

Prévention des risques chimiques et biologiques

# Études et recherches

RAPPORT R-873



## **Optimisation de SATURISK, l'outil de calcul du temps de service des cartouches de protection respiratoire contre les vapeurs organiques**

*Ludovic Tuduri  
Florence Janvier  
Yves Cloutier  
Josée Poulin  
Daniel Cossement  
Daniel Drolet  
Jaime Lara*



Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

## NOS RECHERCHES

*travaillent pour vous !*

### Mission

Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes;

Assurer la diffusion des connaissances et jouer un rôle de référence scientifique et d'expertise;

Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.

*Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission de la santé et de la sécurité du travail.*

### Pour en savoir plus

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement. [www.irsst.qc.ca](http://www.irsst.qc.ca)

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CSST. Abonnement : [www.csst.qc.ca/AbonnementPAT](http://www.csst.qc.ca/AbonnementPAT)

### Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec  
2015  
ISBN : 978-2-89631-800-1 (PDF)  
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications  
et de la valorisation de la recherche  
505, boul. De Maisonneuve Ouest  
Montréal (Québec)  
H3A 3C2  
Téléphone : 514 288-1551  
Télécopieur : 514 288-7636  
[publications@irsst.qc.ca](mailto:publications@irsst.qc.ca)  
[www.irsst.qc.ca](http://www.irsst.qc.ca)  
© Institut de recherche Robert-Sauvé  
en santé et en sécurité du travail,  
Mars 2015



Prévention des risques chimiques et biologiques

# Études et recherches

RAPPORT R-873

## Optimisation de SATURISK, l'outil de calcul du temps de service des cartouches de protection respiratoire contre les vapeurs organiques

### Avis de non-responsabilité

L'IRSST ne donne aucune garantie relative à l'exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l'information contenue dans ce document. En aucun cas l'IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l'utilisation de cette information.

Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle.

*Ludovic Tuduri<sup>1</sup>, Florence Janvier<sup>1,2</sup>,  
Yves Cloutier<sup>1</sup>, Josée Poulin<sup>1</sup>, Daniel Cossement<sup>3</sup>,  
Daniel Drolet<sup>1</sup>, Jaime Lara<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>IRSST

<sup>2</sup>Département de santé environnementale et santé au travail,  
Université de Montréal

<sup>3</sup>Institut de recherche sur l'hydrogène,  
Université du Québec à Trois-Rivières

Cliquez recherche  
 [www.irsst.qc.ca](http://www.irsst.qc.ca)



Cette publication est disponible  
en version PDF  
sur le site Web de l'IRSST.

## ÉVALUATION PAR DES PAIRS

Conformément aux politiques de l'IRSST, les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

## SOMMAIRE

L'exposition des travailleurs aux solvants, ou plus largement aux vapeurs organiques, doit être maîtrisée sinon maintenue en deçà des valeurs limites réglementaires. Lorsque l'ensemble des mesures administratives, d'ingénierie et de protection collective ne permet pas d'atteindre des niveaux d'exposition sans danger pour la santé, les travailleurs concernés doivent être équipés d'appareils de protection respiratoire (APR). En l'absence de situations de danger immédiat pour la vie et la santé (DIVS), les APR équipés de cartouches de filtration à base de charbon activé sont utilisés contre les vapeurs organiques. Se pose alors la question du temps de service de ces cartouches. Parmi les options disponibles pour y répondre, celle visant à mettre en œuvre des modèles prédictifs des temps de claquage est la plus utilisée.

Ainsi, l'objectif de ce projet consistait en la mise à jour de Saturisk, l'outil en ligne offert par l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) pour calculer le temps de service des cartouches pour les vapeurs organiques. Cette mise à jour visait notamment à intégrer un éventail plus large de cartouches et de solvants à Saturisk. En parallèle, le développement d'un système expérimental basé sur la miniaturisation des cartouches a été réalisé pour vérifier, dans des conditions contrôlées, les temps de service prédits par le modèle.

Le modèle de Wood a été choisi pour effectuer le calcul des temps de service. Les propriétés des charbons (volume microporeux, facteur de structure) ont pu être déterminées en utilisant trois approches expérimentales différentes, c.-à-d. l'adsorption de solvants sur cartouches réelles, l'adsorption de solvants sur minicartouches et, la plus classique, l'adsorption d'argon. La comparaison des résultats expérimentaux et des résultats calculés par le modèle montre que, de manière générale, les temps de service ou temps de claquage 10 %, sont sous-estimés de manière quasi systématique par le modèle (0-20 % environ). Cela représente un facteur de sécurité supplémentaire dans l'utilisation de cet outil pour établir la séquence de remplacement des cartouches dans un programme de protection respiratoire.

C'est l'adsorption de solvants sur cartouches réelles qui fournit les valeurs de volume microporeux et de facteur de structure avec lesquelles le modèle est le plus juste. Un nombre accru d'expérimentations permettrait de s'assurer statistiquement de cette conclusion, car les volumes microporeux et les facteurs de structure obtenus par les deux autres méthodes mènent également à des estimations acceptables des temps de service.

Le taux d'adsorption, une variable du modèle de Wood, a été déterminé selon deux méthodes empiriques de calcul. Bien que la méthode de Wu semble globalement améliorer la justesse du modèle, son utilisation dans la routine se heurte à l'absence de données bibliographiques concernant la constante diélectrique des vapeurs organiques. C'est donc la méthode de Wood-Stampfer qui a été retenue.

La miniaturisation des cartouches pour réaliser les tests de claquage s'est avérée prometteuse. Tant pour déterminer les volumes microporeux et facteurs de structure des charbons, que pour vérifier les données calculées par le modèle, les résultats sont encourageants : les temps de claquage 10 % mesurés expérimentalement pour les cartouches réelles et les minicartouches sont fortement corrélés. Il subsiste cependant des améliorations à apporter dans les hypothèses de

transposition réelles-mini, pour parvenir à une meilleure adéquation entre ces deux types de cartouche dans l'allure des courbes de claquage.

En le mettant à jour, l'utilitaire Saturisk pourra donc calculer les temps de service à partir d'une base de données de 167 vapeurs organiques, puisées à même l'annexe 1 du Règlement sur la santé et la sécurité du travail, et de 11 cartouches provenant de sept manufacturiers autorisés à vendre leurs produits sur le territoire québécois. Des rappels réglementaires spécifiques à certaines vapeurs organiques et aux conditions d'utilisation d'APR, ainsi que des limitations liées à l'utilisation de modèles seront fournis pour permettre d'exercer le meilleur jugement sur les temps de service calculés par Saturisk.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>SOMMAIRE</b> .....	<b>I</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES</b> .....	<b>III</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>V</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>VI</b>
<b>LISTE DES SYMBOLES, SIGLES ET ACRONYMES</b> .....	<b>VII</b>
<b>1. INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
1.1 Contexte de la santé et de la sécurité au travail au Québec .....	1
1.2 Les options pour déterminer les temps de service.....	2
1.2.1 L'approche expérimentale.....	2
1.2.2 Les indicateurs de fin de service .....	4
1.2.3 Les modèles prédictifs.....	4
1.3 Les outils de calculs pour les travailleurs.....	6
1.4 Objectifs .....	7
<b>2. MATÉRIELS ET MÉTHODES</b> .....	<b>9</b>
2.1 Choix des solvants .....	9
2.1.1 Solvants pour l'expérimentation .....	9
2.1.2 Solvants pour la base de données .....	9
2.2 Choix et caractérisation des cartouches et des charbons.....	11
2.2.1 Cartouches retenues pour l'étude .....	11
2.2.2 Caractérisation des cartouches .....	11
2.2.3 Caractérisation des charbons .....	11
2.3 Banc d'essai pour les tests de claquage .....	12
2.4 Modélisation et outil Saturisk .....	16
<b>3. RÉSULTATS ET DISCUSSION</b> .....	<b>17</b>
3.1 Caractérisation physique des cartouches et des charbons .....	17
3.1.1 Caractérisation des cartouches .....	17
3.1.2 Caractérisation des charbons .....	18

3.1.3	Conclusion.....	23
<b>3.2</b>	<b>Tests de claquage.....</b>	<b>23</b>
3.2.1	Répétabilité des tests de claquage .....	24
3.2.2	Allure des courbes de claquage.....	28
3.2.3	Comparaison des temps de claquage $T_{CL10\%}$ .....	31
3.2.4	Comparaison des temps de claquage $T_{CL50\%}$ .....	32
3.2.5	Comparaison des capacités d'adsorption $We$ .....	34
3.2.6	Conclusion.....	36
<b>3.3</b>	<b>Prévisions du modèle de Wood .....</b>	<b>37</b>
3.3.1	Contexte .....	37
3.3.2	Détermination de $W_0$ et $B$ par adsorption de solvants.....	38
3.3.3	Comparaison et évaluation des couples $(W_0; B)$ .....	39
3.3.4	Calcul des temps de claquage $T_{CL10\%}$ .....	42
3.3.5	Conclusion.....	46
<b>4.</b>	<b>SATURISK : UNE BRÈVE PRÉSENTATION .....</b>	<b>49</b>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>51</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>55</b>



## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Comparaison des attributs de trois outils de calcul de temps de service en ligne. ....	6
Tableau 2. Composés cibles et propriétés physicochimiques. ....	10
Tableau 3. Cartouches à l'étude. ....	17
Tableau 4. Dimensions et données clés des différentes cartouches. ....	18
Tableau 5. Synthèse des données de l'adsorption à l'argon sur les charbons. Densité et fraction granulométrique 70 %. ....	22
Tableau 6. Données propres à chaque essai de claquage pour les essais de répétabilité sur les cartouches 3M 6001. ....	26
Tableau 7. Synthèse des volumes microporeux ( $W_0$ ) et des facteurs de structure $B$ des 11 charbons. ....	39
Tableau 8. Capacités d'adsorption mesurées par pesée et calculées avec l'équation D-R. ....	40
Tableau 9. Capacités d'adsorption mesurées par pesée et calculées avec l'équation D-R. ....	41
Tableau 10. Différences relatives moyennes et médianes : $T_{CL10\%}$ mesurés et calculés. ....	45
Tableau 11. Différences relatives moyennes : $T_{CL10\%}$ mesurés et calculés, par composé. ....	45
Tableau 12. Différences relatives moyennes: $T_{CL10\%}$ mesurés et calculés, par cartouche. ....	46
Tableau 13. Conditionnalités pour effectuer un calcul dans Saturisk. ....	50

## LISTE DES FIGURES

Figure 1. Courbes de claquage pour deux composés différents, sur la cartouche MOLDEX 7100. ....	3
Figure 2. Banc d'essai pour les tests de claquage (échelle non respectée). ....	13
Figure 3. Minicartouche (A) et tube à remplissage (B). ....	15
Figure 4. Distribution granulométrique des granules de charbon dans les cartouches. ....	19
Figure 5. Isothermes d'adsorption de l'argon à 87 K. ....	20
Figure 6. Distribution de la structure poreuse des charbons selon le modèle DFT. ....	21
Figure 7. Courbes de claquage des cinq composés sur la cartouche réelle et la minicartouche 3M 6001-répétabilité. ....	25
Figure 8. Comparaison des épaisseurs de charbon entre une cartouche réelle et une minicartouche. ....	27
Figure 9. Courbes de claquage sur la cartouche SURVIVAIR 100100, versions réelle et mini...	29
Figure 10. Courbes de claquage sur la cartouche SUNDSTRÖM SR218-6, versions réelle et mini. ....	30
Figure 11. Comparaison des temps de claquage 10 % pour les cartouches réelles et mini. ....	32
Figure 12. Comparaison des temps de claquage 50 % pour les cartouches réelles et mini. ....	33
Figure 13. Comparaison des capacités d'adsorption (par pesée) pour les cartouches réelles et mini. ....	35
Figure 14. Comparaison des capacités d'adsorption déterminée par pesée et calcul pour les cartouches réelles et mini. ....	36
Figure 15. Linéarisation de l'équation de D-R pour les charbons 3M 6001 et MSA COMFO. ...	38
Figure 16. Adéquation entre $T_{CL10\%}$ mesurés et calculés. ....	44

## LISTE DES SYMBOLES, SIGLES ET ACRONYMES

$b$ :	$3.56 \cdot 10^{-5} (\text{mL}_{\text{adsorbat}}/\text{mol})^{1.8}(\text{mole}/\text{cal})^2(1/\text{mL}_{\text{micropores}})$
$B$ ou $k$ :	Facteur de structure du charbon $(\text{mL}_{\text{adsorbat}}/\text{mol})^{1.8}(\text{mole}/\text{cal})^2$
$C_0$ et $C_x$ :	Concentration en vapeur organique (g/L) à l'entrée et à la sortie de la cartouche
$d_L$ :	Densité liquide (g/mL)
$e$ :	Épaisseur du lit de charbon dans la cartouche réelle à reproduire (cm)
$k_v$ :	Taux d'adsorption (1/min)
$M_w$ :	Masse molaire du solvant (g/mol)
$m_{CA}$ :	Masse de charbon à introduire dans la minicartouche (g)
$n_D$ :	Indice de réfraction du solvant
$P_0$ :	Pression de vapeur saturante d'un composé (mm Hg)
$P/P_0$ :	Pression relative, rapport entre pression partielle et pression de vapeur saturante
$P_e$ :	Polarisation moléculaire (mL/mol)
$PS$ :	Centile 70 de la distribution de la taille des granules de charbon (mm)
$Q_{\text{mini}}$ :	Débit à travers la minicartouche (L/min)
$Q_{\text{réelle}}$ :	Débit à travers la cartouche réelle (L/min)
$Q$ :	Débit d'air à travers la cartouche (L/min)
$R$ :	Constant des gaz parfaits (1,987 cal/mol*K)
$r$ :	Rayon de la minicartouche (cm)
$S_{\text{mini}}$ :	Section de la minicartouche (cm <sup>2</sup> )
$S_{\text{réelle}}$ :	Section de la cartouche réelle (cm <sup>2</sup> )
$Sol_{\text{eau}}$ :	Solubilité dans l'eau (g/L)
$T$ :	Température (K ou °C)
$T_{eb}$ :	Température d'ébullition (K ou °C)
$T_{CL}$ :	Temps de claquage (min)
$T_{CL10\%}$ :	Temps de claquage à 10 % de la saturation (min)
$T_{CL50\%}$ :	Temps de claquage à 50 % de la saturation (min)
$W_0$ :	Volume microporeux (mL/g <sub>charbon</sub> )
$W_e$ :	Capacité d'adsorption du charbon (g/g)
$W$ :	Masse de charbon dans la cartouche (g)
$v_L$ :	Vitesse linéaire (cm/s)
$\varepsilon$ :	Constante diélectrique (D)
$\rho$ :	Densité apparente du charbon (g/L)
AIHA :	American Industrial Hygiene Association
ACGIH :	American Conference of Governmental Industrial Hygienists
APR :	Appareils de protection respiratoire
BET :	Brunauer-Emmett et Teller
BJH :	Barret, Joyner, Halenda
CMU :	Concentration maximale d'utilisation

CSA :	Canadian Standard Association-(appelée « groupe CSA »)
CSST :	Commission de la santé et de la sécurité du travail
CV :	Coefficient de variation
DFT :	Density Functional Theory
DIVS :	Danger immédiat pour la vie ou la santé
D-R :	Dubinin-Radushkevich
EQCOTESST :	Enquête québécoise sur des conditions de travail, d'emploi et de santé et sécurité du travail
FPC :	Facteur de protection caractéristique
IRSST :	Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail
IUPAC :	International Union of Pure and Applied Chemistry
LSST :	Loi sur la santé et la sécurité du travail
NIOSH :	National Institute for Occupational Safety and Health
OSHA :	Occupational Safety and Health Administration
PEL :	Permissible Exposure Limit
RSST :	Règlement sur la santé et la sécurité du travail
TLV <sup>®</sup> :	Threshold Limit Values
VEA :	Valeur d'exposition admissible
VECD :	Valeur d'exposition courte durée
VEMP :	Valeur d'exposition moyenne pondérée
W-J :	Wheeler-Jonas
WEELS <sup>®</sup> :	Workplace Environmental Exposure Levels

## 1. INTRODUCTION

### 1.1 Contexte de la santé et de la sécurité au travail au Québec

Afin de protéger la santé et la sécurité des travailleurs, le Québec s'est doté en 1979, d'une Loi sur la santé et la sécurité du travail (LSST) [1] et de nombreux règlements, notamment le Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST) [2]. Ce dernier établit des normes relatives à divers paramètres, notamment sur la qualité de l'air, la ventilation, l'hygiène et les équipements de protection individuelle. Dans l'hypothèse où le danger ne pourrait être éliminé à la source ou réduit par des mesures soit administratives, soit d'ingénierie telle que la ventilation, des équipements de protection individuelle doivent être fournis aux travailleurs. En particulier, les appareils de protection respiratoire (APR) devraient être utilisés quand la teneur en oxygène de l'air ambiant est inférieure à 19,5 %, en cas de danger immédiat pour la vie ou la santé (DIVS), et/ou quand les concentrations atmosphériques de contaminants réglementés dépassent les valeurs d'exposition admissibles (VEA, p. ex. VEMP ou VECD) de l'annexe 1 du RSST. Quelles que soient la nature et la concentration des contaminants, les APR utilisés au Québec doivent :

- être approuvés par le National Institute of Occupational Safety and Health (NIOSH);
- être prévus au Guide des appareils de protection respiratoire utilisés au Québec [3];
- être choisis, ajustés, utilisés et entretenus conformément à la norme Choix, entretien et utilisation des respirateurs, CSA Z94.4-93 [4].

Par ailleurs, un programme de protection respiratoire doit être élaboré et mis en œuvre par chaque employeur. Pour encourager le respect de la réglementation en vigueur, et faciliter son application, la Commission de la santé et de la sécurité du travail (CSST) a publié un guide réglementaire et un guide pratique sur la protection respiratoire, préparés par l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST), renfermant de précieuses informations [3,5].

Les APR peuvent être scindés en deux grands types : les APR à approvisionnement d'air (adduction d'air, appareils autonomes) et les APR à épuration d'air (motorisé, ou à pression négative). Ces derniers sont les plus utilisés. Leur principe de fonctionnement est relativement simple : l'air est épuré en traversant un médium filtrant quand les contaminants sont à l'état particulaire, ou un médium adsorbant dans le cas de polluants gazeux, avant d'être respiré par les travailleurs.

Parmi les contaminants gazeux, on compte :

- des molécules inorganiques, telles que le dioxyde de soufre, le chlore ou l'ammoniac. Pour ces composés, le médium adsorbant est souvent du charbon actif. Il possède une importante surface spécifique grâce à sa microporosité, et est imprégné de réactifs divers selon la nature du contaminant. Ce dernier est piégé par réaction chimique. Quand la totalité du réactif de la cartouche est consommé, la cartouche n'est plus en mesure d'épurer l'air, et la protection respiratoire n'est plus assurée.

- des vapeurs organiques, qui sont souvent des solvants. Ceux-ci sont utilisés dans l'industrie pour de multiples applications [6]. Le nombre de travailleurs exposés aux solvants au Québec a été évalué entre 150 000 et 320 000 par Gérin et Bégin en 1995 [7] et, selon l'Enquête québécoise sur des conditions de travail, d'emploi et de santé et sécurité du travail (EQCOTESST) publiée en 2011, il serait de 312 000 [8]. Pour ce type de molécules, le charbon actif est également préconisé comme adsorbant de choix dans les cartouches, boîtiers ou « canisters », sans imprégnation chimique. Les interactions adsorbant-adsorbat sont faibles, l'adsorption est réversible et compétitive. La capacité d'adsorption d'un charbon est finie, c'est-à-dire que lorsque celui-ci est saturé, la cartouche ne protège plus l'utilisateur, et des effets de relargage peuvent entraîner une exposition malgré le port de l'APR, à des concentrations supérieures à la concentration ambiante.

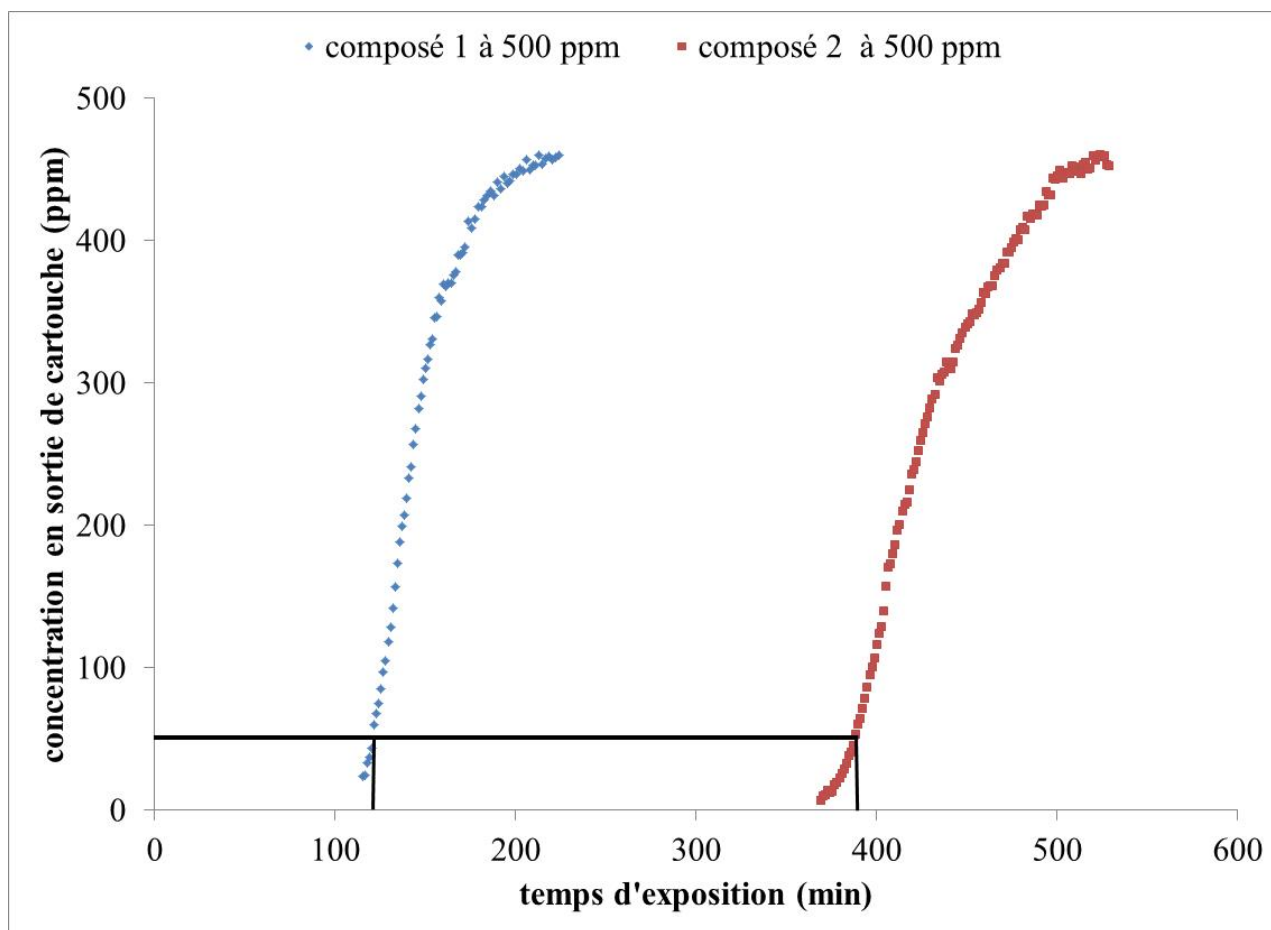
Il est donc nécessaire de déterminer un temps d'utilisation sécuritaire, ou temps de service, pour les cartouches à épuration d'air protégeant contre les contaminants gazeux. La section suivante présente les différentes options pour la détermination de ce temps de service, en mettant l'emphase sur les cartouches de protection respiratoire contre les vapeurs organiques, objet principal de l'étude.

## **1.2 Les options pour déterminer les temps de service**

Historiquement, la fin de service des cartouches des APR était souvent déterminée de manière arbitraire. Il était recommandé de changer de cartouches lorsque le travailleur portant l'APR détectait une odeur, un goût, ou bien percevait une irritation. Dans la mesure où le niveau de détection olfactif n'est pas identique chez l'ensemble des travailleurs, et que la toxicité d'un composé n'est en rien liée à l'intensité de l'odeur, l'exposition à des vapeurs toxiques était toujours probable, et les risques d'atteintes à la santé insuffisamment contrôlés. Il appert donc qu'il est important de pouvoir établir le temps de service en se basant sur des données objectives. Plusieurs approches peuvent être mises en œuvre pour y parvenir, telles que décrites ci-dessous.

### **1.2.1 L'approche expérimentale**

Cette approche vise à reproduire en laboratoire des conditions d'exposition retrouvées en milieu de travail (types de vapeurs organiques, concentrations, température, débit respiratoire, taux d'humidité). De l'air contaminé par des vapeurs organiques à concentrations connues est aspiré à travers une cartouche et l'évolution de la concentration en sortie de cartouches est mesurée. Les résultats typiques de telles expérimentations, des courbes de claquage, sont illustrés à la Figure 1.



**Figure 1. Courbes de claquage pour deux composés différents, sur la cartouche MOLDEX 7100.**

Aucune trace de contaminant n'est détectée après utilisation d'une cartouche pendant 110 min pour le composé 1 et 360 min pour le composé 2, les deux composés ayant une volatilité différente. Puis les concentrations augmentent rapidement pour atteindre la concentration d'exposition, soit 500 ppm. La détermination du temps de service repose sur le jugement d'expert, mais la concentration en sortie de cartouche doit nécessairement rester inférieure à la VEMP. Une pratique largement acceptée dans le domaine de la protection respiratoire consiste à utiliser le « temps de claquage 10 % » comme référence pour établir le temps de service [9]. Celui-ci est défini comme le temps où la concentration en sortie de cartouche est égale à 10 % de la concentration d'exposition.

Cette approche expérimentale s'avère très utile à des fins de recherche pour étudier notamment l'effet des facteurs environnementaux (taux d'humidité, concentrations, exposition à des mélanges de composés) ou respiratoires sur les performances des cartouches [10-12], ainsi que pour comparer les cartouches entre elles. C'est aussi grâce à ce genre d'expérimentations, dont les résultats peuvent être regroupés en « base de données », que l'on peut tester la validité de modèles prédictifs des temps de service [9], ou déterminer des propriétés importantes du charbon activé [13].

Par contre, cette approche ne semble pas soutenable pour établir des temps de service de manière routinière. Il existe en effet autant de conditions d'exposition que de travailleurs, et donc autant d'expérimentations requises pour établir les temps de service.

### 1.2.2 Les indicateurs de fin de service

Un indicateur de fin de service doit signaler au porteur de l'APR que le claquage (saturation) de la cartouche est amorcé, et donc qu'il commence à inhaler des contaminants malgré sa protection respiratoire. Il existe une multitude de procédés brevetés, basés sur des systèmes de détection différents. L'avertissement lancé au travailleur peut être visuel ou sonore. Favas en propose un très bon aperçu dans son rapport [14]. Malgré cela, de tels dispositifs ne sont pas encore intégrés aux cartouches de protection contre les vapeurs organiques. Les principales raisons avancées sont la spécificité (capacité à détecter une molécule en particulier) du système de détection, son coût, et les interférences avec l'humidité. Il est raisonnable de penser qu'outre la spécificité, la calibration de tels dispositifs, intégrables à l'APR ou à la cartouche, et donc la maintenance entraîneraient une gestion plus lourde que celle en place actuellement dans les entreprises.

### 1.2.3 Les modèles prédictifs

Pour combler les lacunes des approches décrites ci-dessus, nombre de modèles permettant de prédire les temps de service ont été proposés. Par modèle, on entend le couplage d'équations qui permettent de décrire le phénomène d'adsorption des vapeurs organiques sur le charbon activé, et la courbe de claquage, telle que décrite à la Figure 1. Une revue exhaustive de ces modèles a été publiée [15]. Depuis cette publication, un ancien modèle, nouvellement adapté à la protection respiratoire a cependant été proposé [16], et comparé à celui qui est largement utilisé et accepté, le modèle de Wood [17].

Le modèle de Wood utilise l'équation de Dubinin-Radushkevich (D-R, [18]) pour décrire les isothermes d'adsorption des vapeurs organiques et l'équation de Wheeler Jonas (W-J, [19,20]) pour décrire les courbes de claquage :

$$T_{CL} = \frac{W_e W}{C_0 Q} - \frac{W_e \rho}{k_v C_0} L n \left( \frac{C_0 - C_x}{C_0} \right) \text{ éq. (1)}$$

avec

$T_{CL}$  : Temps de claquage (min)

$W_e$  : Capacité d'adsorption du charbon (g/g)

$W$  : Masse de charbon dans la cartouche (g)

$C_0$  et  $C_x$  : Concentration en vapeur organique (g/L) à l'entrée et à la sortie de la cartouche

$Q$  : Débit d'air à travers la cartouche (L/min)

$\rho$  : Densité apparente du charbon (g/L)

$k_v$  : Taux d'adsorption (1/min)

Dans cette équation,  $W$ ,  $Q$ ,  $\rho$ ,  $C_0$  et  $C_x$  sont, soit spécifiques à la cartouche utilisée, soit fixés par les conditions d'utilisation de la cartouche. Ce sont donc des données faciles à obtenir. La capacité d'adsorption  $W_e$  est, quant à elle, obtenue par l'équation de D-R, adaptée par Wood [21]:



$$W_e = W_0 * d_L e^{\left(-BP_e^{-1.8} * R^2 * T^2 * Ln^2\left(P/P_0\right)\right)} \text{ éq. (2)}$$

avec

$W_0$ : Volume microporeux (mL/g<sub>charbon</sub>)

$d_L$ : Densité liquide (g/mL)

$B$ : Facteur de structure du charbon (mL<sub>adsorbat</sub>/mol)<sup>1.8</sup>(mol/cal)<sup>2</sup>

$P_e = \left(\frac{n_D^2 - 1}{n_D^2 + 2}\right) * \frac{M_w}{d_L}$  éq. (3) Polarisation moléculaire (mL/mol)

$R$ : Constant des gaz parfaits (1,987 cal/mole\*K)

$T$ : Température (K)

$P/P_0$ : Pression relative, rapport entre pression partielle et pression de vapeur saturante

Cette forme de l'équation diffère d'autres proposées dans la littérature [18,22] pour être plus facilement utilisable en protection respiratoire. Il s'agit d'éviter les expérimentations pour obtenir les valeurs des variables de cette équation. Ainsi, n'apparaissent plus le facteur de structure du charbon,  $k$ , ainsi que  $\beta$ , le coefficient d'affinité du solvant pour le charbon, ou encore  $E_0$ , l'énergie d'adsorption caractéristique. Wood [21] a établi que :

$$k = B = b * W_0 \text{ éq. (4)}$$

et

$$\beta^2 = P_e^{1.8} \text{ éq. (5)}$$

avec

$b$ :  $3.56 \cdot 10^{-5}$  (mL<sub>adsorbat</sub>/mol)<sup>1.8</sup>(mole/cal)<sup>2</sup>(1/mL<sub>micropores</sub>)

$n_D$ : Indice de réfraction du solvant

$M_w$ : Masse molaire du solvant (g/mol)

En connaissance de  $W_0$ , déterminé expérimentalement, il est possible de calculer  $W_e$  avec l'équation (2), et de le substituer dans l'équation (1). Pour calculer  $T_{CL}$ , seule la valeur du taux d'adsorption  $k_v$  reste à déterminer, pour lequel il existe différentes relations empiriques (par exemple [23,24]).

Le modèle de Wood présenté reste simple, et valable sous certaines conditions. D'autres paramètres environnementaux d'exposition, comme le taux d'humidité et les atmosphères multicontaminées (mélanges de solvants), impactant le calcul du temps de claquage/service, ont été étudiés, et le modèle adapté [25,26]. Par ailleurs, les temps de service estimés ne prennent en compte qu'une utilisation continue, et non intermittente, à des concentrations d'exposition constantes. En effet, « l'histoire » d'une cartouche entre deux utilisations est difficilement modélisable étant donnée les variables nécessaires pour la traduire telles que les conditions de stockage (durée, température, humidité). Par exemple, lors d'une période de stockage des APR entre deux quarts de travail, il est probable que les vapeurs adsorbées migrent au sein du lit de charbon dans la cartouche, et que le temps de service soit plus court que celui qui est calculé. Ce phénomène de migration a été peu étudié [27], et en général, le risque est plus important pour les

composés à température d'ébullition inférieure à 65 °C [28]. Enfin, pour les faibles pressions relatives ( $P/P_0 < 1,5 \cdot 10^{-3}$ ), le modèle de D-R ne semble pas adapté, et surestime les quantités adsorbées [22].

### 1.3 Les outils de calculs pour les travailleurs

Afin d'estimer le bon temps d'utilisation, seuls quelques grands manufacturiers proposent des outils de calcul en ligne; on peut notamment citer 3M, MSA, et SCOTT Safety [29-31]. Il s'agit alors pour les utilisateurs d'entrer les conditions environnementales d'exposition, le type de cartouche et le débit respiratoire du travailleur pour que l'utilitaire en ligne fournisse une estimation du temps de service. Chaque utilitaire possède un degré de convivialité variable, et ses propres attributs.

Le **Tableau 1** présente les disparités entre outils.

**Tableau 1. Comparaison des attributs de trois outils de calcul de temps de service en ligne.**

	3M	MSA	SCOTT Safety
Débit respiratoire	« light », « medium » ou « heavy »	30, 60, 85 L/min ou choisi par l'utilisateur	20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 L/min ou choisi par l'utilisateur
Valeur d'exposition admissible	Plus basse valeur entre ACGIH TLVs <sup>®</sup> , OSHA PEL, ou AIHA WEELS*	OSHA PEL*	Choisie par l'utilisateur
Calcul du temps de claquage	50 % de la valeur d'exposition admissible retenue	10 % et 50 % de la valeur d'exposition admissible ou choisie par l'utilisateur	100 % de la valeur d'exposition admissible Indications graphiques pour autres proportions

\* : signification des acronymes dans la table des abréviations, sigles et acronymes.

Outre ces disparités, qui ne permettent pas de comparer les cartouches des différents manufacturiers entre elles, le modèle prédictif utilisé par chacune des compagnies pour calculer le temps de service n'est pas clairement explicité.

Pour permettre aux travailleurs d'élargir leur choix et de comparer leurs cartouches de protection respiratoire de la manière la plus objective qui soit, des organismes œuvrant en santé et en sécurité du travail proposent également de tels outils. C'est le cas du NIOSH aux États-Unis avec MultiVapor [32] ou encore de l'Institut national de recherche et de sécurité (INRS) en France avec Prémédia [33]. L'IRSST a de son côté mis en ligne Saturisk en 2008 [34]. Cet utilitaire a été créé sur la base de l'expertise construite depuis plusieurs années à l'IRSST [35,36], un organisme privé à but non lucratif voué à la recherche en santé et en sécurité du travail. À partir d'un même modèle prédictif, des données de caractérisation de charbons et de cartouches générées à l'IRSST uniquement, et tenant compte des VEMP québécoises pour environ 130 composés, Saturisk peut calculer des temps de service pour six cartouches de protection contre les vapeurs organiques provenant de compagnies différentes.

Ces utilitaires peuvent accompagner et faciliter la mise en place des fréquences de remplacement de cartouches dans les programmes de protection respiratoire des milieux professionnels concernés. Dans un domaine comme la protection respiratoire où, tant la réglementation que l'offre commerciale peuvent rapidement évoluer, la mise à jour de tels utilitaires, et toute approche facilitant cette mise à jour, est d'intérêt.

## 1.4 Objectifs

L'objectif de ce projet est donc de mettre à jour l'utilitaire Saturisk, et d'entreprendre le développement d'une approche expérimentale fiable, et plus simple à mettre en œuvre que le test d'adsorption sur cartouches réelles, afin d'en vérifier les résultats. Afin d'y parvenir, les sous-objectifs suivants devront être atteints :

- répertorier les cartouches approuvées par le NIOSH et potentiellement offertes sur le territoire québécois, et mettre à jour la base de données « cartouches »;
- caractériser physiquement les charbons et cartouches;
- mettre à jour la base de données « vapeurs organiques »;
- développer un système expérimental à échelle réduite (minicartouche) permettant de caractériser la performance des charbons et des cartouches respiratoires et, dans une étape ultérieure, de vérifier expérimentalement les temps de claquage calculés par le modèle;
- affiner le modèle de Wood;
- effectuer une validation interne des résultats du modèle.



## **2. MATÉRIELS ET MÉTHODES**

### **2.1 Choix des solvants**

#### **2.1.1 Solvants pour l'expérimentation**

Une première étude de l'IRSST sur 11 solvants [36] a abouti à la mise en ligne de Saturisk. Le choix des solvants avait été basé sur leur occurrence en milieu de travail et la possibilité de couvrir une large gamme de propriétés physicochimiques influençant l'adsorption : volatilité, polarité, solubilité dans l'eau et encombrement stérique.

Dans la présente étude, le choix a été restreint à cinq composés, couvrant un large domaine de volatilité, et une solubilité dans l'eau limitée ou très limitée. L'hypothèse formulée est que, grâce à ces cinq solvants, il sera possible d'obtenir des informations sur le volume microporeux de ces charbons, ainsi que sur leur facteur de structure respectif, en utilisant l'équation de D-R. Le Tableau 2 répertorie ces composés.

#### **2.1.2 Solvants pour la base de données**

Le port d'APR étant conditionné par le dépassement des valeurs limites d'exposition (VEMP), les contaminants présents dans l'annexe 1 du RSST en date du 1<sup>er</sup> février 2014 ont été considérés pour constituer la base de données « solvants » de Saturisk. Différents filtres ont ensuite été appliqués afin d'inclure uniquement les composés pertinents, comme suit :

- nature organique de la molécule;
- applicabilité de l'approche de Wood (composé liquide à la température ambiante);
- volatilité de la molécule ( $40\text{ °C} < T_{eb} < 250\text{ °C}$ );
- exclusion des mélanges de solvants commerciaux et autres composés (p. ex. Naphta-distillats de pétrole, solvant Stoddard, térébenthine, isocyanates...);
- disponibilité des propriétés physicochimiques (paramètres d'Antoine, indice de réfraction...).

Les propriétés physicochimiques ont été documentées à partir de 15 références, listées dans l'annexe A.

**Tableau 2. Composés cibles et propriétés physicochimiques.**

Acronyme	Numéro CAS	$M_w$ (g/mol)	$P_0$ [36] (mmHg à 25 °C)	$P_e$ [37] (mL/mol)	$\epsilon$ [38]	$d_L$ [37] (g/mL) 20-25 °C)	$T_{eb}$ [37] (°C)	$Sol_{eau}$ [39] (g/L)	
chlorure de méthylène	DCM	75-09-2	84,94	434,7	16,345	9,14	1.3255	39,75	13
méthylisobutylcétone	MIBK	108-10-1	100,16	18,49	30,059	15,10	0,7965	115,7	19
toluène	TOL	108-88-3	92,15	28,97	31,116	2,39	0,8623	110,6	0,526
n-hexane	HEX	110-54-3	86,18	147,6	29,700	1,89	0,6606	68,72	0,009
m-xylène	XYL	108-38-3	106,16	6,66	35,970	2,36	0,8598	139,1	0,146

$M_w$  : Masse molaire du solvant;  $P_0$  : Pression de vapeur saturante du composé;  $P_e$  : Polarisation moléculaire;  $\epsilon$  : Constante diélectrique;  $d_L$  : Densité liquide;  $T_{eb}$  : Température d'ébullition;  $Sol_{eau}$  : Solubilité dans l'eau

## **2.2 Choix et caractérisation des cartouches et des charbons**

### **2.2.1 Cartouches retenues pour l'étude**

Les cartouches de protection respiratoire contre les vapeurs organiques en vente au Québec doivent être approuvées par le NIOSH. L'utilisation de la « Certified Equipment List » [40] du NIOSH a permis de construire le répertoire de base des cartouches de protection respiratoire (approuvés sous le sigle « TC23 ») efficaces contre les vapeurs organiques uniquement, utilisables avec des APR à pression négative, approuvés entre le 1<sup>er</sup> janvier 1990 et le 1<sup>er</sup> janvier 2012. Une mise à jour a été effectuée en milieu d'année 2013.

Les sites Web des manufacturiers ont ensuite été consultés pour s'assurer que les cartouches n'étaient pas obsolètes, et que la distribution commerciale pouvait théoriquement se faire au Québec. Un contact téléphonique avec chacune des compagnies a ensuite été établi afin de discuter qualitativement de leurs ventes sur le territoire québécois, et donc de la pertinence d'inclure certaines cartouches dans Saturisk. À l'issue de ces discussions, plusieurs cartouches ont été supprimées de la liste initiale.

### **2.2.2 Caractérisation des cartouches**

Afin de pouvoir utiliser le modèle de Wood, et proposer une approche expérimentale simplifiée pour étudier le claquage des cartouches, la détermination de certaines propriétés physiques des cartouches a été nécessaire : la masse de charbon, la teneur en eau de ce charbon, l'épaisseur du lit de charbon, la section, et la densité apparente. La plupart des cartouches n'étant pas cylindriques, la section de la cartouche par laquelle entre l'air contaminé a été mesurée.

### **2.2.3 Caractérisation des charbons**

En plus de la nécessité de connaître certaines propriétés des cartouches pour être en mesure d'utiliser le modèle de Wood, s'est ajoutée la caractérisation des charbons qu'elles contiennent.

#### **2.2.3.1 Granulométrie**

La granulométrie des charbons a été déterminée par tamisage, avec des tamis de tailles 0,50; 0,84; 1,00; 1,19; 1,25; 1,70; 2,00 et 2,36 mm. L'équation de Wu [24] fait intervenir le centile 70 (taille de granules de charbon au-dessus de laquelle 70 % d'entre elles se trouvent) pour calculer le taux d'adsorption  $k_v$ .

#### **2.2.3.2 Densité apparente du charbon**

Deux mesures de densité ont été effectuées : la première pour estimer le compactage du charbon dans la cartouche, en utilisant la masse de charbon et le volume de cette cartouche, et la seconde selon la méthode normalisée ASTM D2854-2009 [41].

### 2.2.3.3 Surface spécifique et structure poreuse des charbons [42]

La surface spécifique se définit par la formation d'une monocouche d'argon sur toute la surface du charbon et se calcule à partir de la relation de Brunauer-Emmett et Teller (BET).

La caractérisation poreuse des charbons a été effectuée en déterminant les isothermes d'adsorption d'argon (Ar) à une température de 87 K. Les résultats obtenus sont en principe équivalents à ceux par adsorption d'azote (N<sub>2</sub>), mais la distribution de tailles de pores par l'argon semblerait être plus juste (porosité plus fine), du fait de son inertie chimique, et des faibles interactions spécifiques de l'argon avec les groupements fonctionnels carbonés de la surface de l'adsorbant [43].

Les isothermes ont été mesurées entre  $P/P_0=10^{-6}$  et  $P/P_0=1$ , avec un appareil Micromeritics ASAP 2020.

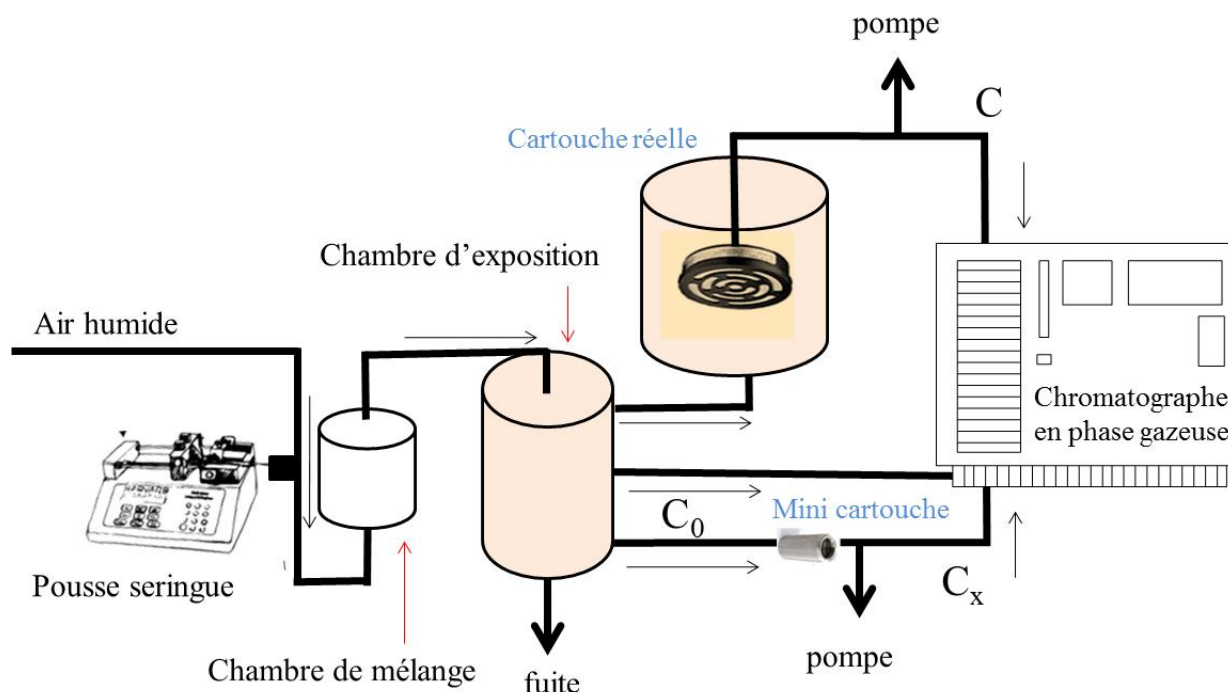
Les surfaces microporeuses et externes des charbons, ainsi que le volume microporeux ont été déterminés en traitant les résultats expérimentaux avec la « méthode t » (t-method ou t-plot). Le volume microporeux a également été déterminé avec la méthode de D-R. Le volume mésoporeux a été calculé selon le modèle de Barret, Joyner, Halenda (BJH). La distribution de la structure microporeuse est modélisée selon la théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT- Density Functional Theory).

Par ailleurs, le volume microporeux, ainsi que le facteur de structure ( $B$ , éq. 4) de ces charbons ont également été déterminés expérimentalement, suite aux tests de claquage effectués sur les charbons à l'étude, en utilisant une approche décrite par Cossement *et coll.* [36] et Wood [44] pour les cartouches de protection respiratoire, et selon l'utilisation de l'équation de D-R.

## 2.3 Banc d'essai pour les tests de claquage

Le banc d'essai utilisé est représenté à la Figure 2.





**Figure 2. Banc d'essai pour les tests de claquage (échelle non respectée).**

Il est composé de trois parties :

- Partie 1 : le système de génération des atmosphères contaminées

Un débit continu de solvant, injecté par un pousse-seringue KD Scientific Legato 210 est évaporé dans un « T » d'injection par de l'air humide à 40 %, à un débit de 40 L/min, généré par un appareil « Miller Nelson » HCS 501. Cette technique de génération d'atmosphères étalons et les calculs de concentration sont répertoriés dans la norme NF EN ISO 6145-4 [45]. La concentration de travail visée pour tous les solvants testés est de 500 ppm.

- Partie 2 : le système d'exposition

L'air contaminé traverse une chambre de mélange en verre, puis une chambre d'exposition en aluminium. L'humidité et la température sont mesurées en continu à l'aide d'un hygromètre VAISALA HM 34 ( $22 \pm 2$  °C,  $40 \pm 5$  % RH). L'air est ensuite aspiré à travers les cartouches « réelles » à un débit de 24 L/min mesuré en continu à l'aide d'un débitmètre TSI 4000, grâce à une pompe à vide. En parallèle, une seconde voie est également présente pour aspirer l'air à travers une « minicartouche » censée reproduire à échelle réduite la cartouche réelle testée sur l'autre voie.

L'hypothèse formulée est qu'une cartouche de format réduit pourrait reproduire le comportement d'une cartouche de taille réelle, afin de déterminer les capacités d'adsorption  $W_e$ , les courbes de

claquage et les temps de claquage  $T_{CL}$ . Les avantages de l'utilisation de minicartouches seraient une consommation réduite de solvants et une simplification de la mise en œuvre des expérimentations. Les débits sont variables, et calculés selon la cartouche réelle reproduite. La « minicartouche » est un tube en inox de diamètre interne 2,4 cm et de longueur 5 cm. Chaque extrémité est constituée d'une grille amovible à larges trous, sur laquelle repose un tissu/feutre pour retenir le charbon. La quantité de charbon à introduire ainsi que le débit d'air à travers une minicartouche sont calculés en considérant que l'épaisseur du lit de charbon et la vitesse de l'air sont identiques pour la cartouche réelle et la minicartouche. On utilise les relations suivantes pour les calculs :

$$m_{CA} = \pi * r^2 * e * \rho \text{ éq. (6)}$$

avec

$m_{CA}$  : Masse de charbon à introduire dans la minicartouche (g)

$r$  : Rayon de la minicartouche (cm)

$e$  : Épaisseur du lit de charbon dans la cartouche réelle à reproduire (cm)

$\rho$  : Densité apparente du charbon dans la cartouche réelle à reproduire (g/cm<sup>3</sup>)

$$Q_{mini} = S_{mini} * \frac{Q_{réelle}}{S_{réelle}} \text{ éq. (7)}$$

avec

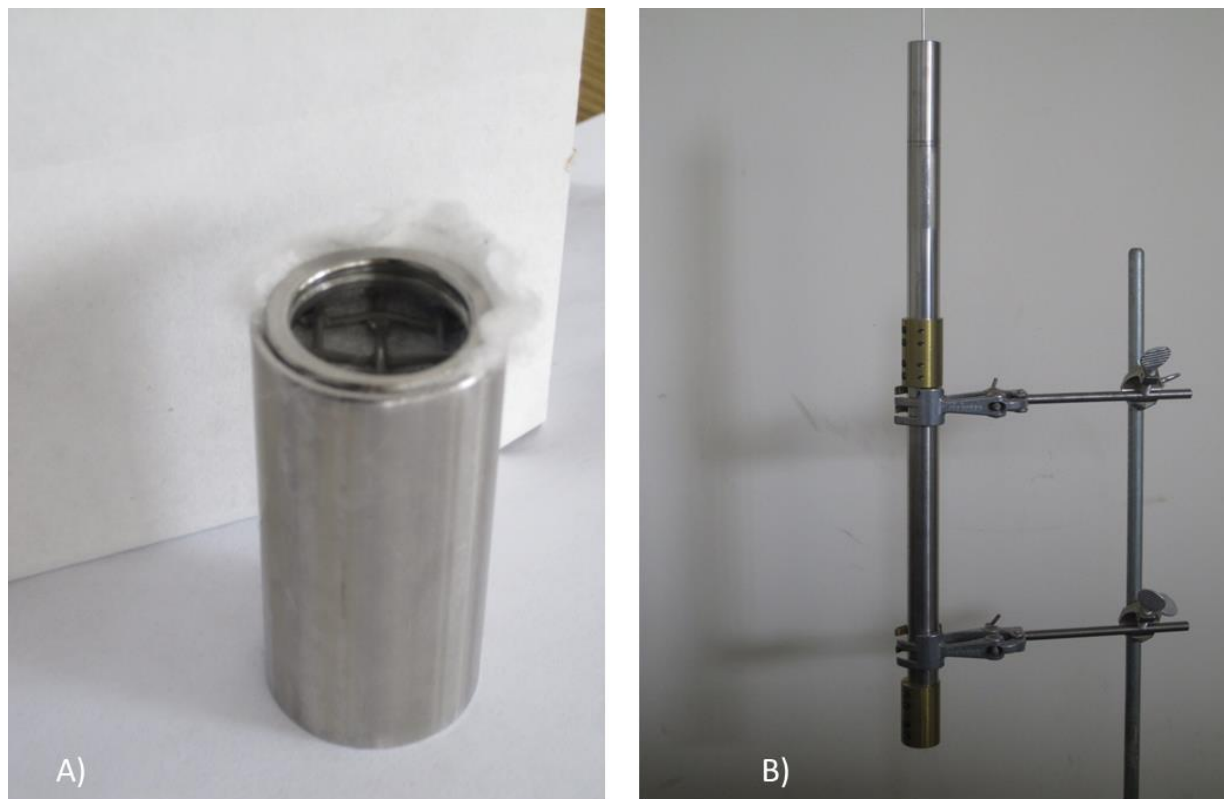
$Q_{mini}$  : Débit à travers la minicartouche (L/min)

$S_{mini}$  : Section de la minicartouche (cm<sup>2</sup>)

$S_{réelle}$  : Section de la cartouche réelle (cm<sup>2</sup>)

$Q_{réelle}$  : Débit à travers la cartouche réelle (L/min)

Le remplissage se fait selon la méthode « snowstorm filling » [46]. La quantité de charbon requise est introduite au sommet d'un tube, bouché à l'instant initial, équipé de chicanes à l'intérieur. La minicartouche est fixée à l'extrémité inférieure et on laisse s'écouler le charbon du haut du tube, vers la cartouche. La Figure 3 présente le montage opérationnel.



**Figure 3. Minicartouche (A) et tube à remplissage (B).**

– Partie 3 : le système d'analyse et de collecte des données

Un chromatographe en phase gazeuse HP 5890, équipé d'un détecteur FID, d'une vanne d'injection six voies (VICI A60), d'une boucle d'injection de 250  $\mu\text{L}$ , d'une colonne en silice fondue et désactivée (40 cm x 0,32 mm) est utilisé pour l'analyse. Il est précédé d'un sélecteur de voies pour l'échantillon à analyser, ce qui permet d'analyser successivement la concentration d'exposition ( $C_0$ ) et les concentrations en sortie des deux cartouches ( $C_x$ ). Le four est réglé à 200 °C en mode isothermale, le détecteur FID à 250 °C. Les débits de gaz sont 5 mL/min pour le gaz vecteur (hélium), 30, 30 et 400 mL/min pour l'azote (make-up), l'hydrogène et l'air, respectivement. L'ensemble des données est collecté par un logiciel « maison » et les résultats d'intégration des chromatogrammes sont enregistrés sous format Excel.

L'étalonnage du chromatographe, réalisé de manière hebdomadaire ou à chaque changement de solvant de travail, se fait avec cinq atmosphères contaminées, générées avec le banc de dilution. Les concentrations étalons sont comprises entre 20 et 700 ppm.

## 2.4 Modélisation et outil Saturisk

Saturisk utilise l'équation de Wheeler-Jonas, rappelée ci-dessous, pour le calcul des temps de claquage :

$$T_{cl} = \frac{W_e W}{C_0 Q} - \frac{W_e \rho}{k_v C_0} \text{Ln} \left( \frac{C_0 - C_x}{C_0} \right) \text{ éq. (1)}$$

Dans cette équation :

- $W$  et  $\rho$  sont spécifiques à la cartouche et déterminés comme indiqué en 1.2.3.
- $C_0$  et  $Q$  sont choisis par l'utilisateur dans Saturisk.
- $C_x$  est choisi par Saturisk :
  - Pour  $C_0 \leq VEMP$ ,  $C_x = 0,1 * C_0$ .
  - Pour  $C_0 > VEMP$ ,  $C_x = 0,1 * VEMP$ .
- $k_v$  : plusieurs expressions empiriques sont disponibles pour le calcul du taux d'adsorption. Dans cette étude, celle utilisée dans la version initiale de Saturisk [47] sera comparée à celle de Wu *et coll.* :

$$k_v = \left\{ \left[ \frac{1}{\vartheta_L} + 0,027 \right] * \left[ 0,000825 + \frac{0,063 - 0,058 \text{Ln} \frac{C_0 - C_x}{C_0}}{P_e} \right] \right\} \text{ éq. (8) [47]}$$

ou:

$$k_v = 3920 + 165,2\vartheta_L - 2060 PS - 32,2\varepsilon \text{ éq. (9) [24]}$$

avec

$\vartheta_L$  : vitesse linéaire (cm/s)

$P_e$  : Polarisabilité moléculaire (cm<sup>3</sup>/mol)

$PS$  : Centile 70 de la distribution de la taille des granules de charbon (mm)

$\varepsilon$  : Constante diélectrique (D)

- $W_e$  la capacité d'adsorption sera calculée grâce à l'équation de D-R

$$W_e = W_0 * d_L e^{\left( -BP_e^{-1,8} * R^2 * T^2 * \text{Ln}^2 \left( P/P_0 \right) \right)} \text{ éq. (2)}$$

Les résultats fournis par Saturisk ne sont valables que pour des humidités relatives inférieures ou égales à 65 %. Au-delà de ce seuil, l'humidité entraîne des changements dans les capacités et la cinétique d'adsorption [48-50]. Un message indique que l'estimation est imprécise.

Lorsque plusieurs contaminants sont présents dans l'atmosphère, les concentrations, exprimées en ppm, sont additionnées, et la somme est attribuée au composé migrant le plus vite à travers la cartouche. Le temps de claquage est alors calculé avec ce composé. En effet, dans le cas des mélanges de vapeurs organiques, les phénomènes d'adsorption/désorption ou d'adsorption compétitive ont été identifiés et modélisés [51-53]. L'approche adoptée pour l'utilitaire Saturisk est calquée sur celle d'OSHA [28] qui a tenu compte de ces travaux.

### 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

À l'issue de la phase d'identification des cartouches potentiellement présentes sur le marché québécois, 11 modèles, provenant de sept fournisseurs ont été retenus pour l'étude (Tableau 3).

**Tableau 3. Cartouches à l'étude.**

Compagnies	Référence commerciale	Nom dans Saturisk
3M	70070316776	3M 6001
HONEYWELL SAFETY	N75001L	NORTH 75001L
	B100100 ou T100100	SURVIVAIR 100100
MSA	464031	MSA COMFO
	815535	MSA ADVANTAGE
MOLDEX	7100	MOLDEX 7100
	8100	MOLDEX 8100
DRÄGER	67 38 024	DRÄGER X-plore
SCOTT SAFETY	7422-BC1	SCOTT 7422-BC1
	7422-BA1	SCOTT 7422-BA1
SUNDSTRÖM	H02-2121	SUNDSTRÖM SR 218-6

Lors de cette recension, une concentration des fournisseurs d'appareils et de cartouches de protection respiratoire a été constatée. Le cas le plus concret est celui d'HONEYWELL SAFETY, qui possède les marques « NORTH » et « SPERIAN ». Antérieurement, les produits PROTECH RESPIRATORS, SURVIVAIR, BACOU, BACOU-DALLOZ ainsi que WILLSON avaient déjà été acquis par SPERIAN.

L'annexe A présente les vapeurs organiques présentes dans la nouvelle base de données Saturisk, choisies selon les critères explicités en 2.1.2. Le nombre passe d'environ 130 dans l'outil Saturisk actuel, à 167. Contrairement à l'originale, la nouvelle base de données contient uniquement des substances pour lesquelles le temps de claquage est calculable.

### 3.1 Caractérisation physique des cartouches et des charbons

#### 3.1.1 Caractérisation des cartouches

La caractérisation des cartouches va permettre d'obtenir des données telles que  $W$ ,  $\rho$  et  $\vartheta_L$ , nécessaires à l'utilisation du modèle de Wood. Les données contenues dans le Tableau 4 montrent que les cartouches ont une section comprise entre 40 et 60 cm<sup>2</sup>, et une masse de charbon entre 40 et 50 g. La cartouche SUNDSTRÖM SR 218-6 se distingue par une section et une masse de charbon plus importantes. Les masques SUNDSTRÖM ne doivent être munis que d'une seule cartouche, ce qui explique la section et la masse de charbon plus importantes dans les cartouches correspondantes. Sauf pour la cartouche NORTH 75001L, les teneurs en eau oscillent entre 2,4 et 4,0 %.

**Tableau 4. Dimensions et données clés des différentes cartouches.**

	Section (cm <sup>2</sup> )	Masse <i>W</i> (g)	Teneur en eau (%)	Cylindre ?
3M 6001	63,18	45,76	2,4	NON
NORTH 75001L	44,05	41,84	0,2	NON
SURVIVAIR 100100	50,54	50,84	2,1	OUI
MSA COMFO	41,26	42,39	4,3	OUI
MSA ADVANTAGE	53,10	50,49	3,9	NON
MOLDEX 7100	45,94	48,45	3,9	OUI
MOLDEX 8100	45,34	37,87	4,0	OUI
DRÄGER X-plore	53,90	47,98	3,2	NON
SCOTT 7422-BC1	59,93	54,82	3,8	NON
SCOTT 7422-BA1	59,93	33,44	3,3	NON
SUNDSTRÖM SR 218-6	72,80	99,97	2,6	OUI

### 3.1.2 Caractérisation des charbons

#### 3.1.2.1 Distribution granulométrique

La Figure 4 présente la distribution granulométrique cumulative des 11 charbons à l'étude. Les différentes fractions sont fortement similaires d'un charbon à l'autre. Les valeurs de *PS* (éq. 9), soit la taille des granules de charbon correspondant au 70<sup>e</sup> centile de la distribution granulométrique déterminée graphiquement et répertoriée dans le Tableau 5 sont en conséquence semblables. Elles varient entre 1,05 et 1,15 mm pour 10 des 11 cartouches. Ainsi, cette variable ne devrait pas, dans le calcul des  $k_v$  selon l'approche de Wu [24], contribuer de manière importante à la différenciation des valeurs calculées pour chaque cartouche. Autrement dit, si les valeurs de  $k_v$  d'un composé devaient varier avec la cartouche, la contribution du paramètre *PS* à cette variation serait faible.

La cartouche SUNDSTRÖM SR 218-6 présente une granulométrie atypique, avec un *PS* de 1,50 mm. Comme indiqué plus haut, une seule cartouche équipe les masques SUNDSTRÖM; le débit d'air respiratoire n'est donc pas partagé entre 2 voies, comme pour les autres cartouches. Pour réduire la résistance respiratoire (perte de charge) liée au port de l'APR, des granules de charbon d'un diamètre plus élevé ont certainement été choisies.

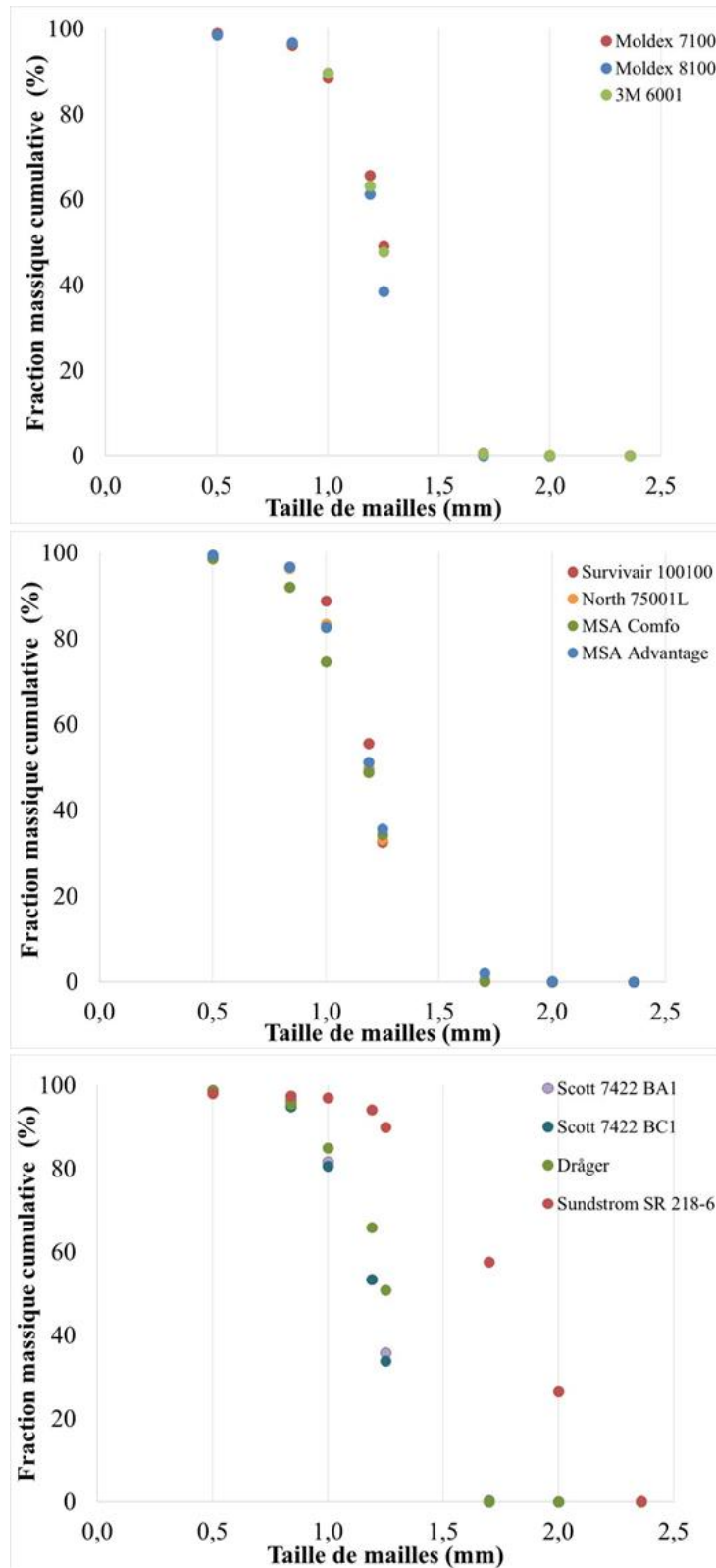
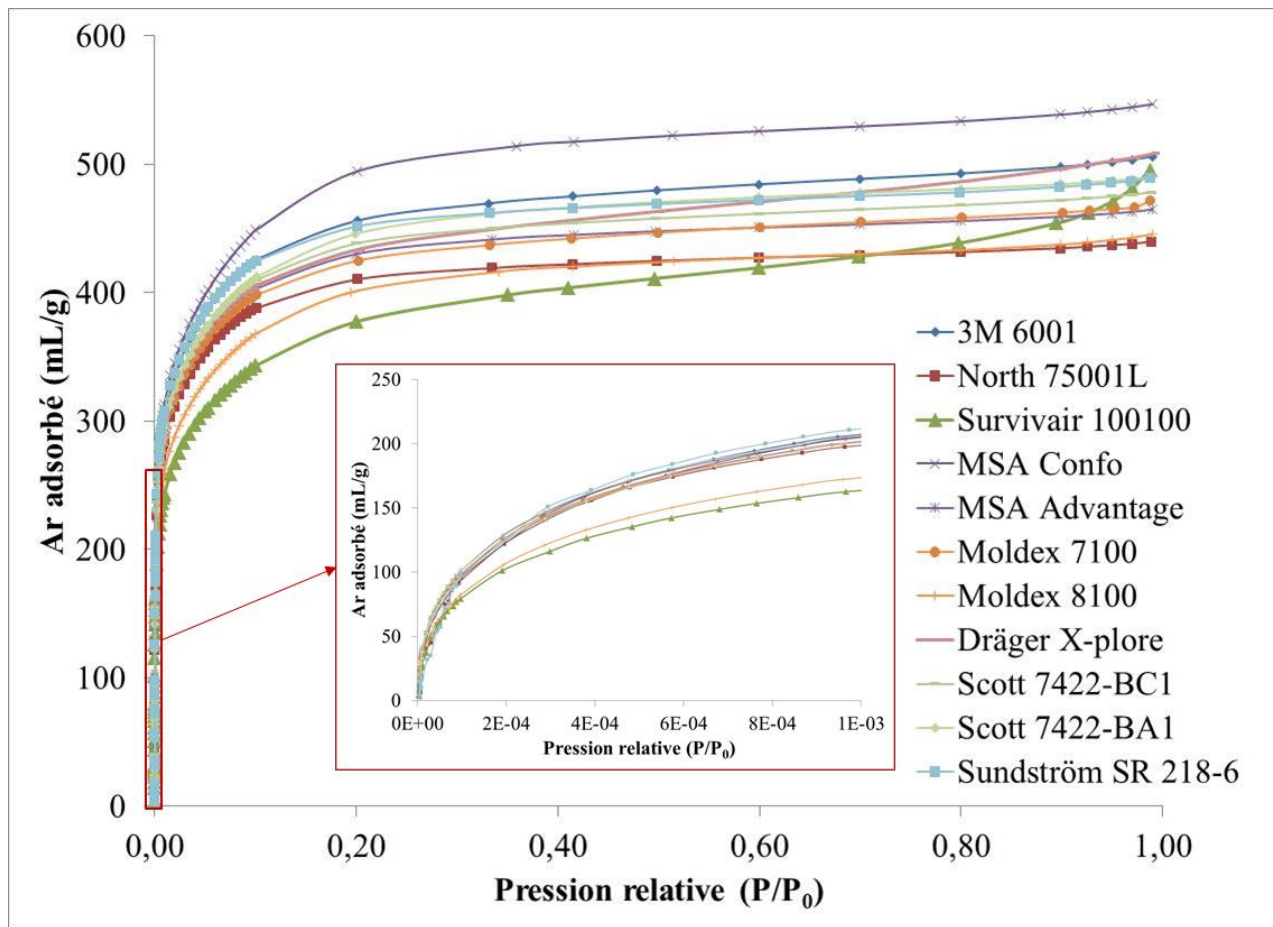


Figure 4. Distribution granulométrique des granules de charbon dans les cartouches.

### 3.1.2.2 Adsorption d'argon

La Figure 5 présente les isothermes d'adsorption de l'argon sur les 11 charbons à l'étude.

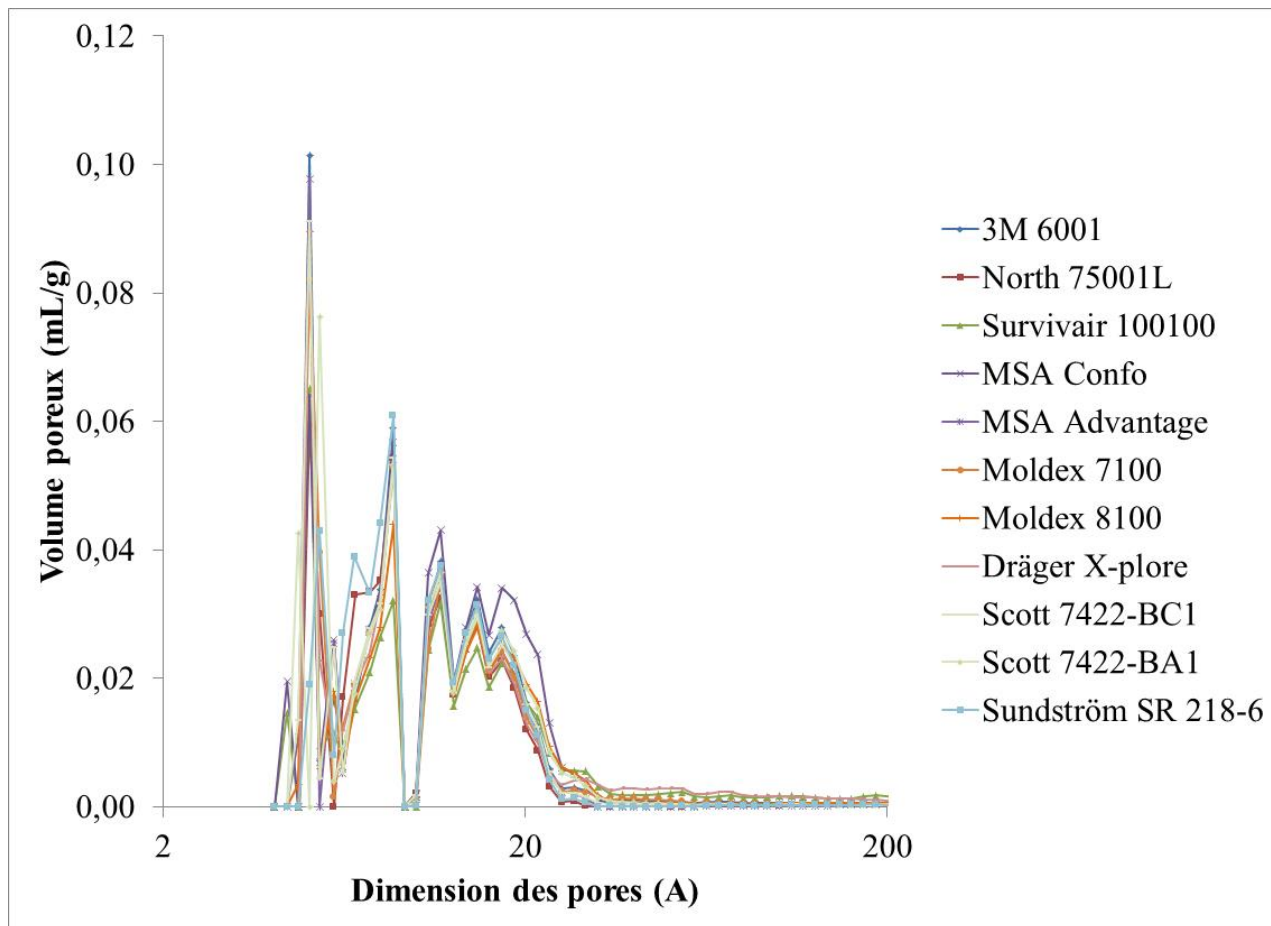


**Figure 5. Isothermes d'adsorption de l'argon à 87 K.**

L'allure générale de ces isothermes est de type « 1 » selon la classification IUPAC [54], typique des solides microporeux à faible surface externe. L'isotherme du charbon SURVIVAIR 100100 se distingue cependant des autres dans le domaine  $P/P_0 = [0,3-1,0]$ , avec une zone plateau plus pentue, synonyme d'un solide ayant une dimension méso ou macroporeuse. Ceci semble confirmé par le volume mésoporeux déterminé grâce à l'approche BJH (Tableau 5).

Par ailleurs, comme le montre la Figure 6 pour l'ensemble des charbons, les tailles de pores prépondérantes se situent entre 2 et 20 Å, caractérisant les micropores.





**Figure 6. Distribution de la structure poreuse des charbons selon le modèle DFT.**

Le Tableau 5 résume l'ensemble des données obtenues par adsorption d'argon sur les charbons, et précise la densité des charbons. Celles-ci sont comprises entre 0,39 et 0,46. Outre le charbon MOLDEX 8100, qui dévie de la tendance, les charbons à surface spécifique plus importante présentent une densité plus faible. La composante microporeuse de la surface est située entre 90 et 98 % de la surface BET, il est donc normal de constater une tendance à avoir des volumes microporeux plus importants pour des charbons moins denses. Le volume microporeux moyen des charbons est de 0,53 mL/g, valeur représentative des charbons microporeux utilisés dans les cartouches de protection respiratoire. C'est la valeur utilisée par le NIOSH dans l'utilitaire « MULTIVAPOR » pour définir une cartouche de protection respiratoire « typique » contre les vapeurs organiques [32]. Le plus faible volume poreux est attribué au charbon SURVIVAIR 100100 (0,45 mL/g), et le plus important au charbon MSA Comfo (0,59 mL/g).

**Tableau 5. Synthèse des données de l'adsorption à l'argon sur les charbons. Densité et fraction granulométrique 70 %.**

Charbons	PS (mm)	Densité (g/mL)	Surfaces (m <sup>2</sup> /g)			Volumes (mL/g)			
			spécifique	micropores	externes	Micropores /BET (%)	Microporeux		Mésoporeux
			BET	t-plot	t-plot		t-plot	DR	BJH
3M 6001	1,15	0,42	1515	1414	101	93,3	0,55	0,56	0,19
NORTH 75001L	1,10	0,43	1376	1350	26	98,1	0,52	0,52	0,14
SURVIVAIR 100100	1,15	0,46	1242	1155	87	93,0	0,47	0,45	0,36
MSA COMFO	1,05	0,43	1602	1528	74	95,4	0,62	0,59	0,25
MSA ADVANTAGE	1,10	0,44	1430	1378	52	96,4	0,54	0,53	0,15
MOLDEX 7100	1,15	0,44	1414	1322	92	93,5	0,51	0,52	0,17
MOLDEX 8100	1,15	0,39	1311	1250	61	95,3	0,50	0,48	0,19
DRÄGER X-plore	1,15	0,41	1440	1292	148	89,7	0,50	0,54	0,22
SCOTT 7422 BC1	1,05	0,42	1455	1374	81	94,4	0,53	0,54	0,16
SCOTT 7422 BA1	1,10	0,41	1466	1396	70	95,2	0,56	0,53	0,19
SUNDSTRÖM-SR218-6	1,50	0,43	1508	1436	72	95,2	0,55	0,56	0,16

### 3.1.3 Conclusion

L'ensemble des données de caractérisation des charbons et des cartouches obtenues permettra d'alimenter le modèle de Wood pour la détermination des temps de service. Des 11 cartouches à l'étude, 10 montrent une masse de charbon et une granulométrie semblables. La cartouche SUNDSTRÖM SR 218-6 se distingue par des valeurs plus importantes pour ces deux variables. Cela est probablement dû au fait qu'une seule cartouche est prévue pour équiper les demi-masques et les masques plein visage de la même marque, contrairement aux autres qui comportent une paire de cartouches.

Les 11 charbons étudiés présentent une microporosité qui avoisine les valeurs typiques pour de tels matériaux adsorbants. Le volume mésoporeux du charbon SURVIVAIR 100100 semblerait plus important, et le microporeux moins important que les autres charbons.

À l'issue de cette partie, il serait possible d'utiliser le modèle de Wood pour estimer les temps de claquage. Cependant, bien qu'ayant déterminé les volumes microporeux des charbons avec l'adsorption d'argon, il est raisonnable de penser qu'en utilisant l'adsorption de solvants pour déterminer ce volume microporeux, les valeurs nouvellement déterminées pourraient être plus représentatives du volume microporeux disponible. La détermination du facteur de structure de chaque charbon,  $B$ , par l'adsorption de solvants, amènera également des valeurs expérimentales et devrait limiter la variabilité générée par l'approche systématique de Wood (éq. 4). L'expérimentation avec les solvants permettrait également d'évaluer l'équation de D-R (éq. 2) pour calculer les capacités d'adsorption  $W_e$ , en comparant les résultats calculés et expérimentaux. C'est l'objet de la seconde partie de ce rapport.

## 3.2 Tests de claquage

Des tests de claquage ont donc été menés afin de déterminer potentiellement de meilleures valeurs d'entrée pour le modèle de Wood. Une validation expérimentale des prévisions d'un modèle étant toujours souhaitable, et afin d'encourager une telle approche, l'utilisation de « substituts » de cartouches réelles, plus faciles à mettre en œuvre, et dans des conditions expérimentales mieux contrôlables, est proposée. Une réduction de l'utilisation de solvants pour générer les atmosphères étalons est également visée. Il s'agissait donc d'envisager une « minicartouche » unique, de forme cylindrique, pour reproduire les conditions d'expérimentation des 11 cartouches (la section 2.3 relate les hypothèses de miniaturisation).

Les 11 cartouches commerciales ainsi que leur substitut « minicartouche » ont été exposés aux mêmes atmosphères contaminées (500 ppm pour les cinq solvants, chaque solvant seul dans l'atmosphère), simultanément et en parallèle grâce au montage illustré à la Figure 2.

### **3.2.1 Répétabilité des tests de claquage**

Afin d'obtenir des résultats expérimentaux fiables, les conditions de test doivent être justes, stables le temps d'un test et répétables dans le temps. Ainsi, les cartouches réelles et mini 3M 6001 ont servi dans une étude de répétabilité. Trois tests de claquage pour les cinq composés, seuls et à 500 ppm ont été menés. La Figure 7 présente les courbes de claquage obtenues.

Pour les deux types de cartouches, les trois courbes de claquage propres à un composé sont relativement semblables, voire superposées pour le chlorure de méthylène. Le Tableau 6 présente d'autres données chiffrées sur les courbes de claquage et sur le montage expérimental.

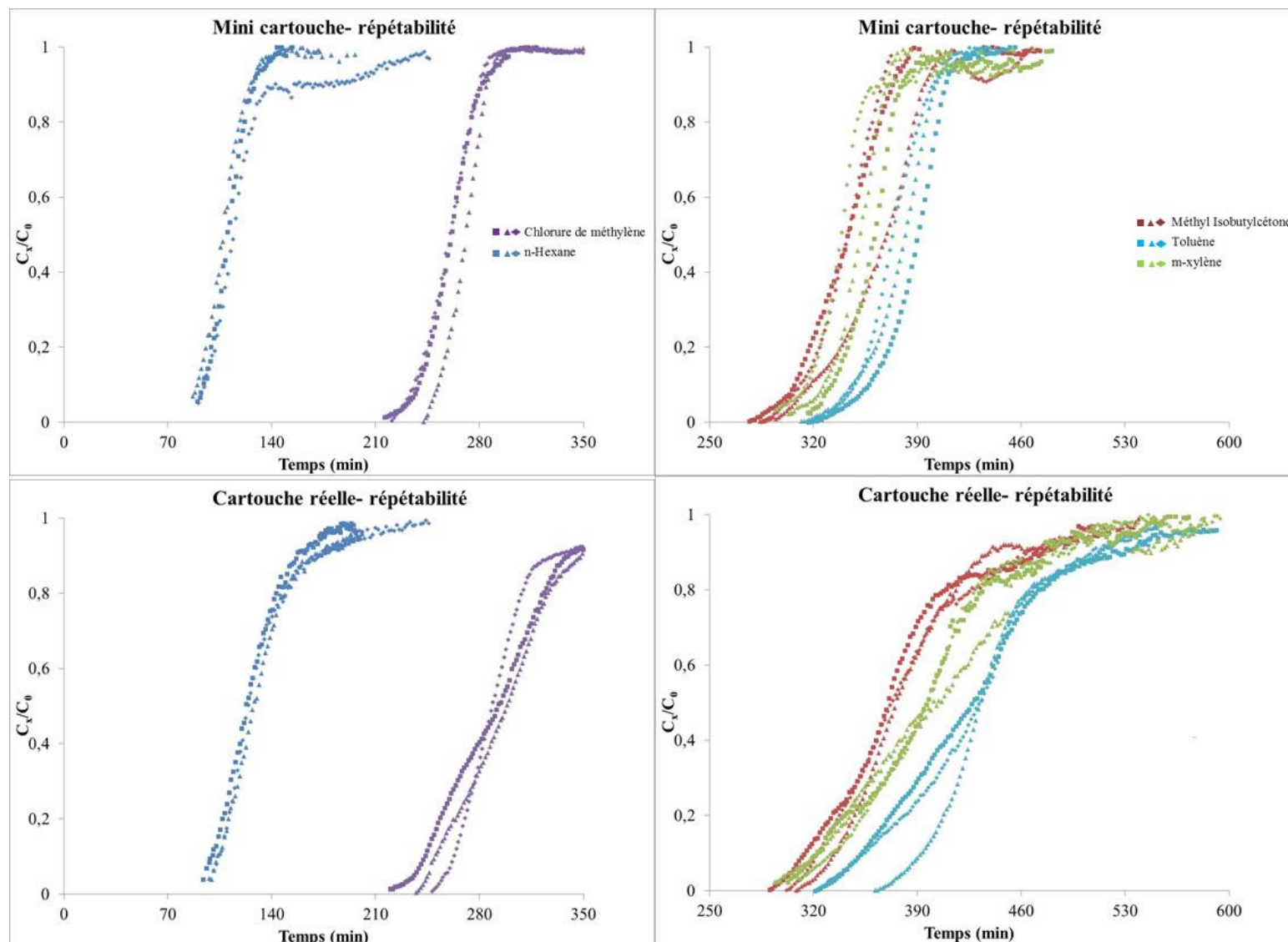


Figure 7. Courbes de claquage des cinq composés sur la cartouche réelle et la minicartouche 3M 6001-répétabilité.

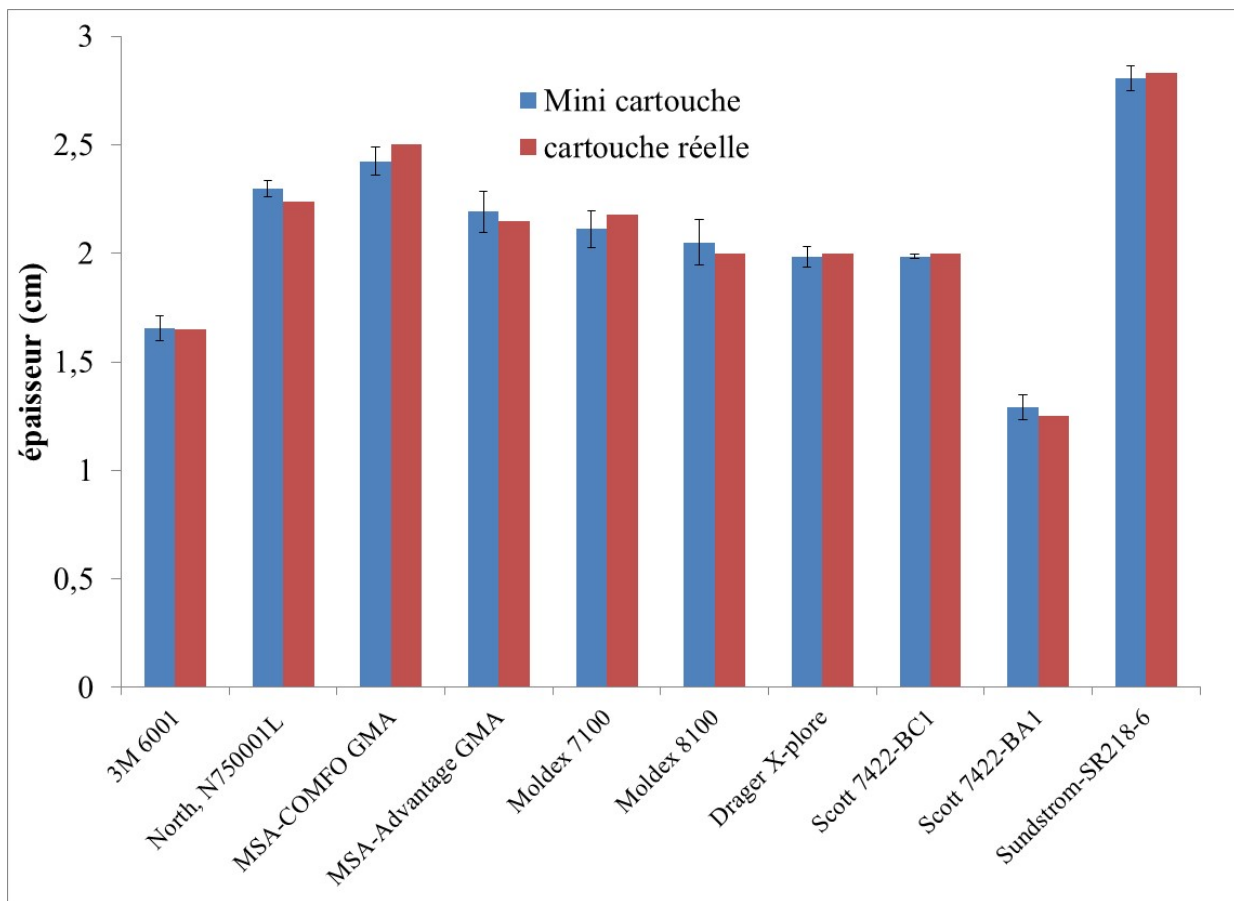
**Tableau 6. Données propres à chaque essai de claquage pour les essais de répétabilité sur les cartouches 3M 6001.**

Solvants	Type de cartouche	$C_0$ (ppm)	CV (%)	$T_{CL\ 10\ \%}$ (min)	$T_{CL\ 50\ \%}$ (min)	$W_e$ (mg/g)
Chlorure de méthylène	Mini	493	2,6	94	114	0,115
		508	2,7	90	107	0,097
		515	2,2	94	110	0,100
	Réelle	493	2,6	104	124	0,115
		508	2,7	104	127	0,116
		515	2,2	100	123	0,112
toluène	Mini	512	2,2	348	373	0,386
		522	1,0	346	382	0,383
		517	1,3	358	391	0,390
	Réelle	512	2,2	355	432	0,413
		522	1,0	394	433	0,406
		517	1,0	353	427	0,409
n-hexane	Mini	523	1,0	252	271	0,251
		511	1,1	239	261	0,254
		503	1,2	237	260	0,253
	Réelle	523	1,0	251	299	0,275
		511	1,1	243	293	0,275
		503	1,2	263	288	0,263
méthylisobutyl cétone	Mini	498	2,1	308	343	0,369
		497	2,3	320	370	0,376
		496	2,4	311	344	0,373
	Réelle	498	2,1	315	371	0,396
		497	2,3	335	376	0,398
		496	2,4	323	373	0,394
m-xylène	Mini	535	2,9	332	361	0,430
		537	3,4	327	352	0,414
		555	3,1	316	339	0,417
	Réelle	535	2,9	323	396	0,416
		537	3,4	324	405	0,458
		555	3,1	333	396	0,415

Les temps de claquage 10 %  $T_{CL10\%}$  et 50 %  $T_{CL50\%}$ , ainsi que les capacités d'adsorption  $W_e$  calculées à partir de la prise de masse de la cartouche à saturation, sont en bon accord pour un même composé (ces observations seront discutées plus en détail en 3.3.2 et 3.3.4), compte tenu des variations possibles dans les concentrations d'exposition, les débits d'air traversant les cartouches ainsi que l'épaisseur de charbon dans la minicartouche. Pour chacun des essais, les coefficients de variation (CV) sur  $C_0$  sont de 1-3 %, ce qui traduit une relative stabilité. Le taux de justesse de la concentration effectivement générée, tous composés confondus, est de  $103 \pm$

4 % (100 % étant 500 ppm). Les concentrations générées pour les composés aromatiques sont cependant supérieures à la consigne de 500 ppm, mais restent dans un intervalle de 10 % de la valeur cible. En tenant compte de l'ensemble des essais réalisés pour chaque cartouche et composés, il est possible de calculer les concentrations moyennes d'exposition par composé lors de l'ensemble des expérimentations réalisées. Elles sont respectivement de  $489 \pm 12$ ,  $504 \pm 13$ ,  $493 \pm 15$ ,  $504 \pm 15$  et  $517 \pm 21$  pour le chlorure de méthylène, le n-hexane, la méthyl isobutylcétone, le toluène et le m-xylène (n = 13-15).

Les débits de prélèvement à travers les minicartouches ont également été enregistrés à 53 reprises. Une fois la consigne de débit réglée, les coefficients de variation des débits mesurés variaient de 0,01 à 3,8 %, avec une valeur moyenne de 1,2 %. Enfin, une bonne préparation de la minicartouche implique une épaisseur du lit de charbon identique entre celle-ci et la cartouche réelle. À la Figure 8, les épaisseurs dans les cartouches réelles (n = 1) sont comparées à celles des mini cartouches (n = 4-8).



**Figure 8. Comparaison des épaisseurs de charbon entre une cartouche réelle et une minicartouche.**

Bien que les mesures d'épaisseur effectuées sur les minicartouches ne soient pas précises, un bon recoupement des valeurs est illustré. Ceci traduit donc une bonne approche de calcul et une bonne pesée de la quantité de charbon à introduire dans la minicartouche, ainsi qu'une densité apparente bien transposée de la cartouche réelle à la minicartouche.

### **3.2.2 Allure des courbes de claquage**

Les courbes de claquage présentées à la Figure 7 sur la minicartouche sont représentatives de l'allure des courbes de claquage obtenues pour toutes les minicartouches préparées, en ce qui concerne leur allure générale. Elles présentent une bonne symétrie pour les cinq composés à l'étude. La pente de la courbe de claquage diminue avec le temps de séjour dans la cartouche; elle est plus importante pour le chlorure de méthylène que pour le m-xylène. Ce comportement, identique pour toutes les cartouches réelles, est certainement lié à la diffusion longitudinale. Ce phénomène semble plus marqué pour la cartouche réelle 3M 6001 que pour la minicartouche correspondante.

Pour une partie des cartouches réelles restantes, les courbes de claquage, dans leur allure générale, présentent parfois un caractère asymétrique. À titre d'exemple, les Figure 9 et Figure 10 présentent les courbes de claquage des cinq composés cibles, sur les cartouches SURVIVAIR 100100 et SUNDSTRÖM SR218-6, dans leurs versions réelles et mini. Outre cette asymétrie, les pentes des courbes de claquage sur cartouche réelle sont plus faibles que celles des minicartouches.



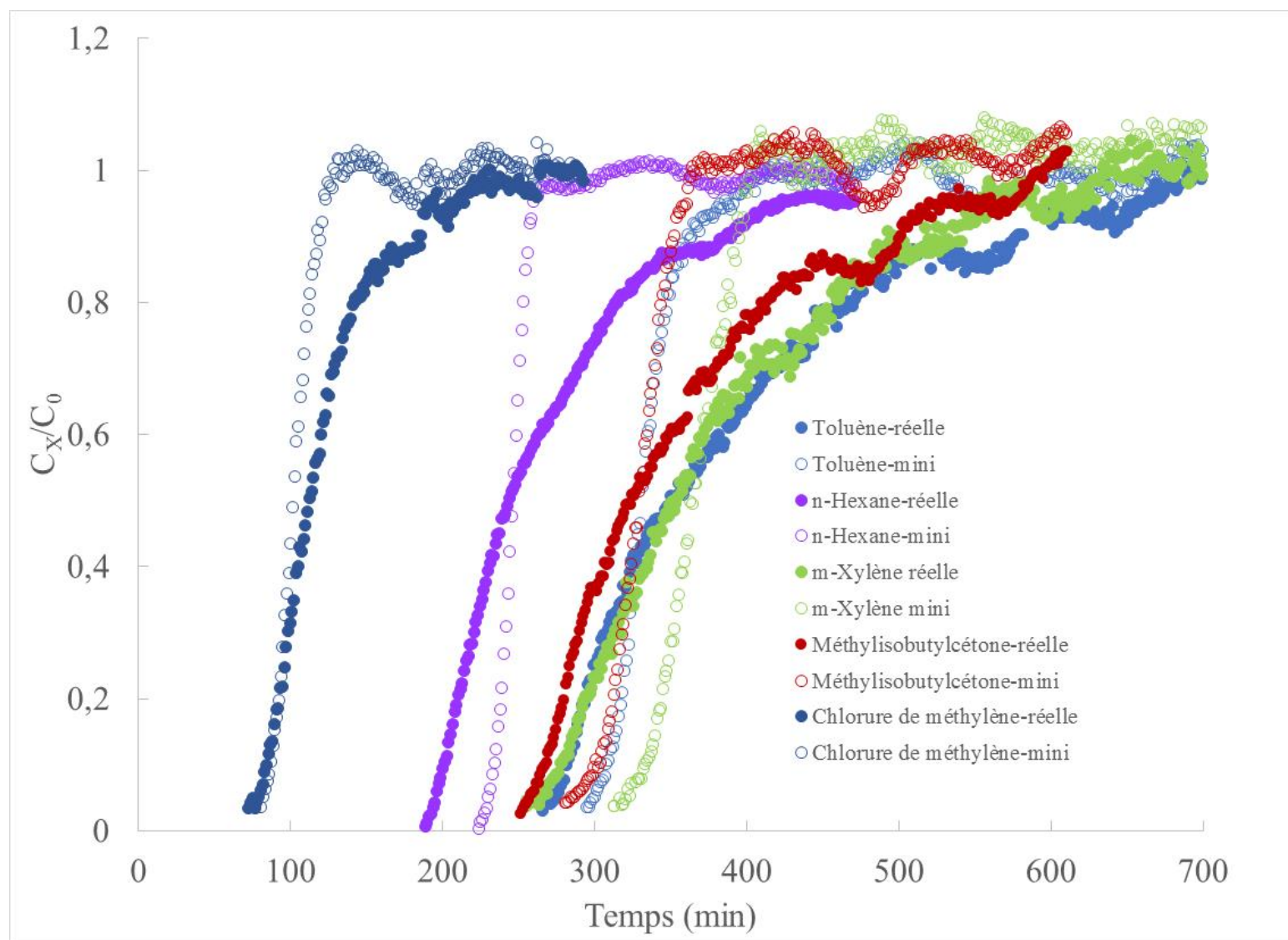


Figure 9. Courbes de claquage sur la cartouche SURVIVAIR 100100, versions réelle et mini.

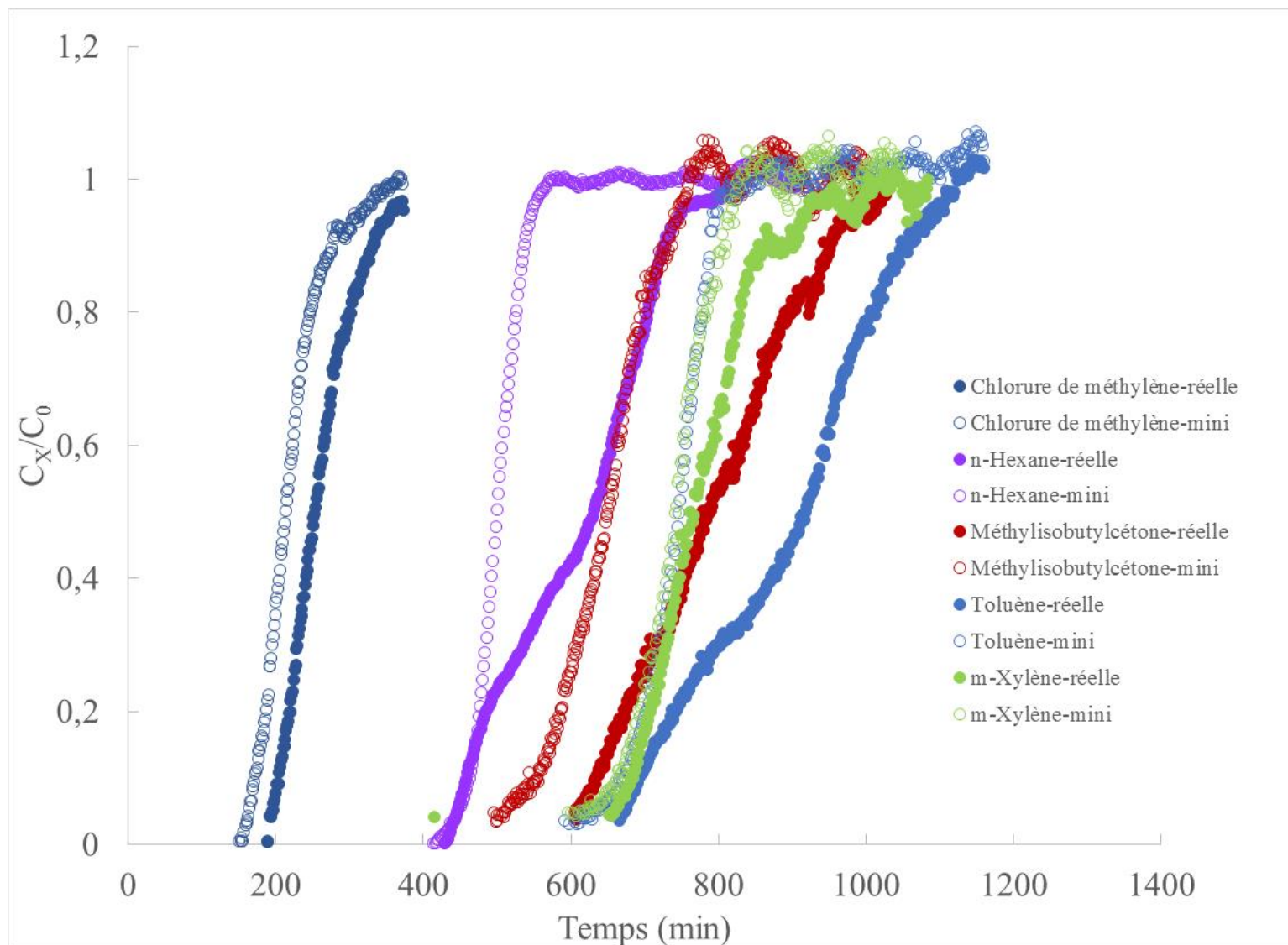


Figure 10. Courbes de claquage sur la cartouche SUNDSTRÖM SR218-6, versions réelle et mini.

Parmi les cartouches réelles présentant des courbes de claquage relativement symétriques, on peut notamment citer les cartouches SCOTT, MSA, MOLDEX et 3M 6001. Cependant, pour un même type de cartouche, l'asymétrie peut varier d'un composé à l'autre : c'est le cas, par exemple, du chlorure de méthylène à profil symétrique sur les cartouches DRÄGER X-plore, alors que le toluène présente un profil asymétrique. Ce phénomène d'asymétrie des courbes a déjà été constaté par ailleurs, et sa prise en compte dans la modélisation des courbes également [55,56]. Cependant, la modélisation de courbes telle que celles de la méthylisobutyl cétone et du m-xylène sur la cartouche SUNDSTRÖM SR218-6 semble difficile à réaliser.

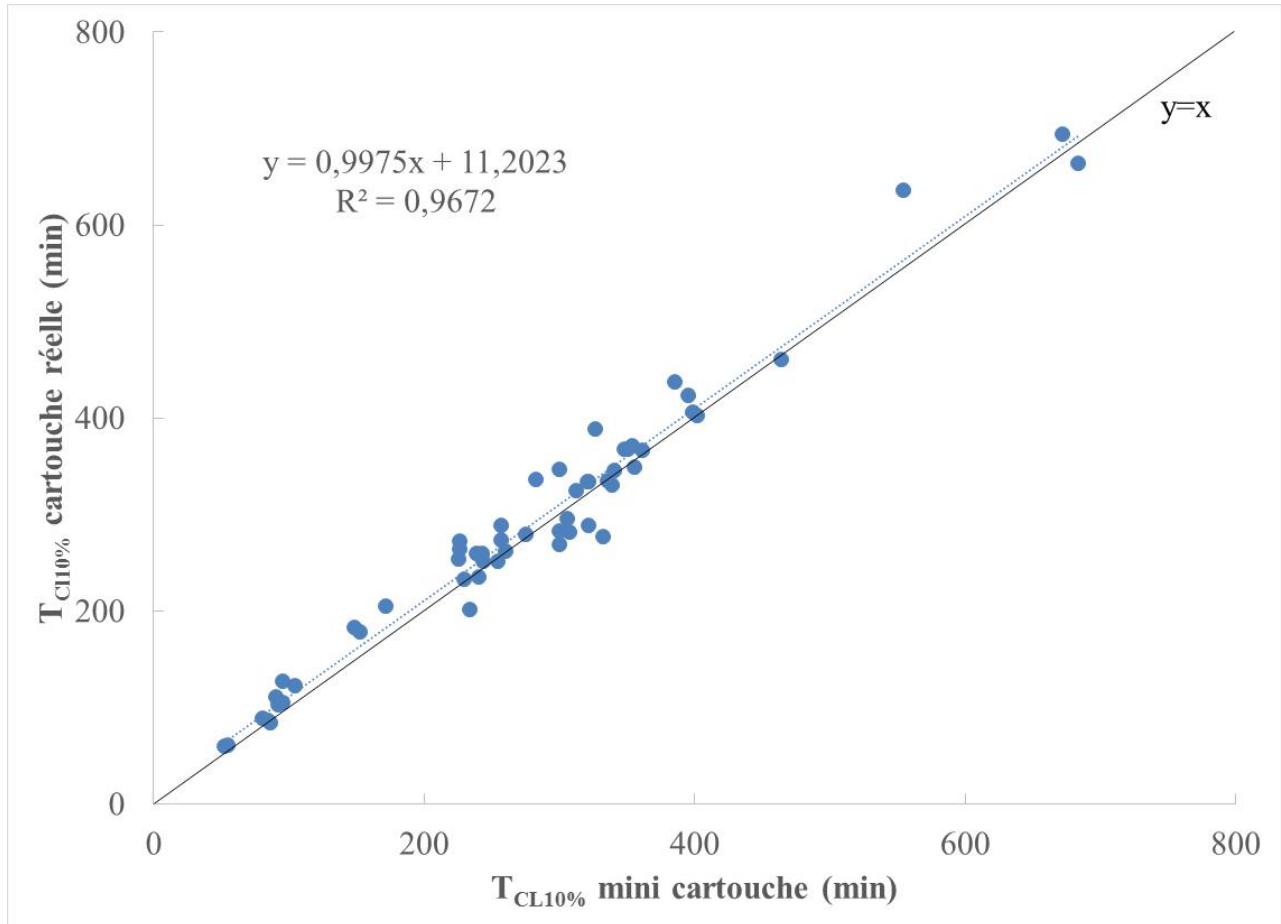
Ainsi, la transposition d'une cartouche réelle à une cartouche mini, comme proposée dans le rapport ne « capture » pas tous les paramètres *a priori* requis pour obtenir des courbes d'allures similaires dans le format mini et le format réel. Alors que les courbes de claquage obtenues avec les minicartouches sont symétriques, celles avec les cartouches réelles ne le sont pas toutes et peuvent varier avec la nature du composé. Plusieurs hypothèses peuvent être émises :

- L'écoulement de l'air à travers les cartouches réelles et mini est différent; l'hypothèse de base de la transposition reposait sur une vitesse d'air identique dans les deux types de cartouches. Cette vitesse d'air dans les cartouches réelles est calculée à partir de la section d'entrée des cartouches. Or, ces cartouches n'étant pas de parfaits cylindres, la section varie avec la « longueur » de la cartouche, ce qui peut provoquer des vitesses d'air inhomogènes, et encourager une diffusion axiale moins maîtrisée que dans le cas de la minicartouche.
- La géométrie de la cartouche réelle ainsi que son remplissage peuvent expliquer l'existence de « chemins préférentiels » suivis par les contaminants, et donc un parcours moyen à travers la cartouche réelle différent du parcours suivi dans la minicartouche.
- Des différences de remplissage, pour un même constructeur, d'une cartouche à une autre, peuvent engendrer les différences de symétrie selon les composés. À notre connaissance, certains des fabricants mettent en œuvre des techniques expérimentales pour contrôler l'homogénéité du remplissage des cartouches, à travers les différents lots de fabrication, mais nous ignorons dans quelle mesure ce contrôle qualité est répandu.

Lodewyckx et coll. ont récemment proposé l'utilisation de la tomographie [58] pour étudier la migration de composés à travers un lit d'adsorbant. Cette approche pourrait partiellement nous aider à confirmer ou infirmer ces hypothèses. De plus, une modélisation de l'écoulement des fluides à travers les différentes cartouches accessibles pourrait nous éclairer afin d'identifier des paramètres supplémentaires dans l'étape de transposition cartouche réelle-cartouche mini, pour ainsi obtenir des courbes de claquage plus semblables. Malgré cela, le potentiel de la minicartouche pour déterminer des temps de claquage 10 % de cartouches réelles, ainsi que des paramètres comme la capacité d'adsorption  $W_e$  reste entier.

### **3.2.3 Comparaison des temps de claquage $T_{CL10\%}$**

La Figure 11 présente graphiquement la comparaison des  $T_{CL10\%}$  pour les cartouches réelles et les mini correspondantes, sans distinguer les cartouches les unes des autres.

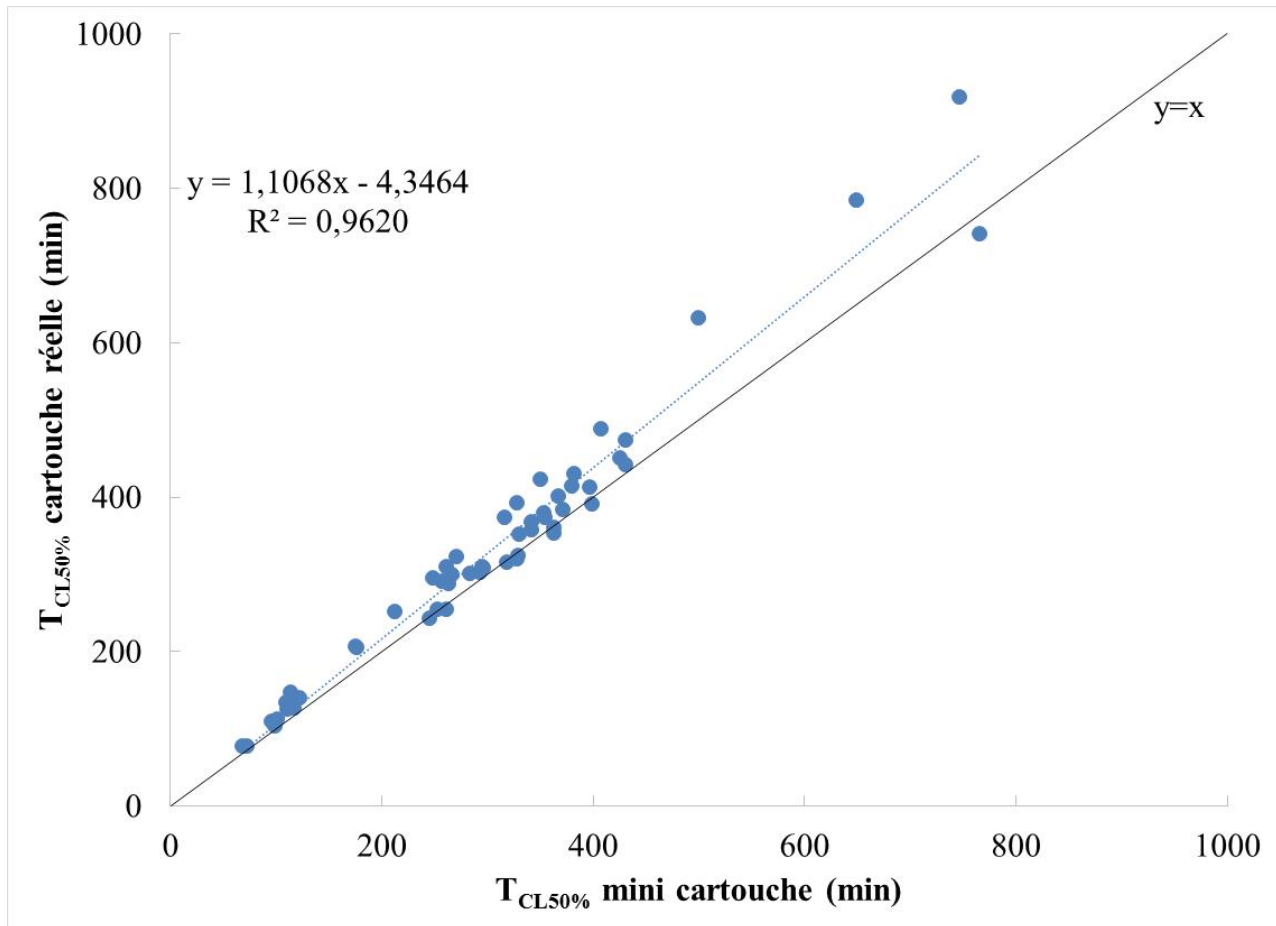


**Figure 11. Comparaison des temps de claquage 10 % pour les cartouches réelles et mini.**

Il existe une bonne corrélation entre les cartouches réelles et les minicartouches, tel qu'indiquée par l'équation de la droite, dont la pente est proche de 1 et l'ordonnée à l'origine proche de 0. La variance de  $T_{CL10\%}$  pour la cartouche réelle est expliquée à 97 % par la variance de  $T_{CL10\%}$  pour la minicartouche. Malgré l'ensemble des remarques et limitations exposées plus haut sur la transposition réelle-mini, la possibilité d'utiliser une minicartouche pour estimer le temps de claquage d'une cartouche réelle semble avérée.

### 3.2.4 Comparaison des temps de claquage $T_{CL50\%}$

De la même manière que précédemment, les  $T_{CL50\%}$  ont été comparés pour les cartouches réelles et les mini. La Figure 12 présente les résultats globaux.



**Figure 12. Comparaison des temps de claquage 50 % pour les cartouches réelles et mini.**

Il existe une bonne corrélation entre les deux variables déterminées expérimentalement, bien que l'équation de la droite s'éloigne de la fonction identité. Les  $T_{Cl\ 50\ \%}$  des cartouches réelles sont globalement supérieurs aux  $T_{Cl\ 50\ \%}$  des minicartouches, ce qui confirme l'apparition d'un comportement différent dans l'écoulement de l'air contaminé des cartouches réelles et mini : la pente des courbes de claquage de cartouches réelles est plus faible, pouvant indiquer une différence de diffusion longitudinale liée à la géométrie des cartouches.

La cartouche SUNDSTRÖM SR 218-6 s'éloigne le plus de la droite identité (quatre points expérimentaux avec les  $T_{CL50\ \%}$  les plus importants). Cette cartouche, qui contrairement aux autres ne s'utilise pas par paire sur les APR, aurait dû être testée dans des conditions expérimentales de débit différentes des autres, soit un débit double, pour la réelle et la mini. Ceci aurait permis d'obtenir des temps de claquage plus courts, plus représentatifs des conditions réelles d'utilisation, et de limiter les phénomènes de diffusion longitudinale dans la cartouche, tels qu'évoqués plus haut. Les pentes des courbes de claquage auraient été plus importantes et la différence avec la minicartouche certainement réduite. En supprimant les données de la cartouche SUNDSTRÖM SR 218-6, l'équation fournie à la Figure 12 deviendrait  $y = 1,0361x + 11,7131$  ( $r^2 = 0,9659$ ), montrant un meilleur accord global cartouche réelle-minicartouche.

### 3.2.5 Comparaison des capacités d'adsorption $W_e$

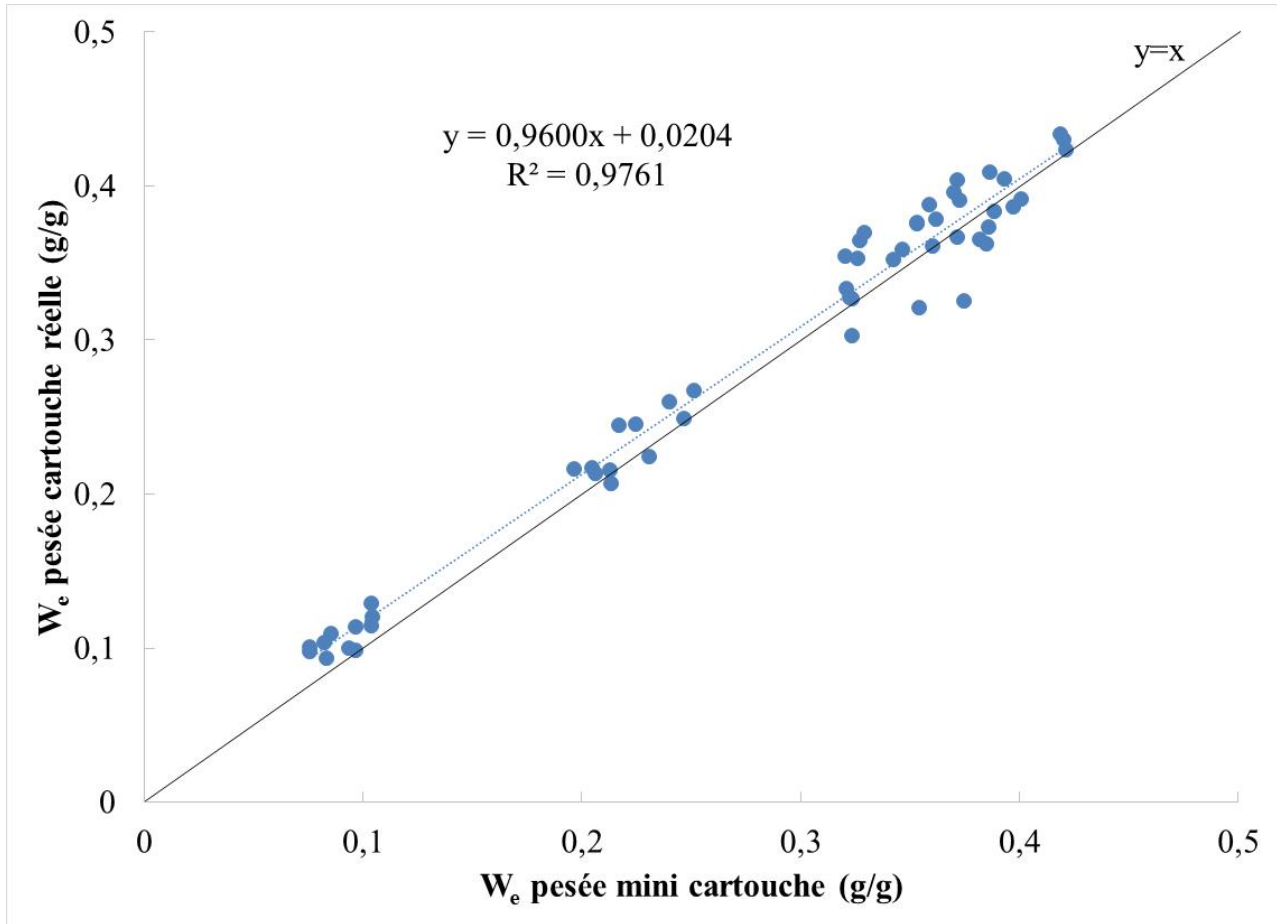
La capacité d'adsorption  $W_e$  d'un composé peut être déterminée de plusieurs manières. La première sous-entend une pesée préexpérimentation de la cartouche réelle ou de son substitut la mini, la réalisation de tests de claquage jusqu'à saturation de la cartouche ( $C_X = C_0$ ), et une pesée postexpérimentation de la même cartouche. La seconde manière utilise l'équation de W-J (éq. 1). Pour  $C_X = 0,5C_0$ , il est possible de réarranger cette équation pour arriver à la relation suivante :

$$W_e = \frac{T_{CL50\%} * C_0 * Q}{W} \text{ éq. (10)}$$

En déterminant expérimentalement le  $T_{CL50\%}$  il est donc possible de calculer la capacité d'adsorption. Aucune des deux méthodes n'est cependant parfaite. La première suppose que la teneur en eau initiale (Tableau 4) du charbon est constante pendant les tests de claquage. Il a cependant été démontré qu'une compétition entre l'eau et certaines vapeurs organiques pour s'adsorber sur le charbon avait lieu [35]. Ainsi, la prise de masse effective du charbon impliqué dans les expérimentations résulte plutôt d'un gain lié à l'adsorption de vapeurs organiques, mais aussi d'une variation de la teneur en eau du charbon. Cette variation est considéré nulle dans la détermination expérimentale de  $W_e$ .

La seconde méthode suppose une description parfaite des courbes de claquage par l'équation de Wheeler Jonas. L'asymétrie des courbes de claquage de vapeurs organiques sur cartouche est un phénomène bien documenté [55-57].

La Figure 13 présente la comparaison des capacités d'adsorption obtenues par pesée sur les cartouches réelles et mini.

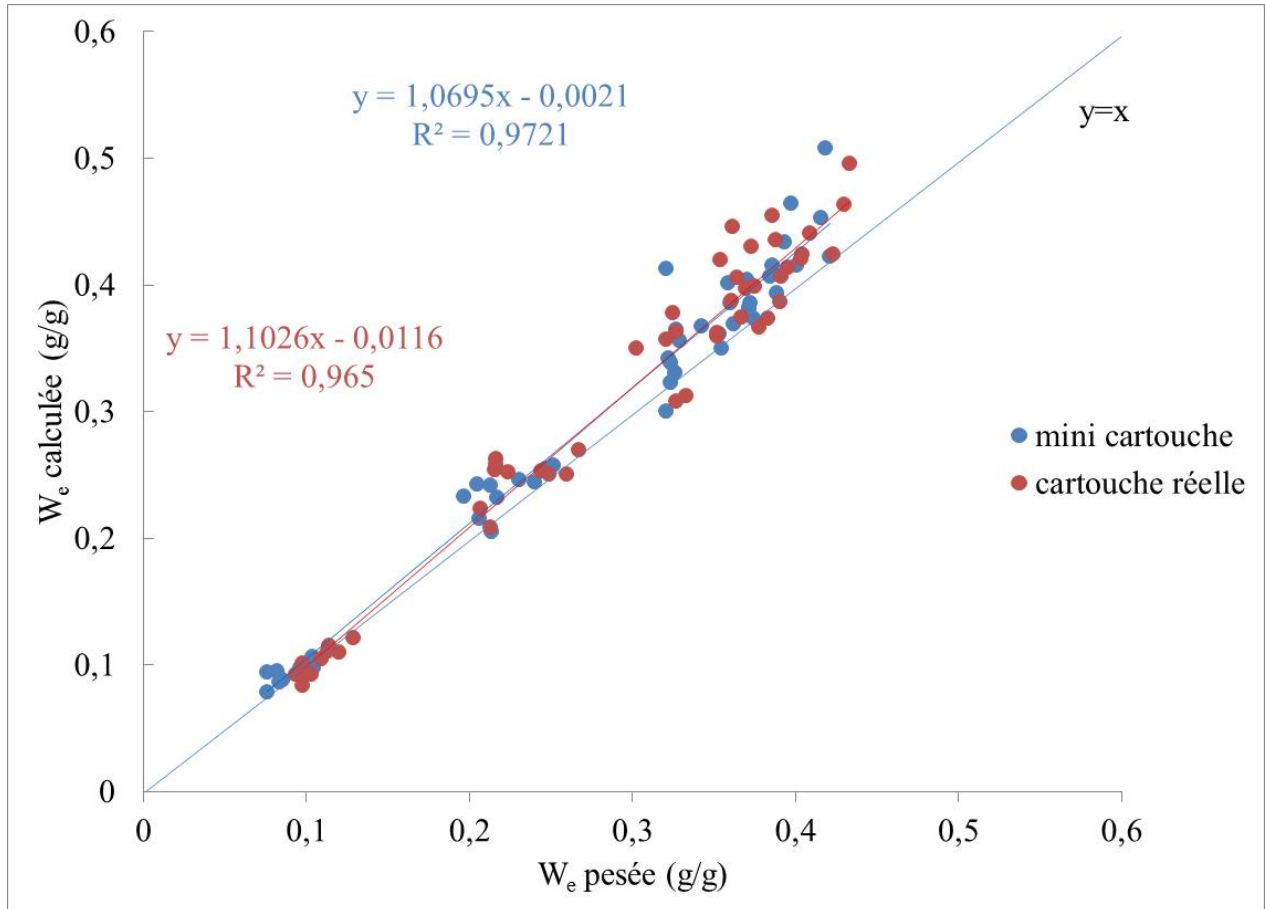


**Figure 13. Comparaison des capacités d'adsorption (par pesée) pour les cartouches réelles et mini.**

Il existe à nouveau une forte corrélation entre les deux types de cartouche. Ceci semble logique, car contrairement à la comparaison des temps de claquage, qui implique des données dynamiques, les capacités d'adsorption traduisent un état d'équilibre entre un charbon, identique dans une cartouche réelle et son homologue mini, et une vapeur organique. La procédure expérimentale adoptée semble bonne pour tous les composés, malgré leur volatilité différente.

La Figure 14 compare les deux approches présentées précédemment pour obtenir les capacités d'adsorption. Les résultats obtenus par celles-ci sont bien corrélés, et comparables, mais pour les deux types de cartouche, la capacité d'adsorption calculée semble supérieure de manière quasi systématique à celle provenant de la pesée.





**Figure 14. Comparaison des capacités d'adsorption déterminée par pesée et calcul pour les cartouches réelles et mini.**

Si l'on considère la méthode de détermination par pesée comme la référence, ceci implique que les  $T_{CL50\%}$  mesurés expérimentalement et utilisés dans l'éq. (10) pour calculer les  $W_e$  sont supérieurs à ce que traduirait une adéquation parfaite au modèle (eq. 1, W-J), pour décrire les courbes de claquage de toutes les cartouches. Un nombre plus important d'expérimentations et une analyse statistique plus élaborée de la relation entre les deux capacités d'adsorption (provenant de la pesée, et de l'éq. 10) permettraient d'étayer cette observation. Quels que soient les résultats obtenus, ceux-ci ne préfigurent cependant pas un problème systématique de prédiction du modèle des  $T_{CL10\%}$ . Ce point potentiel sera discuté en 3.3.4.

### 3.2.6 Conclusion

L'analyse des courbes de claquage pour les cinq composés, sur les 11 cartouches dans les configurations réelle et mini a permis de mieux évaluer le potentiel mimétique de cette dernière.

Grâce à un système expérimental robuste et une hypothèse simple de transposition cartouche réelle-minicartouche, il a été possible de constater visuellement, et de manière générale, que les courbes de claquage des composés sur minicartouches étaient plus symétriques et plus pentues que les courbes de claquage des mêmes composés sur cartouches réelles. Ceci est confirmé par la



comparaison des  $T_{CL50\%}$ , plus élevés pour les cartouches réelles que les minicartouches, bien que la cartouche SUNDSTRÖM SR 218-6 contribue de manière importante à la relation observée. Les  $T_{CL10\%}$ , ainsi que les  $W_e$  obtenues par pesées, pour les deux configurations sont fortement corrélées. La relation entre ces grandeurs est semblable à celle de la fonction identité.

Ainsi, il serait possible de remplacer des essais sur cartouches réelles par des essais sur minicartouches pour vérifier expérimentalement les prédictions d'un modèle lorsque les données inhérentes au charbon (masse, volume microporeux...) et à la cartouche (dimensions, densité apparente) « modélisées » seraient connues. D'un point de vue expérimental, c'est un encouragement à multiplier les essais pour caractériser le pouvoir prédictif d'un modèle et à en augmenter sa robustesse. L'utilisation de plus faibles débits d'air de génération, de moins de solvants et de plus faibles quantités de charbon sont en effet des facteurs positifs, quand sont considérées la stabilité et la simplicité du montage expérimental, ainsi que la toxicité des solvants. Il reste à établir le potentiel des données d'adsorption de solvants sur minicartouches pour déterminer les facteurs clés du charbon, tels que le volume microporeux et le facteur de structure, en utilisant l'équation de D-R (éq. 2). Ce point sera examiné dans la section suivante.

Par ailleurs, la tendance observée entre les capacités d'adsorption calculées (éq. 10) et mesurées indiquerait une adéquation imparfaite du modèle (éq. 1) pour décrire les courbes de claquage sur les deux types de cartouche. Ceci ne préfigure pas nécessairement un mauvais pouvoir prédictif des  $T_{CL10\%}$ . Une analyse statistique plus approfondie de la tendance est cependant nécessaire pour étayer cette conclusion. L'analyse des résultats doit également se faire sous l'angle de l'hygiène du travail. Quand bien même cette adéquation imparfaite serait confirmée et qu'il en découlerait une sous-estimation des  $T_{CL10\%}$  fournis par le modèle, les résultats pourraient être acceptables.

### 3.3 Prévisions du modèle de Wood

#### 3.3.1 Contexte

Dans les sections précédentes, les charbons et cartouches ont été caractérisés pour fournir les données d'entrée du modèle de Wood (éq. 1 et éq. 2). Ceci a impliqué des mesures physiques des charbons (adsorption d'argon, mesure de taille des granules...) et la prise de dimensions des cartouches.

Grâce aux tests de claquage, sur cartouches réelles et mini, il est également possible de déterminer des valeurs de volume microporeux  $W_0$  et de facteur de structure  $B$  pour les 11 charbons, en plus de celles provenant de l'argon. Ces valeurs sont évaluées pour identifier celles fournissant la meilleure adéquation entre les capacités d'adsorption mesurées par pesée et les valeurs fournies par l'équation de D-R (éq. 2).

Deux relations empiriques sont également comparées pour calculer le taux d'adsorption et son incidence sur la justesse des  $T_{CL10\%}$  prédits.

### 3.3.2 Détermination de $W_0$ et $B$ par adsorption de solvants

Les précédents travaux de l'IRSST sur la linéarisation de l'équation de D-R ont à nouveau été réalisés sur les 11 cartouches. La détermination graphique se fait en traçant, pour chaque cartouche, la courbe

$$\ln(W_e/d_L) = f(R^2T^2P_e^{-1.8}(\ln(P_0/P))^2) \text{ éq. (11)}$$

où  $W_e$  est la capacité d'adsorption mesurée par pesée lors des tests de claquage à la concentration  $P_0$ , exprimée en mmHg. La pente de cette droite vaut  $-B$  et l'ordonnée à l'origine  $\ln W_0$ .

La Figure 15 présente un exemple de telles courbes pour les charbons 3M 6001 et MSA COMFO, dans les configurations cartouches réelles et mini.

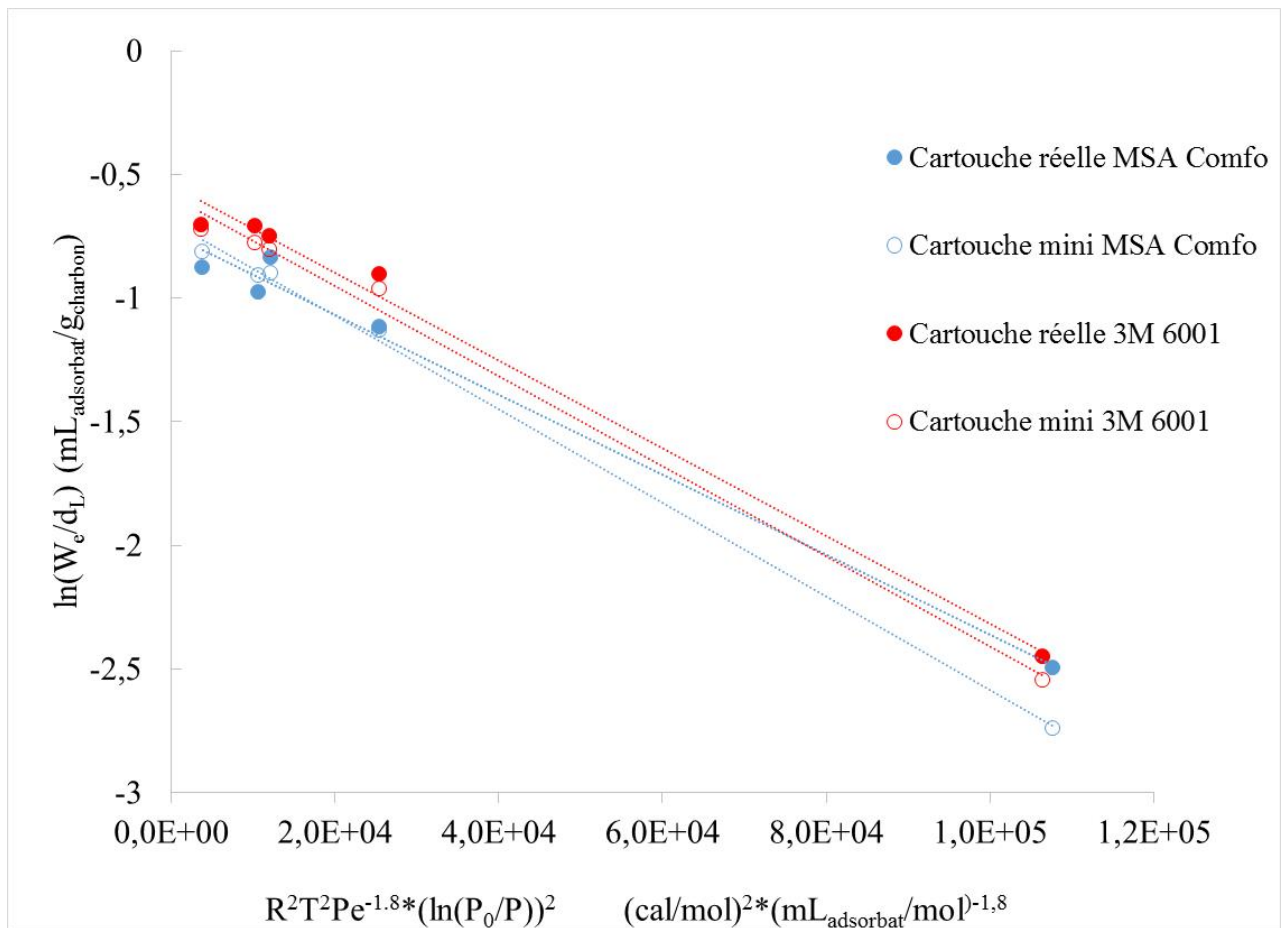


Figure 15. Linéarisation de l'équation de D-R pour les charbons 3M 6001 et MSA COMFO.

Le Tableau 7 récapitule l'ensemble des couples  $(W_0; B)$  par adsorption de solvants et d'argon. Le facteur de structure  $B$  associé à l'argon, est obtenu en utilisant l'éq. 4.

**Tableau 7. Synthèse des volumes microporeux ( $W_0$ ) et des facteurs de structure ( $B$ ) des 11 charbons.**

	<i>W<sub>e</sub> expérimentale</i>						<i>Corrélation (r<sup>2</sup>)</i>	
	<i>argon</i>		<i>cartouche réelle</i>		<i>minicartouche</i>		<i>Cart. réelle</i>	<i>Mini-cart.</i>
	<i>W<sub>o</sub></i>	<i>B</i>	<i>W<sub>o</sub></i>	<i>B</i>	<i>W<sub>o</sub></i>	<i>B</i>		
3M 6001	<b>0,56</b>	<i>1,99E-05</i>	<b>0,58</b>	<i>1,77E-05</i>	<b>0,56</b>	<i>1,82E-05</i>	0,9921	0,9945
NORTH N75001L	<b>0,52</b>	<i>1,85E-05</i>	<b>0,56</b>	<i>1,87E-05</i>	<b>0,57</b>	<i>1,91E-05</i>	0,9945	0,9967
MSA COMFO	<b>0,59</b>	<i>2,10E-05</i>	<b>0,48</b>	<i>1,62E-05</i>	<b>0,50</b>	<i>1,89E-05</i>	0,9892	0,9980
MSA-ADVANTAGE	<b>0,53</b>	<i>1,89E-05</i>	<b>0,49</b>	<i>1,60E-05</i>	<b>0,52</b>	<i>1,80E-05</i>	0,9974	0,9970
SURVIVAIR 100100	<b>0,45</b>	<i>1,60E-05</i>	<b>0,49</b>	<i>1,81E-05</i>	<b>0,49</b>	<i>1,91E-05</i>	0,9986	0,9986
MOLDEX 7100	<b>0,52</b>	<i>1,85E-05</i>	<b>0,52</b>	<i>1,53E-05</i>	<b>0,48</b>	<i>1,66E-05</i>	0,9965	0,9970
MOLDEX 8100	<b>0,48</b>	<i>1,71E-05</i>	<b>0,50</b>	<i>1,77E-05</i>	<b>0,51</b>	<i>2,01E-05</i>	0,9998	0,9976
DRÄGER X-plore	<b>0,54</b>	<i>1,92E-05</i>	<b>0,53</b>	<i>1,61E-05</i>	<b>0,54</b>	<i>1,77E-05</i>	0,9806	0,9978
SCOTT 7422-BC1	<b>0,54</b>	<i>1,92E-05</i>	<b>0,51</b>	<i>1,76E-05</i>	<b>0,49</b>	<i>1,99E-05</i>	0,9970	0,9999
SCOTT 7422-BA1	<b>0,53</b>	<i>1,89E-05</i>	<b>0,54</b>	<i>1,79E-05</i>	<b>0,54</b>	<i>1,99E-05</i>	0,9984	0,9959
SUNDSTRÖM SR 218-6	<b>0,56</b>	<i>1,99E-05</i>	<b>0,52</b>	<i>1,77E-05</i>	<b>0,51</b>	<i>1,82E-05</i>	0,9851	0,9962
<b>Moyenne</b>	<b>0,53±0.04</b>		<b>0,52±0.03</b>		<b>0,53±0.03</b>			

Les valeurs moyennes de  $W_0$  par méthode de détermination sont très proches les unes des autres, bien que des différences soient possibles en comparant les valeurs propres à une cartouche (p. ex. NORTH 75001L, MSA COMFO ou SUNDSTRÖM SR 218-6). Les valeurs de B sont beaucoup plus variables.

### 3.3.3 Comparaison et évaluation des couples ( $W_0; B$ )

Pour évaluer les trois couples ( $W_0; B$ ), il convient de comparer les capacités d'adsorption mesurées par pesée et les valeurs calculées avec l'équation de D-R. Le Tableau 8 et le Tableau 9 présentent cette comparaison.

**Tableau 8. Capacités d'adsorption mesurées par pesée et calculées avec l'équation D-R.**

	$W_e$ expérimentales (g/g)	$W_e$ calculées (g/g)			Différence relative (%)		
		cartouche réelle	Mini- cartouche	argon	cartouche réelle	Mini- cartouche	argon
<b>3M 6001</b>					<b>1,2</b>	<b>6,9</b>	<b>10,8</b>
chlorure de méthylène	0,114	0,113	0,103	0,086	0,9	10,0	24,6
toluène	0,409	0,402	0,383	0,378	1,6	6,4	7,6
n-hexane	0,267	0,242	0,228	0,220	9,5	14,4	17,5
méthylisobutyl cétone	0,395	0,385	0,367	0,363	2,6	7,2	8,1
m-xylène	0,430	0,466	0,446	0,446	-8,4	-3,6	-3,8
<b>NORTH N75001L</b>					<b>0,7</b>	<b>-0,2</b>	<b>7,1</b>
chlorure de méthylène	0,098	0,098	0,096	0,093	0,0	1,9	5,0
toluène	0,39	0,383	0,389	0,357	1,8	0,2	8,4
n-hexane	0,249	0,227	0,229	0,212	8,8	7,8	14,8
méthylisobutyl cétone	0,367	0,367	0,373	0,342	0,0	-1,7	6,8
m-xylène	0,418	0,448	0,456	0,417	-7,1	-9,1	0,3
<b>MSA COMFO</b>					<b>0,4</b>	<b>3,5</b>	<b>-7,7</b>
chlorure de méthylène	0,109	0,109	0,086	0,081	-0,4	21,3	26,0
toluène	0,375	0,336	0,342	0,393	10,4	8,9	-4,8
n-hexane	0,216	0,206	0,202	0,226	4,6	6,5	-4,5
méthylisobutyl cétone	0,302	0,320	0,327	0,378	-6,0	-8,4	-25,2
m-xylène	0,361	0,384	0,400	0,468	-6,4	-10,8	-29,7
<b>MSA-ADVANTAGE</b>					<b>0,2</b>	<b>0,1</b>	<b>1,5</b>
chlorure de méthylène	0,114	0,116	0,099	0,091	-1,3	13,0	19,9
toluène	0,361	0,349	0,363	0,362	3,4	-0,4	-0,4
n-hexane	0,225	0,215	0,217	0,214	4,7	3,6	4,7
méthylisobutyl cétone	0,321	0,332	0,347	0,347	-3,6	-8,1	-8,2
m-xylène	0,391	0,398	0,421	0,424	-1,9	-7,7	-8,5
<b>SURVIVAIR 100100</b>					<b>1,2</b>	<b>4,6</b>	<b>2,2</b>
chlorure de méthylène	0,093	0,091	0,081	0,105	1,8	12,5	-13,4
toluène	0,333	0,336	0,331	0,319	-1,0	0,5	4,3
n-hexane	0,213	0,201	0,195	0,196	5,6	8,3	8,0
méthylisobutyl cétone	0,327	0,322	0,318	0,304	1,6	2,8	7,1
m-xylène	0,384	0,391	0,389	0,364	-1,8	-1,2	5,2

**Tableau 9. Capacités d'adsorption mesurées par pesée et calculées avec l'équation D-R.**

	$W_e$ expérimentales (g/g)	$W_e$ calculées (g/g)			Différence relative (%)		
		cartouche réelle	Mini- cartouche	argon	cartouche réelle	Mini- cartouche	argon
<b>MOLDEX 7100</b>							
chlorure de méthylène	0,129	0,130	0,105	0,093	0,4	11,7	8,8
toluène	0,370	0,369	0,335	0,357	-0,9	18,9	27,9
n-hexane	0,244	0,229	0,204	0,212	0,4	9,5	3,5
méthylisobutyl cétone	0,352	0,351	0,319	0,342	6,2	16,3	13,0
m-xylène	0,403	0,419	0,384	0,417	0,3	9,2	2,8
<b>MOLDEX 8100</b>							
chlorure de méthylène	0,098	0,097	0,077	0,100	-3,9	4,6	-3,4
toluène	0,352	0,346	0,342	0,336	0,4	5,6	2,1
n-hexane	0,207	0,208	0,199	0,203	0,6	21,9	-2,3
méthylisobutyl cétone	0,327	0,331	0,329	0,320	1,8	2,8	4,7
m-xylène	0,404	0,401	0,405	0,387	-0,4	3,9	1,8
<b>D RAGER X-PLORE</b>							
Chlorure de méthylène	0,120	0,123	0,106	0,089	-1,1	-0,5	2,0
toluène	0,325	0,373	0,376	0,368	0,9	-0,1	6,8
n-hexane	0,260	0,229	0,226	0,216	-2,3	11,3	25,4
méthylisobutyl cétone	0,378	0,356	0,360	0,353	-14,9	-15,8	-13,1
m-xylène	0,423	0,427	0,436	0,432	11,8	13,0	16,8
<b>SCOTT 7422-BC1</b>							
chlorure de méthylène	0,100	0,100	0,075	0,089	5,8	4,9	6,7
Toluène	0,364	0,353	0,330	0,368	-0,9	-3,0	-2,0
n-hexane	0,216	0,212	0,193	0,216	0,7	10,8	-0,4
méthylisobutyl cétone	0,354	0,337	0,317	0,353	4,8	10,4	0,4
m-xylène	0,386	0,408	0,390	0,432	-5,7	-1,0	-11,8
<b>SCOTT 7422-BA1</b>							
chlorure de méthylène	0,103	0,104	0,083	0,091	-0,7	19,5	11,4
toluène	0,388	0,376	0,364	0,362	3,2	6,2	6,6
n-hexane	0,211	0,225	0,212	0,214	-6,7	-0,6	-1,6
méthylisobutyl cétone	0,373	0,359	0,350	0,347	3,6	6,3	6,9
m-xylène	0,433	0,436	0,430	0,424	-0,7	0,7	2,0
<b>SUNDSTRÖM SR 218-6</b>							
chlorure de méthylène	0,100	0,102	0,094	0,086	0,5	4,5	0,1
toluène	0,376	0,362	0,350	0,378	-1,6	6,0	14,1
n-hexane	0,245	0,217	0,209	0,220	3,9	6,8	-0,5
méthylisobutyl cétone	0,359	0,346	0,335	0,363	11,4	14,7	10,1
m-xylène	0,365	0,419	0,408	0,446	3,7	6,6	-1,1
					-14,8	-11,7	-22,3

La différence relative moyenne (pour tous les solvants et cartouches) vaut 0,5 % pour les  $W_e$  obtenues par adsorption de solvants sur cartouches réelles, 5,0 % pour les  $W_e$  obtenues par adsorption de solvants sur minicartouches et 3,2 % pour les  $W_e$  obtenues par adsorption d'argon. De même, la différence relative médiane (pour tous les solvants et cartouches) vaut 0,4 % pour les  $W_e$  obtenues par adsorption de solvants sur cartouches réelles, 6,2 % pour les  $W_e$  obtenues

par adsorption de solvants sur minicartouches et 4,3 % pour les  $W_e$  obtenues par adsorption d'argon. Cette tendance se vérifie également quand les différences relatives sont comparées, cartouche par cartouche. Ainsi l'adsorption de solvant sur cartouches réelles semblerait plus juste que les deux autres méthodes pour obtenir les couples  $W_0, B$  spécifiques de chaque charbon, bien que les couples de valeurs communiquées soient très proches. Le bénéfice d'utiliser l'adsorption de solvants sur cartouches réelles pour déterminer le volume microporeux et le facteur de structure du charbon est très marqué pour le chlorure de méthylène. Il serait bon de confirmer si cette observation se vérifie pour d'autres composés à volatilité équivalente. Le cas échéant, ceci pourrait permettre de limiter l'incertitude dans la détermination des temps de claquage pour ces composés à faible affinité avec le charbon.

Des cas particuliers (toluène sur cartouches DRÄGER X-plore, par exemple) nous rappellent cependant que la détermination expérimentale de  $W_e$  par pesée est sujette aux erreurs expérimentales (pas de répétabilité), et que les différences relatives déterminées ici peuvent être affectées.

La valeur positive de ces différences relatives indique une sous-estimation des  $W_e$  calculées par l'équation de D-R. Cette sous-estimation va se propager dans l'équation de W-J (éq. 1) et entraîner une sous-estimation des  $T_{CL10\%}$  calculés, par rapport aux  $T_{CL10\%}$  expérimentaux. Dans une optique de prévention des risques, ceci est tout à fait acceptable.

### 3.3.4 Calcul des temps de claquage $T_{CL10\%}$

Comme indiqué à plusieurs reprises, l'équation de W-J a été utilisée pour calculer les  $T_{CL10\%}$ . Elle est rappelée ci-dessous :

$$T_{CL10\%} = \frac{W_e W}{C_0 Q} - \frac{W_e \rho}{k_v C_0} \ln \left( \frac{C_0 - C_{10\%}}{C_0} \right) \text{ éq. (1)}$$

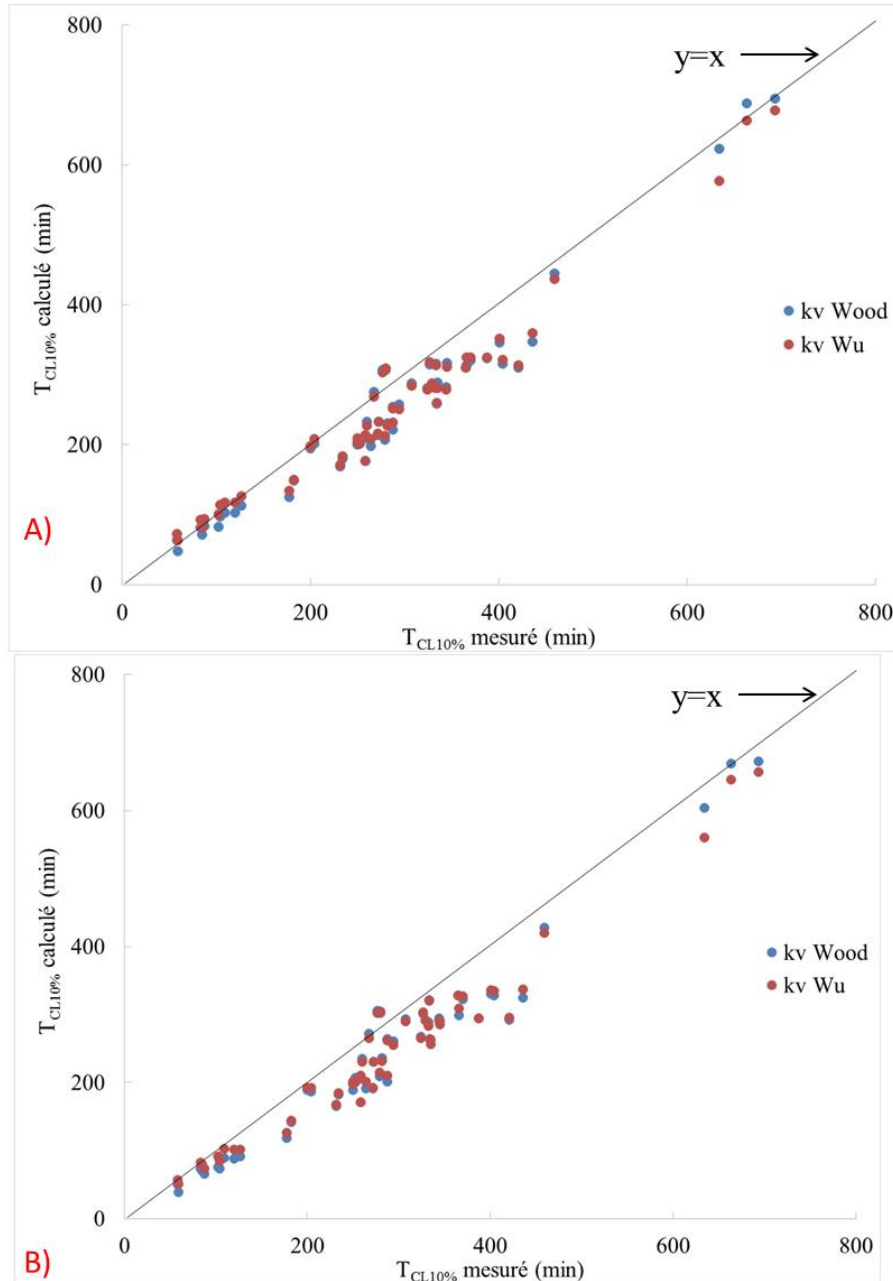
Dans l'exercice de calcul des  $T_{CL10\%}$ , pour faciliter leur comparaison avec les  $T_{CL10\%}$  mesurés, et émettre des explications pour justifier les différences observées, plusieurs hypothèses raisonnables et simplificatrices ont été formulées :

- À chaque composé sera associée une concentration unique  $C_0$ , qui prendra la valeur moyenne des concentrations générées lors de toutes les expérimentations réalisées avec ce composé, quelles que soient les cartouches. Pour rappel, ces concentrations sont respectivement de  $489 \pm 12$ ,  $504 \pm 13$ ,  $493 \pm 15$ ,  $504 \pm 15$  et  $517 \pm 21$  ppm pour le chlorure de méthylène, le n-hexane, la méthylisobutyl cétone, le toluène et le m-xylène ( $n = 13-15$ ).
- Le choix des valeurs de la densité apparente  $\rho$  pour les charbons s'est porté sur la méthode expérimentale inspirée par la norme ASTM D2854-2009, plutôt que celle impliquant l'utilisation des dimensions mesurées de la cartouche et de la masse de charbon pesée. En plus des incertitudes de mesure, les procédés de remplissage des

cartouches, bien que certainement proches du « snow-storm filling » décrit par ailleurs [46], doivent probablement différer.

- Les débits  $Q$ , réglés et mesurés expérimentalement avec pour valeur cible 24 L/min, sont considérés comme fiables. Bien que n'ayant pas fait l'objet de vérifications **enregistrées**, les valeurs disponibles des débits traversant les minicartouches confortent ce choix (section 3.2.1).
- Les masses de charbon  $W$ , mesurées expérimentalement, sont considérées comme fiables, malgré le faible nombre de pesées par cartouche. La variabilité due au procédé de fabrication n'a pas été évaluée. Selon toute vraisemblance, celle-ci ne devrait pas dépasser quelques pourcents.
- Les valeurs  $W_e$  sont fournies par l'équation de D-R, qui elle-même utilise en parallèle les trois couples  $(W_0; B)$  provenant de l'adsorption de solvant sur charbon dans des cartouches réelles et des minicartouches, ainsi que de l'adsorption d'argon sur charbon.
- Deux approches de calcul empirique de  $k_v$  ont été retenues. Il serait théoriquement possible de calculer un  $k_v$  « expérimental » à partir des données tirées des courbes de claquage, en linéarisant l'équation de W-J [59,60], mais les conditions expérimentales choisies ( $C_0$  trop faible pour détecter rapidement  $C_x$ , technique de mesure des concentrations par chromatographie en phase gazeuse manquant de résolution temporelle) ne sont pas optimales.

La Figure 16 présente l'adéquation entre les  $T_{CL10\%}$  mesurés expérimentalement sur les cartouches réelles, et les  $T_{CL10\%}$  calculées par le modèle, selon la méthode de calcul du  $k_v$ , et la méthode de détermination du couple  $W_0, B$  (adsorption de solvant sur cartouches réelles ou minicartouches). L'ensemble des données de temps de claquage est rassemblé à l'annexe C, de même que les différences relatives calculées pour toutes les expérimentations. Seules les grandes lignes seront discutées ici.



**Figure 16. Adéquation entre  $T_{CL10\%}$  mesurés et calculés.**

**A)**  $W_0, B$  provenant de l'adsorption de solvants sur cartouches réelles

**B)**  $W_0, B$  provenant de l'adsorption de solvants sur minicartouches

On peut globalement observer que les valeurs calculées par le modèle se situent sous la fonction identité ( $y = x$ ), ce qui traduit une sous-estimation des  $T_{CL10\%}$  par le modèle. Comme indiqué pour le calcul des  $W_e$ , en hygiène du travail c'est un résultat préférable à une surévaluation, dès lors qu'il s'agit de protéger la santé des travailleurs. Les différences potentielles liées à l'utilisation d'une minicartouche plutôt qu'une cartouche réelle, ainsi qu'une méthode de calcul du  $k_v$  plutôt que l'autre, ne sont pas détectables sur cette figure.



Le Tableau 10 présente les différences relatives moyennes et médianes entre les temps de claquage  $T_{CL10\%}$  mesurés expérimentalement (tous les composés et toutes les cartouches) et ceux calculés avec l'équation de W-J, en considérant les trois couples  $W_0, B$  et les deux calculs empiriques de  $k_v$ .

**Tableau 10. Différences relatives moyennes et médianes :  $T_{CL10\%}$  mesurés et calculés.**

	$k_v$ -Wood			$k_v$ -Wu		
	$W_0, B$ Cartouche réelle	$W_0, B$ Mini- cartouche	$W_0, B$ argon	$W_0, B$ cartouche réelle	$W_0, B$ Mini- cartouche	$W_0, B$ argon
Différence relative moyenne (%)	13,7	17,7	16,0	10,9	15,4	13,6
Différence relative médiane (%)	14,4	18,6	18,5	13,1	16,7	16,9

Quelles que soient les modalités de calcul retenues, on peut globalement observer que les différences relatives sont positives, ce qui traduit une sous-estimation des  $T_{CL10\%}$  par le modèle, tel que mentionné à l'observation de la Figure 16. Également, les données d'adsorption provenant de solvants sur cartouche réelle engendrent une erreur d'estimation du modèle plus faible que les deux autres. Les différences restent cependant minimales. Le calcul de  $k_v$  selon la méthode de Wu réduit l'écart entre les valeurs mesurées et calculées.

Le Tableau 11 présente la moyenne des différences relatives entre les temps de claquage  $T_{CL10\%}$  mesurés expérimentalement et ceux calculés avec l'équation de W-J, par composé, en considérant les trois couples  $W_0, B$  et les deux calculs empiriques de  $k_v$ .

**Tableau 11. Différences relatives moyennes :  $T_{CL10\%}$  mesurés et calculés, par composé.**

	Différence relative (%)					
	$k_v$ -Wood			$k_v$ -Wu		
	$W_0, B$ cartouche réelle	$W_0, B$ Mini- cartouche	$W_0, B$ argon	$W_0, B$ cartouche réelle	$W_0, B$ Mini- cartouche	$W_0, B$ argon
chlorure de méthylène	10,0	23,6	22,0	-3,6	12,2	10,2
toluène	14,4	16,0	14,5	13,3	14,9	13,4
n-hexane	20,0	23,1	21,8	18,3	21,5	20,2
méthylisobutyl cétone	15,5	16,8	15,3	17,3	18,6	17,1
m-xylène	7,8	8,4	6,5	8,4	9,0	7,2

Les résultats montrent que l'approche de Wu améliore surtout les calculs de  $T_{CL10\%}$  pour le chlorure de méthylène. L'ensemble des différences relatives est homogène, avec une meilleure justesse du modèle pour le m-xylène. Il n'est pas possible de mettre en avant un effet de la source du volume microporeux  $W_0$  et du facteur de structure  $B$ , car en regroupant les différentes cartouches pour un même solvant, ce dernier est « masqué ».

Le Tableau 12 présente la moyenne des différences relatives entre les temps de claquage  $T_{CL10\%}$  mesurés expérimentalement et ceux calculés avec l'équation de W-J, par cartouche, en considérant les trois couples  $W_0, B$  et les deux calculs empiriques de  $k_v$ .

**Tableau 12. Différences relatives moyennes:  $T_{CL10\%}$  mesurés et calculés, par cartouche.**

	Différence relative (%)					
	$k_v$ -Wood			$k_v$ -Wu		
	$W_0, B$ cartouche réelle	$W_0, B$ Mini- cartouche	$W_0, B$ argon	$W_0, B$ cartouche réelle	$W_0, B$ Mini- cartouche	$W_0, B$ argon
3M 6001	14,8	19,6	22,8	10,1	15,3	19,1
NORTH N75001L	15,0	14,2	20,4	13,0	12,3	18,5
MSA COMFO	17,7	20,7	11,8	15,3	18,8	10,1
MSA-ADVANTAGE	19,8	19,7	20,9	16,7	17,0	18,4
SURVIVAIR 100100	-2,9	0,5	-1,5	-5,2	-1,6	-4,3
MOLDEX 7100	14,7	24,4	21,9	13,1	23,2	20,9
MOLDEX 8100	11,5	16,8	12,8	9,3	15,3	10,5
DRÄGER X-plore	12,2	14,2	18,4	9,4	11,7	16,3
SCOTT 7422-BC1	18,7	27,3	18,1	13,9	23,5	13,6
SCOTT 7422-BA1	26,2	31,2	30,2	19,1	25,2	23,7
SUNDSTROM SR 218-6	0,9	4,9	0,4	3,2	7,1	3,0

L'ensemble des éléments énoncés à partir des résultats globaux se vérifie en considérant les cartouches prises séparément :

- L'adsorption de solvants sur cartouches réelles permet d'atteindre les meilleures estimations de temps de claquage, excepté pour la cartouche MSA COMFO;
- L'utilisation du  $k_v$  selon la méthode de Wu réduit l'écart entre les valeurs mesurées et calculées, excepté pour les cartouches SUNDSTRÖM SR218-6 et SURVIVAIR 100100. Ceci est de moindre importance, car ce sont les cartouches pour lesquelles l'estimation des  $T_{CL10\%}$  reste la meilleure.

### 3.3.5 Conclusion

L'utilisation du modèle de Wood, selon les différentes modalités exposées, a confirmé son pouvoir de prédiction. Les résultats de calcul montrent une sous-estimation des  $T_{CL10\%}$  obtenus par le modèle. L'adsorption de solvants sur cartouches réelles fournit les valeurs de  $W_0$  et  $B$  limitant le plus les différences relatives entre résultats expérimentaux et ceux calculés. Les différences restent cependant minimales.

Le calcul de  $k_v$  selon les approches de Wood et Wu ne montre pas de contribution flagrante de ce paramètre aux calculs effectués, excepté pour le chlorure de méthylène.

Les meilleures estimations par le modèle sont pour les cartouches SUNDSTRÖM SR 218-6 et SURVIVAIR 100100. Les estimations pour la cartouche SCOTT 7422-BA1 sont celles qui s'éloignent le plus des valeurs expérimentales. L'épaisseur du lit de charbon dans cette cartouche est la plus faible du lot (1,25 cm), alors que celle de la cartouche SUNDSTRÖM SR 218-6 est la plus grande (2,80 cm). Il conviendra, dans des travaux futurs d'approfondissement de la transposition cartouche réelle-minicartouche, d'accorder une attention particulière à ce paramètre.

L'approche adoptée ici pour tester le pouvoir du modèle n'a considéré qu'un jeu de composés restreint. Il serait bon d'expérimenter avec d'autres composés n'ayant pas été utilisés pour la détermination des couples  $W_0, B$ , pour effectuer une validation « externe » du pouvoir du modèle.



## 4. SATURISK : UNE BRÈVE PRÉSENTATION

### *Changement principal par rapport à l'utilitaire existant*

Alors que la première version de Saturisk ne fournissait que des temps de service pour les cartouches recensées dans la base de données, aux conditions énumérées dans le **Tableau 13**, il est maintenant possible de choisir le type de pièce faciale utilisé. Ceci mène au calcul d'une concentration maximale d'utilisation (CMU), telle que définie dans le guide réglementaire [3] :

$$CMU = VEMP * FPC \text{ \textbf{éq. (12)}}$$

avec

*FPC* : Facteur de protection caractéristique d'un type de pièce faciale

À chaque type de pièce faciale correspond un facteur de protection caractéristique (FPC), et dans tous les cas réels d'exposition, la relation suivante doit être respectée :

$$\frac{C_0}{VEMP} \leq FPC \text{ \textbf{éq. (13)}}$$

Les FPC retenus pour le calcul sont ceux publiés par le Groupe CSA [61], soient 10 pour un demi-masque, et 50 pour un masque plein visage. Ainsi, alors que le temps de service ne dépend que du type de cartouche, la *CMU* dépend du type de pièce faciale.

### *Contexte d'hygiène du travail*

Avant de commencer le calcul des temps de service, l'utilisateur doit prendre connaissance des conditions et des limites d'utilisation, ainsi que des mises en garde de rigueur : la description et la documentation des paramètres pouvant affecter le calcul des temps de service accompagnent l'outil afin d'encourager l'utilisation critique des résultats calculés. Des renvois à la réglementation et/ou à d'autres sites pertinents pour compléter le jugement à émettre sur les résultats calculés sont matérialisés.

### *Processus*

Une première partie du processus de calcul consiste à fournir des renseignements quant à l'appareil de protection respiratoire utilisé, afin de lui attribuer un FPC, au type et au nombre de cartouches. Dans la seconde partie, les conditions environnementales telles que la température, le taux d'humidité et la charge de travail, doivent être précisées. La troisième et dernière partie concernera les vapeurs organiques et la/les concentrations d'exposition. Une fois l'ensemble des éléments connus, le modèle peut être utilisé pour calculer les temps de service, aux conditions répertoriées dans le Tableau 13.

Tableau 13. Conditionnalités pour effectuer un calcul dans Saturisk.

	Saturisk initial	Changements apportés
<b>Conditions d'hygiène</b>	Les concentrations individuelles des substances choisies par l'utilisateur (en ppm) ne doivent pas atteindre ou excéder les concentrations DIVS correspondantes.	IDEM
	La concentration totale de la/des substances choisies par l'utilisateur ne doit pas dépasser 1000 ppm.	Les concentrations individuelles des substances choisies par l'utilisateur ne doivent pas dépasser VEMP*FPC
	Les concentrations individuelles des substances choisies par l'utilisateur ne doivent pas dépasser VEMP*10.	
<b>Conditions d'exposition</b>	La température ambiante doit être comprise entre 0 °C et 40 °C.	IDEM
	Le point de fusion de la substance choisie par l'utilisateur doit être supérieur à la température ambiante saisie par l'utilisateur.	OBSOLÈTE : La base de données contient uniquement des composés pour lesquels le calcul est réalisable. Le cas des substances particulières sera abordé dans une section dédiée du site
	Le point d'ébullition de la substance choisie par l'utilisateur doit être supérieur à 40°C.	
	Le système ne prend pas en compte certaines substances de la base de données pour d'autres raisons particulières	

Par ailleurs, la redéfinition de la base de données solvants simplifie l'algorithme de calcul. Cela requiert cependant de créer une section spécifique sur le site Web afin de fournir l'information sur les substances particulières et/ou à réglementation spécifique.

### Résultats

Si l'ensemble des conditions décrites ci-dessus est rempli, alors le calcul est effectué. Les résultats sont accompagnés :

- d'un résumé du scénario d'exposition;
- d'une explication des modalités de calcul retenues : la concentration  $C_x$  utilisée pour calculer les  $T_{CL10\%}$ , tel que précisé en 2.4. Dans le cas des mélanges, la stratégie d'approche sera également détaillée;
- éventuellement, pour les humidités > 65 %, un message indique l'imprécision dans l'estimation;
- d'une note spéciale appropriée si les calculs sont effectués pour des substances reconnues comme sujettes à la pénétration percutanée, notées cancérigènes ou possédant la mention « exposition minimale » dans le RSST;
- d'un rappel des principales valeurs limites réglementaires (DIVS ET VEMP) et de la limite de détection olfactive (LDO).

## 5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'objectif majeur de ce projet était de fournir aux travailleurs un outil en ligne, fiable et à jour, pour calculer les temps de service de cartouches de protection contre les vapeurs organiques. Les données nécessaires pour y parvenir ont été obtenues.

Le nombre de cartouches au sein de Saturisk est désormais porté à 11, contre six auparavant. Ce ne sont pas seulement des ajouts, car la majorité des cartouches présentes dans le Saturisk actuel étaient obsolètes. Ces 11 cartouches sont adaptées aux appareils de protection respiratoire à pression négative. Afin d'améliorer la portée de Saturisk, il apparaîtrait intéressant de pouvoir fournir des informations sur les temps de services des cartouches pour appareils de protection respiratoire à ventilation assistée.

De même, la liste des solvants présents dans la base de données a été rationalisée. Ils ont été choisis sur la base de leur présence dans l'annexe 1 du RSST, et de leurs propriétés physicochimiques. Un soin particulier a été apporté dans le choix des sources bibliographiques, même si elles sont peu détaillées dans le rapport. Le nombre de solvants est passé de 130 à 167.

### **Le développement de l'approche minicartouche s'avère prometteur.**

Le montage expérimental utilisé dans ce projet s'est montré fiable. L'exposition simultanée des cartouches réelles et des minicartouches y a contribué. C'est une étape inévitable avant de ne pouvoir utiliser que les minicartouches.

Malgré des hypothèses de transpositions simples, l'accord entre les  $T_{CL10\%}$  pour les cartouches réelles et les minicartouches est bon, et ce, même si l'allure générale des courbes de claquage est différente. Ces courbes pour les minicartouches sont plus pentues et plus symétriques. Leurs paramètres sont potentiellement liés à des facteurs de diffusion différents au sein du lit de charbon et d'une homogénéité variable de l'écoulement d'air au sein des cartouches réelles et mini. Cela se traduit par une moins bonne correspondance entre  $T_{CL50\%}$  mesurés et calculés. Enfin, les capacités d'adsorption  $W_e$ , mesurées par pesée sont légèrement supérieures pour les minicartouches. Il reste donc des inconnues dans cette étape de transposition. Une maîtrise plus précise de la géométrie et des dimensions des cartouches réelles, de leur remplissage, ainsi qu'une meilleure connaissance des flux d'air à l'intérieur de ces cartouches permettraient certainement d'assurer une transposition plus fine. Des essais de transposition de cartouches pour appareils de protection respiratoire à ventilation assistée, de tailles plus importantes et d'allures géométriques variables, pourraient nous indiquer de manière éclairée les portées et limites de l'approche développée. Pour l'heure, le bilan est positif, mais l'utilisation des minicartouches pour remplacer les cartouches réelles est prématurée.

### **L'adsorption de solvants pour déterminer les volumes microporeux et les facteurs de structure des charbons fournit des résultats fiables.**

Les volumes microporeux  $W_0$  obtenus par adsorption de solvants et adsorption d'argon sont relativement semblables. Les facteurs de structure  $B$  obtenus par ces mêmes approches sont plus dissemblables. En effet, pour l'adsorption d'argon la valeur  $B$  attitrée est pour tous les charbons

un même multiple ( $3,56 \cdot 10^{-5}$ ) de leur volume microporeux  $W_0$ , ce qui annule les différences entre facteurs de structure réels. L'hypothèse simplificatrice  $B = 3,56 \cdot 10^{-5} * W_0$  peut ainsi entraîner et propager de l'incertitude dans le calcul des temps de claquage  $T_{CL10\%}$ . C'est donc l'adsorption de solvants sur cartouches réelles qui nous mène à obtenir un meilleur accord entre les capacités d'adsorption  $W_e$  mesurées et calculées, bien que les différences avec l'adsorption de solvants sur minicartouches et l'adsorption d'argon soient également acceptables.

### **Les valeurs prédites de temps de claquage sont en bon accord avec les valeurs expérimentales.**

La comparaison des temps de claquage  $T_{CL10\%}$  expérimentaux avec les valeurs du modèle, en utilisant trois différents couples  $W_0, B$  pour un même charbon, les 11 cartouches, et deux méthodes de calcul de  $k_v$  met en évidence une sous-estimation du modèle. Cette tendance, plutôt que l'inverse, est préférable, car elle rajoute un « facteur de sécurité » lors de l'utilisation des cartouches en milieu de travail. En effet, les conditions rencontrées en milieux réels sont bien plus complexes : variation des concentrations, présence de mélange de solvants, utilisation intermittente, conditions de stockage non maîtrisées...

Les différences relatives moyennes entre  $T_{CL10\%}$  mesurés et calculés varient entre 13,7 et 17,7 %. Les différences relatives médianes entre  $T_{CL10\%}$  mesurés et calculés varient entre 13,1 et 18,6 %. Ces données indiquent une bonne capacité du modèle à prédire les  $T_{CL10\%}$ . Les meilleurs résultats sont atteints quand les volumes microporeux  $W_0$  et les facteurs de structure  $B$  des charbons utilisés proviennent des tests d'adsorption de solvants sur cartouches réelles. Ceci étant, les résultats obtenus par adsorption de solvant sur minicartouches et adsorption d'argon sont très semblables, et donc acceptables. Ceci est d'autant plus vrai que les  $T_{CL10\%}$  expérimentaux proviennent d'une seule mesure pour toutes les cartouches (excepté la cartouche 3M 6001), ce qui impose la prudence dans les conclusions.

La méthode de Wu pour calculer le  $k_v$  n'améliore pas de manière sensible les différences relatives entre  $T_{CL10\%}$  mesurés et calculés, excepté pour le chlorure de méthylène. Ce composé a été choisi dans les expérimentations, car sa température d'ébullition (39,75 °C) est proche de la limite inférieure d'utilisation des cartouches de protection contre les vapeurs organiques (40 °C). Il n'est cependant pas autorisé d'utiliser ces cartouches pour se protéger de ce composé. Par ailleurs, la nécessité d'obtenir la constante diélectrique  $\epsilon$  pour chaque composé pour le calcul de  $k_v$  risque de diminuer son intérêt. Dans notre base de données, 29 composés sur 167 en sont dénués. Enfin, la connaissance nécessaire de la distribution de tailles de granules de charbon dans chacune des cartouches requiert des expérimentations supplémentaires, quoique simples à réaliser dans les faits. De manière plus exploratoire, il serait bon d'exploiter les données des tests de claquage afin de calculer des  $k_v$  expérimentaux et de les comparer aux valeurs calculées, *a fortiori* si les temps de claquage cherchant à être estimés sont supérieurs à  $T_{CL10\%}$  ( $T_{CL20\%}$ ,  $T_{CL30\%}$ ...).

Pour l'heure, l'outil Saturisk fonctionne donc avec deux nouvelles bases de données: solvants et charbons-cartouches. Des modifications substantielles ont été réalisées dans l'algorithme de calcul des temps de claquage 10 %, avec lesquelles les utilisateurs devront se familiariser. Les



données de structure des charbons utilisés sont celles obtenues à partir d'adsorption de solvants sur cartouches réelles. Saturisk est accompagné d'un document expliquant son fonctionnement et ses limites.



## BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Gouvernement du Québec**, *Loi sur la santé et la sécurité du travail (LSST) [S-2.1]*, éditeur officiel du Québec (1979).
- [2] **Gouvernement du Québec**, *Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST) [S-2.1, r. 13]*, éditeur officiel du Québec (2001).
- [3] **Lara J. et Vennes, M.**, *Guide des appareils de protection respiratoire utilisés au Québec*, guide réglementaire IRSST-CSST (2002).
- [4] **CSA**, *Choix, utilisation et entretien des appareils de protection respiratoire (CSA Z94.4-93)*. Toronto (1993).
- [5] **Lara J. et Vennes, M.**, *Guide pratique de protection respiratoire*, CSST-IRSST, Guide technique R-319 (2002), <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-319.pdf>, accédé le 11/02/15.
- [6] **Gérin M.**, *Solvants industriels. Santé, sécurité, substitution*. ed. Masson, Paris, France, (2002).
- [7] **Gérin M., Bégin D.**, *Substitution des solvants de milieu de travail. Élaboration d'un outil pour l'intervention*, IRSST, Études et recherches rapport R-098 (1995), <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-098.pdf>, accédé le 11/02/15.
- [8] **Vézina M., Cloutier E., Stock S., Lippel K., Fortin E., Delisle A., St-Vincent M., Funes A., Duguay P., Vézina S., Prud'homme P.**, *Enquête québécoise sur des conditions de travail, d'emploi et de santé et de sécurité du travail (EQCOTESST)*, IRSST, Études et recherches rapport R-691 (2011), <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-691.pdf>, accédé le 11/02/15.
- [9] **Nelson G.O., Correia N.**, *Respirator cartridge efficiency studies: VIII summary and conclusions*, Am. Indus. Hyg Assoc. J. 37, 461-468 (1976).
- [10] **Linders M.J.G., Mallens E.P.J., Van Bokhoven J.J.G.M., Kapteijn F., Moulijn J.A.**, *Breakthrough of shallow activated carbon beds under constant and pulsating flow*, Am. Indus. Hyg Assoc. J. 64, 173-180 (2003).
- [11] **Lodewyckx P., Vansant E.F.**, *The influence of humidity on the overall mass transfer coefficient of the Wheeler-Jonas equation*, Am. Indus. Hyg Assoc. J. 61, 461-468 (2000).
- [12] **Yoon Y.H., Nelson J.H., Lara J.**, *Respirator cartridge service-life: exposure to mixtures*, Am. Indus. Hyg Assoc. J. 57, 809-819 (1996).
- [13] **Wood G.O., Moyer E.S.**, *A review and comparison of adsorption isotherm equations used to correlate and predict organic vapor cartridge capacities*, Am. Indus. Hyg Assoc. J. 52, 235-242 (1991).
- [14] **Favas G.**, *End of Service Life Indicator (ESLI) for Respirator Cartridges. Part I: Literature Review*, rapport DSTO-TN-0657 (2005).

- [15] **Wood G.O.**, *Reviews of models for adsorption of single vapors, mixtures of vapors, and vapors at high humidities on activated carbon for applications including predicting service life of organic vapors respirators cartridges*, rapport LA-UR-00-1531 (2000).
- [16] **Grévillet G., Marsteau S., Vallières C.**, *A comparison of the Wheeler-Jonas model and the linear driving force at constant-pattern model for the prediction of the service time of activated carbon cartridges*, J. Occup. Environ. Hyg 8, 279-288 (2011).
- [17] **Wood G.O.**, *Estimating service lives of organic vapor cartridges*, Am. Indus. Hyg Assoc. J. 55, 11-15 (1994).
- [18] **Dubin M.M.**, *Fundamentals of the theory of adsorption in micropores of carbon adsorbents: characteristics of their adsorption properties and microporous structures*, Carbon 27, 457-467 (1989).
- [19] **Lodewyckx P., Wood G.O., Ryu S.K.**, *The Wheeler-Jonas equation: a versatile tool for the prediction of carbon bed breakthrough times*, Carbon 42, 1351-1355 (2004).
- [20] **Jonas L.A., Rehrmann J.A.**, *Predictive equations in gas adsorption kinetics*, Carbon 11, 59-64 (1973).
- [21] **Wood G.O.**, *Activated carbon adsorption capacities for organic vapors*, Carbon 30, 593-599 (1992).
- [22] **Hung H-W., Lin T-F.**, *Prediction of the adsorption capacity for volatile organic compounds onto activated carbons by the Dubinin-Radushkevich-Langmuir model*, J. Air Waste Manage. Assoc. 57, 497-506 (2007).
- [23] **Wood G.O., Stampfer J.F.**, *Adsorption rate coefficients for gases and vapors on activated carbons*, Carbon 31, 195-200 (1993).
- [24] **Wu J., Claesson O., Fangmark I., Hammarstrom L-G.**, *A systematic investigation of the overall rate coefficient in the Wheeler-Jonas equation for adsorption on dry activated carbons*, Carbon 43, 481-490 (2005).
- [25] **Wood G.O.**, *Estimating service lives of organic vapor cartridges ii: a single vapor at all humidities*, J. Occup. Environ. Hyg. 1, 472-492 (2004).
- [26] **Wood G.O., Snyder J.L.**, *Estimating service lives of organic vapor cartridges iii: multiple vapors at all humidities*, J. Occup. Environ. Hyg. 4, 363-374 (2007).
- [27] **Wood G.O., Snyder J.L.**, *Estimating reusability of organic air-purifying respirator cartridges*, J. Occup. Environ. Hyg. 8, 609-617 (2011).
- [28] **OSHA**, *Inspection procedures for the Respiratory Protection Standard*, CPL 02-00-120 (1998).
- [29] <http://webapps.msanet.com/ResponseGuide/Home.aspx>, accédé le 01/04/14.
- [30] <http://extra8.3m.com/SLSWeb/home.html?region=AMERICA&regId=21&langCode=EN&countryName=Canada-English>, accédé le 01/04/14.
- [31] <https://www.scottsurelife.com/Desktopin.aspx?RegionId=MQ%3d%3d-PMHQ7K9J3Kg%3d>, accédé le 01/04/14.

- [32] **NIOSH**, *MultiVapor™ Version 2.2.3 application*, publication No. 2010-124C (2010), <http://www.cdc.gov/niosh/npptl/multivapor/multivapor.html>, accédé le 01/04/14.
- [33] **INRS**, *Premedia*, <https://premedia.inrs.fr/Premedia/jsp/Accueil.jsp>, accédé le 01/04/14.
- [34] **IRSST**, *Saturisk*, <http://www.irsst.qc.ca/media/Outils/tsc/intro.html>, accédé le 01/04/14.
- [35] **Lara J., Yoon Y.H., Nelson J.H.**, *Le temps de service des cartouches filtrantes avec des mélanges binaires de contaminants*, IRSST, Études et recherches rapport R-065 (1993), <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-065.pdf>, accédé le 11/02/15.
- [36] **Cossement D., Bellasfar I., Dubois P.-D., Bose T.K., Lara J., Drolet D., Lemay F., Fortin Z.**, *Mise au point et validation d'un outil de calcul du temps de service des cartouches filtrantes pour vapeurs organiques*, IRSST, Études et recherches rapport R-542 (2008), <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-542.pdf>, accédé le 11/02/15.
- [36] **Yaws C.**, *The Yaws handbook of vapor pressure: antoine coefficients*, Golf publishing company, 1st edition, Houston, USA (2007).
- [37] **Haynes W.M.**, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press, 92nd edition, Boca Raton, USA (2011-2012).
- [38] **Speight J.G.**, *Lange's Handbook of Chemistry*, McGraw-Hill companies, 16th edition, New York, USA (2004).
- [39] **CSST**, *répertoire toxicologique*, <http://www.csst.qc.ca/prevention/reptox/Pages/repertoire-toxicologique.aspx>, accédé le 01/04/14.
- [40] **NIOSH**, *Certified equipment list*, <http://www.cdc.gov/niosh/npptl/topics/respirators/cel/>, accédé le 01/04/14.
- [41] **ASTM**, ASTM D2854, *Standard Test Method for Apparent Density of Activated Carbon* (2009).
- [42] **Rouquerol F., Rouquerol J., Sing K.**, *Adsorption by powders and porous solids; Principles, methodology and applications*, Academic Press, London, UK (1998).
- [43] **Jagiello J., Thommes M.**, *Comparison of DFT characterization methods based on N<sub>2</sub>, Ar, CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub> adsorption applied to carbons with various pore size distributions*, Carbon 42, 1227-1232 (2004).
- [44] **Wood G.O.**, *D-R plots and typical parameters for several ov and multigas cartridges and canisters*, J. Int. Soc. Resp. Protec. 26, 71-81 (2009).
- [45] **AFNOR**, NF EN ISO 6145-4, *Analyse des gaz - Préparation des mélanges de gaz pour étalonnage à l'aide de méthodes volumétriques dynamiques - Partie 4 : méthode continue par seringue d'injection* (2008).
- [46] **Jones J.W.F., Smith M.E.**, CBDE protocol for snowstorm filling of carbon filter beds, CBDE technical note n° 1242 (1992).
- [47] **Wood G.O., Stampfer J.F.**, *Adsorption rate coefficients for gases and vapors on activated carbons*, Carbon 31, 195-200 (1993).
- [48] **Nelson G.O., Correia N., Harder C.A.**, *Respirator cartridge efficiency studies: vii. Effect of relative humidity and temperature*, Am. Indus. Hyg Assoc. J. 37, 280-288 (1976).

- [49] **Lodewyckx P., Vansant E.F.**, *The influence of humidity on the overall mass transfer coefficient of the wheeler-jonas equation*, Am. Indus. Hyg Assoc. J. 61, 461-468 (2000).
- [50] **Wood G.O.**, *Estimating service lives of organic vapor cartridges II: A single vapor at all humidities*. J. Occup. Environ. Hyg. 1, 472-92 (2004).
- [51] **Yoon Y.H., Nelson J.H., Lara J., Kamel C., Fregeau D.**, *Theoretical interpretation of the service life of respirator cartridges for the binary acetone/m-xylene system*, Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 52, 65-74 (1991).
- [52] **Yoon Y.H., Nelson J.H., Lara J., Kamel C., Fregeau D.**, *A theoretical model for respirator cartridge service life for binary systems: application to acetone/styrene mixtures*, Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 53, 493-502 (1992).
- [53] **Wood G.O.**, *A review of the effects of covapors on adsorption rate coefficients of organic vapors adsorbed onto activated carbon from flowing gases*, Carbon 40, 685-694 (2002).
- [54] **Sing K.S.W., Everett D.H., Haul R.W., Moscou L., Pierotti R.A., Rouquerol J. and Siemieniewska T.**, *Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity*, Pure Appl. Chem. 57, 603-619 (1985).
- [55] **Wood, G.O.**, *Quantification and application of skew of breakthrough curves for gases and vapors eluting from activated carbon beds*, Carbon 40, 1883-1890 (2002).
- [56] **Wood G.O.**, *Organic vapor respirator cartridge breakthrough curve analysis*, J. Int. Soc. Resp. Prot. 10, 5-17 (1993).
- [57] **Wood G.O., Lodewyckx P.**, *An extended equation for rate coefficient for adsorption of organic vapors and gases on activated carbons in air-purifying respirators cartridges*, Am. Indus. Hyg Assoc. J. 64, 646-650 (2003).
- [58] **Lodewyckx P., Blacher S., Léonard A.**, *Use of X-ray microtomography to visualise dynamic adsorption of organic vapor and water vapor on activated carbon*, Adsorption 12, 19-26 (2006).
- [59] **Jonas L.A., Deitz V.R., Romans J.B.**, *Desorption kinetics of methyl iodide from impregnated charcoal*, Nucl. Technol. 48, 77-83 (1980).
- [60] **Wood G.O., Moyer E.S.**, *A review of the wheeler equation and comparison of its applications to organic vapor respirator cartridge breakthrough data*, Am. Indus. Hyg Assoc. J. 50, 400-407 (1989).
- [61] **CSA**, *Choix, utilisation et entretien des appareils de protection respiratoire (CSA Z94.4-11)*. Toronto (2011).

## ANNEXE A : COMPOSÉS PRÉSENTS DANS LA NOUVELLE BASE DE DONNÉES SATURISK

Composés	VEMP (ppm)	DIVS (ppm)
Acétate d'amyle normal	50	1000
Acétate d'amyle secondaire	50	1000
Acétate de butyle normal	150	1700
Acétate de butyle secondaire	200	1700
Acétate de butyle tertiaire	200	1500
Acétate de méthyle	200	3100
Acétate de méthylglycol	5	200
Acétate de propyle normal	200	1700
Acétate de vinyle	10	26000
Acétate d'éthyle	400	2000
Acétate d'éthylglycol	5	500
Acétate d'hexyle secondaire	50	500
Acétate d'isoamyle	50	1000
Acétate d'isobutyle	150	1300
Acétate d'isopropyle	250	1800
Acétone	500	2500
Acétophénone	10	11000
Acide acétique	10	50
Acide acrylique	2	24000
Acide méthacrylique	20	16000
Acide propanoïque	10	29000
Acrylate de butyle normal	2	15000
Acrylate de méthyle	2	250
Acrylate d'éthyle	5	300
Alcool allylique	2	20
Alcool butylique normal		1400
Alcool butylique secondaire	100	2000
Alcool butylique tertiaire	100	1600
Alcool chloro-2 éthylique		7
Alcool éthylique	1000	3300
Alcool furfurylique	10	75
Alcool isoamylique	100	500
Alcool isobutylique	50	1600
Alcool isooclylique	50	9000
Alcool isopropylique	400	2000
Alcool méthylamylique	25	400
Alcool propargylique	1	
Alcool propylique normal	200	800
Aldéhyde crotonique	2	50
Aldéhyde valérique normal	50	

Alpha-Méthylstyrène	50	700
Amino-2 éthanol	3	30
Anhydride acétique	5	200
Aniline	2	100
Benzène	1	500
bêta-Chloroprène	10	300
Bromoforme	0,5	850
Butoxy-2 éthanol	20	700
Butyl mercaptan	0,5	500
Butylamine normal		300
Carbone, disulfure de	4	500
Carbone, tétrachlorure de	5	200
Chloro-3 propène	1	250
Chlorobenzène	50	1000
Chlorobromométhane	200	2000
Chloroforme	5	500
Chloropicrine	0,1	2
Chlorure de benzyle	1	10
Chlorure de chloroacétyle	0,05	
Crésol, tous les isomères	5	250
Cumène	50	900
Cyanohydrine d'acétone		22000
Cyclohexane	300	1300
Cyclohexanol	50	400
Cyclohexanone	25	700
Cyclohexène	300	2000
Cyclohexylamine	10	15000
Cyclopentadiène	75	750
Cyclopentane	600	11000
Diacétone alcool	50	1800
Diamino-1,2 éthane	10	1000
Dibromo-1,2 éthane	20	100
Dichloro-1,1 éthane	100	3000
Dichloro-1,2 éthane	1	50
Dichloro-1,2 éthylène	200	1000
Dichloro-1,2 propane	75	400
Dichloro-1,4 butène-2	0,005	15000
Diéthyl cétone	200	16000
Diéthylamine	3	200
Diéthylamino-2 éthanol	10	100
Diéthylène triamine	1	20000
Diisobutyl cétone	25	500
Diisopropylamine	5	200
Diméthyl-1,1 hydrazine	0,5	15



Dioxane	20	500
Divinylbenzène	10	11000
Épichlorohydrine	2	75
Éther d'allyle et glycidyle	5	50
Éther de dichloroéthyle	5	100
Éther de méthyle et de butyle tertiaire	40	16000
Éther diisopropylique	250	1400
Éther monoéthylique de l'éthylène glycol	5	500
Éther monométhylique de l'éthylène glycol	5	200
Éther monométhylique de propylène glycol	100	16000
Éthyl amyl cétone	25	100
Éthylbenzène	100	800
Éthylbutylcétone	50	1000
Formamide	10	27000
Formate d'éthyle	100	1500
Furfural	2	100
Halothane	50	
Heptane normal	400	750
Hexachlorobutadiène	0,02	
Hexachlorocyclopentadiène	0,01	
Hexane normal	50	1100
Hexylène glycol		13000
Indène	10	10000
Iodure de méthyle	2	100
Isophorone		200
Isopropoxyéthanol	25	16000
Méthacrylate de méthyle (monomère)	50	1000
Méthyl éthyl cétone	50	3000
Méthyl isoamyl cétone	50	10000
Méthyl isobutyl cétone	50	500
Méthyl isopropyl cétone	200	15000
Méthyl n-amyl cétone	50	800
Méthyl n-butyl cétone	5	1600
Méthyl propyl cétone	150	1500
Méthylacrylonitrile	1	20000
Méthylal	1000	2200
Méthylchloroforme	350	700
Méthylcyclohexane	400	1200
Méthylcyclohexanol	50	500
Morpholine	20	1400
m-Toluidine	2	11000
N,N-Diméthylacétamide	10	300
N,N-Diméthylaniline	5	100
N,N-Diméthylformamide	10	500

N-Isopropylaniline	2	
Nitrate de propyle normal	25	500
Nitro-1 propane	25	1000
Nitro-2 propane	10	100
Nitrobenzène	1	200
Nitroéthane	100	1000
Nitrométhane	100	750
N-Méthylaniline	0,5	100
Nonane	200	8000
o-Chlorostyrène	50	
o-Chlorotoluène	50	10000
Octane	300	1000
o-Dichlorobenzène		200
o-Méthylcyclohexanone	50	600
o-sec-Butylphénol	5	
o-Toluidine	2	50
Oxyde de mésityle	10	1400
Perchloroéthylène	25	150
Phénylhydrazine	0,1	15
Phénylmercaptan	0,5	
p-tert-Butyltoluène	1	100
Pyridine	5	1000
Silicate de méthyle	1	
Silicate d'éthyle	10	700
Styrène (monomère)	50	700
Tétrabromo-1,1,2,2 éthane (Tétrabromure d'acétylène)	1	8
Tétrachloro-1,1,2,2, éthane (Tétrachlorure d'acétylène)	1	100
Tétrahydrofurane	100	2000
Toluène	50	500
Trichloro-1,1,2 éthane	10	100
Trichloro-1,1,2 trifluoro-1,2,2 éthane	1000	2000
Trichloro-1,2,3 propane	10	100
Trichloroéthylène	50	1000
Triéthylamine	5	200
Triméthylbenzène	25	8000
Vinyltoluène	50	400
Xylène	100	900
$\alpha$ -Pinène	20	
$\beta$ -Pinène	20	

### **Sources bibliographiques utilisées pour créer la base de données des solvants de Saturisk**

**Gouvernement du Québec**, *Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST) [S-2.1, r. 13]*, éditeur officiel du Québec (2001).

**Haynes W.M.**, *Handbook of Chemistry and Physics*, 92<sup>nd</sup> edition, CRC Press, Boca Raton, USA, (2011-2012).

**CSST**, *répertoire toxicologique*, <http://www.csst.qc.ca/prevention/reptox/Pages/repertoire-toxicologique.aspx>, accédé le 01/04/14.

**NIOSH**, *NIOSH pocket guide*, <http://www.cdc.gov/niosh/npg/>, accédé le 01/04/14.

**S.S. Murnane, A.H. Lehocky, P.D. Owens**, *Odor Thresholds for Chemicals with Established Occupational Health Standards*, 2<sup>nd</sup> Edition, AIHA ed., Falls Church, USA (2013).

**Yaws C.**, *The Yaws Handbook of Vapor Pressure. Antoine Coefficients*, Gulf Publishing Company, Houston, USA (2007).

**Speight J.G.**, *Lange's Handbook of Chemistry*, McGraw-Hill companies, 16<sup>th</sup> edition (2004)

**ACGIH**, *Documentation of the Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices*, 7<sup>th</sup> Edition, ACGIH, Cincinnati, USA, (2001).

<http://www.chemicalbook.com>

**3M**, *3M respirator selection guide* (2013), <http://multimedia.3m.com/mws/media/6391100/3m-respirator-selection-guide.pdf>, accédé le 01/04/14.

**NIH**, Division of Specialized Information Services, *Hazardous Substances Data Bank*, <http://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/htmlgen?HSDB>, accédé le 01/04/14.

**A.A. Marriet, E.R. Smith**, *table of dielectric constants of pure liquids*, United States department of commerce, National Bureau of Standards (1951)  
<http://www.boulder.nist.gov/div838/SelectedPubs/NBS%20Circular%20514.pdf>, accédé le 01/04/14

**NIEHS**, *National toxicology program*, <http://ntp.niehs.nih.gov/>, accédé le 01/04/14.  
Fiches de sécurité (Material Safety Data Sheet) provenant de SIGMA ALDRICH et MICROKAT



## **ANNEXE B : MASSE DE CHARBON ET DÉBITS D'AIR À TRAVERS LES MINICARTOUCHES.**

	Masse de charbon (g)	Débit d'air (L/min)
3M 6001	2,827	1,55
NORTH N75001L	3,920	2,22
MSA COMFO	3,833	1,84
MSA-ADVANTAGE	4,385	2,37
SURVIVAIR 100100	4,016	1,94
MOLDEX 7100	3,957	2,13
MOLDEX 8100	3,206	2,16
DRÄGER X-plore	3,378	1,82
SCOTT 7422-BC1	3,467	1,63
SCOTT 7422-BA1	2,096	1,63
SUNDSTRÖM SR 218-6	5,010	1,34



## ANNEXE C : $T_{CL10\%}$ MESURÉS ET CALCULÉS, ET LEURS DIFFÉRENCES RELATIVES.

	$T_{CL10\%}$ mesurés (min)	$T_{CL10\%}$ calculés (min)					
		$k_v$ -Wood			$k_v$ -Wu		
		$W_0, B$ cartouche réelle	$W_0, B$ mini- cartouche	$W_0, B$ argon	$W_0, B$ cartouche réelle	$W_0, B$ mini- cartouche	$W_0, B$ argon
<b>3M 6001</b>							
chlorure de méthylène	103	82	74	62	99	90	75
toluène	367	313	298	294	323	308	304
n-hexane	251	199	188	181	208	197	189
méthylisobutyl cétone	325	280	266	264	277	264	262
m-xylène	327	314	300	301	316	303	303
<b>NORTH N75001L</b>							
chlorure de méthylène	86	71	69	67	81	79	77
toluène	330	285	290	266	287	292	268
n-hexane	235	180	181	168	182	184	170
méthylisobutyl cétone	295	256	260	238	250	254	233
m-xylène	308	287	293	267	283	289	264
<b>MSA COMFO</b>							
chlorure de méthylène	88	82	64	61	93	73	69
toluène	335	257	261	301	259	264	303
n-hexane	232	168	164	183	170	167	186
méthylisobutyl cétone	282	229	235	271	226	231	267
m-xylène	288	253	263	308	250	261	305
<b>MSA-ADVANTAGE</b>							
chlorure de méthylène	121	101	87	80	117	100	92
toluène	405	315	327	327	321	333	333
n-hexane	280	205	208	205	211	214	211
méthylisobutyl cétone	345	281	293	293	278	290	291
m-xylène	366	310	327	329	310	327	330
<b>SURVIVAIR 100100</b>							
chlorure de méthylène	84	81	72	93	92	82	106
toluène	281	306	301	290	308	304	292
n-hexane	201	194	188	189	197	191	192
méthylisobutyl cétone	268	274	270	259	267	264	252
m-xylène	277	306	304	285	303	301	282

	$T_{CL10\%}$ mesurés (min)	$T_{CL10\%}$ calculés (min)					
		$k_v$ - Wood			$k_v$ - Wu		
		$W_{0,B}$ cartouche réelle	$W_{0,B}$ mini- cartouche	$W_{0,B}$ argon	$W_{0,B}$ cartouche réelle	$W_{0,B}$ mini- cartouche	$W_{0,B}$ argon
<b>MOLDEX 7100</b>							
chlorure de méthylène	127	112	90	80	126	101	90
toluène	388	323	293	313	323	294	313
n-hexane	272	213	190	198	215	192	199
méthylisobutyl cétone	336	288	262	281	280	255	273
m-xylène	346	315	290	314	310	285	309
<b>MOLDEX 8100</b>							
chlorure de méthylène	59	63	49	65	72	56	74
toluène	273	231	229	225	232	229	225
n-hexane	183	148	141	144	149	143	146
méthylisobutyl cétone	253	207	206	201	200	199	194
m-xylène	261	231	234	223	227	229	219
<b>DRÄGER X-plore</b>							
chlorure de méthylène	110	102	88	74	117	101	85
toluène	371	319	322	314	324	326	319
n-hexane	259	208	205	196	213	210	201
méthylisobutyl cétone	333	285	288	282	280	282	277
m-xylène	334	314	321	318	313	319	316
<b>SCOTT 7422-BC1</b>							
chlorure de méthylène	105	96	72	86	112	84	100
toluène	437	346	324	361	358	336	374
n-hexane	288	221	201	225	231	209	235
méthylisobutyl cétone	422	309	291	324	312	294	327
m-xylène	402	345	329	364	350	335	370
<b>SCOTT 7422-BA1</b>							
chlorure de méthylène	60	47	37	41	62	50	55
toluène	265	197	190	190	207	200	200
n-hexane	178	124	117	118	133	125	126
méthylisobutyl cétone	259	175	171	170	175	171	169
m-xylène	251	199	197	194	203	200	197
<b>SUNDSTRÖM SR 218-6</b>							
chlorure de méthylène	205	201	185	170	207	192	175
toluène	694	693	672	725	677	656	708
n-hexane	460	443	427	450	435	419	442
méthylisobutyl cétone	635	622	603	653	576	559	605
m-xylène	664	687	668	732	663	645	706



	Différences relatives (%)					
	$k_v$ -Wood			$k_v$ -Wu		
	$W_{0,B}$ cartouche réelle	$W_{0,B}$ mini- cartouche	$W_{0,B}$ argon	$W_{0,B}$ cartouche réelle	$W_{0,B}$ mini- cartouche	$W_{0,B}$ argon
<b>3M 6001</b>	14,8	19,6	22,8	10,1	15,3	19,1
chlorure de méthylène	20,5	27,8	39,6	3,7	12,5	26,8
toluène	14,8	18,9	19,9	11,9	16,2	17,3
n-hexane	20,7	25,0	27,7	17,2	21,7	24,5
méthylisobutyl cétone	14,0	18,0	18,8	14,7	18,7	19,5
m-xylène	4,0	8,2	8,1	3,2	7,5	7,3
<b>NORTH N75001L</b>	15,0	14,2	20,4	13,0	12,3	18,5
chlorure de méthylène	17,7	19,2	21,8	6,1	7,9	10,8
toluène	13,6	12,2	19,4	13,0	11,6	18,9
n-hexane	23,6	22,8	28,6	22,5	21,7	27,6
méthylisobutyl cétone	13,3	11,8	19,2	15,2	13,8	21,0
m-xylène	6,7	5,0	13,2	8,0	6,2	14,3
<b>MSA COMFO</b>	17,7	20,7	11,8	15,3	18,8	10,1
chlorure de méthylène	6,5	26,7	31,1	-5,8	17,1	22,1
toluène	23,3	22,0	10,2	22,7	21,3	9,5
n-hexane	27,8	29,2	20,9	26,7	28,2	19,7
méthylisobutyl cétone	18,6	16,8	3,9	19,9	18,1	5,4
m-xylène	12,2	8,6	-7,1	13,1	9,5	-6,0
<b>MSA-ADVANTAGE</b>	19,8	19,7	20,9	16,7	17,0	18,4
chlorure de méthylène	16,2	28,0	33,8	3,5	17,1	23,7
toluène	22,3	19,2	19,3	20,8	17,7	17,7
n-hexane	26,6	25,8	26,7	24,6	23,7	24,7
méthylisobutyl cétone	18,6	15,1	15,0	19,4	15,9	15,8
m-xylène	15,4	10,6	10,0	15,4	10,6	10,0
<b>SURVIVAIR 100100</b>	-2,9	0,5	-1,5	-5,2	-1,6	-4,3
chlorure de méthylène	3,7	14,2	-11,2	-9,4	2,6	-26,3
toluène	-8,8	-7,2	-3,1	-9,7	-8,0	-3,9
n-hexane	3,4	6,2	5,9	1,9	4,7	4,4
méthylisobutyl cétone	-2,2	-0,9	3,5	0,2	1,5	5,8
m-xylène	-10,5	-9,9	-2,9	-9,3	-8,6	-1,7

	Différences relatives (%)					
	$k_v$ -Wood			$k_v$ -Wu		
	$W_{0,B}$ cartouche réelle	$W_{0,B}$ mini- cartouche	$W_{0,B}$ argon	$W_{0,B}$ cartouche réelle	$W_{0,B}$ mini- cartouche	$W_{0,B}$ argon
<b>MOLDEX 7100</b>	14,7	24,4	21,9	13,1	23,2	20,9
chlorure de méthylène	11,7	29,1	36,9	1,1	20,5	29,3
toluène	16,8	24,4	19,4	16,6	24,3	19,2
n-hexane	21,7	30,1	27,4	21,0	29,5	26,7
méthylisobutyl cétone	14,3	22,0	16,5	16,7	24,1	18,8
m-xylène	8,8	16,3	9,3	10,3	17,6	10,7
<b>MOLDEX 8100</b>	11,5	16,8	12,8	9,3	15,3	10,5
chlorure de méthylène	-6,6	16,2	-9,7	-21,3	4,7	-24,8
toluène	15,2	16,1	17,7	15,2	16,1	17,7
n-hexane	19,3	22,8	21,1	18,6	22,1	20,4
méthylisobutyl cétone	18,1	18,6	20,6	20,8	21,2	23,2
m-xylène	11,4	10,5	14,5	13,2	12,3	16,1
<b>DRÄGER X-plore</b>	12,2	14,2	18,4	9,4	11,7	16,3
chlorure de méthylène	7,3	19,6	32,4	-6,1	7,9	22,6
toluène	13,9	13,3	15,3	12,8	12,1	14,1
n-hexane	19,6	20,7	24,2	17,8	19,0	22,5
méthylisobutyl cétone	14,4	13,6	15,3	16,1	15,2	16,9
m-xylène	5,9	3,9	4,8	6,4	4,5	5,4
<b>SCOTT 7422-BC1</b>	18,7	27,3	18,1	13,9	23,5	13,6
chlorure de méthylène	8,5	31,4	18,5	-7,1	19,7	4,6
toluène	20,9	25,9	17,5	18,0	23,2	14,5
n-hexane	23,3	30,4	21,8	19,9	27,3	18,3
méthylisobutyl cétone	26,7	31,0	23,3	26,0	30,3	22,6
m-xylène	14,3	18,1	9,3	12,9	16,7	7,9
<b>SCOTT 7422-BA1</b>	26,2	31,2	30,2	19,1	25,2	23,7
chlorure de méthylène	22,4	37,9	31,7	-3,4	17,3	9,0
toluène	25,8	28,1	28,5	21,9	24,4	24,7
n-hexane	30,1	34,1	33,5	25,4	29,7	29,0
méthylisobutyl cétone	32,3	34,1	34,5	32,3	34,1	34,6
m-xylène	20,5	21,7	22,7	19,1	20,3	21,4
<b>SUNDSTRÖM SR 218-6</b>	0,9	4,9	0,4	3,2	7,1	3,0
chlorure de méthylène	2,2	9,5	17,3	-1,2	6,4	14,4
toluène	0,1	3,2	-4,4	2,5	5,5	-2,0
n-hexane	3,6	7,2	2,2	5,4	8,9	4,0
méthylisobutyl cétone	2,1	5,1	-2,8	9,2	11,9	4,7
m-xylène	-3,4	-0,6	-10,2	0,2	2,9	-6,3