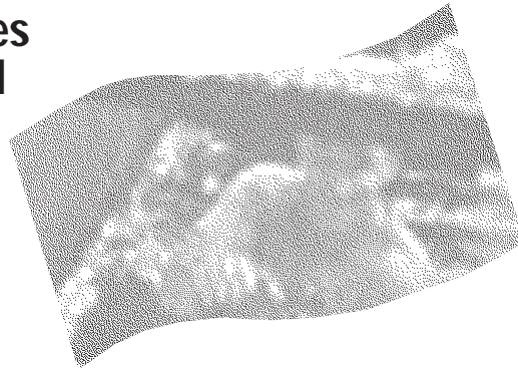


# Formaldéhyde lié à des particules aéroportées en milieu de travail

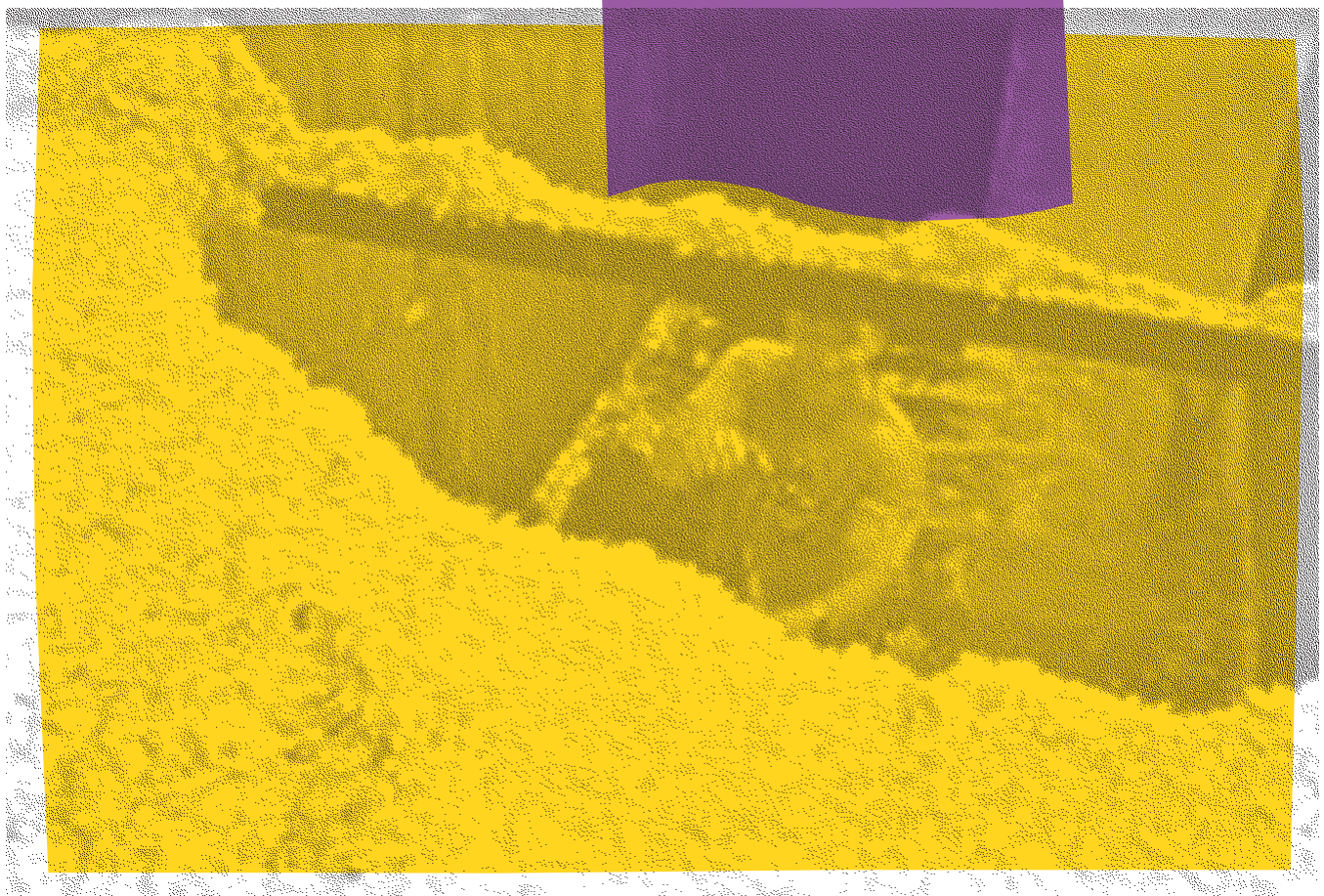


Nathalie H. Gosselin  
Gaétan Carrier  
Robert C. Brunet

Juin 2002

R-304

**RAPPORT**



## La recherche, pour mieux comprendre

L'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (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 subventionne 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, en téléphonant au 1-877-221-7046.

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

Dépôt légal  
Bibliothèque nationale du Québec  
2002

IRSST - Direction des communications  
505, boul. de Maisonneuve Ouest  
Montréal (Québec)  
H3A 3C2  
Téléphone : (514) 288-1551  
Télécopieur : (514) 288-7636  
publications@irsst.qc.ca  
**www.irsst.qc.ca**

© Institut de recherche Robert-Sauvé  
en santé et en sécurité du travail,  
juin 2002.

# Formaldéhyde lié à des particules aéroportées en milieu de travail

ÉTUDES ET  
RECHERCHES

Nathalie H. Gosselin, Gaétan Carrier,  
Chaire en analyse des risques toxicologiques pour l'humain, Université de Montréal

Robert C. Brunet,  
Département de mathématiques et statistique, Université de Montréal

RAPPORT

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



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

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

# TABLE DE MATIERES

<b>1</b>	<b>CONTEXTE</b> .....	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>OBJECTIFS</b> .....	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>MÉTHODOLOGIE</b> .....	<b>7</b>
	<b>4.1 L' ANALYSE CRITIQUE DE LA LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE SUR LE FORMALDÉHYDE LIÉ AUX PARTICULES.</b> .....	<b>7</b>
	4.1.1 <i>EXPOSITION DES TRAVAILLEURS AUX POUSSIÈRES DANS L'INDUSTRIE</i> .....	8
	4.1.2 <i>CONCENTRATIONS DE FORMALDÉHYDE LIÉ AUX POUSSIÈRES</i> .....	9
	4.1.3 <i>L' ABSORPTION ET L' ÉLIMINATION DES POUSSIÈRES PAR L' HOMME</i> .....	11
	4.1.3.1 Dimension des poussières .....	11
	4.1.3.2 Modes de déposition des particules .....	12
	Impaction .....	12
	Sédimentation .....	12
	Diffusion .....	13
	4.1.3.3 Modèle fonctionnel du système respiratoire développé par ICRP .....	13
	La région extra-thoracique (ET) .....	13
	La région de la trachée et des bronches (BB) .....	14
	La région des bronchioles et bronchioles terminales (bb) .....	15
	Région des bronchioles respiratoires, les canaux alvéolaires et les sacs alvéolaires (AI) .....	15
	4.1.3.4 Déposition des particules dans le système respiratoire .....	16
	4.1.3.5 Taux d'élimination des particules hors du système respiratoire .....	17
	<b>4.2 MODÈLE PROPOSÉ POUR LA CINÉTIQUE D' ABSORPTION DU FORMALDÉHYDE VIA LE SYSTÈME RESPIRATOIRE</b> .....	<b>18</b>
	4.2.1 <i>DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE CINÉTIQUE</i> .....	18
	4.2.1.1 Modélisation de la cinétique du formaldéhyde absorbé via le système respiratoire sous forme libre 19	
	Pendant l'exposition d'une durée T .....	19
	Après l'exposition ( $t > T$ ) .....	20
	4.2.1.2 Modélisation de la cinétique du formaldéhyde absorbé via le système respiratoire suite à l'inhalation de poussières contenant du formaldéhyde .....	20
	Pendant l'exposition ( $0 < t \leq T$ ) .....	20
	Après la fin de l'exposition (pour $t \geq T$ ) .....	22
	Quantité totale de formaldéhyde lié aux poussières absorbé pendant et après l'exposition .....	22
	4.2.2 <i>DÉTERMINATION DES VALEURS PARAMÉTRIQUES</i> .....	23
	4.2.2.1 Valeurs des paramètres communs aux deux formes d'exposition .....	23
	$V_c$ et $N_{insp}$ .....	23
	4.2.2.2 Détermination des valeurs paramétriques pour l'absorption du formaldéhyde sous forme libre .....	24
	$Q_{inh}$ .....	24
	$C_{F\_air}$ .....	24
	$f_{abs}$ .....	25
	4.2.2.3 Détermination des valeurs paramétriques pour l'absorption du formaldéhyde lié aux poussières ...	26
	$P_{inh}$ .....	26
	$C_{pouss\_air}$ .....	27
	$k_{p\_elim}$ .....	27
	$C_{F\_pouss}$ .....	27
	$k_{F\_rel}$ .....	27
<b>5</b>	<b>RÉSULTATS</b> .....	<b>29</b>

<b>5.1 ABSORPTION DU FORMALDÉHYDE SOUS FORME LIBRE VIA LE SYSTÈME RESPIRATOIRE.....</b>	<b>29</b>
<b>5.2 ABSORPTION DU FORMALDÉHYDE LIÉ AUX POUSSIÈRES VIA LE SYSTÈME RESPIRATOIRE.....</b>	<b>30</b>
<b>5.3 COMPARAISON DE L'ABSORPTION DU FORMALDÉHYDE ENTRE SA FORME LIBRE ET CELLE LIÉE AUX POUSSIÈRES.....</b>	<b>31</b>
<b>6 DISCUSSION.....</b>	<b>32</b>
<b>7 CONCLUSION.....</b>	<b>33</b>
<b>8 BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>43</b>

## TABLEAUX

TABLEAU 1 : FRACTIONS DE DÉPOSITION CHEZ UN HOMME AVEC UN DÉBIT MOYEN DE 1.2 M <sup>3</sup> /H AVEC UNE DISTRIBUTION LOG-NORMALE POUR LES POUSSIÈRES; $d_{ae} \sim \text{LOG-N}(5 \mu\text{m}, 2.5)$ . (TIRÉ DE L'ICRP(1994)).....	35
TABLEAU 2 : FRACTIONS D'INSPIRABILITÉ (VINCENT ET ARMBRUSTER (1981)).....	35
TABLEAU 3 : FRACTIONS DE DÉPOSITION POUR CHAQUE COMPARTIMENT DU MODÈLE DE L'IRCP (1994) CHEZ UN HOMME AVEC UN DÉBIT MOYEN DE 1.2 M <sup>3</sup> /H ET UNE DISTRIBUTION LOG-NORMALE POUR LES POUSSIÈRES; $d_{ae} \sim \text{LOG-N}(6 \mu\text{m}, 2.4)$ , $d_{ae} \sim \text{LOG-N}(8 \mu\text{m}, 2.4)$ ET $d_{ae} \sim \text{LOG-N}(11 \mu\text{m}, 2.4)$ .....	35
TABLEAU 4 : SYMBOLES POUR LE MODÈLE DE DÉPOSITION ET D'ÉLIMINATION DU SYSTÈME RESPIRATOIRE SELON L'ÉTUDE DE L'ICRP (1994).....	36
TABLEAU 5 : DEMI-VIES D'ÉLIMINATION DES POUSSIÈRES POUR CHAQUE FLÈCHE DE TRANSFERT DE LA FIGURE 2. ....	36
TABLEAU 6 : RÉSULTATS DE L'EXPÉRIENCE DE FRY ET BLACK (1973) SUR LA DEMI-VIE D'ÉLIMINATION DES PARTICULES DÉPOSÉES DANS LE PASSAGE ANTÉRIEUR DU NEZ.....	37
TABLEAU 7 : SYMBOLES POUR LA MODÉLISATION DE LA CINÉTIQUE D'ABSORPTION RESPIRATOIRE DU FORMALDÉHYDE SOUS FORME LIBRE ET SOUS FORME LIÉ AUX POUSSIÈRES.....	38
TABLEAU 8 : RÉSULTATS DES RÉGRESSIONS NON-LINÉAIRES SUR LA QUANTITÉ DE FORMALDÉHYDE RELARGUÉ EN FONCTION DU TEMPS. $\text{PLATEAU} \times (1 - e^{-kt})$ .....	39
TABLEAU 9 RÉSULTATS DES SIMULATIONS NUMÉRIQUES POUR LA DOSE QUOTIDIENNE DE FORMALDÉHYDE LIBRE ABSORBÉ VIA LE SYSTÈME RESPIRATOIRE POUR UNE EXPOSITION DE 8 HEURES. ....	39

TABLEAU 10 : RÉSULTATS DES SIMULATIONS NUMÉRIQUES POUR LA DOSE QUOTIDIENNE DE FORMALDÉHYDE LIÉ AUX POUSSIÈRES ABSORBÉ VIA LE SYSTÈME RESPIRATOIRE POUR UNE EXPOSITION DE 8 HEURES ET UNE DISTRIBUTION LOG-NORMALE; $d_{ae} \sim \text{LOG-N}(6 \mu\text{m}, 2.4)$ ET $d_{ae} \sim \text{LOG-N}(8 \mu\text{m}, 2.4)$ .....	40
TABLEAU 11 : RAPPORT ENTRE LES QUANTITÉS TOTALES DE FORMALDÉHYDE ABSORBÉES SOUS FORME LIÉ ET SOUS FORME LIBRE AVEC $C_{F\_POUSS}=9 \mu\text{g}_F/\text{mg}_P$ ET $C_{F\_air}=0.3 \text{ PPM}$ (VOIR TABLEAUX 9 ET 10).....	40

## FIGURES

FIGURE 1 : REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DU SYSTÈME RESPIRATOIRE AVEC LES COMPARTIMENTS PROPOSÉS PAR L'ICRP (1994).....	41
FIGURE 2 : MODÈLE D'ÉLIMINATION DU SYSTÈME RESPIRATOIRE PROPOSÉ PAR L'ICRP (1994).....	41
FIGURE 3 : REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DE LA CINÉTIQUE D'ABSORPTION DU FORMALDÉHYDE LIBRE.....	42
FIGURE 4 : REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DE LA CINÉTIQUE D'ABSORPTION DU FORMALDÉHYDE LIÉ AUX POUSSIÈRES DE BOIS.....	42

## **1 CONTEXTE**

À la fin de l'année de 2000, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) nous soumettait la problématique du relarguage du formaldéhyde par les particules inhalées. De façon conventionnelle, on mesure les niveaux de formaldéhyde sous forme gazeuse ou de vapeur dans l'air ambiant. Cependant, les travailleurs peuvent également être exposés à des particules aériennes contenant du formaldéhyde. Ces dernières proviennent de produits manufacturés tels le textile, certains papiers, le contre-plaqué, les panneaux agglomérés, les résines synthétiques et les plastiques. Certaines particules aériennes sont inhalées et déposées dans le nez ou le système respiratoire supérieur. Lentement, le formaldéhyde contenu dans ces particules sera relargué, ce qui implique que les travailleurs peuvent être exposés au formaldéhyde même après leurs quarts de travail.

L'IRSST désirait évaluer la pertinence de tenir compte de formaldéhyde lié aux particules de poussières inhalées par les travailleurs en comparant cette forme d'exposition à celle du formaldéhyde sous forme libre (gazeuse ou vapeur). C'est pour répondre à cette demande que la Chaire en analyse des risques toxicologiques de l'Université de Montréal a présenté un projet de recherche, qui fut entériné par la direction de l'IRSST en 7 mois. Vous trouverez ci-dessous le rapport final de cette recherche.

## **2 INTRODUCTION**

L'étude préliminaire sur l'évaluation de l'impact d'un abaissement des valeurs d'exposition admissibles pour le formaldéhyde (IRSST 2000) révèle qu'au Québec, de nombreuses industries font usage du formaldéhyde. Cette étude estime à environ 95 000 le nombre de travailleurs exposés au formaldéhyde dans 2500 établissements. Parmi celles-ci, on peut supposer que plusieurs procédés industriels émettent du formaldéhyde

soit sous forme gazeuse ou sous forme liée à des particules, soit sous les deux formes combinées.

Des recherches épidémiologiques ont étudié l'association entre certains cancers ou symptômes respiratoires et l'exposition au formaldéhyde et/ou aux particules. *Imbus et Tochilin (1988)* ont mesuré les fonctions pulmonaires ( $VEF_1^1$  et  $CVF^2$ ) des travailleurs exposés au formaldéhyde et à la poussière de bois contenant de la résine de phénol-formaldéhyde. Aucun effet néfaste n'a été détecté statistiquement. *Holmström et Wilhelmsson (1988)* ont démontré une association positive entre des symptômes respiratoires (p. ex. inconfort dans le nez et dans les voies respiratoires) et l'exposition au formaldéhyde. Cette association est plus forte lorsque les travailleurs sont exposés seulement au formaldéhyde gazeux ( $p < 0.001$ ) que lorsqu'ils sont exposés au formaldéhyde gazeux combiné aux poussières de bois ( $p < 0.01$ ). *Laforest et al. (2000)* ont réalisé une étude épidémiologique de type "cas-témoins" portant sur les cancers du pharynx et du larynx en relation avec une exposition au formaldéhyde gazeux et en relation avec une exposition aux poussières de bois. Ils ont calculé une association positive entre l'exposition au formaldéhyde gazeux ( $>1$  ppm) et le cancer du pharynx. Cette étude n'a démontré aucune association significative entre l'exposition aux poussières de bois et ces deux types de cancers.

Malgré ces résultats épidémiologiques rassurant eu égard au cancer, plusieurs études démontrent que le formaldéhyde est un agent irritant pour les yeux et les voies respiratoires et soupçonnent que le formaldéhyde puisse être la cause de cancers nasopharyngés chez l'humain (*Leidkauf (2000)*). Il est donc fondamental de surveiller adéquatement l'exposition des travailleurs à cette substance.

### **3 OBJECTIFS**

Le premier objectif de cette étude est d'établir l'importance relative de l'absorption de formaldéhyde lié aux poussières comparée à l'exposition sous sa forme libre (gazeuse ou vapeur) par les travailleurs de l'industrie québécoise.

---

<sup>1</sup> Volume expiratoire forcé en 1 seconde

<sup>2</sup> Capacité résiduelle fonctionnelle

Le second objectif consiste à établir la pertinence de mesurer dans le milieu de travail le formaldéhyde lié aux particules de poussières en plus de mesurer celui sous forme libre.

Une analyse préliminaire de la littérature relative à l'exposition au formaldéhyde lié aux poussières montrait que les plus fortes expositions à cette forme se trouvaient dans l'industrie du bois en général. Conséquemment, dans notre étude, l'accent a été mis sur l'exposition dans l'industrie de fabrication de matériaux de bois utilisant du formaldéhyde et dans celle où on utilise ces matériaux pour la fabrication de produits.

## **4 METHODOLOGIE**

Les travaux suivants ont été réalisés pour répondre à cet objectif.

1. Une analyse critique de la littérature scientifique sur le formaldéhyde lié aux particules.
2. L'analyse des divers mécanismes d'absorption du formaldéhyde en fonction de ses vecteurs de pénétration dans les voies respiratoires (particules et libre) et des capacités d'absorption des diverses parties de l'appareil respiratoire.
3. La modélisation mathématique de la cinétique d'absorption du formaldéhyde par les travailleurs sous ces deux formes.
4. À l'aide des modèles mathématiques proposés, la simulation de scénarios réalistes de l'exposition des travailleurs de l'industrie québécoise à ces deux formes de formaldéhyde, afin d'établir l'importance relative de l'absorption du formaldéhyde lié aux poussières par rapport à celle sous la forme libre (gaz ou vapeur).

### **4.1 L'ANALYSE CRITIQUE DE LA LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE SUR LE FORMALDEHYDE LIÉ AUX PARTICULES.**

Cette analyse critique a été réalisée dans le but :

- d'obtenir une estimation des niveaux d'exposition des travailleurs aux poussières
- de mieux comprendre la dynamique de déposition et d'élimination des particules dans l'arbre respiratoire

- d’extraire les données qui nous serviront à déterminer les paramètres du modèle mathématique que nous proposons pour la cinétique d'absorption du formaldéhyde sous une forme ou l’autre.

#### 4.1.1 EXPOSITION DES TRAVAILLEURS AUX POUSSIÈRES DANS L'INDUSTRIE

La norme établie par la CSST pour les concentrations maximales de poussières de bois dans l'air est de  $5 \text{ mg}_p/\text{m}^3$  <sup>a</sup> au niveau de la zone respiratoire sauf pour le cèdre rouge Western, où la norme est de  $2.5 \text{ mg}_p/\text{m}^3$ . Cette norme est une moyenne sur la base d’une journée de 8 heures et de 5 jours de travail par semaine. Cette méthode de pondération permet ainsi à la concentration de poussières de dépasser  $5 \text{ mg}_p/\text{m}^3$  pendant certaines périodes de la journée. Il existe des cas où cette concentration de poussières a été largement dépassée. Par exemple, en 1964, une étude tchèque a mesuré une concentration moyenne de  $40 \text{ mg}_p/\text{m}^3$  avec un maximum de  $200 \text{ mg}_p/\text{m}^3$  dans une usine de bois de construction (*Hanslian et Kadlec (1964)*). Un autre cas a été rapporté dans une étude anglaise en 1974 où des concentrations moyennes de  $25.5 \text{ mg}_p/\text{m}^3$  ont été enregistrées dans une usine de meuble (*Hounam et Williams (1974)*). Aujourd’hui, il est peu probable qu’on voit de tels niveaux de poussières, grâce à la présence de ventilation installée sur les machines outils (dépoussiéreurs). Des études plus récentes le confirment :

1. Dans l'étude de *Imbus et Tochilin (1988)*, les ouvriers travaillant le bois avec des appareillages étaient exposés à des concentrations maximales de poussières de  $0.57 \text{ mg}_p/\text{m}^3$ .
2. Dans l'étude de *Holmström et Wilhelmsson (1988)*, les concentrations de poussières ont été mesurées dans une usine de fabrication de produits à base de formaldéhyde (résine et papier pour laminage). Les travailleurs étaient exposés à des concentrations de poussières variant de 1 à  $2 \text{ mg}_p/\text{m}^3$ .
3. Dans l'étude de *Holmström et al. (1991)*, les concentrations de poussières dans l’air ont été mesurées à proximité d’un groupe travaillant aux processus de sablage, d’assemblage et de sciage. Ce groupe était exposé à des poussières en

provenance de panneaux MDF. La concentration de poussières moyenne en une heure est de 3.8 mg<sub>p</sub>/m<sup>3</sup> pour le sablage et l'assemblage et de 0.8 mg<sub>p</sub>/m<sup>3</sup> pour le sciage.

À la lumière des données citées ci-haut, une concentration de **5 mg<sub>p</sub>/m<sup>3</sup>** constitue, à nos yeux, un maximum dans les usines d'aujourd'hui où l'on travaille le bois. Dans les calculs présentés dans la section des résultats, on posera donc la concentration de poussières maximale égale à **5 mg<sub>p</sub>/m<sup>3</sup>**.

#### **4.1.2 CONCENTRATIONS DE FORMALDEHYDE LIÉ AUX POUSSIÈRES**

Les concentrations de formaldéhyde dans les poussières de papiers, de contre-plaqué et de résines peuvent être mesurées par différentes méthodes. Dans trois études, une méthode à base d'acétylacétone (ACE) fut comparée à une méthode à base de 2,4-dinitophénylhydrazine (DNPH) (*Elia et Messner (1996) ; Priha (1996)*) et à une autre à base d'acide chromotrope (CTA) (*Elia et Messner (1992,1996) ; Priha (1996)*). Ces auteurs ont observé que les concentrations déterminées en utilisant les méthodes à base de CTA et DNPH sont environ dix fois plus grandes que celles à base de ACE. *Elia et Messner (1996)* précisent que cette dernière méthode est à privilégier car la réaction de l'acétylacétone avec le formaldéhyde produit un composé spécifique au formaldéhyde, tandis que les mesures prises par les autres méthodes sont biaisées par les conditions acides du milieu. De plus, la procédure de trempage de la méthode ACE tente de reproduire les conditions d'absorption du formaldéhyde dans le système respiratoire. Cette méthode utilise un pH semblable à celui des muqueuses nasales (pH≈6) et une température d'eau déionisée environ égale à la température corporelle (37°C). Il nous apparaît donc assez réaliste de supposer que le formaldéhyde lié aux poussières présentes dans le système respiratoire soit relargué au même taux que celui observé lors du trempage des poussières dans la solution ACE. Les données de la méthode ACE seront donc retenues dans la présente étude. La concentration de formaldéhyde dans la poussière

---

<sup>a</sup> mg<sub>p</sub> signifie milligramme de poussières

( $C_{F\_pouss}$ ) est habituellement donnée en  $\mu\text{g}_F/\text{mg}_P$ <sup>b</sup>. Il est intéressant de noter que la concentration minimale que la méthode ACE puisse détecter est de  $0.025 \mu\text{g}_F/\text{mg}_P$ .

À notre connaissance, aucune étude québécoise relative à ce type d'analyse n'a été publiée. Les valeurs des concentrations de formaldéhyde dans la poussière de produits de bois seront donc basées sur des produits étrangers (États-Unis et Finlande). Les valeurs de  $C_{F\_pouss}$  utilisées dans la section des résultats sont celles mesurées par la méthode ACE dans les études de *Elia et Messner (1992, 1996)* et de *Priha (1996)*. Ces trois études ont été réalisées dans des usines où l'on travaille avec des panneaux faits de bois et de résine. Les prélèvements de poussières ont été faits à proximité des machines dans l'aire de travail des opérateurs. Dans chaque cas, la concentration de formaldéhyde dans le bois brut a d'abord été mesurée afin de vérifier que la source première de formaldéhyde dans les poussières était bien la résine utilisée pour la fabrication de ces produits. Les faibles concentrations obtenues dans la poussière du bois brut le confirment.

Dans *Elia et Messner (1992, 1996)*, deux sortes de résine étaient utilisées dans les différents produits de bois: une résine à base de urea-formaldéhyde (UF) et l'autre à base de phénol-formaldéhyde (PhF). Ces panneaux sont classés en deux catégories : « post-press » et « pre-press ». Avec la même résine, les concentrations obtenues dans la poussière du « pre-press » sont supérieures à celles du « post-press ». La majorité des concentrations du « pre-press » se situent entre 2 et  $3 \mu\text{g}_F/\text{mg}_P$ . Il existe néanmoins une valeur maximale observée de  $7 \mu\text{g}_F/\text{mg}_P$  pour les panneaux de particules fabriqués à partir de pin Southern. Quant aux concentrations des panneaux « post-press », elles varient de 0.6 à  $2 \mu\text{g}_F/\text{mg}_P$ . Il faut remarquer que pour la même catégorie de panneau, les concentrations de formaldéhyde dans les poussières varient légèrement selon le type de résine (UF versus PhF). Les concentrations supérieures sont toutefois mesurées dans des produits fabriqués à partir de la résine UF. Par exemple, le « post-press » fabriqué à partir de bois mou Western donne une concentration de  $1.5 \mu\text{g}_F/\text{mg}_P$  avec UF et de  $0.9 \mu\text{g}_F/\text{mg}_P$  avec PhF et pour le « pre-press » du même bois, la concentration est de  $3 \mu\text{g}_F/\text{mg}_P$  avec UF et de  $2 \mu\text{g}_F/\text{mg}_P$  avec PhF.

Deux panneaux de MDF fabriqués avec de la résine à base de UF ont été analysés dans *Priha (1996)*. Les concentrations mesurées sont 1.128 et  $1.382 \mu\text{g}_F/\text{mg}_P$ .

---

<sup>b</sup>  $\mu\text{g}_F$  signifie microgramme de formaldéhyde

Les mesures de *Elia et Messner (1992)* révèlent qu'en général, les poussières provenant du papier contiennent beaucoup moins de formaldéhyde que celles provenant des produits du bois. Les concentrations obtenues sont, respectivement, 0.24, 0.35 et 0.35  $\mu\text{g}_F/\text{mg}_P$  pour le carton non blanchi, le papier blanchi et le papier non blanchi.

On note que les concentrations maximales observées dans les trois études se situent à 3  $\mu\text{g}_F/\text{mg}_P$ , à l'exception de la concentration des panneaux de particules fabriqués avec du pin Southern (7  $\mu\text{g}_F/\text{mg}_P$ ).

#### **4.1.3 L'ABSORPTION ET L'ELIMINATION DES POUSSIÈRES PAR L'HOMME**

Le but de cette section est de déterminer la valeur de la constante d'élimination des poussières dans le système respiratoire ( $k_{P\_elim}$ ). Cette constante dépend de l'endroit où les poussières se déposent dans l'arbre respiratoire et cet endroit dépend de la dimension des poussières. Cette section débutera par une analyse de la dimension des poussières retrouvées en milieu de travail et de la distribution de ces poussières selon leurs dimensions. Une analyse suivra sur la disposition et l'élimination dans le système respiratoire humain des poussières en fonction de leur dimension.

##### **4.1.3.1 Dimension des poussières**

Les mesures accessibles dans la littérature pour la dimension d'une particule aérienne sont basées sur le diamètre aérodynamique qui dépend de la densité et de la forme de la particule. Par définition, ce diamètre aérodynamique ( $d_{ae}$ ) est le diamètre d'une particule sphérique de densité égale à 1  $\text{g}/\text{cm}^3$  ayant la même vitesse de dépôt que la particule mesurée.

Lorsque les particules sont générées par une seule source, leurs diamètres aérodynamiques  $d_{ae}$  suivent une distribution log-normale. Les paramètres de cette distribution sont la médiane du diamètre aérodynamique (MDA) et l'écart type géométrique de la distribution ( $\sigma_g$ ). Cet écart-type géométrique est défini comme le rapport entre la mesure du diamètre aérodynamique dont 84.1% de la distribution est plus petite ( $d_{ae}^{84.1}$ ) et la médiane du diamètre aérodynamique (MDA); c'est-à-dire  $\sigma_g = d_{ae}^{84.1}/\text{MDA}$ . Cette distribution log-normale implique que la variable  $Y = \ln(d_{ae})$  est

normalement distribuée de moyenne  $\mu$  et de variance  $\sigma^2$ ;  $Y \sim N(\mu, \sigma^2)$  avec  $\mu = \ln(\text{MDA})$  et  $\sigma = \ln(\sigma_g)$ .

Dans le document de *U.S.A. EPA (1996)*, la distribution des poussières générées par le concassage, le broyage et le sablage ont une médiane de diamètre aérodynamique variant de  $6 \mu\text{m}$  à  $20 \mu\text{m}$ . Il est aussi noté que l'écart type géométrique de ces distributions est environ 2.4. Ce document ne précise pas le matériel d'origine des poussières; il pourrait par exemple s'agir de produits de bois ou de plastique.

Plusieurs études confirment ces résultats. *Hounam et Williams (1974)* obtiennent des médianes variant de  $7.6 \mu\text{m}$  à  $11.5 \mu\text{m}$  pour des poussières de bois produites lors de sciage, sablage et assemblage avec des écarts types géométriques environ égaux à 2.4. Dans l'étude *Stumpf et al. (1986)*, la MDA obtenue à partir d'une distribution de poussières de bois est  $8.26 \mu\text{m}$  et l'écart type géométrique ( $\sigma_g$ ) est 2.01.

#### **4.1.3.2 Modes de déposition des particules**

Les processus de déposition d'une particule dépendent de sa taille, de sa masse volumique et de sa forme. Ces propriétés sont représentées par le diamètre aérodynamique ( $d_{ae}$ ). Les modes de déposition peuvent ainsi être classés selon les diamètres des particules inhalées.

##### **Impaction**

Certaines particules inhalées ne réussissent pas à suivre la trajectoire de l'air, elles entrent en contact avec les parois humides et y adhèrent. Il y a alors une déposition par impaction. Ce mécanisme est efficace pour les plus grosses particules ( $\geq 3 \mu\text{m}$ ). Par exemple, selon *Jonh West (1989)*, 95% des particules avec un diamètre de  $5 \mu\text{m}$  seraient filtrées dans le nez par impaction.

##### **Sédimentation**

Le mécanisme de sédimentation devient possible lorsque la force gravitationnelle et la résistance de l'air sur la particule s'annulent. Il peut y avoir alors une déposition lente sur les parois de la trachée, des bronches et des bronchioles. La plupart des particules de diamètre aérodynamique entre 1 et 5  $\mu\text{m}$  seront déposées par sédimentation.

### **Diffusion**

Le mouvement « brownien » est responsable de la déposition par diffusion. Ce mouvement aléatoire décrit le bombardement des molécules de gaz. Lorsque les particules sont influencées par ce mouvement, elles frappent au hasard les parois et peuvent alors y adhérer. Ce mécanisme de déposition est fréquent chez les particules de diamètre aérodynamique plus petit que 1  $\mu\text{m}$ . Plus la particule est petite, plus elle sera soumise à la diffusion.

#### **4.1.3.3 Modèle fonctionnel du système respiratoire développé par ICRP**

En 1994, une étude complète sur la déposition de particules radioactives chez l'humain fut menée par l'International Commission on Radiological Protection (ICRP) (*Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection*). Il est mentionné dans ce rapport que les calculs s'appliquent aussi pour des particules non-radioactives. Ce qui suit sera basé sur les résultats de ce rapport.

Pour modéliser la déposition des particules, l'étude de l'ICRP divise le système respiratoire en quatre compartiments : un compartiment pour la région extra-thoracique, un pour la région des bronches, un autre pour les bronchioles et un dernier compartiment pour les alvéoles. Voici une brève description de la physiologie et des modes de déposition pour chaque région présentée par la figure 1.

#### **La région extra-thoracique (ET)**

Cette région, qui inclut la zone des narines jusqu'au larynx, se nomme aussi le système respiratoire supérieur. La principale tâche de cette région est de nettoyer et de réchauffer l'air inspiré avant qu'il n'atteigne la trachée et les poumons. Le nettoyage des

particules inhalées se fait principalement par impaction car les nombreuses courbures et bifurcations de la région extra-thoracique favorisent ce mode de déposition. Cependant, les cordes vocales du larynx diminuent le calibre du conduit d'air et favorisent ainsi le dépôt par sédimentation des particules avant leur entrée dans la trachée. Étant donné la proximité de l'épiglotte, ce dépôt de particules est rapidement avalé.

Pour mieux modéliser l'élimination de cette région, trois sous-compartiments ont été développés:  $ET_1$ ,  $ET_2$ ,  $ET_{seq}$ . La zone  $ET_1$  comprend les narines et les passages antérieurs du nez, la zone  $ET_2$  les passages postérieurs du nez, la bouche, le pharynx et le larynx et la zone  $ET_{seq}$  représente les tissus lymphatiques de la région extra-thoracique.

Le mouchage et l'éternuement sont les principaux mécanismes d'élimination des particules déposées dans le nez ( $ET_1$ ). Par contre, certaines de ces particules se déplacent plus profondément dans la région extra-thoracique par le reniflement et le flot du mucus. La majorité des particules déposées dans la région  $ET_2$  s'élimine rapidement par les mucus qui sont ingérés dans l'œsophage au niveau du pharynx. Une partie négligeable (0.05%) des particules de cette région sera séquestrée dans les tissus lymphatiques pour être ensuite absorbée par la lymphe ( $ET_{seq}$ ).

### **La région de la trachée et des bronches (BB)**

Cette région de conduction de l'air se compose de la trachée et des huit premières générations des voies aériennes selon *Weibel (1963)*. Ces huit générations définissent l'ensemble des bronches. Selon la dimension des particules, le mode de déposition dans la trachée et dans les bronches se fait par impaction, sédimentation et/ou par diffusion. Cependant, vu la diminution du calibre de ces conduits d'air, la sédimentation est le mode de déposition le plus fréquent.

La trachée et les bronches sont recouvertes d'un tapis muco-ciliaire qui, par le battement des cils, produit un mouvement vers le haut. Arrivées au pharynx, les substances muqueuses sont ingérées dans l'œsophage. Cette surface muqueuse du tapis emprisonne les particules déposées et permet ainsi l'épuration de la trachée et des bronches. La majorité des particules sera éliminée dans l'œsophage. Une petite partie des particules déposées dans cette région sera séquestrée dans les tissus lymphatiques pour être par la suite absorbée par la lymphe ( $BB_{seq}$ ).

Dans le modèle de l'ICRP, la région de la trachée et des bronches est divisée en deux régions  $BB_1$  et  $BB_2$  pour modéliser les deux vitesses d'élimination possibles du système mucociliaire. Cette vitesse dépend de la dimension des particules; plus leur diamètre aérodynamique est élevé, plus les particules seront éliminées rapidement.

### **La région des bronchioles et bronchioles terminales (bb)**

Cette région se compose des bronchioles représentées par les générations 9 à 15 selon le modèle de *Weibel (1963)*. Les bronchioles terminales, présentées par la génération 15, sont les plus petites voies aériennes dépourvues d'alvéoles. Selon la dimension des particules, la déposition dans cette dernière région de conduction (bb) se fait par sédimentation ou par diffusion. Cependant, la diminution rapide de vitesse au niveau des bronchioles terminales favorise la déposition par sédimentation des particules dans la génération précédente (i.e. génération 14).

L'élimination des particules déposées dans les bronchioles est principalement provoquée par le système mucociliaire qui les dirige vers les bronches. Comme la région de la trachée et des bronches, deux vitesses fonction de la dimension des particules sont impliquées dans le processus d'élimination des bronchioles. Deux sous-compartiments sont alors requis pour chacune des vitesses ( $bb_1$  et  $bb_2$ ). Une autre partie des particules déposées dans cette région sera séquestrée dans les tissus lymphatiques pour être par la suite absorbée dans la lymphe ( $bb_{seq}$ ).

### **Région des bronchioles respiratoires, les canaux alvéolaires et les sacs alvéolaires (AI)**

Cette région se compose des générations restantes du modèle de *Weibel*: les générations 16 à 23. C'est dans cette région que les échanges gazeux se produisent. Les mouvements aléatoires du gaz dans les alvéoles favorisent la déposition par diffusion mais il peut aussi exister des dépôts par sédimentation.

Les particules déposées dans les bronchioles respiratoires seront déplacées vers les bronchioles terminales par le tapis mucociliaire ou par les macrophages tandis que celles déposées dans les alvéoles seront majoritairement éliminées par les macrophages.

Ces macrophages phagocytent les particules et se dirigent vers le tapis mucociliaire des bronchioles ou vers la lymphe. L'élimination dans les alvéoles peut être très longue, des expériences prouvent que certaines particules insolubles peuvent être retenues plus d'une décennie. La différence de la vitesse d'élimination sera considérée en fractionnant cette dernière région en trois différentes zones AI<sub>1</sub>, AI<sub>2</sub>, AI<sub>3</sub> pour l'élimination rapide, moyenne ou lente respectivement.

#### **4.1.3.4 Déposition des particules dans le système respiratoire**

Dans cette étude effectuée par l'ICRP (1994), les auteurs ont développé un modèle complet pour déterminer la fraction de particules déposées dans les différentes régions du système respiratoire. Il permet d'estimer les fractions de déposition pour différents niveaux et scénarios d'exposition. Ce modèle est basé sur les caractéristiques anatomiques et physiologiques de l'humain et sur les caractéristiques des particules (tiré du chapitre 5 du rapport ICRP (1994)). Les fractions de dépositions dans chaque zone respiratoire sont données au tableau 1.

Ce tableau montre que seulement 82% des particules seront déposées dans le système respiratoire. Ceci s'explique par le concept d'inspirabilité des particules. L'inspirabilité est la fraction des particules ambiantes dans l'air capable d'entrer dans la bouche ou dans le nez lors de l'inspiration. Le tableau 2 représente l'inspirabilité mesurée pour certains diamètres aérodynamiques (*Vincent et Armbruster (1981)*).

À partir des équations du modèle de l'ICRP, il est possible de faire différentes simulations de déposition selon la distribution des particules. Trois simulations avec le même travailleur type qu'au tableau 1 ont été réalisées. Les diamètres aérodynamiques des particules sont distribués en log-normale avec un écart-type de 2.4 et avec des médianes variant de 6 à 11  $\mu\text{m}$ . Les résultats sont présentés au tableau 3. Il existe peu de différence entre les fractions de déposition de la distribution avec une MDA de 5  $\mu\text{m}$  et celles présentées au tableau 3. Dans ces deux distributions, on remarque que la majorité de la déposition se fait dans la zone extra-thoracique; 90% des particules déposées pour une MDA de 5  $\mu\text{m}$  et 93.7% pour une MDA de 8  $\mu\text{m}$ . Ces valeurs sont semblables à celles proposées par John West soit que 95% des particules avec un diamètre de 5  $\mu\text{m}$  seraient filtrées dans le nez.

#### 4.1.3.5 Taux d'élimination des particules hors du système respiratoire

À la suite du modèle de déposition et des modes de déposition, les auteurs de l'étude effectuée pour l'ICRP ont développé un modèle pour déterminer le temps d'élimination d'une particule en fonction de son lieu de déposition et de sa dimension (tiré du chapitre 7 du rapport de l'ICRP). La figure 2 représente ce modèle d'élimination et le tableau 4 donne la signification des symboles. Chaque flèche indique un transfert de particules d'une région à une autre. L'étude associe à chacune de ces flèches une constante de transfert qui définit la demi-vie d'élimination d'une particule dans le compartiment de départ. Le tableau 5 indique les demi-vies correspondantes pour chaque flèche.

Sachant que l'élimination dans la zone du nez ( $ET_1$ ) se fait principalement par éternuement ou par mouchage, il n'est pas étonnant de voir une grande variabilité inter et intra-individuel pour l'élimination des particules dans cette zone. Le rapport de l'ICRP note une incertitude considérable sur la demi-vie de 17 heures qu'il met de l'avant. Par exemple, l'expérience de Fry et Black (1973) a découvert qu'il peut exister dans cette région deux phases distinctes d'élimination, une phase rapide et une phase lente. Le tableau 6 représente les résultats de leur expérience sur des sujets qui ont inhalé des poussières de diamètres aérodynamiques variant de 2.5 à 10  $\mu\text{m}$ . On remarque dans ce tableau qu'il y a toujours une phase lente d'élimination.

Plus la demi-vie d'élimination des poussières est grande, plus leur temps de résidence est long et plus le formaldéhyde peut être transféré vers l'organisme. (Une demi-vie de 17 heures est probablement une surestimation du temps de résidence.) Pour notre simulation sur l'absorption du formaldéhyde lié aux poussières, différentes valeurs pour la demi-vie de  $ET_1$  seront utilisées compte tenu de la variabilité de ce paramètre.

La demi-vie d'élimination du sous-compartiment  $ET_2$  de la région extra-thoracique se base sur la vitesse d'évacuation du mucus sécrété par les muqueuses des voies respiratoires. Cette vitesse est déterminée par des données expérimentales. Il existe une plus grande certitude sur cette demi-vie, elle est estimée à 10 minutes. Pour

nos simulations sur l'absorption du formaldéhyde lié aux poussières, seule cette dernière valeur pour la demi-vie de  $ET_2$  sera utilisée.

On peut supposer que les poussières déposées plus profondément que la région extra-thoracique auront le temps de relarguer tout le formaldéhyde qu'elles contiennent (BB, bb, AI).

## **4.2 MODELE PROPOSE POUR LA CINETIQUE D'ABSORPTION DU FORMALDEHYDE VIA LE SYSTEME RESPIRATOIRE**

Le but de cette analyse mathématique est d'estimer la quantité de formaldéhyde absorbée dans l'organisme sous deux formes différentes. La première forme est le formaldéhyde inhalé sous forme libre et la seconde est celle liée aux poussières déposées dans le système respiratoire.

Nous avons développé deux modèles pour décrire la cinétique de ces deux formes d'absorption. Ces modèles sont représentés par les figures 3 et 4. Chaque flèche de ces représentations schématiques symbolise une quantité de formaldéhyde transférée par unité de temps. Il est supposé que cette quantité est proportionnelle à la quantité de formaldéhyde présente à chaque instant dans le compartiment-source. Le compartiment de l'organisme est ici considéré comme un compartiment d'accumulation; la distribution, le métabolisme et l'élimination du formaldéhyde ne sont pas à l'étude. Les variables et les paramètres utilisés dans cette figure sont définis au tableau 7.

L'absorption du formaldéhyde est décrite à l'aide d'un système d'équations différentielles pour chacune des formes. La résolution mathématique de ces deux systèmes détermine les équations régissant la quantité de formaldéhyde absorbée via le système respiratoire sous la forme libre et sous la forme liée. Ainsi, avec ces équations et des valeurs paramétriques déterminées à partir de données expérimentales, les quantités de formaldéhyde absorbées en milieu de travail sous forme libre (gaz et vapeur) ou liée aux poussières pourront être estimées (voir la section « Résultat »).

### **4.2.1 DEVELOPPEMENT DU MODELE CINETIQUE**

#### 4.2.1.1 Modélisation de la cinétique du formaldéhyde absorbé via le système respiratoire sous forme libre

##### Pendant l'exposition d'une durée T

La figure 3 représente la cinétique de l'absorption du formaldéhyde dans le système respiratoire lors de l'inhalation de cette substance sous forme libre.

Le modèle gouvernant la cinétique d'absorption du formaldéhyde libre absorbé via le système respiratoire est exprimé par les équations différentielles 1 et 2.

$$\frac{d}{dt} F_1(t) = f_{\text{abs}} \cdot Q_{\text{inh}} \cdot 10^3 - k_{\text{ro}} \cdot F_1(t) \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} F_{\text{ABS}_{\text{libre}}}(t) = k_{\text{ro}} \cdot F_1(t) \quad (2)$$

Le facteur  $10^3$  transforme les milligrammes (mg/heure) du paramètre  $Q_{\text{inh}}$  en microgrammes ( $\mu\text{g}/\text{heure}$ ). Ce facteur de conversion permet d'obtenir la quantité totale de formaldéhyde libre absorbée en microgramme ( $\mu\text{g}$ ).

Des expériences scientifiques montrent qu'à faibles concentrations, 98% du formaldéhyde gazeux inhalé est absorbé dans la région supérieure du système respiratoire lors de l'inhalation (*Leikauf (2000)*). En fait, l'absorption se fait tellement rapidement que cette molécule hydrosoluble ne peut se rendre plus loin dans le système respiratoire. Étant donné que l'absorption du formaldéhyde dans l'organisme se fait rapidement, un équilibre dynamique s'établit dans le système respiratoire et on peut alors poser

$$F_1(t) = \frac{f_{\text{abs}} \cdot Q_{\text{inh}} \cdot 10^3}{k_{\text{ro}}} \quad (\text{Segel et Slemrod, 1989}).$$

Ce résultat nous permet de ramener la cinétique à une seule équation différentielle pour  $F_{\text{ABS}_{\text{libre}}}(t)$  :

$$\frac{d}{dt} F_{\text{ABS}_{\text{libre}}}(t) = f_{\text{abs}} \cdot Q_{\text{inh}} \cdot 10^3 \quad (3)$$

La solution de cette dernière équation différentielle avec la condition initiale  $F_{\text{ABS}_{\text{libre}}}(0)=0$  est donné par l'équation 4. Cette équation sera utilisée pour estimer la quantité cumulative de formaldéhyde libre ( $\mu\text{g}$ ) absorbée dans l'organisme via le système respiratoire après un temps  $t$  (exprimé en heures) pour  $t < T$ , où  $T$  est la durée maximum d'exposition. On obtient :

$$F_{\text{ABS}_{\text{libre}}}(t) = f_{\text{abs}} \cdot Q_{\text{inh}} \cdot 10^3 \cdot t \quad (4)$$

#### Après l'exposition ( $t > T$ )

Sachant que l'absorption sous cette forme libre se fait presque instantanément, aucune quantité supplémentaire de formaldéhyde ne sera absorbée après l'exposition. Ainsi pour tout  $t > T$ , la quantité restera égale à la quantité cumulative absorbée à l'arrêt d'une exposition ayant durée un temps  $T$ , soit :

$$F_{\text{ABS}_{\text{libre}}}(t) = f_{\text{abs}} \cdot Q_{\text{inh}} \cdot 10^3 \cdot T \quad (5)$$

#### **4.2.1.2 Modélisation de la cinétique du formaldéhyde absorbé via le système respiratoire suite à l'inhalation de poussières contenant du formaldéhyde**

La figure 4 représente la cinétique de l'absorption respiratoire du formaldéhyde lorsqu'il est relargué par les poussières déposées dans le système respiratoire. Dès que le formaldéhyde est relargué dans le système respiratoire sous sa forme libre, on suppose que l'absorption se fait presque instantanément.

#### Pendant l'exposition ( $0 < t \leq T$ )

La quantité de formaldéhyde lié aux poussières qui entre dans le système respiratoire par unité de temps est le produit de la quantité de poussières entrant par unité de temps  $P_{\text{inh}}$  et de la concentration de formaldéhyde dans cette poussière  $C_{\text{F}_{\text{pouss}}}$ . Le formaldéhyde sous forme lié présent dans le système respiratoire  $F_{\text{P}}(t)$  est réduit par deux voies : par l'élimination des poussières au taux  $k_{\text{P}_{\text{elim}}}$  et par son relarguage au taux  $k_{\text{F}_{\text{rel}}}$ . Le formaldéhyde libre  $F_{\text{r}}(t)$  généré par cette dernière voie est rapidement absorbé

par l'organisme avec un taux d'absorption égale à  $k_{ro} \cdot FPR(t)$ . La cinétique d'absorption du formaldéhyde lié aux poussières s'exprime par les équations différentielles 6,7 et 8.

$$\frac{d}{dt} FPR(t) = P_{inh} \cdot C_{F\_pouss} - k_{P\_elim} \cdot FPR(t) - k_{F\_rel} \cdot FPR(t) \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt} F_r(t) = k_{F\_rel} \cdot FPR(t) - k_{ro} \cdot F_r(t) \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt} F\_ABS_{lié}(t) = k_{ro} \cdot F_r(t) \quad (8)$$

Tout comme le formaldéhyde libre, on peut supposer que le formaldéhyde relargué des poussières est rapidement absorbé dans l'organisme ( $k_{ro} \gg k_{F\_rel}$ ). Avec cette absorption dans le système respiratoire qui se fait presque instantanément, il est justifié de supposer un équilibre dynamique pour  $F_r(t)$  et de poser  $F_r(t) = \frac{k_{F\_rel} \cdot FPR(t)}{k_{ro}}$  (Segel et Slemrod, 1989). Cette simplification nous donne une nouvelle équation différentielle pour  $F\_ABS_{lié}(t)$ .

$$\frac{d}{dt} F\_ABS_{lié}(t) = k_{F\_rel} \cdot FPR(t) \quad (9)$$

Les données de la littérature montrent qu'au début d'un quart de travail, il ne subsiste plus dans l'organisme de formaldéhyde absorbé la veille, on peut donc poser:  $FPR(0)=0$  et  $F\_ABS_{lié}(0)=0$ . Il est alors possible de trouver la solution exacte du système d'équations différentielles. Cette résolution permet d'obtenir les équations explicites pour les deux variables d'état  $FPR(t)$  et  $F\_ABS_{lié}(t)$  décrite par les équations 10 et 11, respectivement.

Pour  $t \leq T$  :

$$FPR(t) = \frac{P_{inh} \cdot C_{F\_pouss}}{k_{P\_elim} + k_{F\_rel}} \cdot \left[ 1 - e^{-(k_{P\_elim} + k_{F\_rel}) \cdot t} \right] \quad (10)$$

$$F\_ABS_{lié}(t) = \frac{k_{F\_rel}}{k_{P\_elim} + k_{F\_rel}} \cdot P_{inh} \cdot C_{F\_pouss} \cdot \left[ t + \frac{e^{-(k_{P\_elim} + k_{F\_rel}) \cdot t} - 1}{k_{P\_elim} + k_{F\_rel}} \right] \quad (11)$$

Après la fin de l'exposition (pour  $t \geq T$ )

Après l'exposition, les poussières encore dans le système respiratoire continueront de relarguer du formaldéhyde qui sera ensuite rapidement absorbé. Pour  $t > T$ , la figure 4 et les équations différentielles 6 et 9 sont encore valides, mais cette fois en posant  $P_{inh}=0$ . Les conditions initiales pour cette période  $t > T$  sont données par les équations 10 et 11 à la fin de l'exposition au temps  $t = T$ .

La quantité de formaldéhyde lié aux poussières encore présentes dans le système respiratoire après l'exposition s'exprime par l'équation 12.

$$FPR(t) = FPR(T) \cdot e^{-(k_{P\_elim} + k_{F\_rel}) \cdot (t-T)} \quad (12)$$

où la valeur  $FPR(T)$ , à la fin de l'exposition, est calculée à l'aide de l'équation 10.

En substituant l'équation 12 dans l'équation différentielle 9 et en intégrant de  $T$  à  $t$  (pour  $t \geq T$ ), on obtient la quantité de formaldéhyde absorbée par relargage post-exposition dans le système respiratoire. Cette quantité est égale à:

$$F\_ABS_{lié}(t) - F\_ABS_{lié}(T) = \frac{k_{F\_rel}}{k_{F\_rel} + k_{P\_elim}} \cdot FPR(T) \cdot \left[ 1 - e^{-(k_{F\_rel} + k_{P\_elim}) \cdot (t-T)} \right] \quad (13)$$

Quantité totale de formaldéhyde lié aux poussières absorbée pendant et après l'exposition

En substituant les formes explicites de  $FPR(T)$  et  $F\_ABS_{lié}(T)$  dans l'équation 13, on peut déterminer la quantité totale de formaldéhyde lié aux poussières qui sera absorbé pendant et après l'exposition. On obtient :

$$F\_ABS_{lié}(t) = \frac{k_{F\_rel}}{k_{F\_rel} + k_{P\_elim}} \cdot P_{inh} \cdot C_{F\_pouss} \cdot \left[ T - \frac{\left( e^{-(k_{F\_rel} + k_{P\_elim}) \cdot (t-T)} - e^{-(k_{F\_rel} + k_{P\_elim}) \cdot t} \right)}{(k_{F\_rel} + k_{P\_elim})} \right] \quad (14)$$

Après une longue période de temps, ( $t \rightarrow \infty$ ), la dose totale de formaldéhyde absorbée pour une exposition d'une durée T est exprimée par l'équation 15.

$$F\_ABS_{lié}(t \rightarrow \infty) = \frac{k_{F\_rel}}{k_{F\_rel} + k_{P\_elim}} \cdot (P_{inh} \cdot C_{F\_pouss} \cdot T) \quad (15)$$

La quantité entre les parenthèses exprime la quantité totale de formaldéhyde lié aux poussières qui a pénétré dans le système respiratoire du travailleur durant son quart de travail, tandis que l'expression  $\frac{k_{F\_rel}}{k_{F\_rel} + k_{P\_elim}}$  représente la fraction de ce formaldéhyde qui est absorbé. Cette fraction décrit la compétition de vitesse entre relargage du formaldéhyde au taux  $k_{F\_rel}$  et le taux d'expulsion physique des particules de poussières  $k_{P\_elim}$ .

## 4.2.2 DETERMINATION DES VALEURS PARAMETRIQUES

### 4.2.2.1 Valeurs des paramètres communs aux deux formes d'exposition

#### Volume courant ( $V_c$ ) et Nombre d'inspiration par unité de temps ( $N_{insp}$ )

Ces paramètres respiratoires comportent des variations inter-individuelles et intra-individuelles. D'un individu à l'autre, il peut exister une grande différence entre leur volume courant et leur nombre d'inspirations par minute pour un même niveau d'activité

et il peut aussi exister une grande différence chez un même individu d'un moment à un autre.

Une analyse des équations d'absorption montre que la quantité de formaldéhyde absorbé sous les deux formes est directement proportionnelle aux paramètres respiratoires  $V_c$  et  $N_{insp}$ . C'est-à-dire que si on double la valeur d'un de ces paramètres, on double aussi la quantité de formaldéhyde absorbée et ce, peu importe la forme du formaldéhyde (libre ou lié). Le rapport entre les deux modes d'absorption n'est donc pas modifié par les valeurs retenues pour ces deux paramètres.

Pour la présente étude, ces paramètres seront posés égaux aux valeurs proposées dans l'étude de l'IRCP (1994). L'individu de référence est un homme inspirant en moyenne **17.5 fois par minute** un volume courant de **1095 cm<sup>3</sup>**. Ces valeurs sont basées sur un homme travaillant pendant 31% du temps en position assise et 69% du temps en effectuant un exercice léger.

#### **4.2.2.2 Détermination des valeurs paramétriques pour l'absorption du formaldéhyde sous forme libre**

##### **Quantité de formaldéhyde libre inhalé par unité de temps ( $Q_{inh}$ )**

Pour déterminer la quantité de formaldéhyde inhalée par unité de temps, les valeurs du volume courant ( $V_c$ ), de la fréquence respiratoire ( $N_{insp}$ ) et de la concentration de formaldéhyde libre dans l'air ( $C_{F\_air}$ ) sont requises. La quantité de formaldéhyde inhalée par unité de temps se calcule par l'équation 16.

$$Q_{inh} = V_c \cdot N_{insp} \cdot C_{F\_air} \cdot 10^{-6} \cdot 60 \quad (16)$$

Le facteur  $10^{-6}$  convertit les unités du volume courant (cm<sup>3</sup>) en m<sup>3</sup> pour permettre la simplification avec les unités de volume de la concentration extérieure du formaldéhyde libre (mg<sub>F</sub>/m<sup>3</sup>). Pour sa part, le facteur 60 convertit les minutes de la fréquence respiratoire ( $N_{insp}$ ) en heure, de telle sorte que  $Q_{inh}$  soit donné en mg<sub>F</sub>/heure.

##### **Concentration du formaldéhyde libre dans l'air ( $C_{F\_air}$ )**

À titre indicatif, en 1985, plus d'un million de travailleurs américains étaient exposés au formaldéhyde. Parmi ceux-ci, plus de 20 000 étaient exposés à des concentrations de formaldéhyde supérieures à 1 ppm et plus de 500 000 à des concentrations entre 0.5 et 1 ppm (*Leikauf (2000)*). Au Québec, la valeur plafond de la concentration de formaldéhyde libre acceptée en milieu de travail a été fixée à 2 ppm (voir la fiche RQMT CAS: 50-00-0). En aucun moment, la concentration de formaldéhyde dans l'air ne peut dépasser ces valeurs plafond.

Dans les équations 4 et 5, l'unité du paramètre  $C_{F\_air}$  est en  $mg_F/m^3$ . Cependant, la valeur de la concentration d'un gaz dans l'air est souvent donnée en ppm. Sachant que la masse molaire du formaldéhyde est de 30 g/mol, la relation 17 permet de convertir en  $mg_F/m^3$  les concentrations données en ppm.

$$C_{F\_air} = \frac{x \cdot ppm \cdot 30 \cdot g/mol}{24.45} \quad (17)$$

Où x est le nombre correspondant à la concentration  $C_{F\_air}$  exprimée en ppm.

Pour les calculs à venir, les valeurs de  $C_{F\_air}$  varieront de 0.2 à 2 ppm c'est à dire de **0.25 à 2.5  $mg_F/m^3$** .

### **Fraction d'absorption du formaldéhyde ( $f_{abs}$ )**

La fraction d'absorption est la fraction du formaldéhyde présent dans les voies respiratoires qui sera absorbé par l'organisme presque instantanément. Cette fraction peut s'exprimer comme le rapport entre la quantité absorbée et la quantité inhalée:

$$f_{abs} = \frac{\text{quantité absorbée}}{\text{quantité inhalée}} \quad (18)$$

Étant donné que le formaldéhyde est très soluble dans l'eau et que les parois muqueuses de la zone supérieure du système respiratoire sont très humides, les molécules de cette substance qui viennent en contact avec ces parois se lient à la muqueuse. La fraction d'absorption du formaldéhyde est pour cette raison relativement élevée.

On peut poser, par mesure de sécurité, que tout formaldéhyde ayant des échanges gazeux avec le sang est absorbé. La valeur de la fraction d'absorption serait alors décrite par l'équation 19.

$$f_{\text{abs}} = 1 - \frac{V_m}{V_c} \quad (19)$$

Où  $V_c$  est le volume courant (volume d'air inhalé lors d'une inspiration) et  $V_m$  est le volume de l'espace mort. L'espace mort est en fait la quantité de l'air inhalé qui ne subit pas d'échange gazeux. La fraction du volume de l'espace mort par rapport au volume courant ( $V_m / V_c$ ) est de 0.1333 selon l'étude de l'ICRP(1994). L'estimation de la fraction d'absorption serait donc de 0.8667 tandis que les valeurs citées dans le livre de Jonh B. West (1995) donneraient une estimation égale à 0.7 pour la fraction d'absorption.

Un groupe de recherche (*Heck et al.(1983)*) a mesuré cette fraction d'absorption pour le formaldéhyde inhalé chez le rat et a obtenu la valeur 0.78, intermédiaire entre les deux valeurs ci-haut. Les calculs à venir sont effectués avec  $f_{\text{abs}}=0.78$ . Ce groupe de recherche a aussi démontré que la majorité du formaldéhyde libre est absorbée dans la région supérieure du système respiratoire (ET).

#### **4.2.2.3 Détermination des valeurs paramétriques pour l'absorption du formaldéhyde lié aux poussières**

Dans un milieu de travail, le formaldéhyde se retrouve dans les poussières en provenance de différentes sources tels les produits de bois, le textile, le papier... Il faut noter que le modèle élaboré pour l'absorption du formaldéhyde lié aux poussières est valide pour toutes poussières mais, à titre indicatif, les valeurs des paramètres seront déterminées à partir de poussières en provenance de produits du bois.

#### **Quantité de poussières inhalées par unité de temps ( $P_{\text{inh}}$ )**

La quantité de poussières inhalée par heure (en  $\text{mg}_p/\text{hr}$ ) est en fait le produit du volume d'air inhalé à chaque inspiration ( $V_c$ ), de la concentration de poussières dans l'air ( $C_{\text{pouss\_air}}$ ) et du nombre d'inspiration par heure ( $60 \cdot N_{\text{insp}}$ ) :

$$P_{\text{inh}} = V_c \cdot N_{\text{insp}} \cdot 60 \cdot 10^{-6} \cdot C_{\text{pouss\_air}} \quad (20)$$

Le facteur  $10^{-6}$  transforme l'unité du volume courant en  $m^3$ . Pour connaître la valeur de  $P_{inh}$ , on doit alors estimer la concentration de poussières dans l'air ( $C_{pouss\_air}$ ) en  $mg_p/m^3$ .

### **Concentration de poussières dans l'air ( $C_{pouss\_air}$ )**

Dans les calculs à venir, la concentration de poussières de bois sera posée égale à  $5 mg_p/m^3$ , soit la limite maximale permise au Québec. On a vu à la section 4.1.1 que les concentrations de poussières retrouvées aujourd'hui dans les usines travaillant le bois sont généralement inférieures à cette limite.

### **Taux d'élimination des poussières par le système respiratoire ( $k_{P\_elim}$ )**

Cette constante d'élimination physique de la poussière par le système respiratoire est estimée à partir de la demi-vie d'élimination des poussières ( $t_{1/2\_P}$ ) par le système respiratoire. La relation 21 décrit le lien entre ces deux paramètres.

$$k_{P\_elim} = \frac{\ln(2)}{t_{1/2\_P}} \quad (21)$$

La demi-vie d'élimination des poussières par le système respiratoire dépend de plusieurs facteurs dont les principaux sont le lieu de déposition des poussières dans le système respiratoire et la dimension des poussières. Pour estimer la valeur de ce paramètre, une investigation sur ces deux facteurs a été effectuée à la section « L'absorption et l'élimination des poussières de bois par l'homme » (4.1.3). Les valeurs de cette demi-vie sont données à la section 4.1.3.5.

### **Concentration de formaldéhyde dans la poussière ( $C_{F\_pouss}$ )**

Voir section « Concentrations de formaldéhyde lié aux poussières ».

### **Taux de relargage du formaldéhyde lié aux poussières ( $k_{F\_rel}$ )**

On a déjà vu que la procédure de trempage de la méthode ACE tente de reproduire les conditions d'absorption du formaldéhyde dans le système respiratoire. En

effet, cette méthode utilise un pH semblable à celui des muqueuses nasales ( $\text{pH} \approx 6$ ) et une température d'eau déionisée environ égale à la température corporelle ( $37^\circ\text{C}$ ). C'est la raison pour laquelle on utilisera les valeurs estimées avec cette méthode comme taux de relargage du formaldéhyde lié aux poussières dans le système respiratoire.

Des expériences ont été effectuées pour établir le lien entre la quantité de formaldéhyde relarguée et le temps de trempage des poussières (*Elia et Messner (1992,1996) ; Priha (1996)*). Les courbes de ces graphiques suggèrent que l'équation gouvernant ce relargage est de la forme :  $\text{Plateau} \times (1 - e^{-kt})$ . Le paramètre « Plateau » symbolise la quantité maximale de formaldéhyde contenu dans un milligramme de poussière ( $C_{F\_pouss}$ ) alors que  $k$  symbolise le taux de relargage du formaldéhyde. Ce taux de relargage devient une estimation du taux de relargage du formaldéhyde contenu dans les poussières du système respiratoire ( $k_{F\_rel}$ ).

Les valeurs de  $k_{F\_rel}$  ont été obtenues à l'aide du logiciel « GraphPad Prism » en ajustant, par une procédure d'optimisation statistique, l'équation  $\text{Plateau} \times (1 - e^{-kt})$  aux données expérimentales des graphiques retrouvés dans les études suivantes : *Elia et Messner (1992,1996) ; Priha (1996)*. La procédure d'optimisation statistique dont il est question est un ajustement de régression non-linéaire sur les données recueillies des graphiques en référence. Cet ajustement minimise les moindres carrés entre ces données et l'équation théorique ( $\text{Plateau} \times (1 - e^{-kt})$ ). Les valeurs obtenues pour  $k$  varient selon l'étude et selon la catégorie de panneaux à particules. Le tableau 8 résume les résultats obtenus où  $R^2$  est le coefficient de la régression non-linéaire et  $t_{1/2\_F}$  est la demi-vie de relargage du formaldéhyde lié.

Les équations 11 et 14, 15 montrent que plus la valeur de  $k_{F\_rel}$  est élevée (ou plus la demi-vie est courte), plus grande sera la quantité de formaldéhyde absorbée. Il est évident que plus cette demi-vie est courte, plus le formaldéhyde se libère rapidement de la poussière avant qu'elle ne soit expulsée et plus il y aura de formaldéhyde libéré dans les voies respiratoires. Dans les calculs à venir, par mesure de sécurité, la valeur de la demi-vie de relargage sera posée égale à 1 heure. Ceci correspond au taux de relargage observé le plus élevé :  **$0.693 \text{ hr}^{-1}$** .

## **5 RESULTATS**

Cette section présente des simulations numériques sur la quantité totale de formaldéhyde absorbé par un travailleur exposé aux deux formes pendant une durée de 8 heures (T=8 heures). L'absorption est d'abord étudiée pour du formaldéhyde forme libre et ensuite sous la forme liée aux poussières. Les valeurs paramétriques proposées à la section « Méthodologie » sont utilisées pour estimer les doses quotidiennes de formaldéhyde que peut absorber ce travailleur.

### **5.1 ABSORPTION DU FORMALDEHYDE SOUS FORME LIBRE VIA LE SYSTEME RESPIRATOIRE**

RAPPEL DES VALEURS PARAMÉTRIQUES FIXÉES:

$$N_{\text{insp}} = 17.5 \text{ fois par minute}$$

$$V_c = 1095 \text{ cm}^3$$

$$f_{\text{abs}} = 0.78$$

$$T = 8 \text{ heures}$$

$$t = 24 \text{ heures}$$

L'équation 5 permet de déterminer la dose quotidienne de formaldéhyde libre absorbé via le système respiratoire pour différentes concentrations dans l'air. En substituant la forme explicite de  $Q_{\text{inh}}$  dans cette équation d'absorption, on obtient l'équation 22. On remarque que l'absorption du formaldéhyde sous forme libre est proportionnelle à chacun des paramètres impliqués.

$$F_{\text{ABS}}_{\text{libre}}(T) = f_{\text{abs}} \cdot N_{\text{insp}} \cdot V_c \cdot C_{F_{\text{air}}} \cdot 10^{-3} \cdot 60 \cdot T \quad (22)$$

Le tableau 9 représente les résultats obtenus pour la quantité totale de formaldéhyde libre (en  $\text{mg}_F$ ) qui est absorbé via le système respiratoire lors d'une exposition de 8 heures. Lorsque la concentration de formaldéhyde libre dans l'air varie de 0.25 à 2.5  $\text{mg}_F/\text{m}^3$ , la dose quotidienne absorbée varie alors de 1.8  $\text{mg}_F$  à 18  $\text{mg}_F$ .

## 5.2 ABSORPTION DU FORMALDEHYDE LIÉ AUX POUSSIÈRES VIA LE SYSTÈME RESPIRATOIRE

RAPPEL DES VALEURS PARAMÉTRIQUES FIXÉES :

$$N_{\text{insp}} = 17.5 \text{ fois par minute}$$

$$V_c = 1095 \text{ cm}^3$$

$$T = 8 \text{ heures}$$

$$t = 24 \text{ heures}$$

$$t_{1/2\_F} = 1 \text{ heure}$$

$$k_{F\_rel} = \ln(2) \text{ heure}^{-1}$$

$$C_{\text{pouss\_air}} = 5 \text{ mg/m}^3$$

Pour ET<sub>2</sub>,

$$k_{P\_elim} = 6 \cdot \ln(2) \text{ heure}^{-1}$$

$$t_{1/2\_P} = 10 \text{ minutes}$$

Pour simplifier les calculs, on suppose que les poussières déposées dans les zones profondes du système respiratoire ont le temps de relarguer tout le formaldéhyde qu'elles contiennent. Ainsi, pour les zones de la trachée jusqu'aux alvéoles (BB, bb, AI), l'équation de la dose quotidienne absorbée est simplement la quantité de poussières inhalées durant l'exposition multipliée par la concentration de formaldéhyde dans les poussières :

$$F_{\text{ABS}_{\text{lié}}}(t) = P_{\text{inh}} \cdot T \cdot C_{F\_pouss} \quad (23)$$

En substituant la forme explicite de  $P_{\text{inh}}$  dans cette dernière équation, on obtient l'équation 24.

$$F_{\text{ABS}_{\text{lié}}}(t) = C_{F\_pouss} \cdot C_{\text{pouss\_air}} \cdot V_c \cdot N_{\text{insp}} \cdot 60 \cdot 10^{-6} \cdot T \quad (24)$$

L'équation 14 exprime la quantité totale de formaldéhyde lié absorbé via le système respiratoire au temps « t » pour les régions ET<sub>1</sub> et ET<sub>2</sub>. Cependant, pour connaître la dose quotidienne de formaldéhyde absorbé, il faut utiliser la valeur

asymptotique exprimée par l'équation 15. En substituant la forme explicite de  $P_{inh}$  dans cette équation, on obtient l'équation 25.

$$F_{\_ABSli\acute{e}}(t) = \frac{k_{F\_rel}}{k_{F\_rel} + k_{P\_elim}} \cdot \left( V_c \cdot N_{insp} \cdot 60 \cdot 10^{-6} \cdot C_{pouss\_air} \cdot C_{F\_pouss} \cdot T \right) \quad (25)$$

On remarque que si le taux d'élimination est petit comparé au taux de relargage on a l'approximation :  $\frac{k_{F\_rel}}{k_{F\_rel} + k_{P\_elim}} \approx 1$ .

Pour le scénario d'exposition au formaldéhyde lié, on suppose que le travailleur est exposé à des poussières distribuées log-normalement avec une médiane du diamètre aérodynamique de  $6 \mu m$  ou de  $8 \mu m$  et un écart-type géométrique de 2.4. Les fractions de déposition des poussières dans chacune des régions sont données au tableau 3. La dose quotidienne absorbée via le système respiratoire est la somme des quantités de formaldéhyde absorbé dans chacune des régions.

Le tableau 10 représente les résultats obtenus pour la quantité quotidienne absorbée à partir de formaldéhyde lié à des poussières (en  $\mu g_F$ ) lors d'une exposition de 8 heures et ce, pour différentes concentrations de formaldéhyde dans les poussières et différentes valeurs de demi-vie d'élimination pour la région du nez ( $ET_1$ ).

### **5.3 COMPARAISON DE L'ABSORPTION DU FORMALDEHYDE ENTRE SA FORME LIBRE ET CELLE LIEE AUX POUSSIERES**

Il est possible de comparer chez un même travailleur la dose absorbée de formaldéhyde sous forme libre à la dose sous forme liée et ce, pour différentes concentrations. Cette comparaison peut se faire en posant différentes valeurs pour la demi-vie d'élimination de  $ET_1$  (voir les tableaux 9 et 10 pour fin de comparaison).

Pour une exposition d'une durée de 8 heures avec une concentration de poussières dans l'air de  $5 mg_p/m^3$  et une concentration de formaldéhyde lié aux poussières de concentration de  $9 \mu g_F/mg_p$ , une comparaison a été effectuée entre la quantité totale absorbée provenant des poussières et la quantité totale absorbée de formaldéhyde libre

avec une concentration aérienne de 0.3 ppm. Le tableau 11 présente les résultats de cette comparaison selon diverses hypothèses sur la demi-vie d'élimination des poussières. Dans le pire des scénarios (i.e. lorsque la demi-vie d'élimination des poussières dans le nez est de 17 heures), la quantité totale de formaldéhyde absorbée en provenance des poussières est environ 7% de la quantité sous forme libre.

## **6 DISCUSSION**

Le but de cette étude était d'établir l'importance relative de l'exposition au formaldéhyde lié aux poussières comparée à l'exposition sous la forme libre (gazeuse ou vapeur). La comparaison des quantités absorbées sous les deux formes dans la section précédente permet de déterminer cette importance relative (voir tableau 11).

Afin d'estimer la dose quotidienne de formaldéhyde que peut absorber un travailleur via les poussières, les valeurs des paramètres choisies vont dans le sens des pires scénarios réalistes.

Étant donné que la médiane de la distribution des poussières générées lors de processus de concassage, de broyage et de sablage peut varier de 6  $\mu\text{m}$  à 20  $\mu\text{m}$  (voir référence 18), le scénario avec une médiane de 6  $\mu\text{m}$  est en fait le pire scénario. En effet, le tableau 3 montre que plus la médiane de distribution est élevée, moins il y aura de poussières déposées dans le système respiratoire et ainsi moins d'absorption. Ceci est vérifié au tableau 10 entre la dose quotidienne absorbée avec une distribution de médiane 6  $\mu\text{m}$  et celle avec une médiane de 8  $\mu\text{m}$ .

Le taux de relargage utilisé lors des simulations numériques tend à surestimer la quantité absorbée. Plus ce taux est élevé, plus le formaldéhyde est relargué rapidement des poussières et ainsi, plus il y aura de formaldéhyde libéré pour être absorbé par le système respiratoire. La valeur choisie dans le scénario est plus élevée que celles mesurées en laboratoire (voir tableau 8).

Les concentrations impliquées pour l'exposition à la forme liée surestiment aussi la dose de formaldéhyde absorbée due à l'inhalation de poussières de produits de bois. La concentration de formaldéhyde dans les poussières utilisée dans les simulations est plus de trois fois supérieure à celles que l'on retrouve en moyenne dans les produits du

bois (*Elia et Messner (1992,1996) ; Priha (1996)*). De plus, la concentration de poussières dans l'air de  $5\text{mg}_p/\text{m}^3$  utilisée dans les simulations est rarement observée pendant 8 heures en milieu de travail de nos jours.

Malgré cette surestimation des valeurs paramétriques, la quantité absorbée provenant de la forme liée est moins de 7% de la quantité absorbée sous la forme gazeuse, ceci pour une concentration de formaldéhyde gazeux dans l'air de 0.3 ppm et pour une concentration de formaldéhyde dans les poussières de  $9\ \mu\text{g}_F/\text{mg}_p$ . Chung et al. (2000) ont observé qu'il existe une relation entre la concentration du formaldéhyde libre dans l'air ambiant et celle dans la poussière de produits de bois, soit entre nos variables  $C_{F\_air}$  et  $C_{F\_pouss}$ . Ainsi, si on travaille du bois contenant une forte concentration de formaldéhyde, la concentration de la forme gazeuse dans l'air augmentera dans les mêmes proportions que celle contenue dans les poussières. Dans les simulations présentées au tableau 11, la concentration du formaldéhyde gazeux est de 0.3 ppm. Soulignons que dans une étude réalisée dans la région de Montréal par Bonvalot et al. (2001), la concentration moyenne de formaldéhyde gazeux mesurée dans l'air ambiant de 40 résidences de particuliers était de 0.23 ppm. Si on est en présence de  $5\ \text{mg}_p/\text{m}^3$  de poussières ayant une concentration aussi que  $9\ \mu\text{g}_F/\text{mg}_p$ , on devrait alors s'attendre à mesurer une concentration de formaldéhyde gazeux supérieure à 0.3 ppm. Ceci implique que le rapport formaldéhyde absorbé provenant de la forme liée sur formaldéhyde absorbé sous la forme gazeuse sera inférieur au 7% estimé avec un scénario pessimiste. On peut alors considérer qu'avec les concentrations retrouvées dans l'industrie du bois, l'absorption du formaldéhyde sous forme liée aux poussières sera faible par rapport à l'absorption sous forme gazeuse, voire presque négligeable par rapport à l'absorption sous forme libre.

## **7 CONCLUSION**

Cette étude montre que dans les industries de bois contenant du formaldéhyde (contre-plaqué, panneaux de particules, MDF) les poussières ne sont pas de bons véhicules pour l'absorption du formaldéhyde par le système respiratoire en comparaison à sa forme libre dans l'air. Les simulations montrent qu'avec des concentrations retrouvées dans l'industrie du bois, en prenant les pires conditions, plus de 93% de

l'absorption du formaldéhyde proviendrait de la forme gazeuse. En réalité, on s'attend à ce que cette proportion soit plus élevée que 93%. Les valeurs publiées dans la littérature scientifique conjuguées au modèle que nous proposons pour la dynamique du formaldéhyde permettent de conclure que les mesures conventionnelles des niveaux d'exposition au formaldéhyde sont de bonnes estimations de l'exposition réelle chez les travailleurs du bois. Toutefois, il pourrait être pertinent de faire des mesures conjointes de ses deux formes dans certains milieux de travail pour valider nos présomptions. Si de telles mesures étaient réalisées, nous recommandons d'utiliser la méthode ACE pour la mesure des concentrations de formaldéhyde dans les poussières prélevées dans l'air ambiant.

## Tableaux et Figures

Tableau 1 : Fractions de déposition chez un homme avec un débit moyen de 1.2 m<sup>3</sup>/h avec une distribution log-normale pour les poussières;  $d_{ae} \sim \log-N(5 \mu\text{m}, 2.5)$ . (Tiré de L'ICRP(1994))

Région	Fractions de déposition (%)
ET <sub>1</sub>	33.9
ET <sub>2</sub>	39.9 (0.05% dans ET <sub>seq</sub> )
BB	1.8 (33% dans BB <sub>2</sub> , 0.7% dans BB <sub>seq</sub> )
bb	1.1 (40% dans bb <sub>2</sub> , 0.7% dans bb <sub>seq</sub> )
AI	5.3 (30% dans AI <sub>1</sub> , 10% dans AI <sub>2</sub> et 60% dans AI <sub>3</sub> )
Total	82.0

Tableau 2 : Fractions d'inspirabilité (Vincent et Armbruster (1981))

Diamètre aérodynamique ( $\mu\text{m}$ )	Fractions d'inspirabilité
0	1.00
1	0.99
2	0.97
5	0.94
10	0.82
20	0.63
30	0.54
40	0.52

Tableau 3 : Fractions de déposition pour chaque compartiment du modèle de l'ICRP (1994) chez un homme ayant un débit respiratoire moyen de 1.2 m<sup>3</sup>/hr et une distribution log-normale pour les poussières;  $d_{ae} \sim \log-N(6 \mu\text{m}, 2.4)$ ,  $d_{ae} \sim \log-N(8 \mu\text{m}, 2.4)$  et  $d_{ae} \sim \log-N(11 \mu\text{m}, 2.4)$ .

Région	Fractions de déposition (%)		
	6 $\mu\text{m}$	8 $\mu\text{m}$	11 $\mu\text{m}$
ET <sub>1</sub>	35.12	35.43	34.8
ET <sub>2</sub>	40.81	39.99	38.0
BB	1.72	1.49	1.2
bb	0.94	0.74	0.5
AI	4.27	2.88	1.6
Total	82.86	80.53	76.1

Tableau 4 : Symboles pour le modèle de déposition et d'élimination du système respiratoire selon l'étude de l'ICRP (1994).

Symboles	Représentation
ET	Quantité de poussières dans la région extra-thoracique
ET <sub>1</sub>	Quantité de poussières dans le nez
ET <sub>2</sub>	Quantité de poussières dans les passages postérieurs du nez, le larynx, le pharynx et la bouche.
ET <sub>seq</sub>	Quantité de poussières séquestrées dans les tissus lymphatiques de la région extra-thoracique
BB	Quantité de poussières dans la région de la trachée et des bronches
BB <sub>1</sub>	Quantité de poussières avec élimination rapide
BB <sub>2</sub>	Quantité de poussières avec élimination lente
BB <sub>seq</sub>	Quantité de poussières séquestrées dans les tissus lymphatiques
bb	Quantité de poussières dans la région des bronchioles et des bronchioles terminales
bb <sub>1</sub>	Quantité de poussières avec élimination rapide
bb <sub>2</sub>	Quantité de poussières avec élimination lente
bb <sub>seq</sub>	Quantité de poussières séquestrées dans les tissus lymphatiques
AI	Quantité de poussières dans la région des bronchioles respiratoires, les canaux et les sacs alvéolaires
AI <sub>1</sub>	Quantité de poussières avec élimination rapide
AI <sub>2</sub>	Quantité de poussières avec élimination moyenne
AI <sub>3</sub>	Quantité de poussières avec élimination lente
LN	Quantité de poussières absorbée par la lymphe

Tableau 5 : Demi-vies d'élimination des poussières pour chaque taux de transfert de la figure 2.

De la région	À la région	Demi-vie	Demi-vie (heures)
AI <sub>1</sub>	bb <sub>1</sub>	35 jours	840
AI <sub>2</sub>	bb <sub>1</sub>	700 jours	16 800
AI <sub>3</sub>	bb <sub>1</sub>	7000 jours	168 000
AI <sub>3</sub>	LN	34 657 jours	831 768
bb <sub>1</sub>	BB <sub>1</sub>	8 heures	8
bb <sub>2</sub>	BB <sub>1</sub>	23 jours	552
bb <sub>seq</sub>	LN	70 jours	1680
BB <sub>1</sub>	ET <sub>2</sub>	100 minutes	1.667
BB <sub>2</sub>	ET <sub>2</sub>	23 jours	552
BB <sub>seq</sub>	LN	70 jours	1680
<b>ET<sub>2</sub></b>	<b>Œsophage</b>	<b>10 minutes</b>	<b>0.1667</b>
ET <sub>seq</sub>	LN	700 jours	16800
<b>ET<sub>1</sub></b>	<b>Environnement</b>	<b>17 heures</b>	<b>17</b>

Tableau 6 : Demi-vie d'élimination des particules déposées dans le passage antérieur du nez : résultats tirés de l'expérience de Fry et Black (1973)

Nombre de sujets	Phase rapide		Phase lente ( $t_{1/2}$ ) (heure)
	% des poussières	$t_{1/2}$ (minutes)	
2	40±30	12±11	6±3
6	34±18	9±5	>12
10	-	-	7±3
4	-	-	>12

Tableau 7 : Symboles pour la modélisation de la cinétique d'absorption respiratoire du formaldéhyde sous forme libre et sous forme lié aux poussières

t	Temps écoulé depuis le début de l'exposition (hr)
T	Durée totale de l'exposition (hr)
<b>Formaldéhyde sous forme libre</b>	
<b>Variables</b>	
$F_i(t)$	Quantité de formaldéhyde libre et non-absorbée dans le système respiratoire au temps t ( $\mu\text{g}_F$ )
$F_{\text{ABS}_{\text{libre}}}(t)$	Quantité totale de formaldéhyde libre absorbée via le système respiratoire au temps t ( $\mu\text{g}_F$ )
<b>Paramètres</b>	
$Q_{\text{inh}}$	Quantité de formaldéhyde libre inhalé par unité de temps ( $\text{mg}_F/\text{hr}$ )
$f_{\text{abs}}$	Fraction d'absorption du formaldéhyde
$V_c$	Volume courant i.e. volume inhalé à chaque inspiration ( $\text{cm}^3$ )
$N_{\text{insp}}$	Nombre d'inspiration par unité de temps ( $\text{min}^{-1}$ )
$C_{F_{\text{air}}}$	Concentration du formaldéhyde sous forme libre dans l'air ( $\text{mg}_F/\text{m}^3$ )
$k_{\text{ro}}$	Taux de transfert du formaldéhyde entre le système respiratoire et l'organisme ( $\text{hr}^{-1}$ )
<b>Formaldéhyde lié aux poussières</b>	
<b>Variables</b>	
$\text{FPR}(t)$	Quantité de formaldéhyde lié aux poussières présentes dans le système respiratoire au temps t ( $\mu\text{g}_F$ )
$F_r(t)$	Quantité de formaldéhyde relarguée et non-absorbée dans le système respiratoire au temps t ( $\mu\text{g}_F$ )
$F_{\text{ABS}_{\text{lié}}}(t)$	Quantité totale de formaldéhyde lié absorbée via le système respiratoire au temps t ( $\mu\text{g}_F$ )
<b>Paramètres</b>	
$C_{\text{pouss}_{\text{air}}}$	Concentration de poussières dans l'air ( $\text{mg}_P/\text{m}^3$ )
$C_{F_{\text{pouss}}}$	Concentration de formaldéhyde dans la poussière ( $\mu\text{g}_F/\text{mg}_P$ )
$k_{F_{\text{rel}}}$	Taux de relarguage du formaldéhyde lié aux poussières ( $\text{hr}^{-1}$ )
$t_{1/2_F}$	Demi-vie de relarguage du formaldéhyde lié aux poussières (hr)
$k_{P_{\text{elim}}}$	Taux d'élimination des poussières par le système respiratoire ( $\text{hr}^{-1}$ )
$t_{1/2_P}$	Demi-vie d'élimination des poussières par le système respiratoire (hr)
$P_{\text{inh}}$	Quantité de poussières inhalées par unité de temps ( $\text{mg}_P/\text{hr}$ )
$V_c$	Volume courant i.e. volume inhalé à chaque inspiration ( $\text{cm}^3$ )
$N_{\text{insp}}$	Nombre d'inspiration par unité de temps ( $\text{min}^{-1}$ )
$k_{\text{ro}}$	Taux de transfert du formaldéhyde entre le système respiratoire et l'organisme ( $\text{hr}^{-1}$ )

Tableau 8 : Résultats des régressions non-linéaires sur la quantité de formaldéhyde relargué en fonction du temps.  $\text{Plateau} \times (1 - e^{-kt})$

Source	Plateau ( $\mu\text{g}_F/\text{mg}_P$ )	k ( $\text{hr}^{-1}$ )	$t_{1/2\_F}$ (hr)	R <sup>2</sup>
<i>Priha (1996)</i> Données prises à 40°C	1.664	0.1181	5.869	0.9337
<i>Elia et Mesner (1992)</i> « Pre-press »	9.095	0.1218	5.691	0.7752
« Post-press »	4.536	0.04708	14.72	0.7827
<i>Elia et Messner (1996)</i> « Pre-press »	3.119	0.3731	1.858	0.3886
« Post-pres »	1.127	0.6436	1.077	0.7923

Tableau 9 Résultats des simulations numériques pour la dose quotidienne de formaldéhyde libre absorbé par la voie respiratoire pour une exposition de 8 heures.

Concentration extérieure ( $\text{mg}_F/\text{m}^3$ )	Quantité de formaldéhyde absorbé sous forme libre ( $\text{mg}_F$ )
0.25	1.794
0.38	2.726
0.5	3.587
0.75	5.381
1	7.174
1.25	8.968
1.5	10.762
1.75	12.555
2	14.349
2.25	16.142
2.5	17.936

Tableau 10 : Résultats des simulations numériques pour la dose quotidienne de formaldéhyde lié aux poussières, absorbé par la voie respiratoire pour une exposition de 8 heures et une distribution log-normale;  $d_{ae} \sim \log-N(6 \mu\text{m}, 2.4)$  et  $d_{ae} \sim \log-N(8 \mu\text{m}, 2.4)$ .

$C_{F\_pouss}$ ( $\mu\text{g}_F/\text{mg}_P$ )	Demi-vie d'élimination de $ET_1$ (heure)	Quantité totale de formaldéhyde absorbée dans le système respiratoire ( $\mu\text{g}_F$ )	
		$6 \mu\text{m}$	$8 \mu\text{m}$
9	17	190.11	183.30
5	17	105.62	101.83
3	17	63.37	61.10
1	17	21.12	20.37
9	5	173.96	167.01
5	5	96.64	92.78
3	5	57.99	55.67
1	5	19.33	18.56
9	1	125.51	118.13
5	1	69.73	65.63
3	1	41.84	39.38
1	1	13.95	13.13
9	0.1667	55.22	47.21
5	0.1667	30.68	26.23
3	0.1667	18.41	15.74
1	0.1667	6.14	5.25

Tableau 11 : Rapport de la quantité totale de formaldéhyde absorbé sous forme liée sur celle absorbée sous forme libre avec  $C_{F\_pouss}=9 \mu\text{g}_F/\text{mg}_P$  et  $C_{F\_air}=0.3 \text{ ppm}$  (voir tableaux 9 et 10).

Demi-vie d'élimination de la zone $ET_1$ (heure)	Rapport quantités (forme lié/forme libre)	
	$6 \mu\text{m}$	$8 \mu\text{m}$
17	0.0697	0.0672
5	0.0638	0.0613
1	0.0460	0.0433
0.1667	0.0203	0.0173

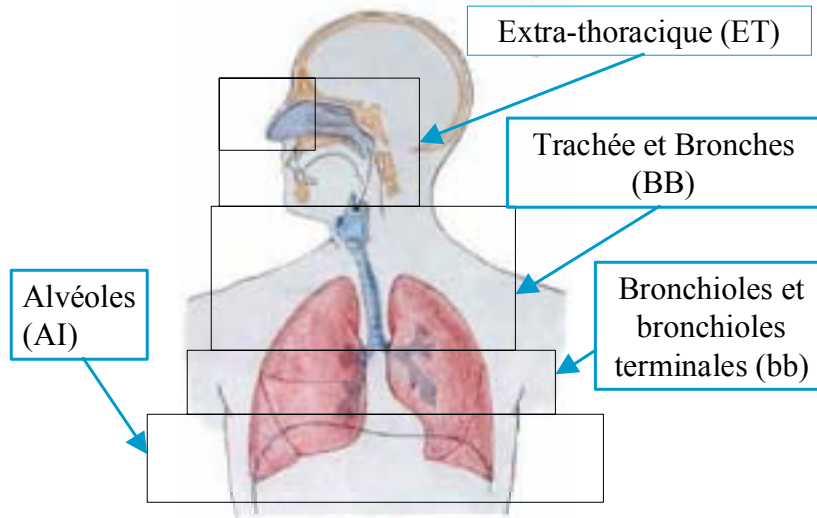


Figure 1 : Représentation schématique du système respiratoire avec les compartiments proposés par l'ICRP (1994).

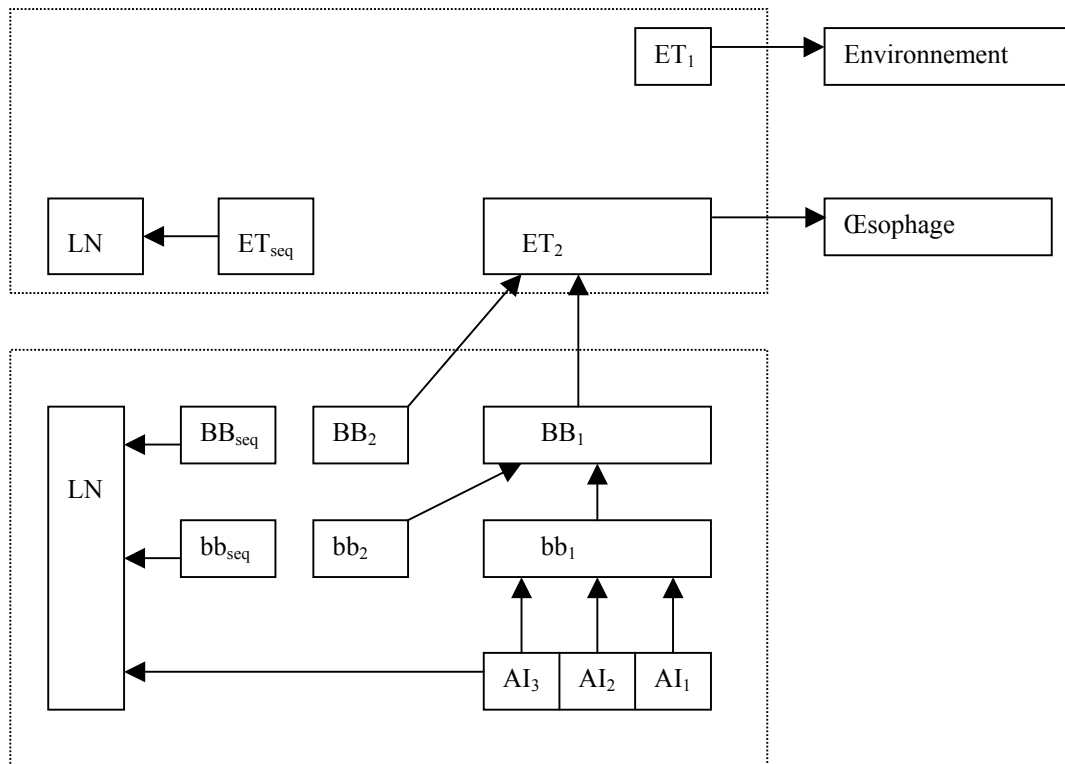


Figure 2: Modèle d'élimination du système respiratoire proposé par l'ICRP (1994)

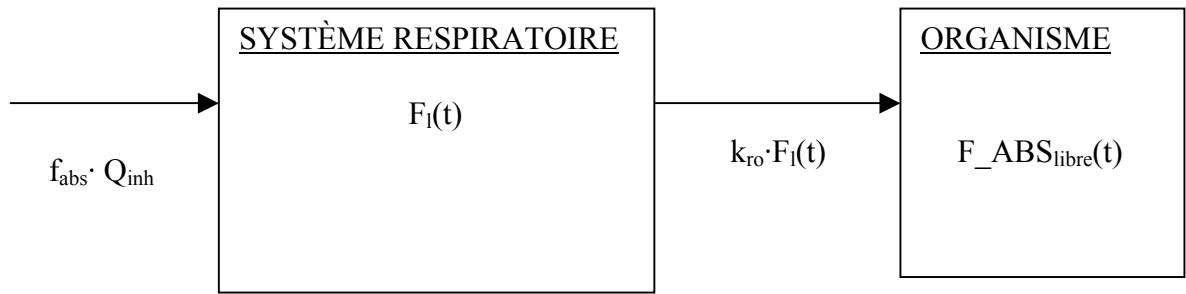


Figure 3 : Représentation schématique de la cinétique d'absorption du formaldéhyde libre

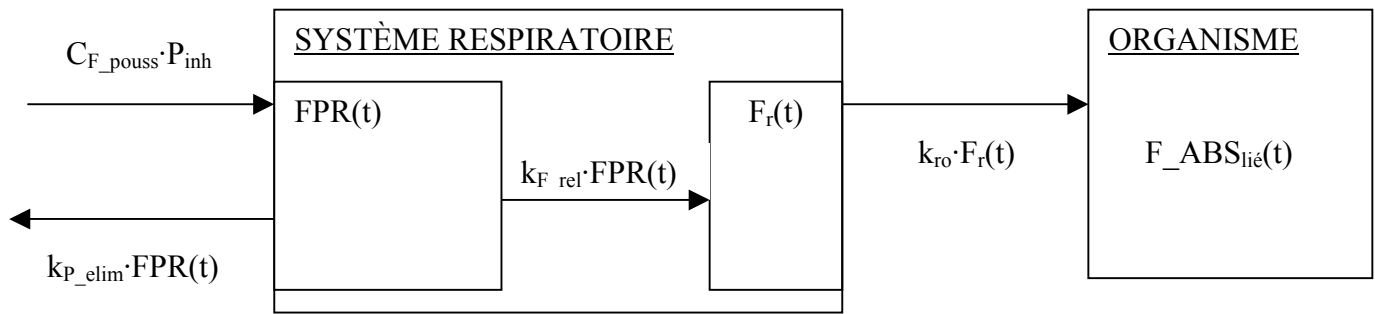


Figure 4: Représentation schématique de la cinétique d'absorption du formaldéhyde lié aux poussières de bois

## 8 BIBLIOGRAPHIE

1. **Bonvalot Y; Carrier G; Labrèche F; Farant J-P; Kosatsky T; Larouche L:** Formaldéhyde: Mise en perspective des normes en milieu professionnel par rapport à des niveaux observés dans l'environnement général *Colloque Canadian Association for Research on Work & Health* (novembre 2001).
2. **Crow E.L.:** Applications in Atmospheric Sciences *Lognormal Distributions Theory and Applications, chapitre 13:* pp.331-356 (1988).
3. **Chung, K.Y.; Cuthbert, R.J.; Revell, G.S.; Wassel, S.g.; Summers, N:** A Study on Dust Emission, Particle Size Distribution and Formaldehyde Concentration during Machining of Medium Density Fibreboard. *Ann. Occup. Hyg. 44:* pp.455-466 (2000).
4. **Elia, V.J; Messner, R.A.:** Comparison of Methods for Measurement of Released Formaldehyde in Resin-Containing Dusts. *Appl. Occup. Environ. Hyg. 11:* pp.1064-1074 (1996).
5. **Elia, V.J; Messner, R.A.:** Evaluation of Methods for Estimating Formaldehyde Released from Resin-Containing Paper and Wood Product Dusts. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 53:* pp.632-638 (1992).
6. **Fry, F.A. et Black, A.:** Regional Deposition and Clearance of Particules in Human Nose. *J. Aerosol Sci. 4:* pp. 113-124 (1973).
7. **Groach W.J.; Bradfield J.; Gramp G.; Rudzinski R.; Heroux G.:** Comparative Response of Reconstituted Wood Products to European and North Americal Test Methods for Determining Formaldehyde Emissions. *Environ. Sci. Technol. 25:* pp.117-122 (1990).
8. **Hanslian, L.; Kadlec:** Drevo a jeho prach (Timber and timber dust). *Pracovni Lekarstvi 16:* pp.276-282 (1964).
9. **Heck, H.A., Chin, T.Y et Schmitz, M.C.:** Distribution of [<sup>14</sup>C] Formaldehyde in Rats after Inhalation Exposure *Formaldehyde Toxicity* (J.E Gibson, Ed.): pp.26-37 (1983). Hemisphere Publishing Corporation, Washington, DC.
10. **Holmström M.; Rosén G.; Wilhelmsson B.:** Symptoms, Airway Physiology and Histology of Workers Exposed to Medium-Density Fiber Board. *Scand. J. Work Environ. Health 17:* pp. 409-413 (1991).
11. **Holmström M.; Wilhelmsson B.:** Respiratory Symptoms and Pathophysiological Effects of Occupational Exposure to Formaldehyde and Wood Dust. *Scand. J. Work Environ. Health 14:* pp.306-311 (1988).

12. **Hounam R. F.; Williams J.:** Levels of Airborne Dust in Furniture Making Factories in the High Wycombe Area. *Brit. J. Ind. Med.*31: pp.1-9 (1974).
13. **ICRP 1994:** Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publ.66. *Annals ICRP*;24 (Nos. 1-3). Oxford: Elsevier.
14. **ICRP 1966:** Task Group on Lung Dynamics: Deposition and Retention Models for Internal Dosimetry of the Human Respiratory Tract. *Health Phys. (12):* pp.173-207 (1966).
15. **Imbus, H.R.; Tochilin S.J.:** Acute Effect upon Pulmonary Function of Low Level Exposure to Phenol-Formaldehyde-Resin-Coated Wood. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J* 49: pp.434-437 (1988).
16. **IRSST:** Étude préliminaire sur l'évaluation de l'impact d'un abaissement des valeurs d'expositions admissibles pour le formaldéhyde. *Rapport final de l'activité 98-083, édité par Perrault G. et al* (2000).
17. **Laforest, L.; Luce D.; Goldberg, P.; Bégin, D.; Gérin, M.; Demers, P.A.; Brugère, J.; Leclerc, A. :** Laryngeal and Hypopharyngeal Cancers and Occupational Exposure to Formaldehyde and Various Dusts : a Case-Control Study in France. *Occup Environ Med* 57: pp.767-773 (2000).
18. **Leikauf G.D.:** Formaldehyde and Other Aldéhydes *Environmental Toxicants: Human Exposures and their Health Effects, chapitre 12:* pp.409-448 (2000).
19. **Lippmann M.:** Introduction and Background *Environmental Toxicants: Human Exposures and their Health Effects, chapitre 1:* pp.1-29 (2000).
20. **Priha, E.:** Formaldehyde Released from Resin-Containing Wood Board Dusts: Evaluation of Methods to Determine Formaldehyde. *Appl. Occup. Environ. Hyg. 11:* pp.465-470 (1996).
21. **Segel, L.A. et Slemrod, M.:** The Quasi-Steady State Approximation : a Case Study in Perturbation. *SIAM Review* 31, pp. 446-476 (1989).
22. **Shimizu K.; Crow E.L.:** History, Genesis, and Properties *Lognormal Distributions Theory and Applications, chapitre 1:* pp.1-25 (1988).
23. **Stumpf J. M.; Kenneth D.B.; Buchan R.M; Bobby J.G.:** Characterization of Particleboard Aerosol – Size Distribution and formaldehyde Content. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J* 47: pp.725-730 (1986).
24. **U.S.A EPA. 1996:** Air Quality Criteria for particulate Matter. *EPA/600/P-95/001F. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency.*

- 25. Vincent, J.H.; Armbruster, L:** Short Communication- On the Quantitative Definition of Inspirability of Airborne Dust. *Annals of Occupational Hygiene* 24 : pp. 245-248 (1981).
- 26. Weibel, E.R:** Morphometry of Human Lung. New York, Academic Press (1963).
- 27. West, J.B :** Physiologie respiratoire. Éditions Pradel, 4<sup>ième</sup> édition : pp.14 et 8 (1995).
- 28. West, J.B :** Physiopathologie respiratoire. Éditions Pradel, 1<sup>ière</sup> édition: pp.137-140 (1989).
- 29. Whitehead L.W; Freund T; Hahn L.L:** Suspended dust concentrations and size distributions, and Qualitative Analysis of Inorganic Particles, from Woodworking Operation. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J* 42: pp.461-467 (1981).