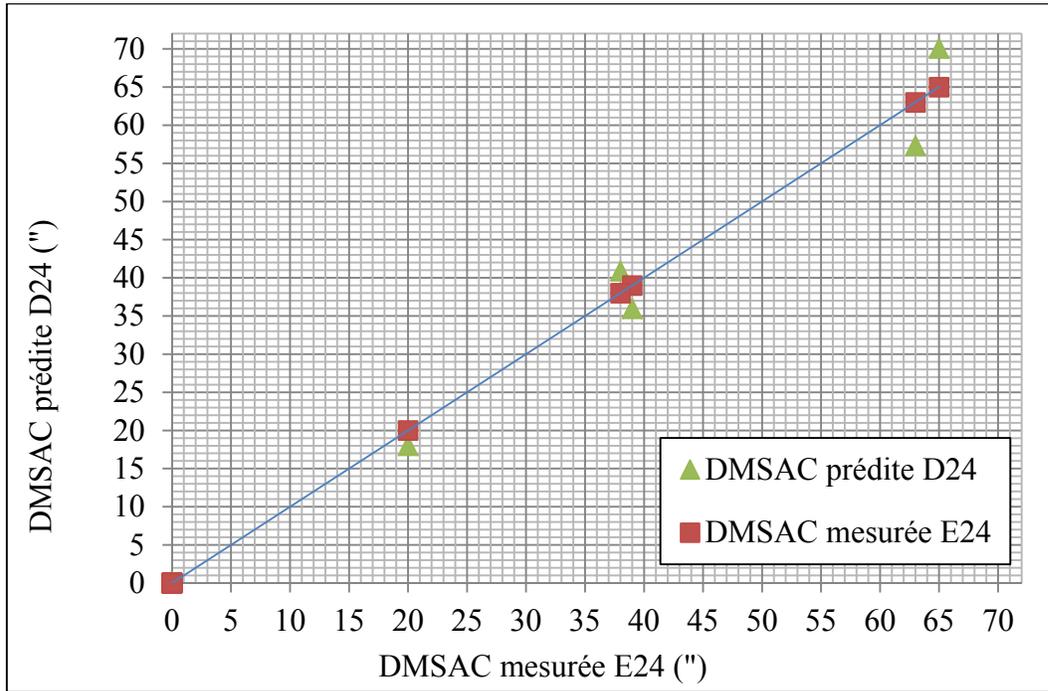


Figure-A VIII.4-1 Comparaison entre DMSAC prédites par la fonction D24 et DMSAC mesurées avec la rampe E24

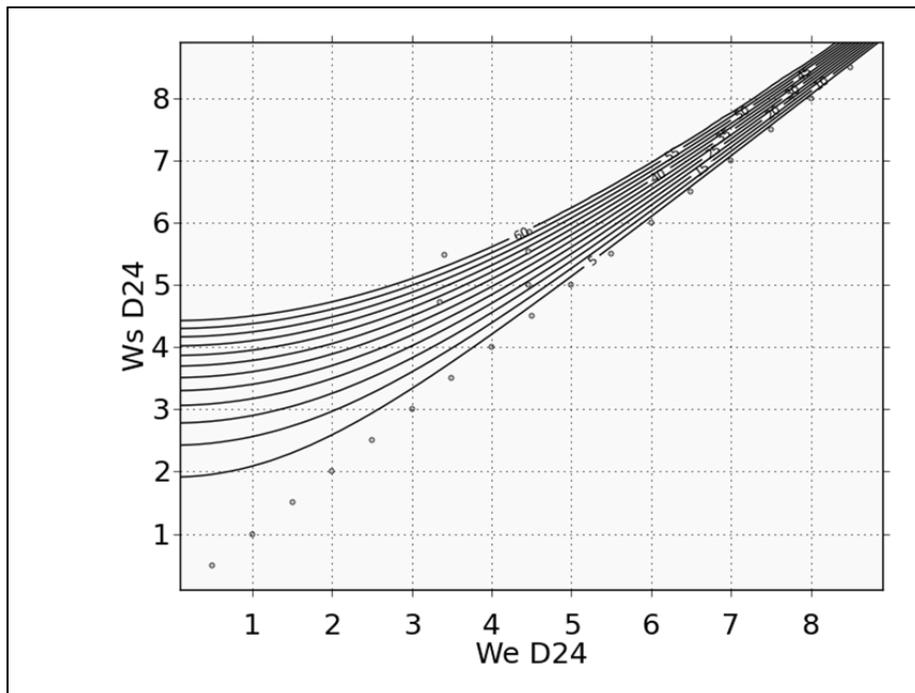


Figure-A VIII.4-2 Isoplèthes fonction D24  
Tirée de ZunZun.com (2014)

## BIBLIOGRAPHIE

- Arthur E. Wheeler. 2009. «Air Handling Unit Design for Energy Conservation». ASHRAE Journal, February, p. 40-50.
- ASHRAE. 1992. Standard Methods for Laboratory Airflow measurement. ANSI/ASHRAE Standard, 41.2-1987 (RA 92). 1791 Tullie Circle, NE, Atlanta, GA 30329-2305, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 32p.
- ASHRAE. 2009. 2009 ASHRAE Handbook—Fundamentals. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- ASHRAE. 2010. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ANSI/ASHRAE Standard, 55-2010. 1791 Tullie Circle, NE, Atlanta, GA 30329-2305, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 36p.
- 2012 ASHRAE Handbook - Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Systems and Equipment (I-P Edition). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Phillips, James. 2013. «Online Curve And Surface Fitting». In ZunZun.com. En ligne. <http://zunzun.com>. Consulté le 21 octobre 2013.
- Frank, M. White. 1998. Fluid Mechanics, 4th ed. McGrawHill, 832p.
- R. Journeaux. 1993. «La régression linéaire et ses conditions d'application». BULLETIN DE L'UNION DES PHYSICIENS, vol.87, n°752, Mars, p.353-369
- Sebastian Herrmann, Hans-Joachim Kretschmar & Donald P. Gatley (2009) Thermodynamic Properties of Real Moist Air, Dry Air, Steam, Water, and Ice (RP-1485), HVAC&R Research, 15:5, p.961-986.
- Yunus A. Çengel, Michael A. Boles. 2002. Thermodynamics : An Engineering Approach, 4th ed. New York : McGraw-Hill, 930p.

