

1993

Le temps de service des cartouches filtrantes avec des mélanges binaires de contaminants

Jaime Lara
IRSST

Young Hee Yoon
DataChem Laboratories

James H. Nelson
DataChem Laboratories

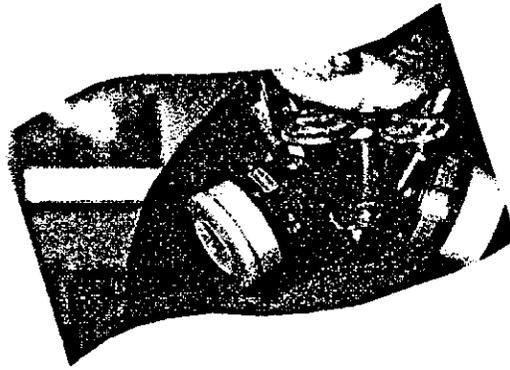
Suivez ce contenu et d'autres travaux à l'adresse suivante: <https://pharesst.irsst.qc.ca/rapports-scientifique>

Citation recommandée

Lara, J., Hee Yoon, Y. et Nelson, J. H. (1993). *Le temps de service des cartouches filtrantes avec des mélanges binaires de contaminants* (Rapport n° R-065). IRSST.

Ce document vous est proposé en libre accès et gratuitement par PhareSST. Il a été accepté pour inclusion dans Rapports de recherche scientifique par un administrateur autorisé de PhareSST. Pour plus d'informations, veuillez contacter pharesst@irsst.qc.ca.

**Le temps de service
des cartouches
filtrantes avec
des mélanges binaires
de contaminants**



**ÉTUDES ET
RECHERCHES**

Jaime Lara
Young Kee Yoon
James H. Nelson

Avril 1993

R-065

RAPPORT



IRSST
Institut de recherche
en santé et en sécurité
du travail du Québec

La recherche, pour mieux comprendre

L'Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec (IRSST) est un organisme de recherche scientifique voué à l'identification et à l'élimination à la source des dangers professionnels, et à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes. Financé par la CSST, l'Institut réalise et finance, par subvention ou contrats, des recherches qui visent à réduire les coûts humains et financiers occasionnés par les accidents de travail et les maladies professionnelles.

Pour tout connaître de l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par la CSST et l'Institut.

Les résultats des travaux de l'Institut sont présentés dans une série de publications, disponibles sur demande à la Direction des communications.

Il est possible de se procurer le catalogue des publications de l'Institut et de s'abonner à *Prévention au travail* en écrivant à l'adresse au bas de cette page.

ATTENTION

Cette version numérique vous est offerte à titre d'information seulement. Bien que tout ait été mis en œuvre pour préserver la qualité des documents lors du transfert numérique, il se peut que certains caractères aient été omis, altérés ou effacés. Les données contenues dans les tableaux et graphiques doivent être vérifiées à l'aide de la version papier avant utilisation.

Dépôt légal
Bibliothèque nationale du Québec

IRSST - Direction des communications
505, boul. de Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1 551
Télécopieur: (514) 288-7636
Site internet : www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche en santé
et en sécurité du travail du Québec,

**Le temps de service
des cartouches
filtrantes avec
des mélanges binaires
de contaminants**

Jaime Lara

Programme sécurité-ingénierie, IRSST

Young Nee Yoon et James H. Nelson

DataChem Laboratories

avec la collaboration de

Daniel Drolet

Programme hygiène et toxicologie, IRSST

**ÉTUDES ET
RECHERCHES**

RAPPORT

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.

© Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec, avril 1993.

2^e trimestre 1993.

TABLE DES MATIÈRES

Page

1.	INTRODUCTION	1
2.	PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE	4
2.1	Les produits chimiques	4
2.2	Le choix des systèmes	4
2.3	Le montage	5
2.4	Les cartouches	9
2.5	L'évaluation du temps de service	9
3.	RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	10
3.1	Système I. Acétone/m-xylène	10
3.1.1	Les systèmes simples	10
3.1.2	Le système binaire	15
3.1.3	Temps de service au 10 % de claquage	22
3.1.4	Effet de concentration	25
3.2	Système II. Acétone/styrène	26
3.2.1	Le système simple	26
3.2.2	Le système binaire	27
3.2.3	Temps de service au 10 % de claquage	32
3.2.4	Effet de la concentration	34
3.3	Système III. Toluène/m-xylène	36
3.3.1	Les systèmes simples	36
3.3.2	Le système binaire	38
3.3.3	Le temps de service au 10 % de claquage	45
3.3.4	Effet de la concentration	48
4.	CONCLUSION	49
	RÉFÉRENCES	52

Remerciements

Nous remercions toutes les personnes qui nous ont permis de réaliser cette étude. Nous remercions particulièrement messieurs Cherif Kamel, Daniel Fréreau et Stéphane Côté pour la réalisation des essais et le traitement des données.

1. INTRODUCTION

Les appareils de protection respiratoire filtrants

Les appareils de protection respiratoire du type filtrant sont les plus utilisés lorsqu'il y a dans l'air des polluants dangereux pour la santé. Dans ces appareils, l'utilisateur respire de l'air ambiant qui est débarrassé de ses polluants à l'aide d'un filtre (cartouche ou boîtier). Les polluants peuvent être de nature diverse, tels que des poussières, des aérosols, des fumées, des gaz ou des vapeurs. Dans le cas des poussières, des aérosols et des fumées, l'efficacité des cartouches augmente avec l'usage à cause du colmatage. L'utilisateur remarque une augmentation de la résistance respiratoire, ce qui peut être considéré comme un indicateur de la saturation de la cartouche. Dans le cas des gaz et des vapeurs, souvent l'odeur du polluant est le seul indicateur de la saturation de la cartouche.

Le type de filtre le plus en usage pour retenir les gaz et les vapeurs est celui qui utilise le charbon actif comme adsorbant. Les charbons adsorbants peuvent être de nature très variée suivant leur origine, à savoir, fabriqués à base de noix de coco ou bien d'origine minérale [1]. Ces charbons ont des propriétés qui diffèrent de beaucoup par rapport à leur capacité d'adsorption des polluants. Ceci est déterminé par l'aire de surface disponible pour l'adsorption et la présence plus ou moins importante des pores à l'intérieur des grains de charbon.

D'autres facteurs ayant un effet sur la capacité de filtration des cartouches sont : la quantité de charbon et leur densité de compactage dans les cartouches et la conception des cartouches pour utiliser efficacement toute la capacité d'adsorption du charbon actif. Pour ces raisons, des cartouches provenant de différents fabricants peuvent avoir des capacités de filtration très différentes pour le même contaminant.

Le temps de service des cartouches filtrantes

L'évaluation du temps de service des cartouches filtrantes pose un problème aux utilisateurs des masques de protection respiratoire. En effet, les travailleurs doivent se fier à l'odeur du/des contaminants, suivant la recommandation des fabricants, pour déterminer le moment où les cartouches sont saturées. Cette pratique est dangereuse car il est connu qu'il existe beaucoup de contaminants dont le seuil de détection olfactive est inférieur au TLV [1].

La seule information concernant l'efficacité des cartouches provient des organismes qui font les essais pour leur approbation suivant les normes existantes, dans le cas des États-Unis et du Canada, le National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH).

Les cartouches destinées à un usage spécifique pour des polluants tels que l'ammoniac, le formaldéhyde, le chlore, le bioxyde de soufre, l'oxyde de carbone et les gaz acides, sont soumises à des tests avec les gaz concernés. Pour certains de ces polluants, les cartouches sont munies d'un indicateur coloré indiquant la saturation.

Dans le cas des cartouches destinées aux vapeurs organiques, les essais sont réalisés avec un seul contaminant, le tétrachlorure de carbone, à une concentration constante de 1000 ppm, à 25°C et 70 % d'humidité avec un débit d'air de 52 L/min. Les informations générées à partir de ces essais ne sont pas utilisables pour estimer la durée de vie des cartouches car elles ne concernent qu'un seul contaminant. De plus, il est connu qu'il y a beaucoup de contaminants qui sont moins bien retenus que le tétrachlorure de carbone par les cartouches filtrantes [2].

Le problème demeure pour la plupart des vapeurs organiques pour lesquelles il n'existe pas d'indicateur de saturation. Pour cette raison, nos efforts dans cette recherche sont orientés vers le développement d'une méthode permettant d'estimer le temps de service des cartouches filtrantes en milieu de travail.

Depuis quelques années, beaucoup de recherches ont été faites afin de caractériser la capacité de filtration des cartouches avec différents types de polluants. Le travail le plus remarquable est celui réalisé par Gary Nelson [2 - 6] qui a évalué des cartouches filtrantes avec 121 différents solvants. Ces travaux ont démontré qu'il est possible de déterminer le temps de service des cartouches par des essais de laboratoire. Dans ce cas, les cartouches sont exposées à une concentration de polluant constante avec contrôle de l'humidité, du débit d'air et de la température. La caractérisation du temps de service des cartouches à différentes concentrations de polluant permet de générer des courbes du type montré à la Figure a. Cette figure représente le pourcentage du polluant qui traverse la cartouche (ou % de claquage) en fonction du temps. À partir de ces informations, il est possible de générer des courbes pour chaque polluant représentant le temps de service des cartouches à un pourcentage de claquage donné à différentes concentrations de polluant. La Figure b est un exemple de représentation du temps de service des cartouches au 10 % de claquage correspondant aux courbes de claquage présentées à la Figure a.

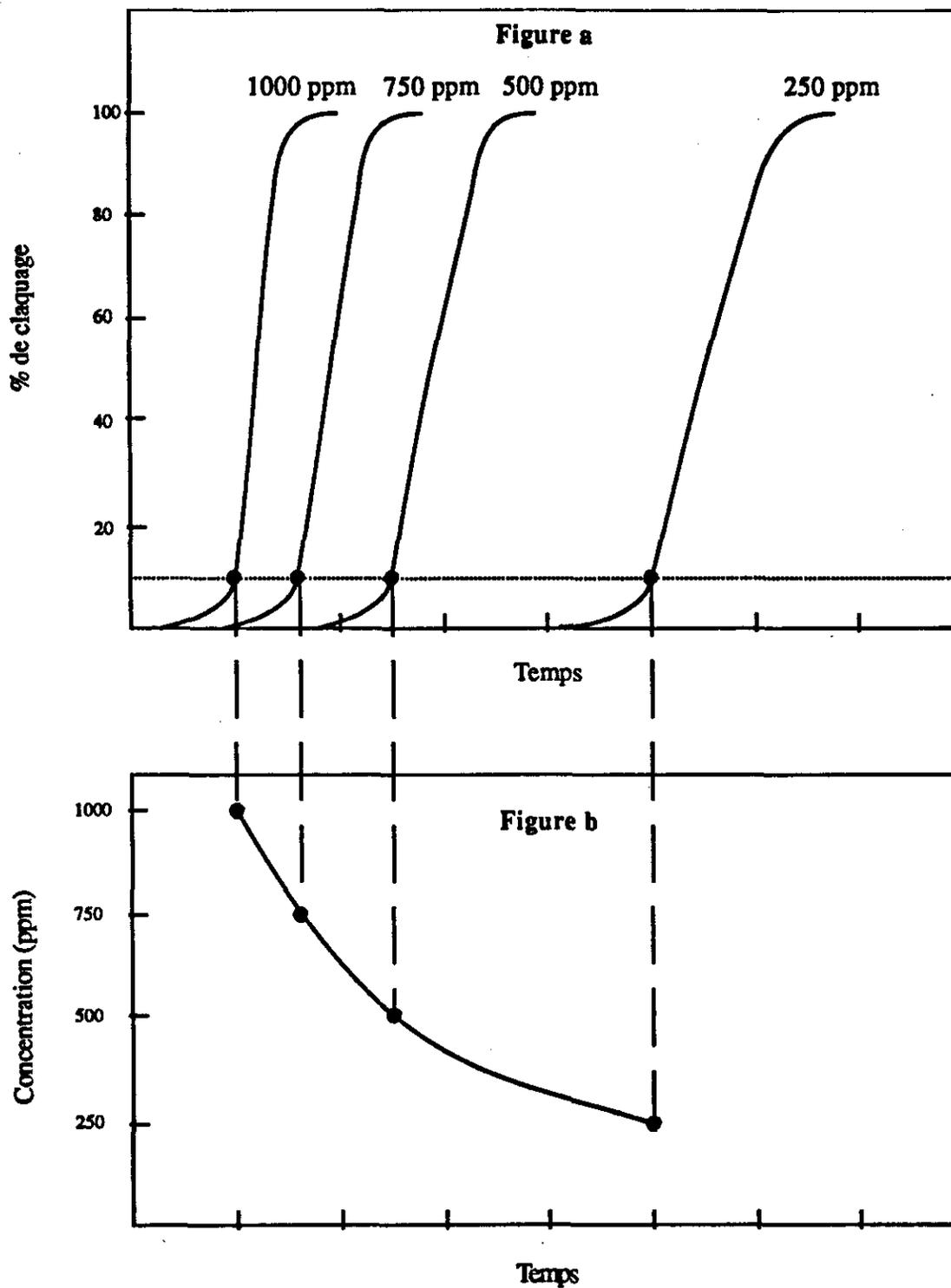


Figure a. Exemple de courbes de claquage pour un solvant pur

Figure b. Temps de service des cartouches au 10 % de claquage pour un solvant pur

L'utilisation pratique de ces résultats reste limitée car ces informations ne sont valables que pour les cas d'un seul contaminant. Dans l'air ambiant des milieux de travail, on retrouve souvent plus de deux polluants à la fois. De ce fait, il est très important d'approfondir les connaissances sur les mécanismes de rétention des vapeurs dans le charbon actif lorsqu'il y a plusieurs polluants dans l'air afin de prédire la durée de vie des cartouches filtrantes. Dans cette recherche, la capacité de filtration des cartouches exposées à des mélanges binaires des vapeurs organiques a été caractérisée.

2. PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

2.1 Les produits chimiques

Les produits chimiques utilisés pour la génération des polluants sont les suivants :

Tableau 1

Solvant	Qualité
Acétone	Certifié, Fisher
Styrène	Certifié, Fisher
m-Xylène	Certifié, Fisher
Toluène	HPLC, Baker

2.2 Le choix des systèmes

Nous avons choisi des systèmes très dissemblables de façon à représenter des situations extrêmes. Les systèmes acétone/m-xylène et toluène/m-xylène sont des exemples de mélanges binaires. Dans le premier cas, les propriétés physico-chimiques sont très différentes, le point d'ébullition de l'acétone étant de 56,5 °C et le volume molaire de 72,9 g/cm³, et le m-xylène avec un point d'ébullition de 139 °C et un volume molaire de 122,9 cm³/mole. Dans le deuxième cas, les caractéristiques physico-chimiques se ressemblent; le point d'ébullition du toluène est de 110,4 °C et le volume molaire de 106,4 cm³/mole. De plus, le toluène et le m-xylène ont en commun l'anneau benzénique. Dans le cas du mélange acétone/styrène, ce système a été choisi parce qu'on le retrouve dans les industries de fibre de verre, ce qui représente une situation réelle.

2.3 Le montage

Le montage expérimental pour évaluer le temps de service des cartouches filtrantes est représenté à la figure 1. Le montage est composé de quatre parties :

1 - *Système de génération composé de :*

- a) un système de contrôle de température, de débit d'air et d'humidité de la compagnie Miller-Nelson, modèle HCS-301 (Miller-Nelson Research, Inc., Dublin, Calif.) [N° 1];
- b) un système d'injection des polluants composé de deux seringues, une pour chaque solvant, dont la vitesse de déplacement du piston est contrôlée par un moteur [N° 2];
- c) une chambre d'exposition constituée d'une boîte en plexiglass ayant un volume de 120 L et où quatre cartouches peuvent être exposées simultanément aux polluants [N° 3].

2 - *Système respiratoire :*

Le système respiratoire est constitué d'un compresseur travaillant en aspiration à débit constant [N° 4]. Pour s'assurer d'obtenir un débit constant, des tubes en acier comportant un trou critique qui assure un débit de 36 L/min ou 24 L/min par cartouche, ont été installés dans le tuyau reliant les cartouches au système d'aspiration. De plus, des débitmètres ont été installés à la sortie de chaque cartouche.

Les débits d'air utilisés correspondent aux débits respiratoires des humains faisant un effort physique moyen ou élevé. En effet, d'après Silverman et al.,(7) le débit respiratoire moyen d'une personne peut varier entre 14 L/min en état de repos et 72 L/min lorsqu'elle fait un effort physique très élevé.

3 - Système d'analyse :

Le système de détection est composé :

- a) d'un sélecteur de valves [N° 6 et N° 9], contrôlé par ordinateur permettant d'échantillonner alternativement l'air de la chambre d'exposition et l'air qui traverse les cartouches;**
- b) d'un chromatographe Hewlett-Packard, modèle 5890, série II, avec un détecteur à ionisation de flamme (FID) [N° 5].**

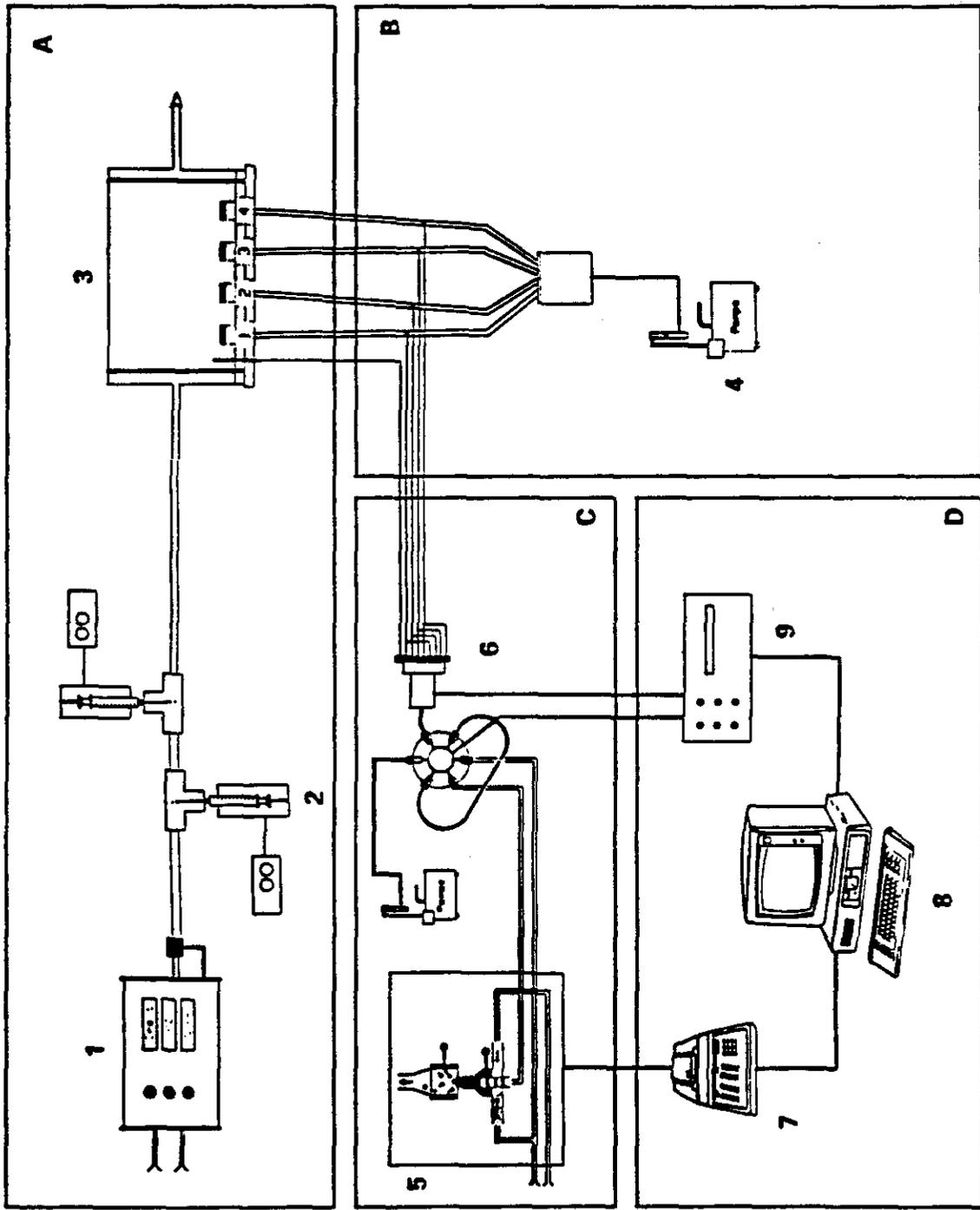


Figure 1 Schéma du montage expérimental pour l'évaluation du temps de service des cartouches filtrantes.

Pour la séparation des solvants du mélange, nous avons utilisé une colonne d'une longueur de 25 cm, ayant un diamètre interne de 2 mm remplie du carbopack C/0.1 % SP-1000 comme adsorbant. La température du détecteur était de 250°C et le gaz porteur était de l'azote. Le débit du gaz porteur et la température du four ont été établis pour chaque système afin d'obtenir la meilleure séparation. Ces conditions sont présentées au tableau suivant.

Système	Débit du gaz porteur mL/min	Température du four
Acétone/m-xylène	30 mL/min	200°C
Acétone/styrène	49 mL/min	220°C
Toluène/m-xylène	30 mL/min	185°C

Des courbes d'étalonnage ont été préparées pour chaque paire de solvants et chaque condition expérimentale. Les solutions étalons pour les solvants purs et pour les mélanges de solvants étaient préparées par dilution du solvant liquide dans l'air dans des sacs de Tedlar®. À chaque essai, un mélange binaire étalon ayant la même composition du mélange désirée, était préparé et analysé. La hauteur des pics du chromatogramme servait de référence pour ajuster les concentrations des solvants dans la chambre d'exposition.

4 - Le système d'acquisition et de traitement des données :

Le système d'acquisition est composé d'un intégrateur Hewlett-Packard, modèle 3395, [N° 7] et d'un ordinateur IBM-PC. Le traitement des données a été réalisé avec un logiciel SOLO, version 3.0.*

* Hintze, J.L. : Solo Statistical Systems (Computer Software) BHDP Statistical Software, Inc., 1989.

2.4 Les cartouches

Les cartouches utilisées dans cette étude sont celles de la compagnie Scott Aviation (Lancaster, N.Y.), modèle 640.OV pour les vapeurs organiques. Ces cartouches correspondaient aux lots N° 06149, 06159 et 12198 dont le poids de charbon était de 50 ± 1 g et le type de charbon était de noix de coco activé à haute température. Le volume de charbon dans les cartouches est de 112 cm^3 , le diamètre des cartouches est de 8 cm et l'épaisseur de 2.24 cm. L'aire de surface du charbon actif est de $1280 \text{ m}^2/\text{g}$.

2.5 L'évaluation du temps de service

Les temps de service des cartouches ont été caractérisés d'abord avec le système simple en les exposant à des concentrations constantes entre 100 ppm et 1000 ppm. Par la suite, les cartouches ont été évaluées avec le système binaire aux rapports de concentrations solvant 1/solvant 2 indiqués au Tableau 2. La concentration totale des polluants était de 1000 ppm.

Tableau 2

Concentration solvant 1 (ppm)	Concentration solvant 2 (ppm)
100	900
250	750
500	500
750	250
900	100

De plus, l'effet des concentrations d'un solvant par rapport à l'autre a été analysé. Dans ce cas, la concentration d'un des polluants était maintenue constante à 500 ppm et la concentration de l'autre était variée entre 100 ppm et 1500 ppm.

Les essais ont été réalisés à la température de $25^\circ \pm 1^\circ \text{ C}$, les débits d'aspiration de l'air à 24 min ou 36 L/min et l'humidité relative de $40 \pm 1 \%$. La température et l'humidité de la chambre d'exposition ont été contrôlées à l'aide d'un appareil Vaisale (Helsinki, Finlande) modèle HUI14.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Étant donné le nombre très important de résultats générés dans cette étude, la présentation de résultats et la discussion seront faites pour chaque système.

3.1 Système I. Acétone/m-xylène

3.1.1 Les systèmes simples

La figure 2 représente un exemple typique d'un chromatogramme obtenu dans un essai avec un solvant pur. Dans cet essai, la cartouche a été exposée à une concentration de 1000 ppm d'acétone avec un débit d'aspiration de 24 L/min par cartouche. Ce débit a été utilisé pour tous les essais du système acétone/m-xylène. Dans la première partie du chromatogramme, seulement le pic correspondant à l'acétone qui est dans la chambre d'exposition est observé, tandis qu'aucun signal n'est détecté lors de l'analyse de l'air qui traverse la cartouche. Ceci indique que toutes les vapeurs du solvant ont été retenues dans la cartouche. Après quelques minutes (autour de 50 min), l'acétone claqué à travers la cartouche et la concentration de claquage augmente très rapidement pour atteindre la concentration de la chambre.

La figure 3 présente les résultats obtenus avec l'acétone lorsque les cartouches ont été exposées à 107 ppm, 260 ppm, 501 ppm, 726 ppm et 1060 ppm. Les concentrations d'exposition correspondent à la moyenne des analyses réalisées pendant la durée de l'essai. Dans cette figure, les résultats sont présentés en termes du % de claquage en fonction du temps. Tous les résultats des évaluations des temps de service des cartouches seront présentés de cette façon à moins d'indication contraire.

La forme des courbes présentées à la figure 3 est de type sigmoïdal, ce qui est typique du claquage d'un gaz pur à travers des cartouches lors de la saturation du charbon actif.

La figure 4 présente les résultats obtenus avec le m-xylène pur à des concentrations moyennes de 93 ppm, 257 ppm, 446 ppm et 973 ppm. La forme des courbes de claquage est essentiellement la même que celle de l'acétone mais les temps de claquage sont beaucoup plus élevés. Ceci s'explique parce que le point d'ébullition du m-xylène est de 139°C, ce qui est beaucoup plus élevé que celui de l'acétone qui est de 56°C.

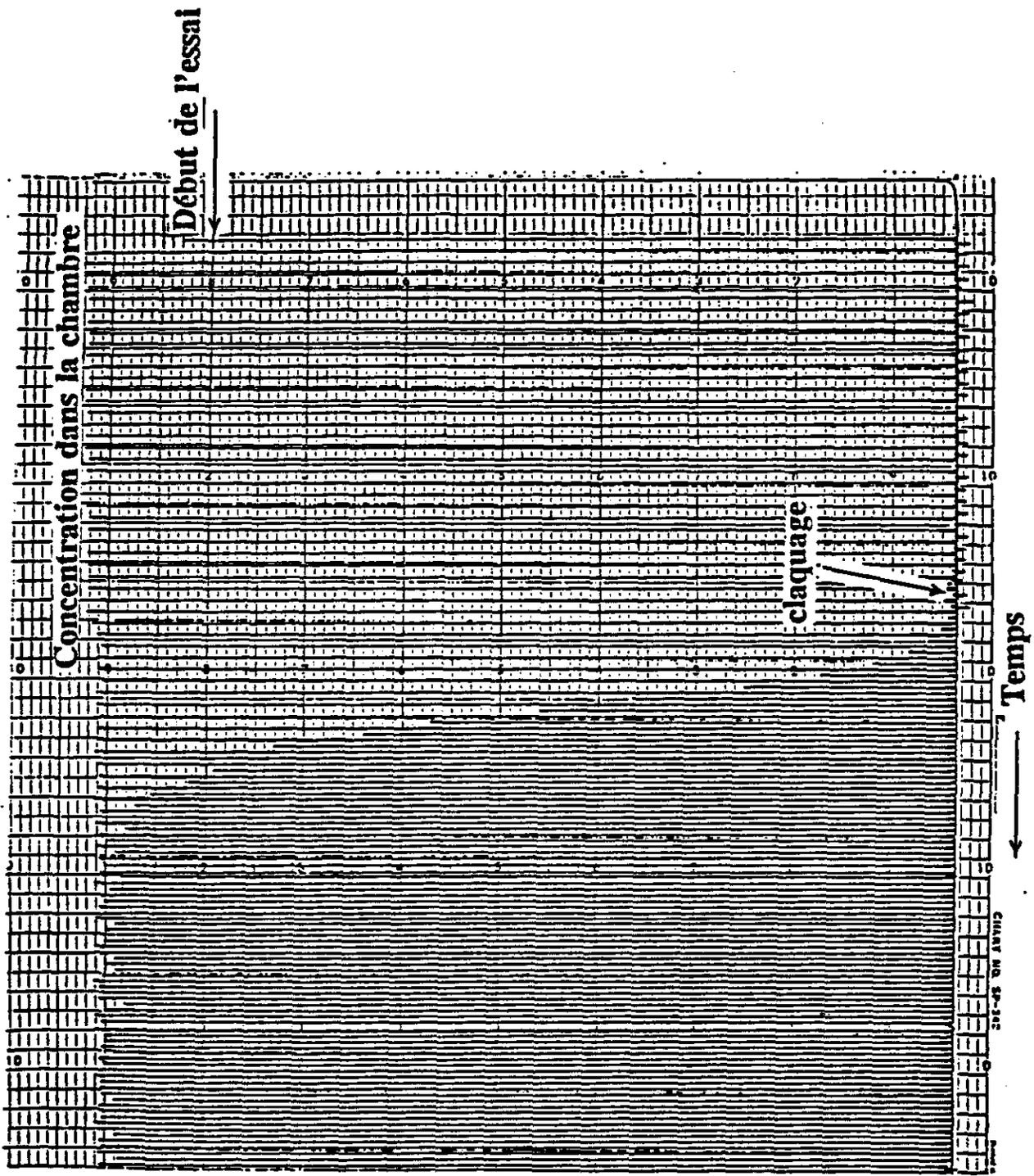


Figure 2 Chromatogramme obtenu lors d'un essai avec acetone à 1000 ppm de concentration.

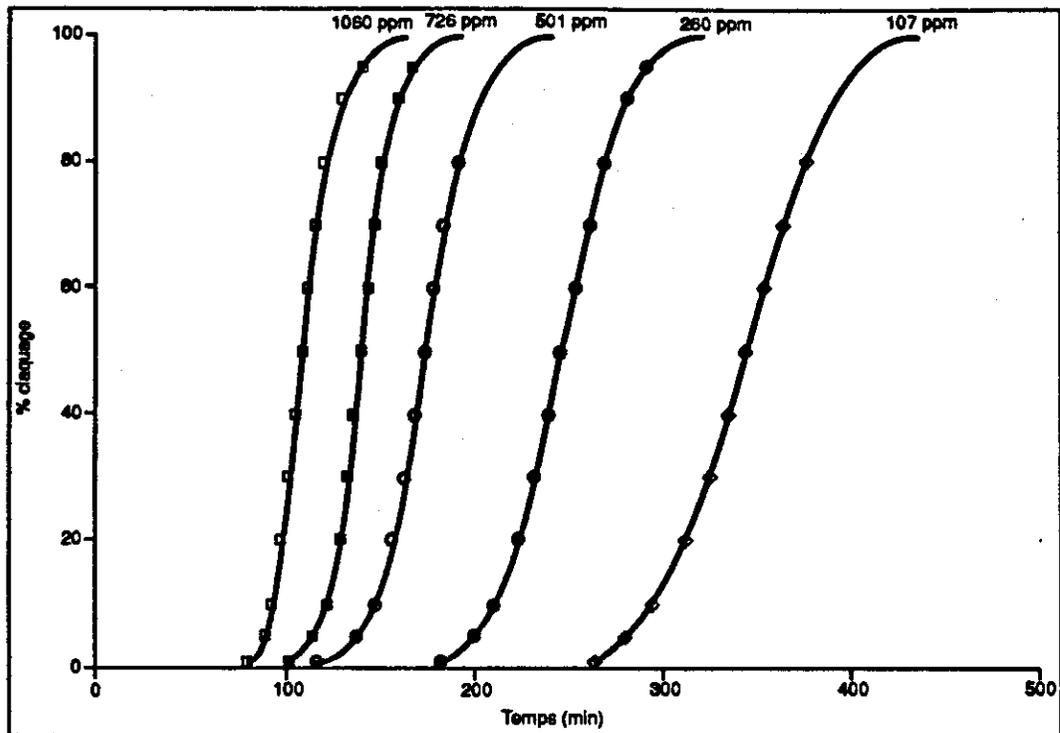


Figure 3 Courbes de claquage pour l'acétone.

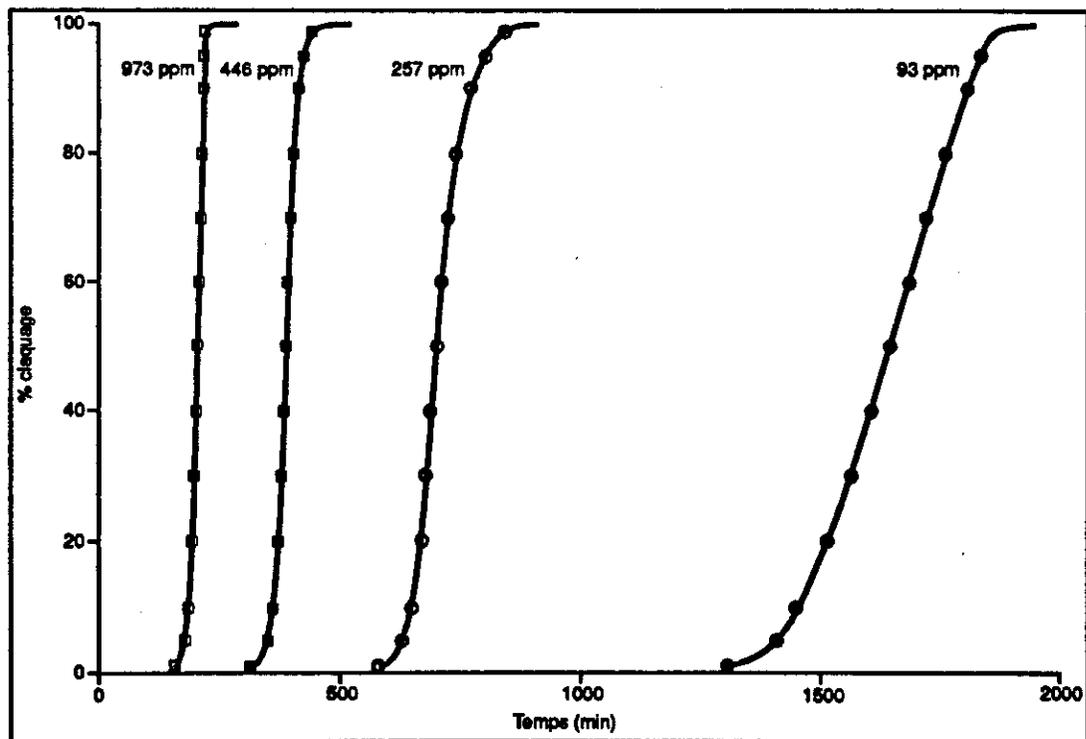


Figure 4 Courbes de claquage pour le m-xylène.

La Figure 5 permet de comparer le temps de service des cartouches pour l'acétone et pour le m-xylène au 10% de claquage. Dans cette figure, la dépendance du temps de service des cartouches avec la concentration d'exposition est représentée. Cette figure met en évidence l'énorme différence existant entre le temps de service de la cartouche pour l'acétone et pour le m-xylène. Par exemple, à des concentrations équivalentes, le temps de service pour l'acétone à 107 ppm est de 296 min et pour le m-xylène à 93 ppm, il est de 1449 min. À l'autre extrême, lorsque la concentration d'acétone est de 1060 ppm, le temps de service de la cartouche est de 94 min et pour le m-xylène à 973 ppm, il est de 185 minutes.

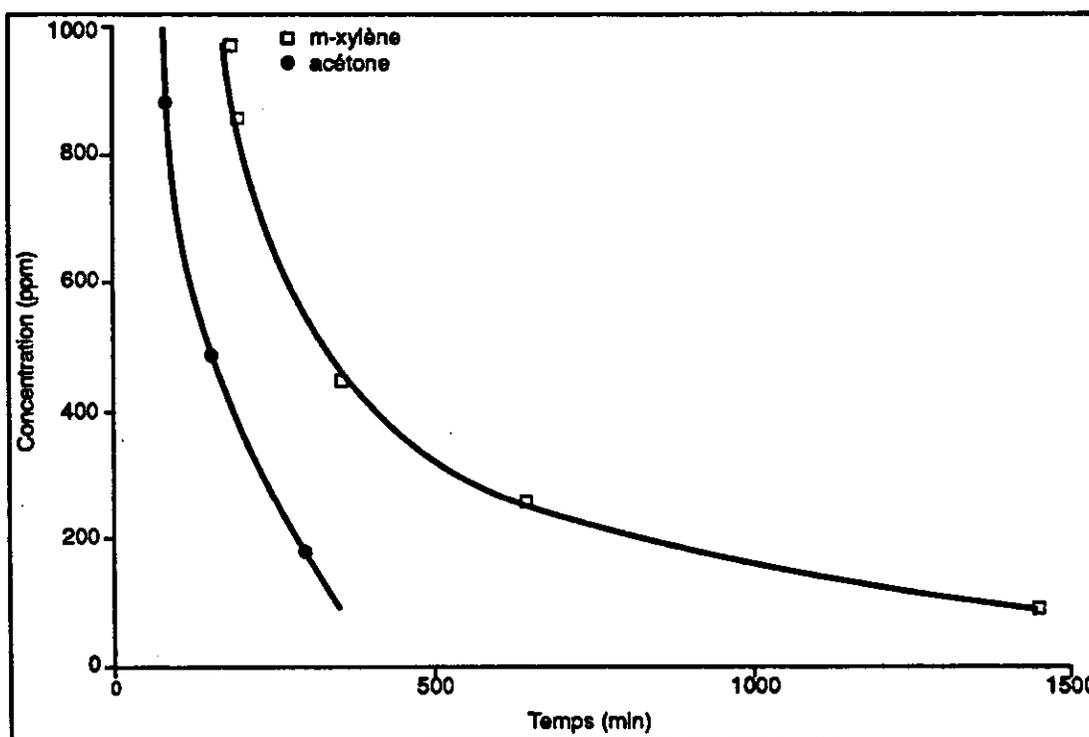


Figure 5 Comparaison des temps de service au 10 % de claquage pour l'acétone et pour le m-xylène.

Capacité d'adsorption des cartouches

Yoon (8,9) a établi que la capacité totale de filtration d'une cartouche pour un polluant donné peut être calculée à partir de l'équation suivante :

$$W_t = C F \tau \quad (1)$$

où W_t = représente la capacité d'adsorption totale de la cartouche filtrante en une unité de poids (e.g. mg, g)

- C** = est la concentration du contaminant en une unité de poids (e.g. mg, g)/L
F = le débit de l'air qui passe à travers la cartouche en L/min
 τ = est le temps de service de la cartouche à 50 % de claquage en minutes

À partir de cette équation, la capacité d'adsorption des cartouches pour l'acétone et pour le m-xylène a été calculée aux différentes concentrations et est présentée au Tableau 3.

Tableau 3

**Capacité de filtration des cartouches
pour l'acétone et le m-xylène purs**

Acétone				m-xylène			
Concentration		τ	W_t	Concentration		τ	W_t
ppm	mg/m ³	min	g/c*	ppm	mg/m ³	min	g/c*
107	257	340	2.10	93	405	1640	15.93
260	624	270	4.04	257	1118	702	18.84
501	1202	170	5.02	446	1940	386	17.97
726	1742	140	5.85	857	3728	215	19.24
1060	2544	109	6.66	973	4233	202	20.52

* grammes de solvant/cartouche

Les résultats du Tableau 3, démontrent que les cartouches ont une capacité de filtration plus élevée pour le m-xylène que pour l'acétone. Par exemple, lorsque la concentration de l'acétone est de 260 ppm, la capacité de filtration de la cartouche est de 4.04 grammes. Pour une concentration équivalente de m-xylène, soit 257 ppm, la capacité de filtration de la cartouche est de 18.84 grammes.

Le Tableau 3 montre d'autre part, que la capacité de filtration de la cartouche pour un même solvant augmente avec la concentration. Dans le cas du m-xylène, pour une concentration de 973 ppm, la capacité de filtration de la cartouche est autour de 1.3 fois plus élevée que lorsque la concentration est de 93 ppm. Dans le cas de l'acétone, cet effet est beaucoup plus important. La capacité de filtration de la cartouche pour l'acétone augmente d'environ trois fois lorsque la concentration du solvant passe de 107 ppm à 1060 ppm.

La différence dans la capacité de filtration des cartouches pour l'acétone et pour le m-xylène peut être interprétée comme étant due à l'adsorption simultanée de l'eau (l'humidité de l'air est 40 %) et du solvant. Dans le cas de l'acétone, lorsque la concentration est basse, la durée de l'essai est longue. Il y aura donc beaucoup d'air qui passe à travers la cartouche et conséquemment beaucoup d'eau sera adsorbée sur les sites actifs du charbon. Inversement, lorsque la concentration de l'acétone est élevée, la durée de l'essai est plus courte et il y a donc moins d'air qui passe à travers la cartouche et conséquemment moins d'eau adsorbée par le charbon actif. L'acétone étant une molécule hydrophile, elle ne serait pas en compétition avec l'eau pour les sites actifs du charbon. De plus, l'eau ayant un point d'ébullition plus élevé que celui de l'acétone, elle est mieux adsorbée par le charbon actif. Ceci expliquerait l'effet négatif qu'a l'adsorption de l'eau dans la diminution de la capacité de la cartouche de filtrer l'acétone.

Le m-xylène, étant une molécule hydrophobe, il est en compétition avec l'eau pour les sites actifs. Ce solvant a un point d'ébullition plus élevé que celui de l'eau, il est donc plus adsorbé par le charbon actif. Pour ces raisons, comme il sera démontré plus tard, le m-xylène est capable de déloger les molécules d'eau adsorbées sur le charbon. Ceci fait que la capacité d'adsorption de la cartouche par rapport au m-xylène est peu affectée par la présence de l'eau. De ce fait, W_t varie peu lorsque la concentration du m-xylène augmente.

3.1.2 Le système binaire

Les résultats obtenus avec les différentes compositions du mélange acétone/m-xylène sont présentés aux figures 6 à 9. Les concentrations recherchées étaient celles présentées au tableau 2 mais les concentrations obtenues expérimentalement ont été les suivantes : 109 ppm/891 ppm, 248 ppm/730 ppm, 474 ppm/490 ppm et 749 ppm/260 ppm pour acétone/m-xylène respectivement.

La figure 6 représente les résultats obtenus pour le mélange composé de 109 ppm d'acétone et 891 ppm de m-xylène. L'acétone, le solvant le plus volatil, claque le premier malgré le fait qu'il est présent à plus faible concentration. La concentration de claquage augmente rapidement pour dépasser de loin la concentration de l'acétone dans la chambre d'exposition. Le maximum de la concentration de claquage pour l'acétone est atteint autour de 355 ppm, soit plus de trois fois la concentration à la chambre d'exposition. Lorsque le m-xylène claque la cartouche, la concentration de claquage augmente en même temps que celle de l'acétone diminue. Cependant, le claquage du m-xylène débute peu de temps avant

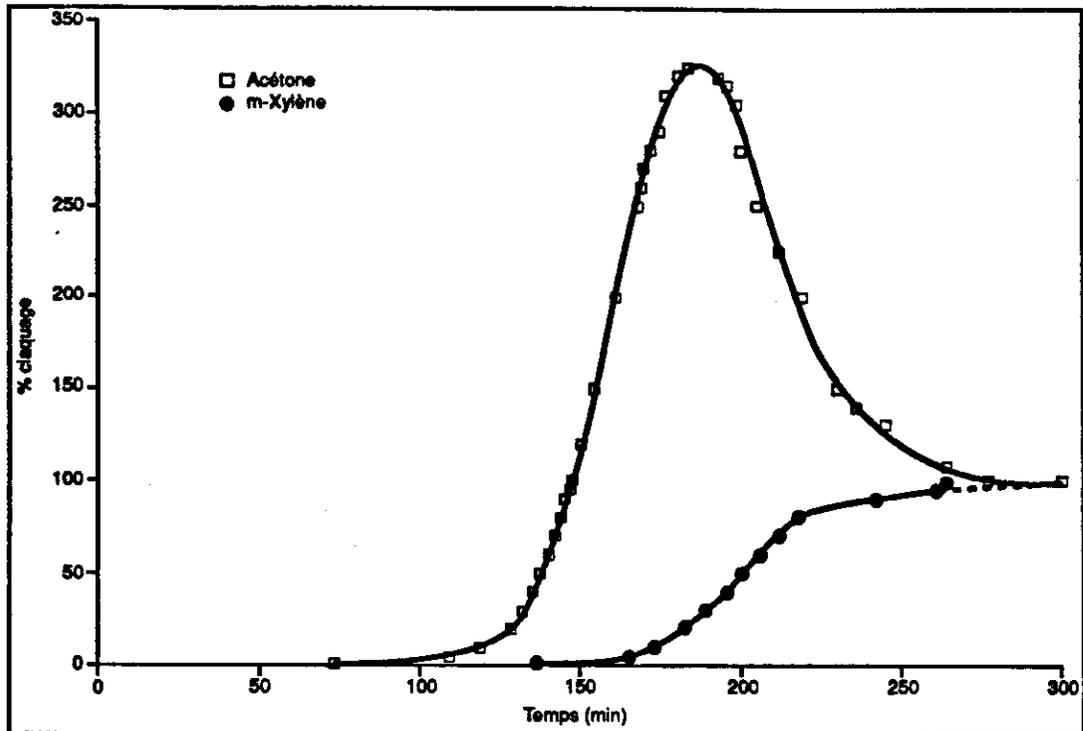


Figure 6 Courbes de claquage pour l'acétone et le m-xylène avec le mélange 109 ppm/891 ppm acétone/m-xylène.

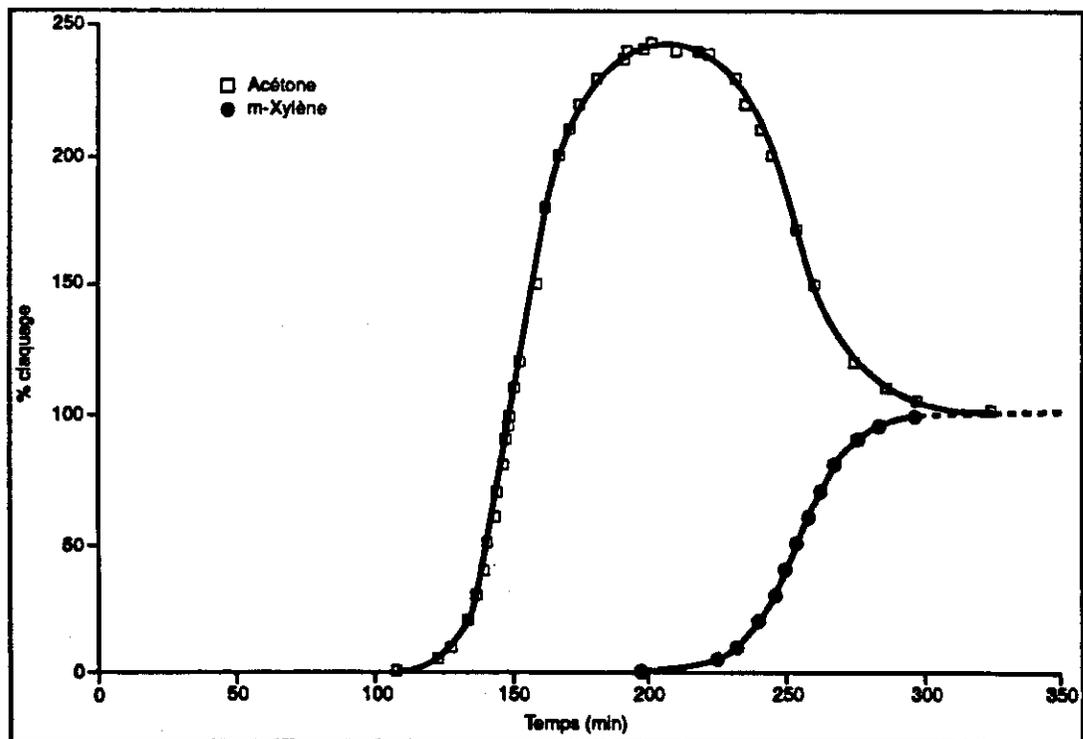


Figure 7 Courbes de claquage pour l'acétone et le m-xylène avec le mélange 248 ppm/730 ppm acétone/m-xylène.

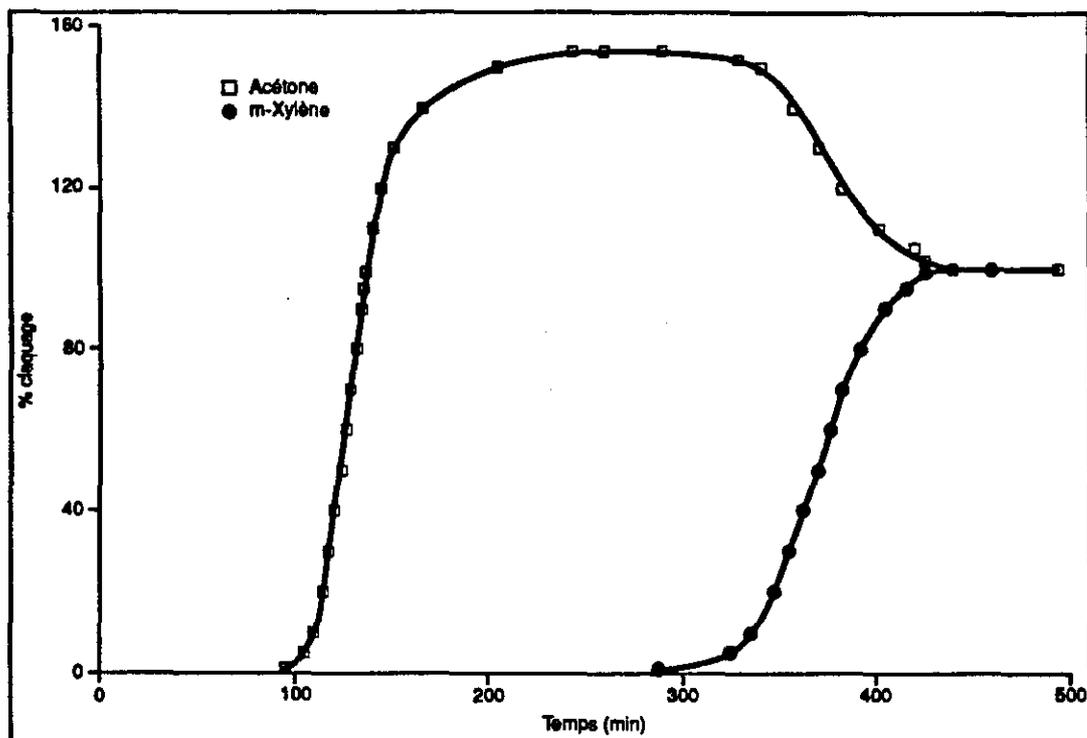


Figure 8 Courbes de claquage pour l'acétone et le m-xylène avec le mélange 474 ppm/490 ppm acétone/m-xylène.

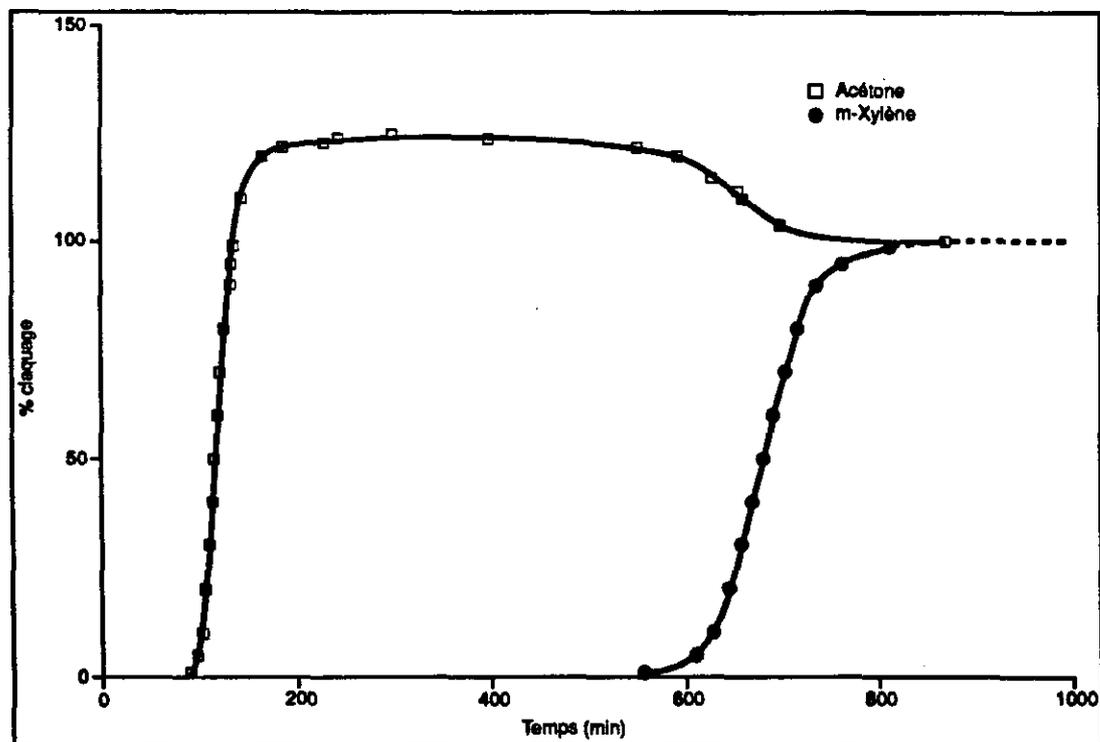


Figure 9 Courbes de claquage pour l'acétone et le m-xylène avec le mélange 749 ppm/260 ppm acétone/m-xylène.

que la concentration de l'acétone commence à diminuer. Lorsque la concentration de claquage du m-xylène atteint la concentration d'exposition (100 %), la concentration de l'acétone diminue à la concentration de la chambre.

La figure 7 présente les résultats obtenus pour le mélange de 248 ppm d'acétone et 730 ppm de m-xylène. Comme dans la figure précédente, l'acétone claqué le premier et la concentration de claquage dépasse la concentration d'exposition pour atteindre au maximum, une concentration autour de 2,5 fois la concentration de la chambre. D'autre part, la figure montre que dans ce cas, le début du claquage du m-xylène et le début de la diminution de la concentration de claquage de l'acétone se produisent en même temps.

La figure 8 montre que lorsque les concentrations des solvants sont équivalentes, soit 474 ppm d'acétone et 490 ppm de m-xylène, le claquage de l'acétone présente certaines différences par rapport à celles présentées dans les deux cas précédents. En effet dans ce cas, l'acétone claqué le premier, atteint son maximum à une concentration équivalente à 1.5 fois la concentration d'exposition et demeure stable pour une longue période de temps (plus d'une heure). La diminution de la concentration de claquage de l'acétone débute en même temps que le claquage du m-xylène.

Finalement, la figure 9 présente les résultats obtenus lorsque la concentration de l'acétone était de 749 ppm et celle du m-xylène de 260 ppm. Dans ce cas, le maximum de la concentration de claquage de l'acétone atteint un plateau autour de 1,2 fois la concentration d'exposition, et la concentration de claquage demeure constante pour une très longue période (autour de ~ 8 heures). Le début du claquage du m-xylène coïncide avec le début de la diminution de la concentration de claquage de l'acétone.

Ces résultats peuvent être interprétés de la façon suivante : l'adsorption d'un contaminant sur le charbon actif peut être représentée comme un phénomène de condensation du solvant à la surface du charbon. Plus le point d'ébullition du solvant est élevé, plus la condensation du solvant à la surface du charbon est importante. De ce fait, la capacité d'adsorption du charbon actif est beaucoup plus élevée pour le m-xylène que pour l'acétone, comme il a été montré précédemment au tableau 3.

Lorsque les cartouches sont exposées au mélange binaire dans l'air humide, l'acétone, le m-xylène et l'eau sont adsorbés simultanément par le charbon actif. Lors du claquage de l'acétone, la situation à l'intérieur de la cartouche serait la suivante : la plupart des sites

actifs du charbon sont occupés par l'acétone, le m-xylène et l'eau. Le m-xylène non adsorbé déplace des molécules d'acétone adsorbées. Lorsque tous les sites actifs du charbon sont occupés (on dit que le charbon est saturé), l'acétone claqué la cartouche. Cependant, la concentration de l'acétone qui claqué la cartouche est donnée par la somme de l'acétone provenant de la chambre d'exposition, plus l'acétone déplacée par le m-xylène de la surface du charbon. Ce phénomène justifie le fait que la concentration de claquage de l'acétone dépasse la concentration dans la chambre d'exposition.

Capacité de filtration des cartouches dans le système binaire

La capacité de filtration des cartouches pour chacun des solvants du mélange acétone/m-xylène a été calculée à l'aide de l'équation 1 (voir page 12). Ces résultats sont rapportés au Tableau 4.

Tableau 4

**Capacité de filtration des cartouches par rapport
à l'acétone et au m-xylène dans le système binaire**

Concentration (ppm)		τ (min)		W (g/e)	
Acétone	m-Xylène	Acétone	m-Xylène	Acétone	m-Xylène
813	90	117	1610	5.48	15.14
749	260	122	682	5.26	18.53
474	490	132	369	3.60	18.90
248	730	154	254	2.20	19.38
109	891	163	201	1.02	18.72

Il a déjà été démontré que la capacité de la cartouche de filtrer l'acétone décroît avec la diminution de la concentration du solvant. Les résultats du tableau 4 démontrent que la capacité de la cartouche de filtrer l'acétone dans le système binaire diminue d'une façon encore plus importante lorsque la concentration du m-xylène augmente. D'autre part, la capacité de la cartouche de filtrer le m-xylène est peu affectée par la présence de l'acétone.

Substitution de l'acétone par le m-xylène

Il est possible de déterminer approximativement le nombre de molécules de m-xylène nécessaires pour remplacer une molécule d'acétone adsorbée à la surface du charbon actif. Il s'agit de soustraire le maximum de la concentration atteinte par l'acétone (C_m) à la concentration de l'acétone dans la chambre d'exposition (C_a). Cette différence représente la concentration de l'acétone provenant des molécules déplacées par le m-xylène.

$$C_m - C_a = \text{concentration de l'acétone désorbée} \quad (2)$$

Lorsque la concentration de claquage de l'acétone augmente jusqu'à égaler la concentration à la chambre d'exposition, on peut imaginer que tous les sites actifs du charbon sont occupés par l'acétone, le m-xylène et l'eau. Toute nouvelle molécule de m-xylène aura besoin de déplacer, soit l'acétone ou l'eau pour s'adsorber à la surface du charbon. Si la concentration du m-xylène est C_x , le rapport des molécules de m-xylène qui remplace une molécule d'acétone sera représenté par :

$$\eta = \frac{C_x}{C_m - C_a} = \frac{\text{Concentration d'exposition de m-xylène}}{\text{Concentration d'acétone désorbée}} \quad (3)$$

Le rapport η pour les différentes compositions du mélange acétone/m-xylène calculé avec l'équation 3 est présenté au Tableau 5. Les résultats de ce tableau démontrent que le nombre de molécules de m-xylène nécessaires pour remplacer une molécule d'acétone adsorbée varie de 1.55 à 3.62 pour les différents rapports de concentration du mélange binaire.

Pour représenter le processus de substitution, voici un exemple : lorsque les concentrations d'acétone et m-xylène sont de 474 ppm et 490 ppm respectivement, 196 molécules de m-xylène déplaceront 100 molécules d'acétone adsorbées à la surface du charbon actif. Ceci, qui du point de vue mathématique s'explique bien, ne correspond pas nécessairement à la réalité. En effet, seulement une partie du m-xylène pourrait être utilisée pour déloger l'acétone et une autre partie pourrait servir à déloger l'eau adsorbée.

Tableau 5

**Rapport du nombre η de molécules de m-xylène nécessaires
pour déplacer une molécule d'acétone adsorbée**

Concentration (ppm)		Cm	η
Acétone	m-Xylène		
813	90	871	1.55
749	260	921	1.51
474	490	724	1.96
248	730	610	2.01
109	891	355	3.62

Substitution de l'eau par le m-xylène

Le phénomène de désorption de l'eau par le m-xylène a été mis en évidence à l'aide d'un essai très simple qui est présenté ici pour appuyer notre argumentation. Une cartouche a été exposée à 750 ppm de m-xylène à 40 % d'humidité. Une sonde pour mesurer l'humidité a été placée à l'intérieur de la chambre et une autre sonde a été placée à la sortie de la cartouche afin de mesurer l'humidité de l'air qui sort de la cartouche. Le résultat de cet essai est montré à la Figure 10.

Le signal numéro 1 à la figure, correspond à l'humidité de l'air dans la chambre d'exposition et le signal numéro 2 est l'humidité de l'air à la sortie de la cartouche. Le début de l'essai (départ) correspond au moment dans lequel la cartouche a été installée dans le banc d'essais. La signal correspondant à l'air qui sort de la cartouche montre que, dans un premier temps, l'humidité de l'air diminue. Ceci est dû au fait que les molécules d'eau sont retenues par le charbon actif. Par la suite, l'humidité de l'air augmente (claquage de l'eau), dépasse l'humidité de l'air dans la chambre, et atteint un plateau au maximum de sa concentration pour diminuer ensuite lorsque le m-xylène claque la cartouche. Ceci démontre que le m-xylène déplace les molécules d'eau adsorbées à la surface du charbon actif ce qui cause l'augmentation de l'humidité de l'air à la sortie de la cartouche.

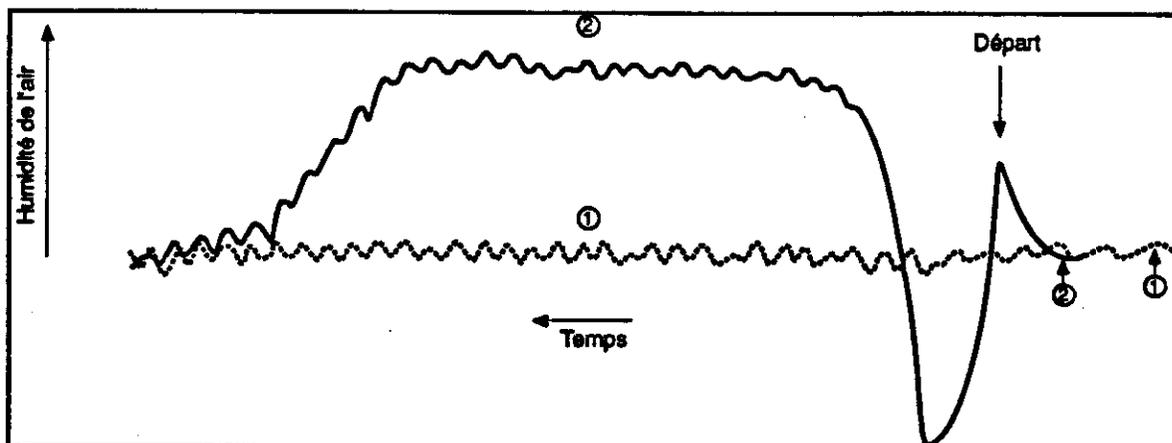


Figure 10 Courbe de désorption de l'eau par m-xylène.

3.1.3 Temps de service au 10 % de claquage

Le 10 % de claquage correspond à une concentration "dite sécuritaire". Au-delà du 10 % de claquage, la concentration de polluant augmente très rapidement devenant un risque pour la santé de l'utilisateur d'un appareil de protection respiratoire filtrant. Ceci est plus critique dans le cas des mélanges binaires de polluants, car comme il a été montré dans le cas du système acétone/m-xylène, la concentration de claquage du composant le plus volatil augmente encore plus rapidement que dans le cas du solvant pur et peut dépasser plusieurs fois la concentration du contaminant dans l'air. De ce fait, si la cartouche n'est pas remplacée à temps, l'air respiré à l'intérieur de l'appareil de protection respiratoire peut être temporairement beaucoup plus pollué que l'air ambiant.

Dans ce sens, il est utile de représenter les résultats des temps de service au 10 % de claquage pour les solvants purs et pour les systèmes binaires. Les figures 11 et 12 présentent respectivement les résultats pour l'acétone et pour le m-xylène.

La figure 11 montre que le temps de service de la cartouche pour l'acétone est fortement affecté par la présence du m-xylène. Par exemple, le temps de service au 10 % de claquage pour l'acétone pure à une concentration de 107 ppm est de 296 min. Dans le système binaire, lorsque la concentration de l'acétone est de 109 ppm et celle du m-xylène de 891 ppm, le temps de service de la cartouche au 10 % de claquage de l'acétone baisse à 119 min. Une autre information qui peut être tirée de la figure 11, est que le temps de service au 10 % de claquage pour l'acétone varie très peu, lorsque la concentration de

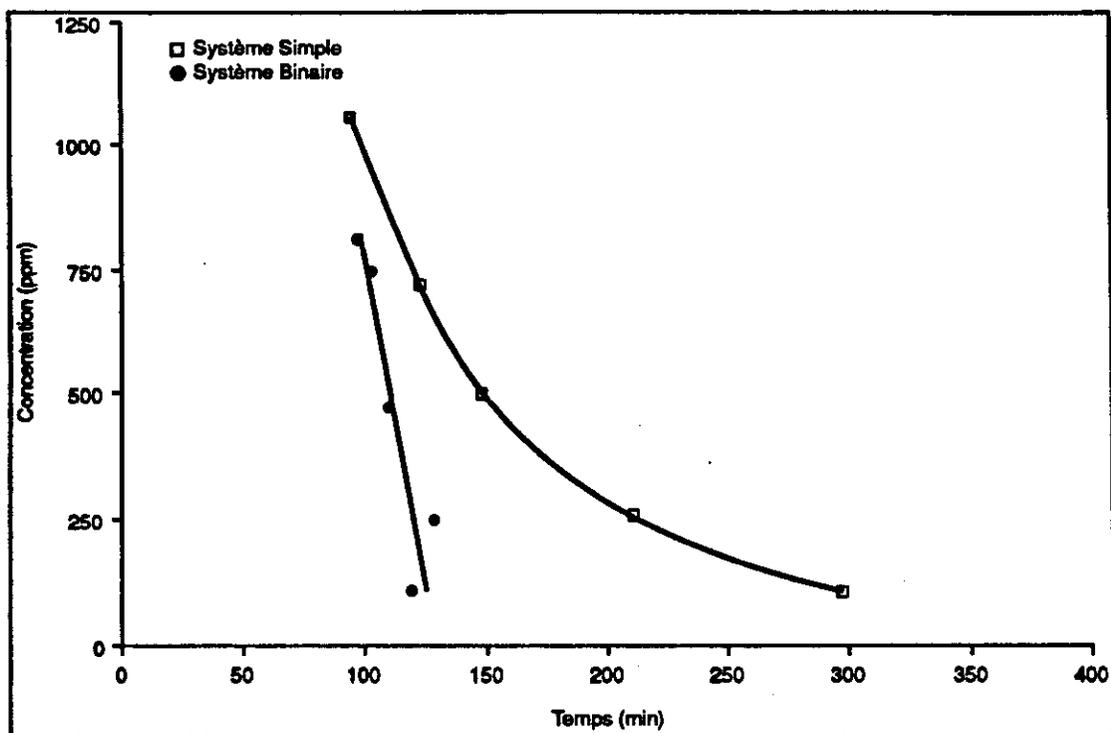


Figure 11 Temps de service au 10 % de claquage pour l'acétone dans le système simple et dans le système binaire acétone/m-xylène.

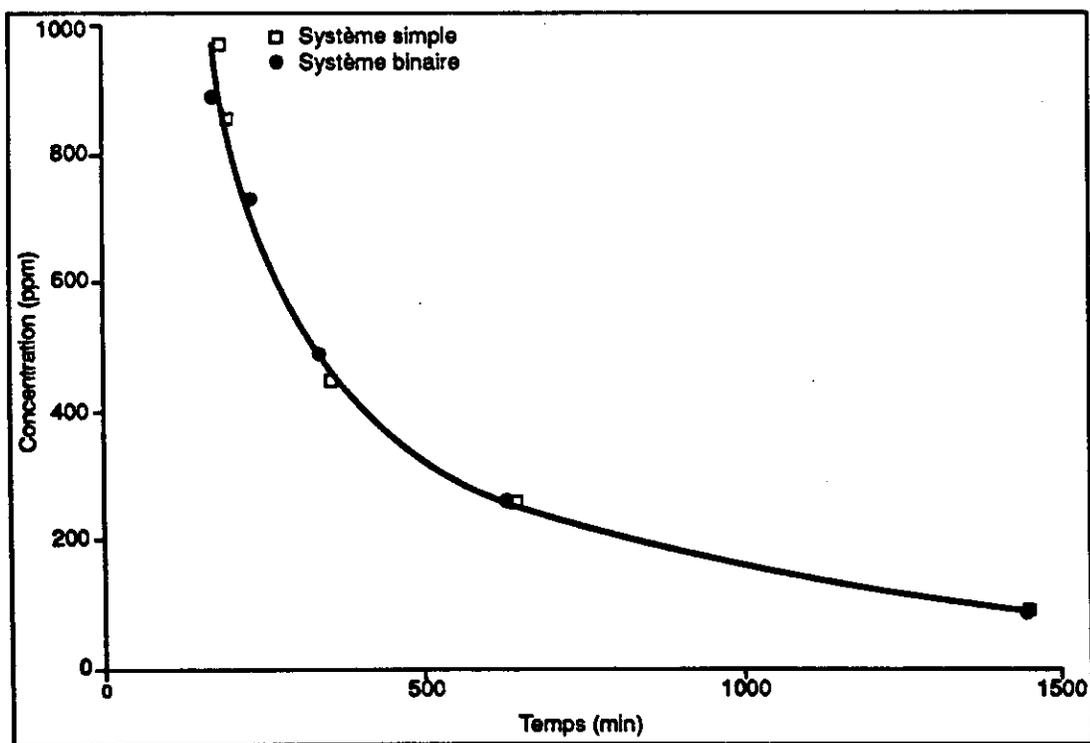


Figure 12 Temps de service au 10 % de claquage pour le m-xylène dans le système simple et dans le système binaire acétone/m-xylène.

l'acétone augmente de 109 ppm à 813 ppm dans le système binaire. Dans le premier cas, le temps de service est de 119 min tandis que dans le deuxième cas il est de 97 min, ces valeurs étant très rapprochées de celle de l'acétone pure à 1060 ppm qui est de 96 minutes.

Ces résultats appuient l'argumentation utilisée précédemment pour interpréter les résultats du système binaire. L'acétone, le m-xylène et l'eau s'adsorbent simultanément sur les sites actifs du charbon. Il y aura donc moins de sites d'adsorption libres sur le charbon actif, ce qui en résulte dans une diminution du temps de service pour l'acétone.

Pour interpréter la faible variation du temps de service des cartouches au 10 % de claquage pour l'acétone dans le système binaire, on doit considérer que la concentration totale pour les deux solvants est toujours approximativement de 1000 ppm. D'autre part, on doit tenir compte que le nombre de sites actifs pour l'adsorption à la surface du charbon est toujours le même car le type de cartouches est le même. Si le phénomène était idéal, il serait seulement nécessaire de connaître le temps de service au 10 % de claquage de l'acétone pure à différentes concentrations, pour prédire le temps de service de l'acétone dans le mélange binaire à n'importe quelle concentration. Le temps de service au 10 % de l'acétone dans le système binaire serait celui correspondant au solvant pur à une concentration égale à la somme des concentrations du m-xylène et de l'acétone. En d'autres mots, si la concentration de l'acétone est de 100 ppm et celle du m-xylène de 900 ppm, le temps de service par rapport à l'acétone serait celui obtenu pour l'acétone pure à 1000 ppm.

Étant donné que la situation n'est pas idéale, soit qu'une partie du m-xylène est utilisée à désorber des molécules d'eau, le temps de service des cartouches par rapport à l'acétone augmente légèrement lorsque la concentration de l'acétone diminue. En d'autres mots, un nombre n_1 de molécules de xylène déloge de la surface du charbon actif un nombre n_2 de molécules d'acétone + n_3 molécules d'eau. Ceci est la cause de la légère augmentation de la valeur du 10 % de claquage de l'acétone dans le système binaire. Toutefois, d'un point de vue pratique, il serait possible de prédire le temps de service des cartouches avec un faible écart, en additionnant les concentrations de l'acétone à celle du m-xylène.

Dans le cas du m-xylène, la figure 12 montre que l'acétone n'a pratiquement aucun effet sur le temps de service au 10 % de claquage. Ceci démontre que tous les sites actifs du charbon sont occupés par le m-xylène. En d'autres mots, pratiquement tout l'acétone qui était adsorbée a été remplacée par le m-xylène.

3.1.4 Effet de la concentration

Pour évaluer l'effet de la concentration sur le temps de service des cartouches filtrantes, la concentration du m-xylène a été gardée constante aux environs de 500 ppm et la concentration de l'acétone a varié entre 100 et 900 ppm. Dans ce cas, le débit de l'air a été fixé à 36 L/min. Pour éviter d'alourdir la présentation de résultats, seulement les valeurs du temps de service au 10 % de claquage sont présentées au tableau 6.

Les résultats de ce tableau démontrent que le temps de service de la cartouche par rapport à l'acétone diminue et par rapport au m-xylène le temps de service n'est pas affecté lorsque la concentration de l'acétone augmente.

Tableau 6

Effet de la concentration sur le temps de service au 10 % de claquage
Système acétone/m-xylène
débit = 36 L/min

Concentration (ppm)		Temps au 10 % de claquage (min)	
Acétone	m-Xylène	Acétone	m-Xylène
96	503	140	227
260	496	105	240
432	520	86	-
474	490	74	223
758	500	64	229
899	520	59	-

3.2 Système II. Système acétone/styrène

3.2.1 Le système simple

Le débit d'air utilisé avec le système acétone/styrène a été de 24 L/min. Pour le styrène pur, les temps de service des cartouches ont été caractérisés aux concentrations suivantes : 254 ppm, 497 ppm, 725 ppm et 1045 ppm. Les résultats sont présentés à la figure 13. Les résultats pour l'acétone pure ont été présentés dans la section précédente.

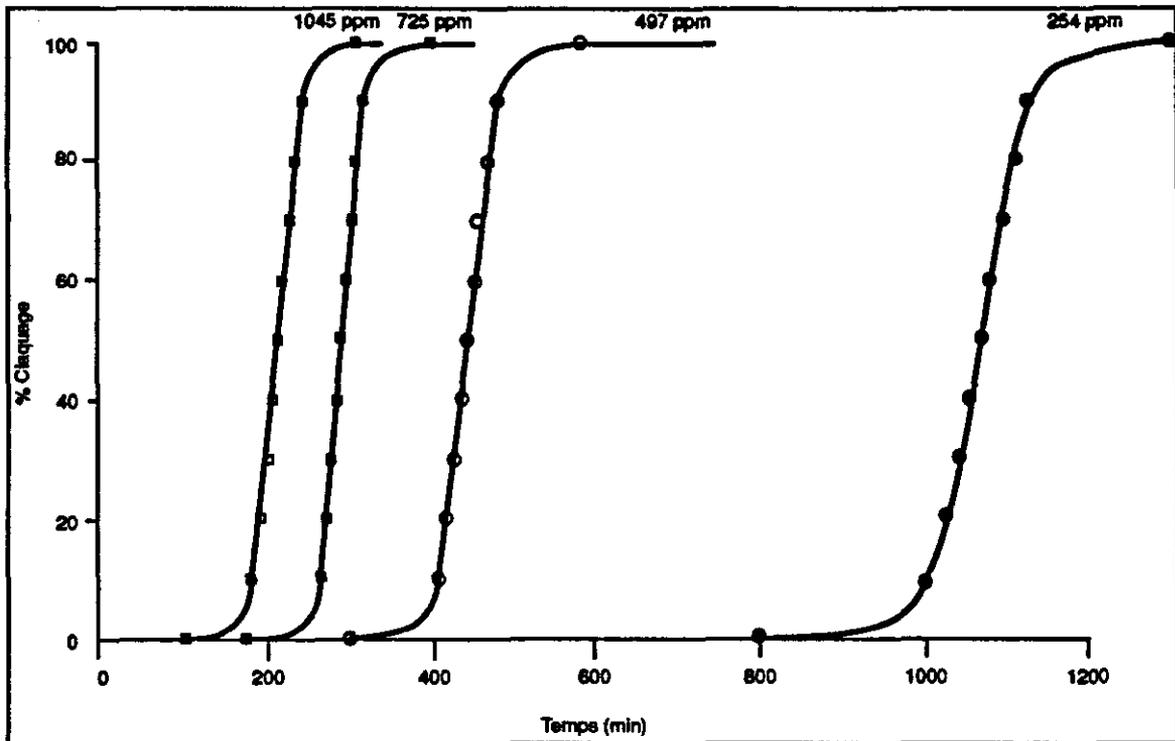


Figure 13. Courbes de claquage pour le styrène.

Les résultats pour le styrène démontrent que le temps de service des cartouches par rapport à ce solvant sont légèrement supérieurs à ceux du m-xylène. Ceci est explicable par le fait que la température d'ébullition du styrène est de 146°C, ce qui est plus élevé que celle du m-xylène qui est de 139°C.

La capacité totale de la cartouche à filtrer le styrène a été calculée avec l'équation 1 et les résultats sont présentés au Tableau 7. On peut remarquer dans ce tableau, que la capacité de filtration de la cartouche varie très peu avec la concentration du styrène. Ce comportement est semblable à celui observé dans le cas du m-xylène. Les valeurs de W_t pour le styrène sont légèrement plus élevées que celles du m-xylène, ce qui est en accord avec le fait que les temps de service du styrène sont un peu plus élevés.

Tableau 7
Capacité totale de filtration de la cartouche filtrante
par rapport au styrène

Concentration		τ (min)	W_t g/c
ppm	mg/m ³		
254	1067	728	18.64
481	2020	418	20.26
497	2087	393	19.68
725	3045	270	19.73
1045	4389	206	21.70

Pour interpréter ces résultats, on peut faire appel au même type d'argumentation utilisé précédemment. Le styrène étant une molécule hydrophobe et ayant un point d'ébullition beaucoup plus élevé que celui de l'eau, déplacera les molécules d'eau adsorbées. De ce fait, l'humidité de l'air aura peu d'effet sur le temps de service des cartouches par rapport au styrène.

3.2.2 Le système binaire

Les résultats des essais réalisés avec le système binaire acétone/styrène sont présentés aux figures 14 à 17. En général, les courbes de claquage obtenues pour ce mélange ressemblent à celles obtenues avec le mélange acétone/m-xylène. La figure 14 présente les courbes de claquage pour le mélange composé de 97 ppm d'acétone et 892 ppm de styrène. L'acétone claque le premier et la concentration de claquage dépasse la concentration de l'acétone à la chambre pour atteindre une concentration maximale de 353 ppm, soit autour de 3.5 fois la concentration d'exposition. Par la suite, la concentration de claquage de l'acétone décroît lorsque le styrène claque jusqu'à atteindre la concentration de la chambre. Dans ce cas, on n'observe pas de plateau au maximum de la concentration de claquage de l'acétone.

La figure 15 montre que lorsque la concentration de l'acétone est de 249 ppm et celle du styrène de 755 ppm, la concentration de claquage de l'acétone excède la concentration d'exposition pour atteindre un maximum d'environ 513 ppm, soit le double de la concentration d'exposition. La concentration de claquage de l'acétone atteint un plateau au maximum et cette concentration reste stable pour plus d'une heure.

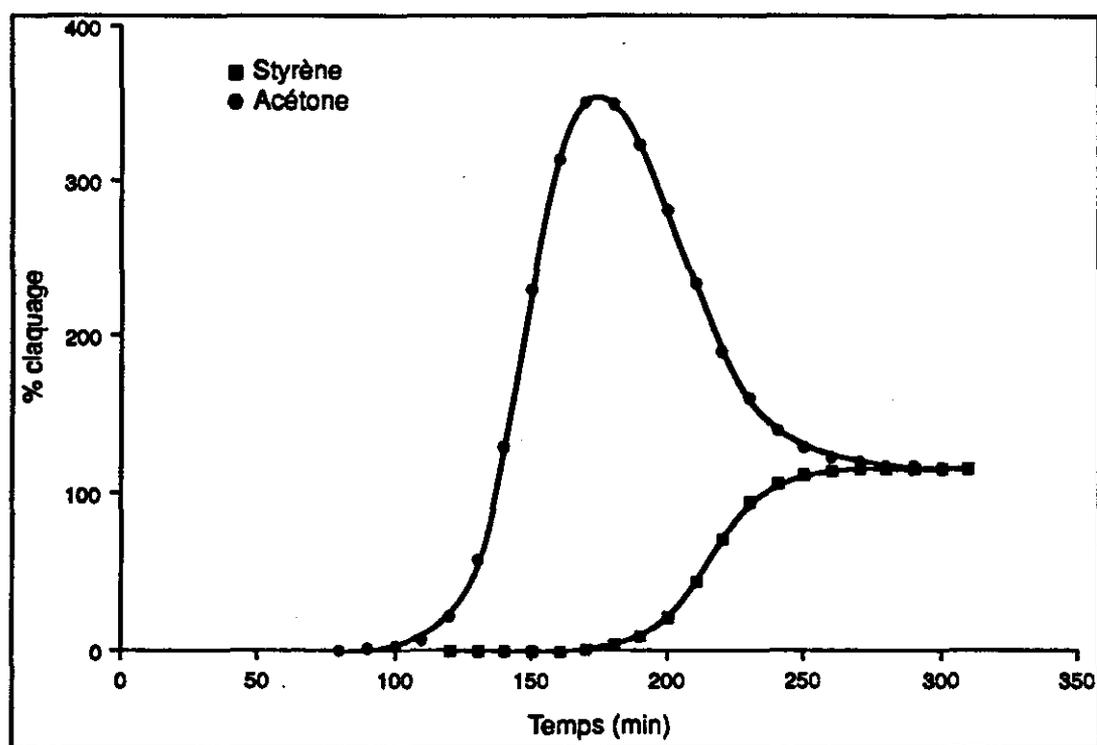


Figure 14 Courbes de claquage pour l'acétone et le styrène avec le mélange 97 ppm/892 ppm acétone/styrène.

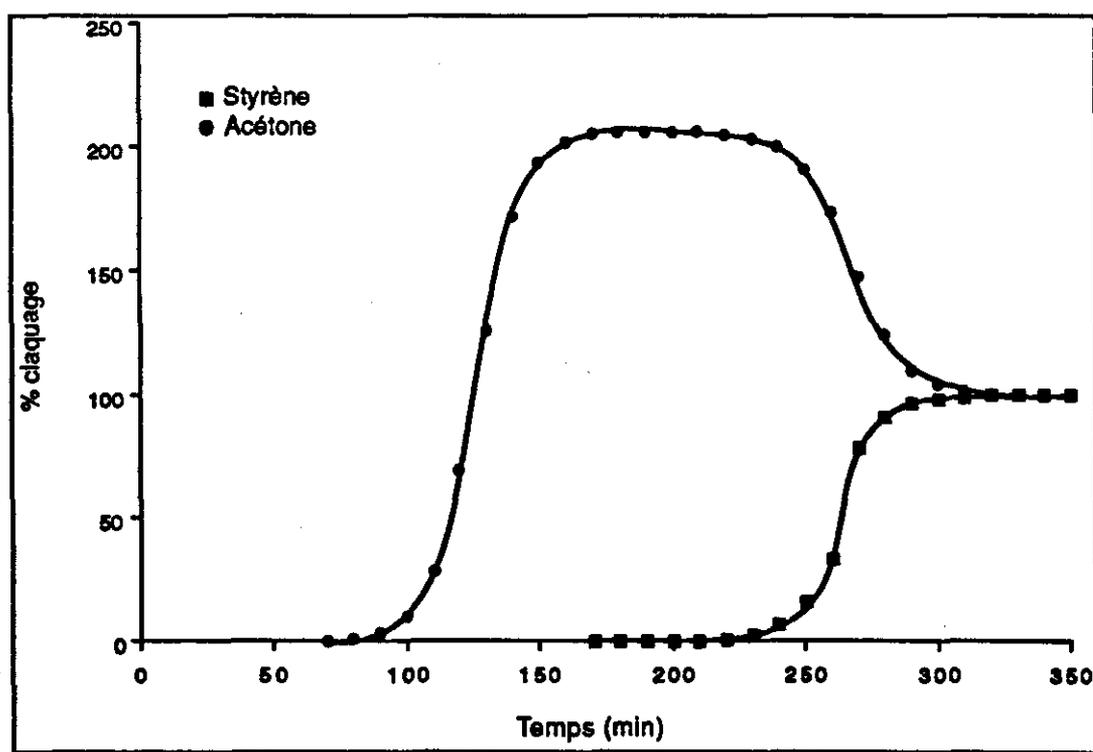


Figure 15 Courbes de claquage pour l'acétone et le styrène avec le mélange 249 ppm/755 ppm acétone/styrène.

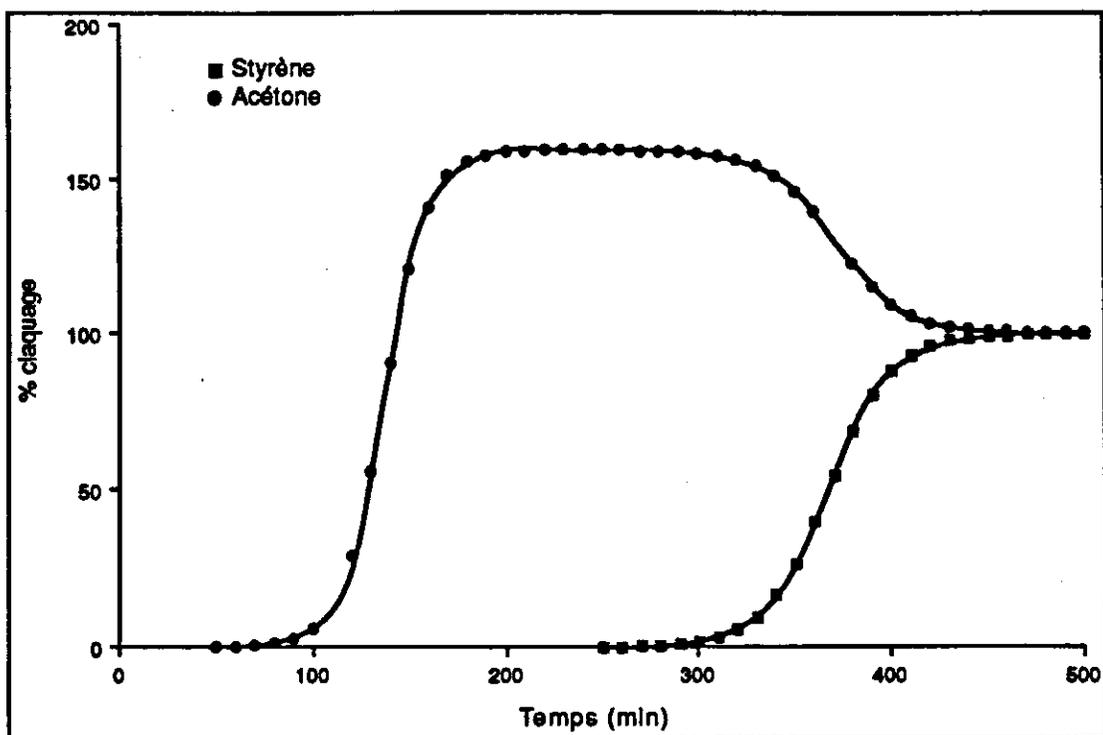


Figure 16 Courbes de claquage pour l'acétone et le styrène avec le mélange 479 ppm/507 ppm acétone/styrène.

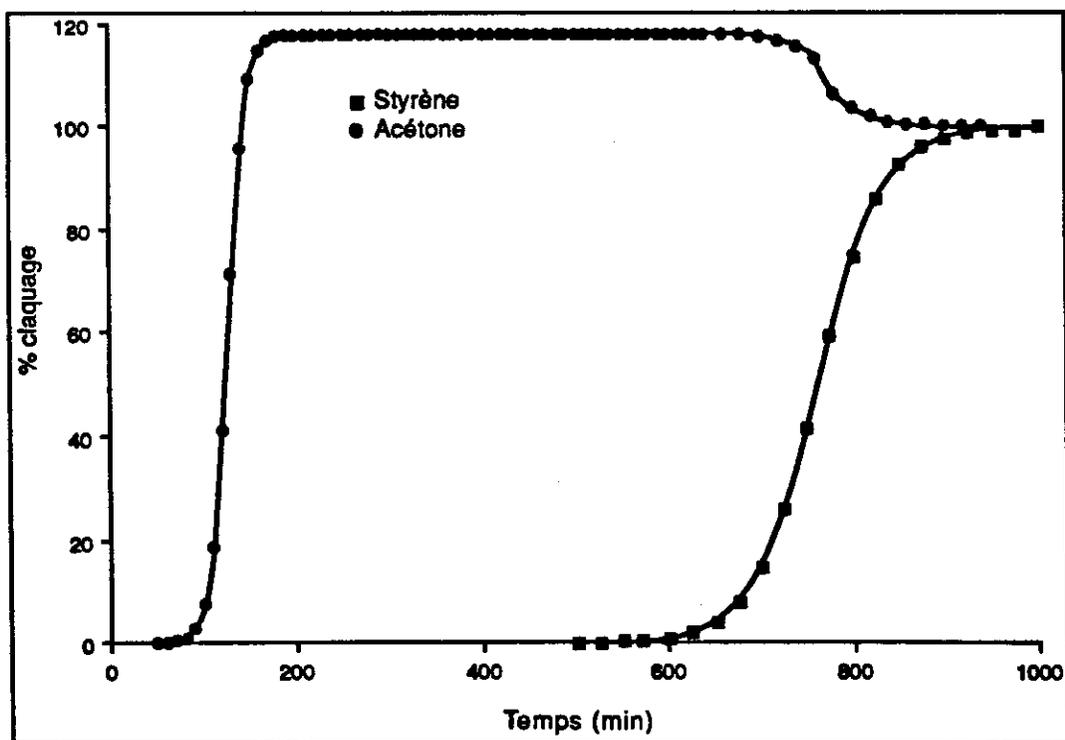


Figure 17 Courbe de claquage pour l'acétone et le styrène avec le mélange 746 ppm/256 ppm acétone/styrène.

Les figures 16 et 17 montrent les résultats pour les concentrations acétone/styrène de 479 ppm/507 ppm et 746 ppm/256 ppm respectivement. Dans ces deux cas, le maximum de la concentration de claquage de l'acétone atteint un plateau qui demeure stable pour une période de temps plus longue que dans le cas présenté à la Figure 15. La figure 16 montre que lorsque le rapport des concentrations acétone/styrène est 479ppm/507 ppm, la concentration de claquage de l'acétone au plateau est d'autour 760 ppm pour une durée d'environ 2 heures. Lorsque la composition du mélange acétone/styrène est 746 ppm /256 ppm au deuxième cas, la concentration de claquage de l'acétone au plateau est d'environ 880 ppm pendant 4 heures (Figure 17).

L'interprétation des résultats est équivalente à celle présentée précédemment pour le système acétone/m-xylène. Le déplacement des molécules d'acétone adsorbées à la surface du charbon actif par le styrène explique le fait que la concentration de claquage de l'acétone dépasse la concentration d'exposition. Théoriquement, on peut imaginer que lorsque la concentration de l'acétone diminue pour atteindre la concentration de la chambre, il n'y aura pratiquement plus d'acétone adsorbée sur le charbon actif mais seulement du styrène. Ceci a été prouvé expérimentalement à l'aide d'une analyse de la composition des adsorbants

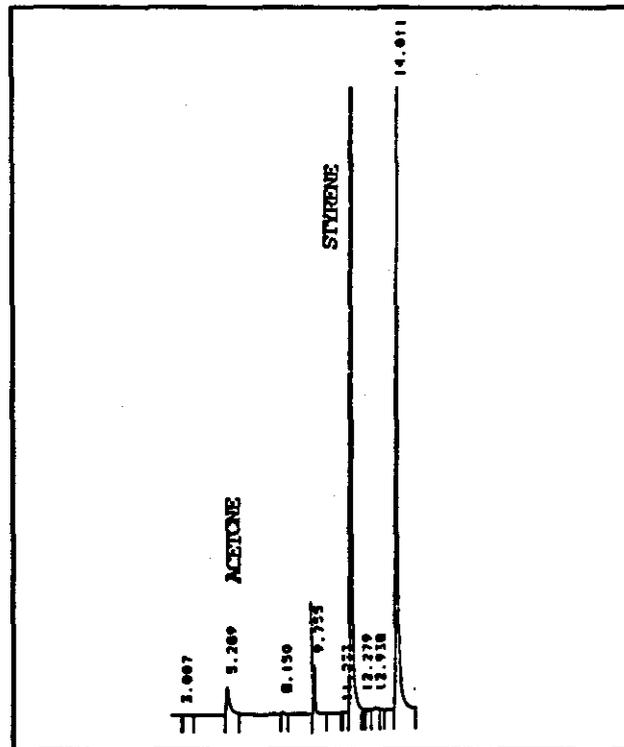


Figure 18 Chromatogramme montrant le contenu d'acétone et du styrène adsorbé sur le charbon actif provenant d'une cartouche saturée avec un mélange 479 ppm/507 ppm acétone/styrène.

trouvés dans le charbon actif, suivant la méthode utilisée pour les tubes d'échantillonnage [10]. La figure 18 montre le chromatogramme obtenu lors de l'analyse du charbon d'une cartouche saturée ayant servi à un essai avec 479 ppm d'acétone et 507 ppm de styrène. L'analyse a démontré qu'il y avait seulement du styrène et des traces d'acétone.

Capacité d'adsorption des cartouches dans le système binaire

La capacité de filtration des cartouches pour l'acétone et pour le styrène dans les différents mélanges a été calculée à l'aide de l'équation 1 et est présentée dans le Tableau 8. Ces résultats démontrent que la capacité de filtration de la cartouche par rapport à l'acétone est très affectée par le styrène. Plus le rapport des concentrations styrène/acétone est élevé, moins l'acétone est retenue par la cartouche. Comme exemple lorsque le rapport de concentration styrène/acétone est de 892/97 ppm, la capacité d'adsorption de la cartouche est de 0.88 g d'acétone. Lorsque le rapport de concentration styrène/acétone est de 746 ppm/256 ppm, la capacité d'adsorption est de 5.42 g d'acétone par cartouche.

Dans le cas du styrène par contre, la capacité d'adsorption de la cartouche n'est pas affectée par la présence de l'acétone. Une comparaison des résultats du tableau 8 avec ceux du tableau 7, permet de constater que la capacité de la cartouche de filtrer le styrène est pratiquement la même avec le solvant pur et avec le mélange binaire.

Tableau 8

Capacité de filtration des cartouches par rapport à l'acétone et au styrène dans le système binaire

Concentration (ppm)		τ (min)		W (g/c)	
Acétone	Styrène	Acétone	Styrène	Acétone	Styrène
97	892	158	217	0.88	19.98
234	739	129	257	1.74	19.60
249	755	136	267	1.95	20.80
479	507	137	367	3.78	19.20
746	256	126	762	5.42	20.13

Substitution de l'acétone par le styrène

Le rapport de molécules d'acétone déplacées par le styrène, (η), a été calculé à l'aide de l'équation 3 et les résultats sont présentés au Tableau 9.

Tableau 9
Rapport du nombre η de molécules du styrène nécessaires
pour déplacer une molécule d'acétone adsorbée

Concentration (ppm)		Cm	η
Acétone	Styrène		
746	256	882	1.9
479	507	763	1.8
249	755	513	2.9
234	739	492	2.9
97	892	353	3.5

Les valeurs de η diminuent avec l'augmentation de la concentration de l'acétone, suivant la même tendance que celle observée pour le mélange acétone-m-xylène. Cependant, le rapport de substitution de l'acétone par le styrène est plus élevé que celui observé dans le système acétone/m-xylène.

Une explication possible de ces résultats pourrait être la suivante : le volume molaire du styrène ($114.97 \text{ cm}^3/\text{mole}$) est plus réduit que celui du m-xylène ($122.85 \text{ cm}^3/\text{mole}$). De ce fait, le nombre de molécules de styrène nécessaires pour déloger de la surface du charbon actif l'acétone et l'eau, sera plus grand que le nombre de molécules de m-xylène.

3.2.3 Temps de service au 10 % de claquage

Les figures 19 et 20 présentent les temps de service au 10 % de claquage respectivement pour l'acétone et pour le styrène.

La figure 19 présente les temps de service pour l'acétone pure et pour l'acétone dans le système binaire. Cette figure montre que le temps de service des cartouches au 10 % de

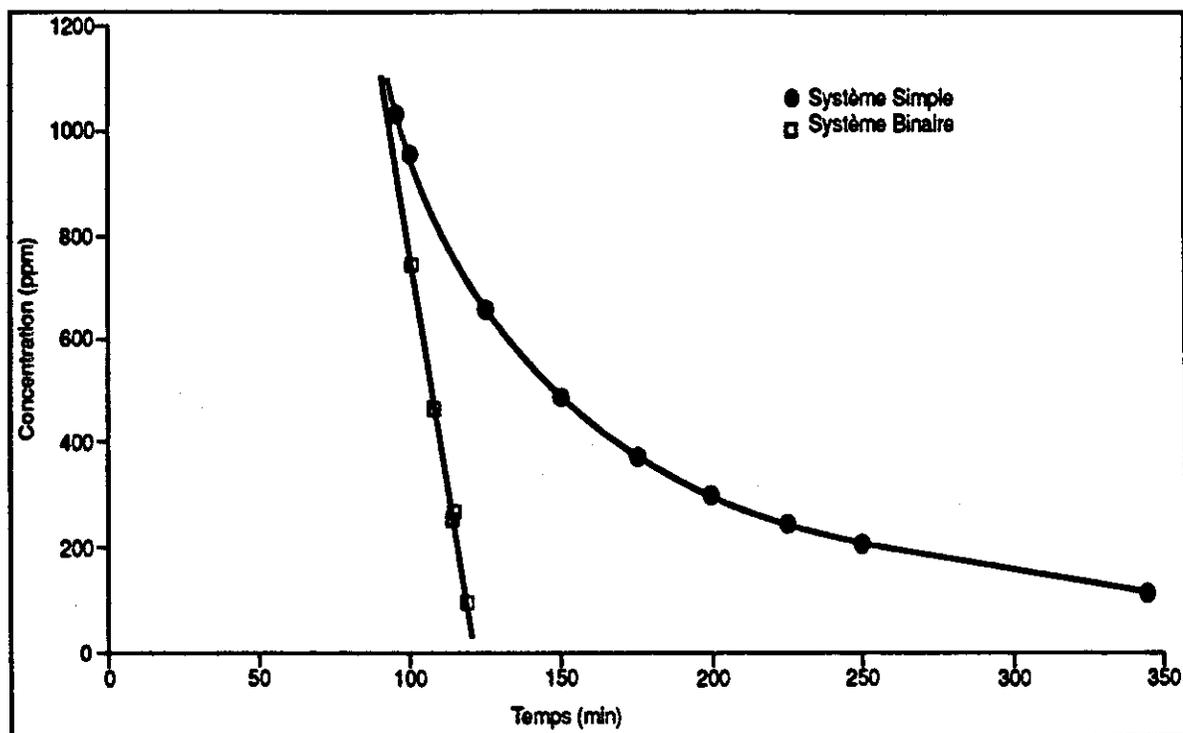


Figure 19 Temps de service au 10 % de claquage pour l'acétone dans le système simple et le système binaire acétone/styrène.

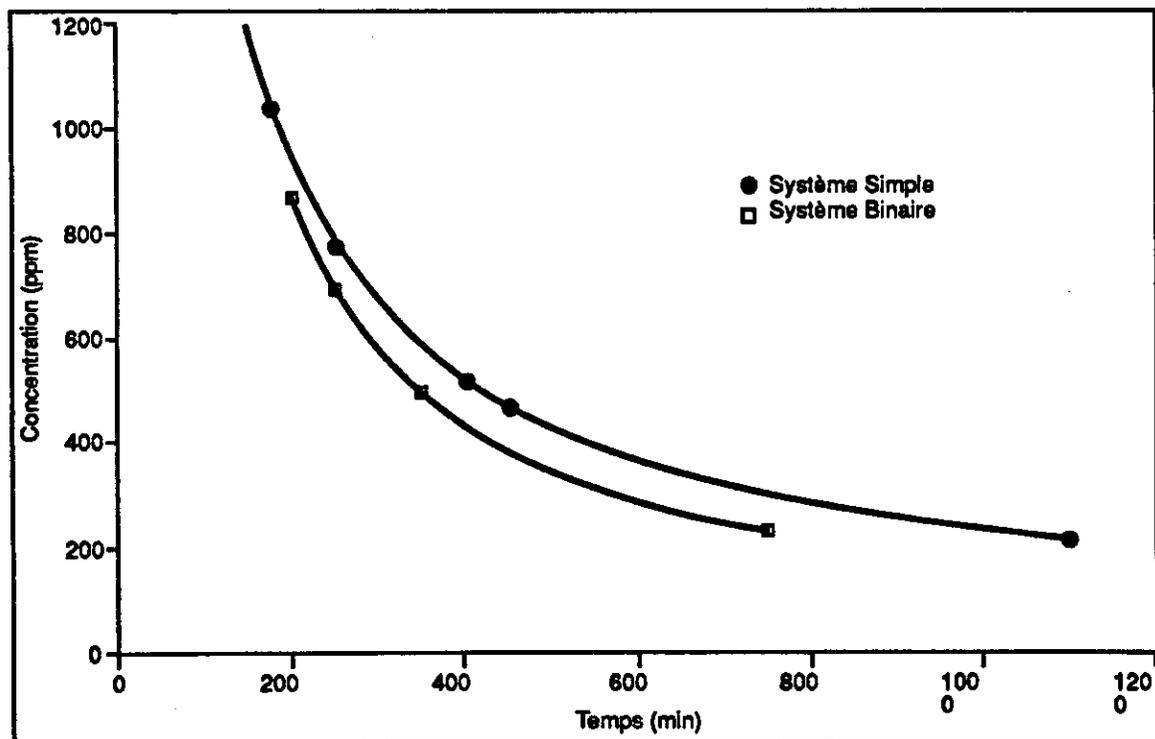


Figure 20 Temps de service au 10 % de claquage pour le styrène dans le système simple et dans le système binaire acétone/styrène.

claquage de l'acétone dans le mélange est très affecté par la présence du styrène. Ce comportement est semblable à celui observé dans le mélange acétone/xylène.

La Figure 20 présente les temps de service pour le styrène et pour le styrène dans le système binaire. Dans ce cas, la figure montre que la présence de l'acétone a peu d'effet sur le temps au 10% de claquage du styrène.

Globalement, l'interprétation des résultats pour le système acétone/styrène est la même que celle discutée précédemment pour le cas du mélange acétone/m-xylène. Le temps de service de la cartouche est déterminé par le contaminant le plus volatil, dans ce cas l'acétone. Les concentrations de l'acétone et du styrène peuvent être considérées comme ayant un effet additif par rapport au temps au 10% de claquage de l'acétone. Ainsi, pour prédire le temps de service au 10 % de claquage de l'acétone dans le mélange binaire, l'information obtenue pour l'acétone peut être utilisée. Pour ce faire, la concentration du styrène est ajoutée à celle de l'acétone et la concentration totale est attribuée à l'acétone.

3.2.4 Effet de la concentration

L'effet de la variation de la concentration d'un des solvants sur le temps de service au 10 % de claquage de l'autre solvant, a été évalué pour l'acétone et le styrène.

Dans un premier cas, la concentration du styrène était maintenue à 500 ppm et celle de l'acétone variait entre 100 ppm et 1000 ppm. Ces résultats sont présentés dans le Tableau 10. Les résultats de ce tableau confirment que la variation de la concentration de l'acétone a peu d'effet sur le temps au 10 % de claquage du styrène.

Dans un deuxième cas, la concentration de l'acétone a été maintenue constante autour de 500 ppm et celle du styrène variait entre 500 ppm et 1500 ppm. Les résultats sont présentés au Tableau 11. Les résultats de ce tableau, démontrent que le temps de service au 10 % de claquage de l'acétone diminue proportionnellement avec l'augmentation de la concentration du styrène.

Pour les raisons discutées à la section 3.1.3, l'effet des concentrations de l'acétone et du styrène par rapport au claquage de l'acétone n'est pas parfaitement additif car une partie du styrène déluge des molécules d'eau de la surface du charbon actif. De ce fait, par exemple,

le temps au 10 % de claquage de l'acétone pour le mélange 99 ppm/516 ppm acétone/styrène est de 172 min, alors que ce temps pour l'acétone pure à 615 ppm est d'environ 140 minutes.

Tableau 10

Effet de la concentration sur le temps de service au 10 % de claquage
Système acétone/styrène
Acétone variable

Concentration (ppm)		Temps au 10 % de claquage (min)	
Acétone	Styrène	Acétone	Styrène
92	508	190	344
99	516	172	347
305	503	141	359
479	507	104	366
779	510	97	350
985	496	85	368

Tableau 11

Effet de la concentration sur le temps de service au 10 % de claquage
Système acétone/styrène
Styrène variable

Concentration (ppm)		Temps au 10 % de claquage (min)	
Acétone	Styrène	Acétone	Styrène
479	507	104	366
492	733	99	247
494	1036	93	186
490	1578	75	122

3.3 Système III. Toluène/m-xylène

3.3.1 Les systèmes simples

L'évaluation du temps de service des cartouches pour le système toluène/m-xylène a été réalisée à un débit de 36 L/min. La capacité de filtration des cartouches par rapport aux deux solvants étant très élevée, ce débit a été choisi pour obtenir les temps de claquage dans une période de temps raisonnable.

La figure 21 présente les résultats pour le toluène à des concentrations de 244 ppm, 550 ppm, 773 ppm et 1006 ppm. Dans le cas du m-xylène, les essais ont été refaits au nouveau débit. Les résultats obtenus à des concentrations de 247 ppm, 571 ppm, 747 ppm et 1000 ppm sont présentés à la figure 22. Les figures 21 et 22 démontrent que les temps de service des cartouches pour le toluène et pour le m-xylène sont très rapprochés.

La capacité de filtration des cartouches pour les solvants purs calculée à l'aide de l'équation 1, est présentée au Tableau 12.

Tableau 12

Capacité de filtration des cartouches par rapport
au toluène et au m-xylène purs

Toluène				m-Xylène			
Concentration		τ	Wt	Concentration		τ	Wt
ppm	mg/m ³	min	g/c	ppm	mg/m ³	min	g/c
244	916	522	17.22	247	1075	557	21.55
506	1896	297	20.27	571	2483	241	21.55
773	2897	203	21.17	747	3251	189	22.12
1006	3772	140	19.01	1093	4756	118	20.20

Ces résultats démontrent que la capacité de filtration des cartouches est légèrement plus élevée pour le m-xylène que pour le toluène. Ceci correspond au fait que le toluène est plus volatil (point d'ébullition de 110.4°C) que le m-xylène (point d'ébullition de 139°C).

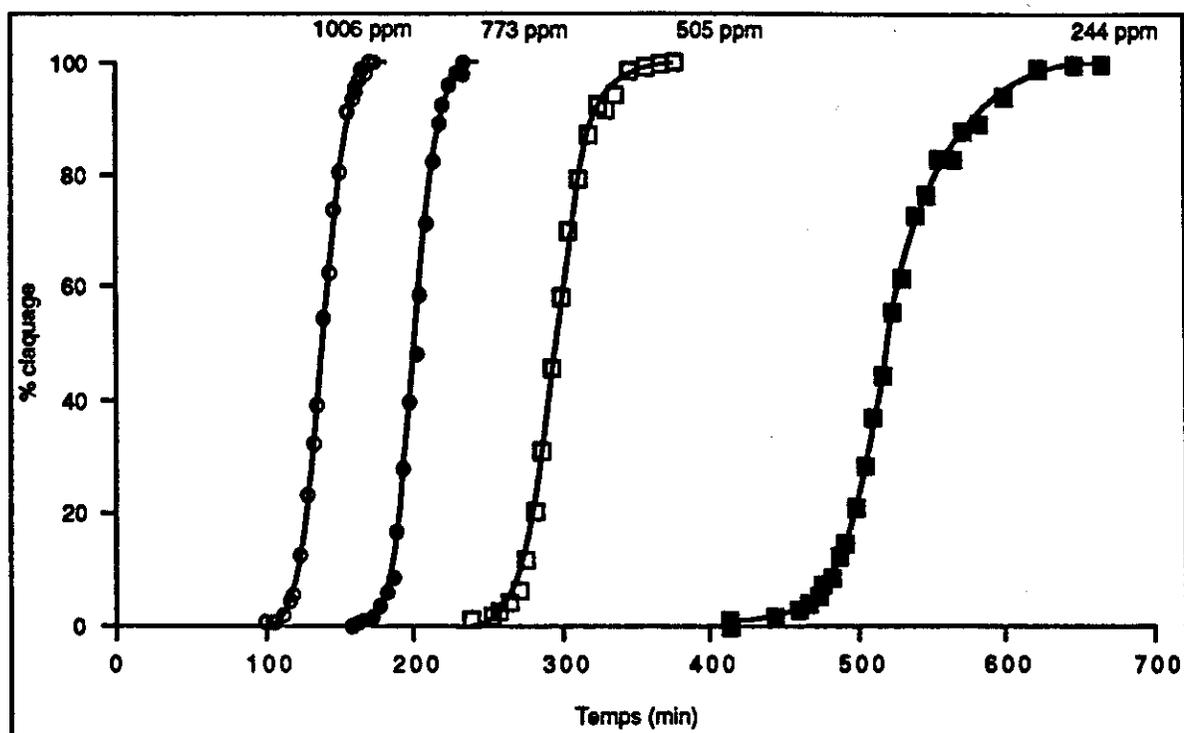


Figure 21 Courbes de claquage pour le toluène aux concentrations suivantes : 244 ppm, 550 ppm, 773 ppm et 1006 ppm.

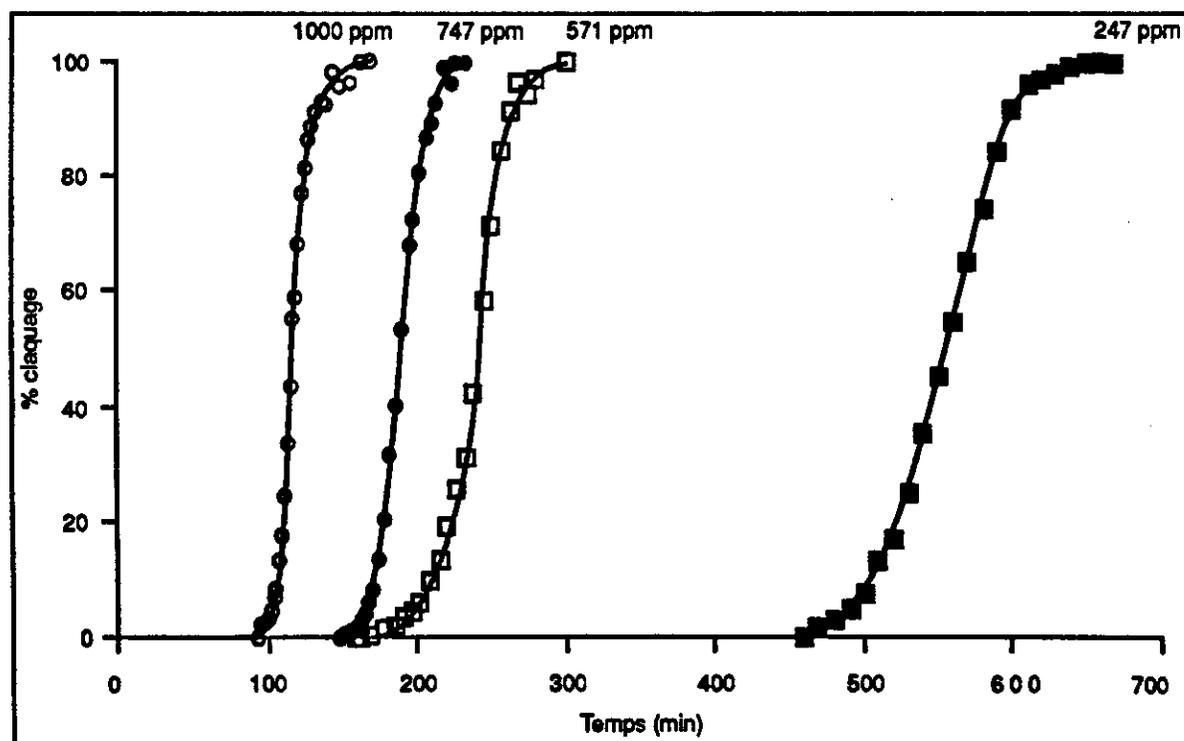


Figure 22 Courbes de claquage pour le m-xylène aux concentrations suivantes : 247 ppm, 571 ppm, 747 ppm et 1000 ppm.

3.3.2 Le système binaire

Les figures 23 à 27 présentent les résultats obtenus avec les mélanges toluène/m-xylène aux concentrations suivantes : 95 ppm/875 ppm, 242/740 ppm, 516 ppm/507 ppm, 747 ppm et 886 ppm/97 ppm. Dans tous les cas, le toluène étant le solvant le plus volatil, claque le premier la cartouche indépendamment du rapport de concentration toluène/m-xylène.

La figure 23 correspond au mélange composé de 95 ppm de toluène et 861 ppm de m-xylène. Dans ce cas, les temps de claquage pour les deux solvants sont très rapprochés. Comme exemple, au 10 % de claquage, le temps de service pour le toluène est de 100 min et pour le m-xylène de 112 min. La concentration de claquage du toluène augmente très rapidement pour dépasser la concentration à la chambre d'exposition. Le maximum de la concentration de claquage du toluène est autour de 3,4 fois la concentration d'exposition.

La figure 24 présente les résultats pour le mélange composé de 245 ppm de toluène et 725 ppm de m-xylène. Dans ce cas, le temps de service au 10 % de claquage est de 127 min pour le toluène et 148 min pour le m-xylène. La concentration du claquage du toluène dépasse rapidement la concentration du toluène à la chambre d'exposition. Le maximum de la concentration de claquage du toluène, est équivalent à 2.9 fois la concentration d'exposition.

Dans les deux cas présentés aux figures 24 et 25, le claquage du m-xylène se produit bien avant que la concentration de claquage du toluène atteigne son maximum. Ce type de comportement diffère de celui observé pour les systèmes acétone/m-xylène et acétone/styrène. Dans ces derniers cas, le début du claquage du solvant moins volatil coïncide avec le début de la diminution de la concentration de claquage de l'acétone, après avoir atteint son maximum. Ceci montre que l'interprétation de l'adsorption du système binaire toluène/m-xylène sur le charbon actif diffère des deux autres déjà discutés.

L'interprétation la plus probable serait la suivante : dans le mélange binaire, le toluène et le m-xylène s'adsorbent simultanément sur le charbon actif. Une fraction du toluène serait délogée par le m-xylène. Le plateau qui correspond à un équilibre dans le processus de adsorption-désorption n'a pas été observé dans ces cas.

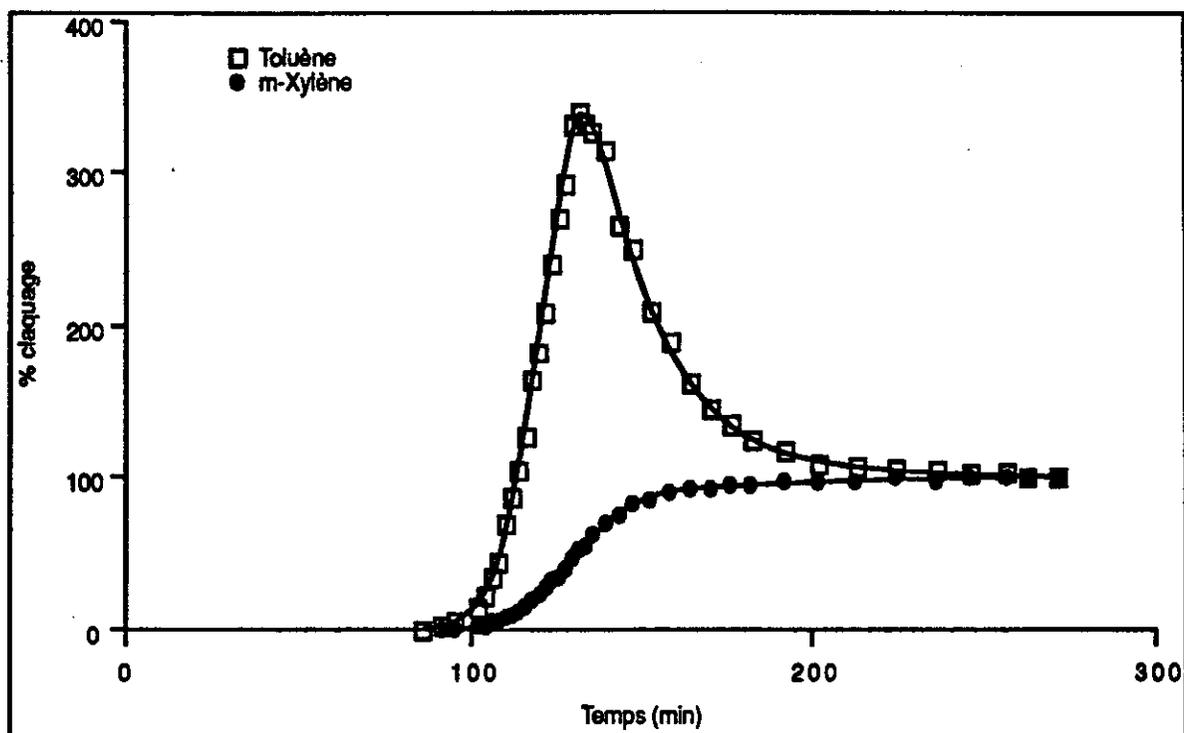


Figure 23 Courbes de claquage pour le toluène et le m-xylène avec le mélange 95/861 ppm toluène/m-xylène.

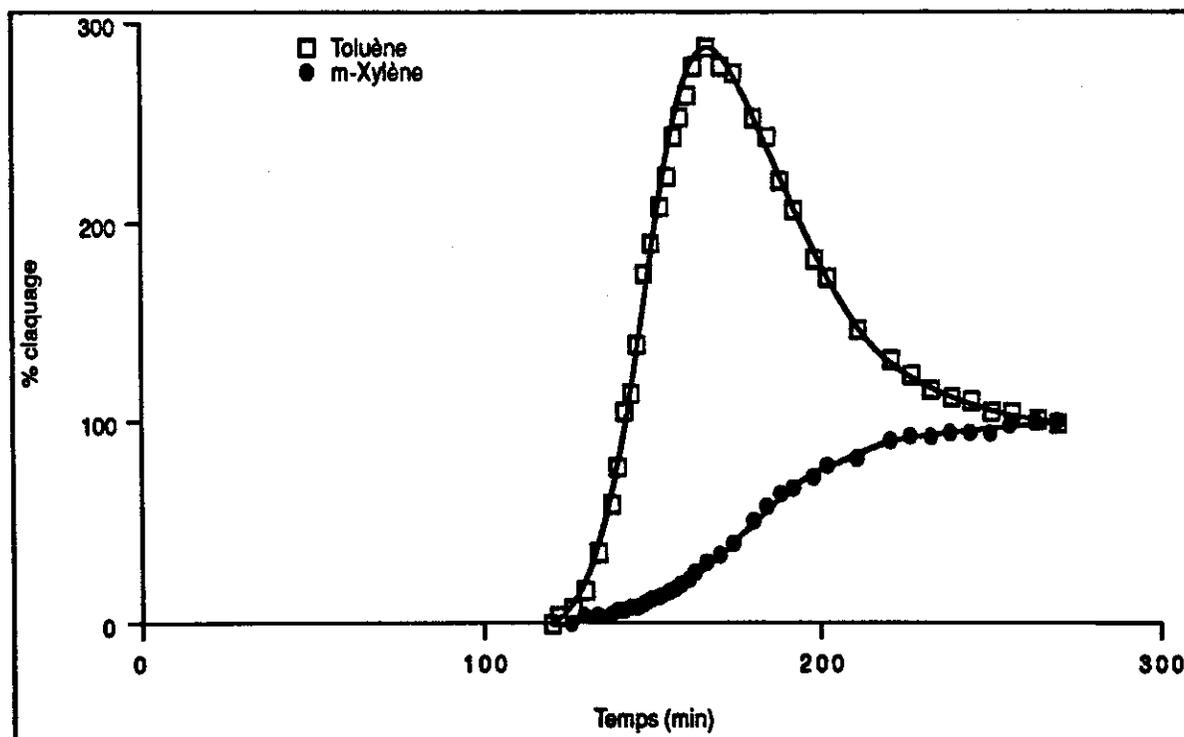


Figure 24 Courbes de claquage pour le toluène et le m-xylène avec le mélange 245 ppm/725 ppm toluène/m-xylène.

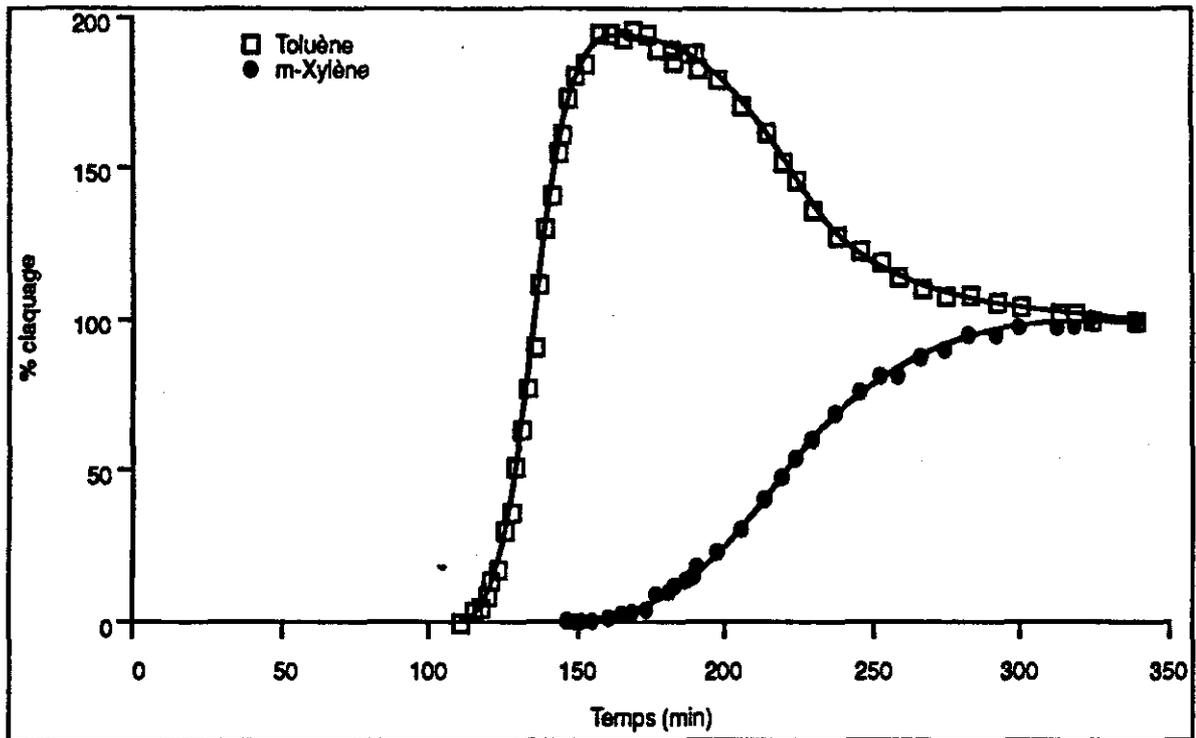


Figure 25 Courbes de claquage pour le toluène et le m-xylène avec le mélange 516 ppm/507 ppm toluène/m-xylène.

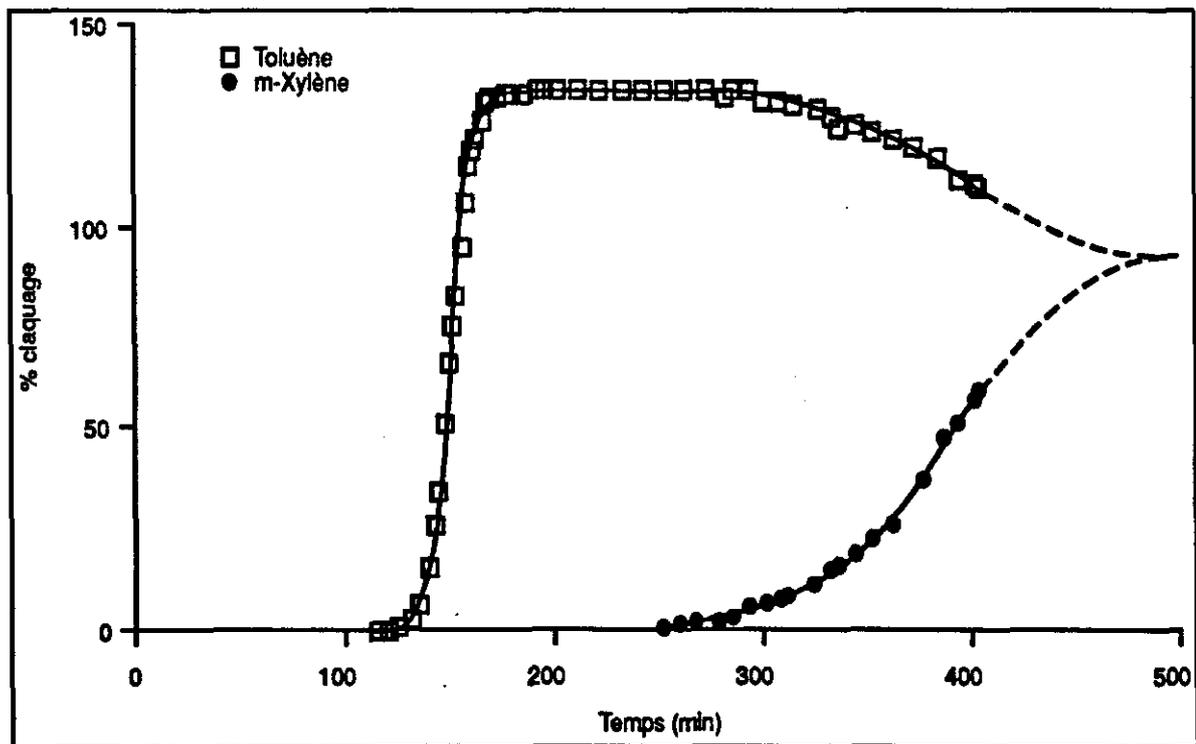


Figure 26 Courbes de claquage pour le toluène et le m-xylène avec le mélange 747 ppm/247 ppm toluène/m-xylène.

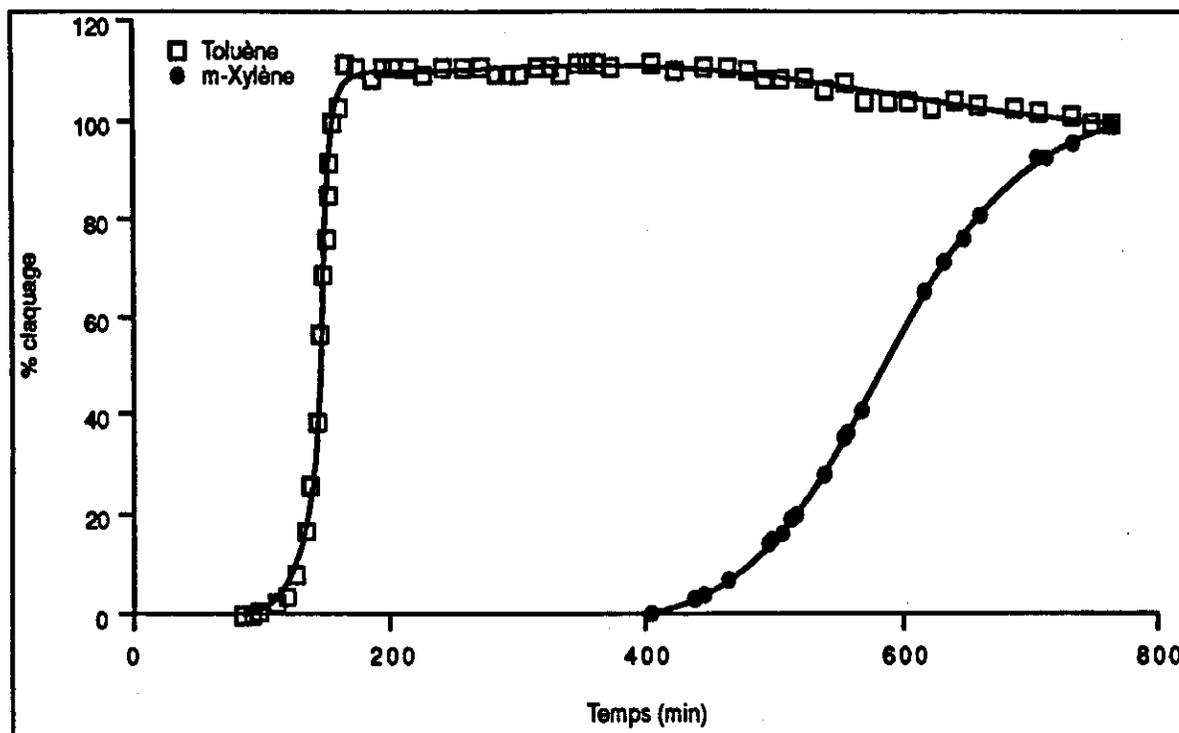


Figure 27 Courbes de claquage pour le toluène et le m-xylène avec le mélange 886 ppm/97 ppm toluène/m-xylène.

La figure 25 présente les claquages pour le mélange composé de 516 ppm de toluène et 507 ppm de m-xylène. Dans ce cas, le temps au 10 % de claquage, pour le toluène est de 100 min et pour le m-xylène de 180 min. Le maximum de la concentration de claquage du toluène correspond à environ 2 fois la concentration d'exposition. Le début de la diminution de la concentration de claquage du toluène coïncide avec le début du claquage du m-xylène. Cependant, dès que le maximum de la concentration de claquage du toluène est atteint, celle-ci décroît sans atteindre le plateau.

Les figures 26 et 27 présentent les résultats pour les mélanges de toluène/m-xylène ayant des concentrations de 747 ppm/247 ppm et 886 ppm/97 ppm respectivement. Dans ces deux cas, on observe un plateau au maximum de la concentration de claquage du toluène. Dans le cas présenté à la figure 26, le maximum de la concentration de claquage du toluène correspond à environ 1.4 fois la concentration d'exposition et la durée du plateau est d'autour 2 heures. Dans le cas présenté à la figure 27, le maximum de la concentration de claquage du toluène est 1.1 fois plus élevé que la concentration d'exposition et la durée du plateau est d'autour 4.5 heures.

La capacité de filtration des cartouches pour le toluène et pour le m-xylène, a été calculée à l'aide de l'équation 1 et les résultats sont présentés au Tableau 13.

Tableau 13

Capacité d'adsorption des cartouches par rapport au toluène et au m-xylène dans le système binaire

Concentration (ppm)		r (min)		w (g/c)	
Toluène	m-Xylène	Toluène	m-Xylène	Toluène	m-Xylène
242	740	135	174	4.42	20.15
245	725	136	180	4.46	20.43
501	506	143	230	9.68	18.24
516	507	129	223	8.99	17.70
743	247	147	387	14.81	14.96
886	97	144	585	17.22	8.84

Ce tableau montre que la capacité de filtration de la cartouche par rapport aux deux solvants dans le système binaire est très dépendante du rapport des concentrations toluène/m-xylène. Lorsque la concentration d'un des solvants augmente, la capacité de filtration de la cartouche par rapport à l'autre solvant diminue. Cependant, il apparaît que l'effet est beaucoup plus marqué pour le toluène que pour le m-xylène. Ainsi, lorsque les concentrations de toluène et m-xylène sont équivalentes, comme par exemple dans le cas du mélange 516 ppm de toluène et 507 ppm de m-xylène, la capacité de filtration de la cartouche pour le toluène est de 8.9 grammes, tandis que celle pour le m-xylène est de 17.7 grammes. Lorsque le toluène est à plus faible concentration, comme c'est le cas du mélange 242 ppm de toluène et 740 ppm de m-xylène, la cartouche ne filtre qu'un maximum de 4.4 grammes de toluène tandis que la capacité de filtration par rapport au m-xylène est de 20.15 grammes. Finalement, lorsque le m-xylène est à faible concentration, ce qui est le cas du mélange 886 ppm toluène et 97 ppm de m-xylène, la capacité de filtration de la cartouche par rapport au toluène est de 12.52 grammes et par rapport au m-xylène de 8.84 grammes.

Une autre information intéressante retrouvée au tableau 13, est que le temps de service par rapport au 50 % de claquage demeure presque constant pour le toluène à n'importe quel rapport de concentration. Dans le cas du m-xylène par contre, le temps de service au 50 % de claquage augmente lorsque sa concentration diminue.

L'interprétation la plus plausible pour ces résultats serait la suivante : le toluène et le m-xylène sont des molécules hydrophobes ayant un point d'ébullition plus élevé que l'eau. Lors du passage de l'air humide avec le mélange de ces contaminants à travers la cartouche, les molécules d'eau adsorbées à la surface du charbon actif seront délogées par le m-xylène et le toluène. La surface du charbon actif libérée par l'eau, serait occupée par le toluène et par le m-xylène. De ce fait, la présence d'eau dans l'air aurait peu d'effet (sinon aucun) sur l'adsorption des deux solvants à la surface du charbon actif. La relative constance des valeurs τ du toluène aux différents rapports des concentrations toluène/m-xylène peut être expliquée par l'effet additif qu'a la concentration du m-xylène sur la concentration du toluène. De ce fait, la valeur τ du toluène dans le mélange, sera équivalente à celle du toluène pur à 1000 ppm (voir Tableau 12).

Lorsque le charbon actif est saturé, le m-xylène déplace des molécules de toluène adsorbées. Cependant, ce déplacement ne serait que partiel et dépendrait du rapport de concentration dans le système binaire.

Pour avoir une idée approximative de la quantité de toluène retenue par la cartouche, on pourrait faire le calcul suivant : la différence entre la quantité totale de m-xylène adsorbée dans le système simple (W_{txyl}) et la quantité adsorbée dans le mélange binaire (W_{xyl}) représente la quantité de m-xylène non adsorbée par la cartouche à cause du toluène (ΔW_{xyl}).

$$\begin{aligned} W_{txyl} - W_{xyl} &= \Delta W_{xyl} && (4) \\ W_{txyl} &= \text{capacité totale de filtration de m-xylène pur} \\ W_{xyl} &= \text{capacité de filtration de m-xylène dans le système binaire} \end{aligned}$$

Étant donné qu'il y a une différence entre la capacité de filtration du toluène et celle du m-xylène, il faut multiplier ΔW_{xyl} par un facteur W_{tol}/W_{txyl} pour obtenir la quantité de toluène restant dans la cartouche après saturation avec le m-xylène.

$$\Delta W_{tol} = \Delta W_{xyl} \times \frac{W_{tol}}{W_{xyl}} \quad (5)$$

W_{tol} = grammes de toluène adsorbés dans le système binaire
 W_{ttol} = capacité totale de filtration de toluène pur

À l'aide de l'équation 5, les quantités de toluène qui restent après saturation de la cartouche avec le mélange binaire ont été calculées. Ces valeurs qui restent "approximatives", sont présentées au Tableau 14.

Le même résultat peut être obtenu par le calcul de la quantité de m-xylène retenue par la cartouche. Dans ce cas, l'équation 4 devient :

$$W_{ttol} - W_{tol} = \Delta W_{tol} \quad (6)$$

et l'équation 5 modifiée pour calculer ΔW_{xyl} , devient :

$$\Delta W_{xyl} = \Delta W_{tol} \times \frac{W_{xyl}}{W_{tol}} \quad (7)$$

Tableau 14

Concentration (ppm)		ΔW_{xyl} g/c	ΔW_{tol} g/c
Toluène	m-Xylène		
242	740	1.21	1.10
245	724	0.93	0.85
501	506	3.12	2.84
516	507	3.66	3.33
747	247	6.40	5.82
886	97	12.52	11.39

$$\begin{aligned}
 W_{tol}/W_{xyl} &= 0.91 \\
 W_{txyl} &= 21.34 \text{ g.}
 \end{aligned}$$

Ce tableau montre que presque tout le toluène est désorbé lorsque la concentration de toluène est plus faible que celle du m-xylène. Cependant, la quantité de toluène résiduelle dans la cartouche croît avec l'augmentation de la concentration du toluène.

Pour vérifier la validité de cette démarche, le poids calculé de m-xylène retenu par la cartouche dans le mélange binaire (tableau 13) a été additionné au poids calculé de toluène restant dans la cartouche. Cette valeur est comparée avec la quantité déterminée expérimentalement par pesée de la cartouche à la fin de chaque essai. Ces résultats sont présentés au Tableau 15.

Tableau 15

Concentration (ppm)		Poids mesuré (grammes)	Poids calculé (grammes)	Δp (g)
Toluène	m-Xylène			
242.3	739.95	21.55	21.25	- 0.30
501.2	506.3	21.30	21.08	- 0.22
746.6	246.8	21.80	20.78	- 1.02
885.8	96.5	20.52	20.23	- 0.29

Les résultats de ce tableau démontrent que les quantités de solvants filtrés par la cartouche qui ont été calculées à partir des valeurs des temps de claquage et les quantités déterminées par pesée sont très rapprochées. De plus, ces résultats appuient l'interprétation faite pour l'adsorption des solvants du système binaire.

3.3.3 Le temps de service au 10 % de claquage

Les figures 28 et 29 présentent les temps de service au 10 % de claquage pour le toluène et le m-xylène respectivement. À la figure 28, le temps de service pour le toluène dans le système simple et dans le système binaire est représenté. Dans le cas du système simple, le temps de service de la cartouche augmente d'une manière exponentielle avec la diminution de la concentration du toluène. Cependant, dans le cas du mélange binaire, le temps de service par rapport au toluène demeure constant à n'importe quel rapport de concentration

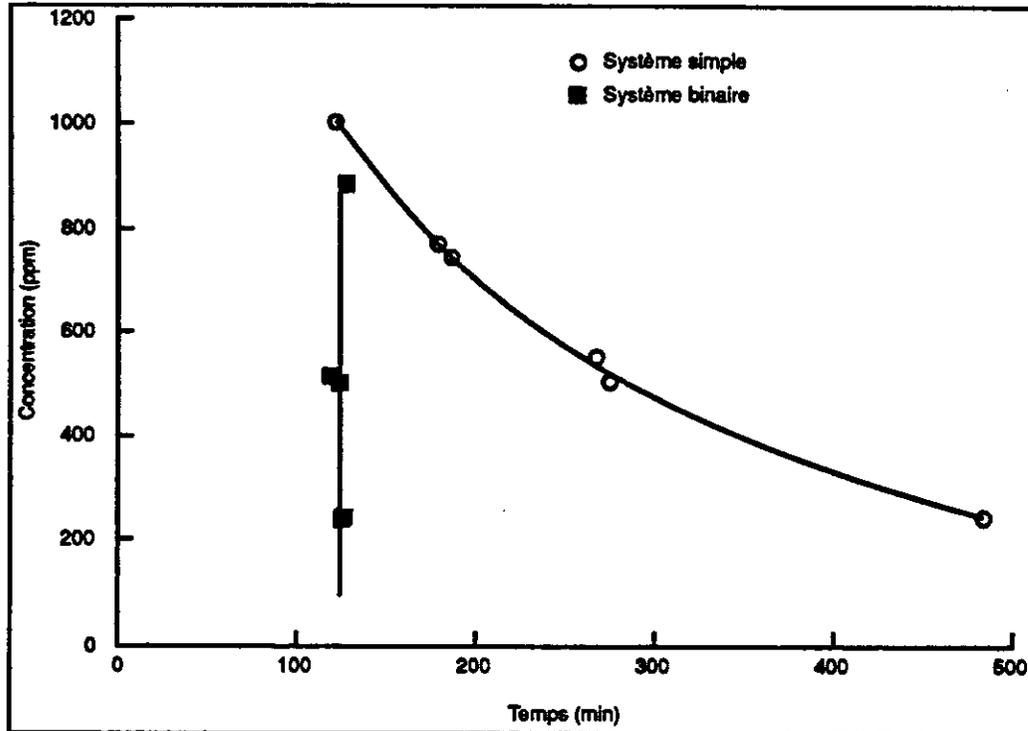


Figure 28 Temps de service au 10 % de claquage pour le toluène dans le système simple et dans le système binaire toluène/m-xylène.

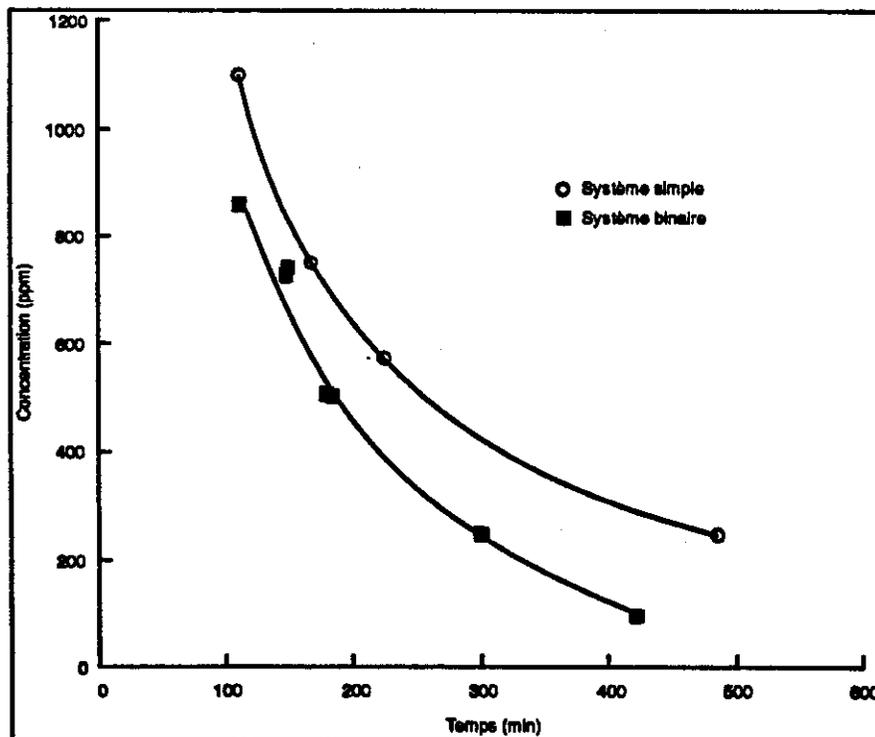


Figure 29 Temps de service au 10 % de claquage pour le m-xylène dans le système simple et dans le système binaire toluène/m-xylène.

toluène/m-xylène. Cette observation qui avait déjà été faite par rapport aux valeurs τ du toluène dans le mélange binaire, renforce l'interprétation présentée précédemment, que les concentrations de toluène et m-xylène sont de quantités additives par rapport au claquage du toluène. En d'autres mots, lorsque la composition du mélange serait par exemple de 250 ppm de toluène et 750 ppm de m-xylène, le temps de claquage du toluène sera celui du toluène pur à une concentration de 1000 ppm.

Le temps de service pour le m-xylène au 10 % de claquage dans le système binaire et dans le système simple est comparé à la figure 29. Cette figure montre que le temps de service du m-xylène est fortement diminué par la présence du toluène. Cependant, la forme de la courbe reste la même, à savoir, le temps de service augmente exponentiellement avec la diminution de la concentration du m-xylène.

Substitution de toluène par m-xylène

Pour avoir l'information sur le nombre de molécules de m-xylène qui déplacent les molécules de toluène adsorbées, des calculs ont été réalisés à l'aide de l'équation 3 pour les différents rapports de concentration toluène/m-xylène. Ces résultats sont présentés au Tableau 16.

Tableau 16

Rapport du nombre η de molécules de toluène nécessaires pour déplacer une molécule de m-xylène adsorbée

Concentration (ppm)		Cm	η
Toluène	m-Xylène		
95	875	985	0.98
245	725	1016	0.94
516	507	1039	0.97
747	247	994	1.00
886	97	983	1.00

Les résultats de ce tableau démontrent que le rapport de substitution est approximativement 1:1, soit une molécule de m-xylène déplace une molécule de toluène adsorbée à la surface du charbon actif. De plus, les résultats démontrent que l'eau n'interfère pas à l'adsorption du toluène ou du m-xylène.

3.3.4 Effet de la concentration

L'effet de la variation de la concentration d'un solvant par rapport à l'autre a été vérifié en gardant la concentration du m-xylène constante et en variant celle du toluène entre 100 ppm et 1000 ppm. Les résultats obtenus sont présentés en termes du temps de service au 10 % dans le Tableau 17.

Tableau 17

Effet de la concentration sur le temps de service
au 10 % de claquage pour le système toluène/m-xylène
- Concentration de toluène variable

Concentration (ppm)		Temps au 10 % de claquage (min)	
Toluène	m-Xylène	Toluène	m-Xylène
94	507	182	205
249	510	154	194
516	507	120	180
757	505	98	156
1025	524	84	145

Les résultats de ce tableau démontrent que le temps de service des deux solvants diminue lorsque la concentration du toluène augmente. Cependant, la variation est plus marquée pour le toluène que pour le m-xylène.

Le rapport de substitution du toluène adsorbé par le m-xylène a été calculé pour les mêmes mélanges à l'aide de l'équation 3 et les résultats sont présentés dans le Tableau 18.

Tableau 18

Rapport du nombre η de molécules de toluène nécessaires pour déplacer une molécule de m-xylène adsorbée : effet de la concentration de toluène variable

Concentration (ppm)		Cm	η
Toluène	m-Xylène		
94	507	597	1.01
249	510	767	0.98
516	507	1039	0.97
757	505	1316	0.90
1026	524	1588	0.93

Les résultats de ce tableau indiquent qu'il y a une légère diminution de η lorsque le rapport des concentrations toluène/m-xylène augmente. Cependant, la variation est faible et le rapport de substitution de toluène par m-xylène reste proche de 1:1.

4. CONCLUSION

La capacité de filtration des cartouches pour les contaminants simples est dépendante du point d'ébullition des solvants. Les solvants ayant le point d'ébullition le plus élevé, soit le styrène (146°C) et le m-xylène (139°) sont les plus retenus par les cartouches filtrantes. Ensuite, on retrouve le toluène (110.4°C) et finalement, le solvant le moins retenu par les cartouches est l'acétone qui est le plus volatil avec un point d'ébullition de 56°C.

Dans le cas de l'acétone, il a été trouvé que la capacité de filtration de la cartouche est très dépendante de la concentration du contaminant. Plus la concentration de l'acétone est élevée, plus grande est la capacité de filtration de la cartouche.

De plus, les résultats de cette étude ont démontré que lorsqu'il y a plus d'un contaminant dans l'air ambiant, le temps de service des cartouches filtrantes est déterminé par le temps de claquage du contaminant le plus volatil. Ce contaminant claque toujours le premier et la concentration de claquage peut dépasser de plusieurs fois la concentration d'exposition du contaminant.

Il a été trouvé que l'eau agit comme un contaminant par rapport au solvant le plus volatil. En effet, la capacité de filtration des cartouches par rapport à l'acétone est très diminuée par la présence de l'eau provenant de l'humidité de l'air. Cependant, la capacité de filtration par rapport aux autres solvants essayés qui ont un point d'ébullition plus élevé que l'eau n'est pas affectée par l'humidité.

Dans tous les systèmes étudiés, il a été trouvé que le solvant le moins volatil déplace des molécules de solvant le plus volatil adsorbées à la surface du charbon actif. La concentration des molécules des contaminants désorbés de la surface du charbon actif s'ajoute à la concentration du contaminant dans l'air. Ceci explique que la concentration de claquage du solvant le plus volatil peut dépasser de plusieurs fois sa concentration dans l'air.

Dans le cas des systèmes acétone/m-xylène et acétone/styrène, il a été démontré que tout l'acétone adsorbée sur le charbon actif était déplacée par le m-xylène ou le styrène. Dans le cas du système toluène/m-xylène, il a été démontré que des molécules de m-xylène déplaçaient des molécules de toluène adsorbées, mais que cette substitution n'était que partielle.

Dans le cas des systèmes binaires caractérisés dans cette étude, la concentration des contaminants peut être considérée comme additive et ajoutée à la concentration du contaminant le plus volatil. De ce fait, il serait possible d'utiliser les informations des temps de services obtenus avec des solvants purs, pour prédire la durée de vie des cartouches filtrantes en milieu industriel, pourvu que les concentrations des contaminants et l'humidité soient connues.

D'un point de vue appliqué, l'équation simple proposée dans les références 10 à 12, pour calculer le temps de service des cartouches par rapport à un solvant pur, peut être utilisée dans le cas des solvants multiples pour calculer le temps de service par rapport au solvant le plus volatil. On rappellera que l'équation permettant de calculer le temps de service des cartouches pour un pourcentage de claquage donné (eg. 10 %) est la suivante :

$$T_c(10\%) = A \times C^b$$

T_c est le temps de claquage en minutes au 10 % de la concentration d'exposition, C est la concentration d'exposition, et A et b sont des constantes obtenues expérimentalement pour chaque vapeur organique. Dans le cas des systèmes complexes, la valeur C sera celle résultante de l'addition des concentrations des contaminants dans l'air ambiant, et A et b, les valeurs correspondant au contaminant le plus volatil.

RÉFÉRENCES

- 1.- TERESINSKI, M.F. et CHEREMISINOFF. "Industrial Respiratory Protection", Ann. Arbor Science, Eds, Michigan, USA (1983).
- 2.- NELSON, G.O. and CORREIA, N. "Respiratory Cartridge Efficiency Studies : VIII. Summary and Conclusions", American Industrial Hygiene Association Journal, 37, p. 514-525, (1976).
- 3.- NELSON, G.O. et HARDER, C.A. "Respirator Cartridge Efficiency Studies : VI. Effect of Concentration", American Industry Hygiene Association Journal, 37, p. 205-216, (1976).
- 4.- NELSON, G.O. et HARDER, C.A. "Respirator Cartridge Efficiency Studies V. Effect of Solvent Vapor", American Industrial Hygiene Association Journal, 36, (1974).
- 5.- NELSON, G.O., CORREIA, N.A. et HARDER, C.A. "Respirator Cartridge Efficiency Studies : VII. Effect of Relative Humidity and Temperature", 37, p. 280-288, (1976).
- 6.- NELSON, G.O., CARLSON, G.J. et JOHNSON, J.S. "Service Life of Respirator Cartridges at Various Concentrations of Common Organic Solvents", Report UCRL-52982, Lawrence Livermore Laboratory, University of California, Livermore, Californie 94550, (1980).
- 7.- SILVERMAN, L., LEE, T., PLOTKIN, L., SAWYERS, A. et YANCY, A. R. "Air flow measurements on Human Subjects with and without Respiratory Resistance at Several Work-rates.", A.M.A Arch. Ind. Hyg. Occup. Med., 3:461 (1951).
- 8.- YOON, Y.H. et NELSON, J.-H. "Application of Gas Adsorption Kinetics I. A Theoretical Model for Respirator Cartridge Service Life", American Industrial Hygiene Association Journal, 45, p. 509-516, (1984).
- 9.- YOON, Y.H. et NELSON, J.H. "Application of Gas Adsorption Kinetics - II. A Theoretical Model for Respirator Cartridge Service Life and its Practical Applications", American Industrial Hygiene Association Journal, 45, p. 517-524, (1984).

- 10.- LARA, J., LAFOND, R. et GENDREAU, L. "Guide d'évaluation du temps de service des cartouches chimiques", Publication IRSST, 18 p., (1987).
- 11.- LARA, J. et LAFOND, R. "Chemical Cartridges : The test of Time". OH & S Canada, vol. 3, no 6, p. 16-19, (1987).
- 12.- LARA, J. et LAFOND, R. "The service life of respirator cartridges". Publication IRSST, Méthode de laboratoires, (août 1987).
- 13.- YOON, Y.H., NELSON, J.H., LARA, J., KAMEL, C. et FREGEAU, D. "A Theoretical Interpretation of the Service Life of Respirator Cartridges for the Binary Cartridges Acetone/m-Xylene system", American Industrial Hygiene Association Journal, vol. 52, p. 65-74, (1991).
- 14.- YOON, Y.H., NELSON, J.H., LARA, J., KAMEL, C. et FREGEAU, D. "A Theoretical Model for Respirator Cartridge Service Life for Binary Systems: Application to Acetone/Styrene Mixtures", American Industrial Hygiene Association Journal, vol. 53, p. 493-502, (1992).
- 15.- LARA, J., KAMEL, C. et DROLET, D. The service life of chemical cartridges. Laboratory vs field testing". Proceeding 3rd. Scandinavian Symposium on protective clothing against chemicals and other health risks (Nokobetef III), pp. 107-120, Gausdal, Norway, (septembre 1989).