

2016

Bilan du programme de contrôle de la qualité de la numération des fibres

Chantal Dion
IRSST

Daniel Drolet
IRSST

Gabrielle Chamberland
IRSST

Claudette M. Dufresne
IRSST

Julie McCabe
IRSST

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

Citation recommandée

Dion, C., Drolet, D., Chamberland, G., Dufresne, C. M. et McCabe, J. (2016). *Bilan du programme de contrôle de la qualité de la numération des fibres* (Rapport n° R-930). 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.

Prévention des risques chimiques et biologiques

Études et recherches

RAPPORT R-930



Bilan du programme de contrôle de la qualité de la numération des fibres

*Chantal Dion
Daniel Drolet
Gabrielle Chamberland
Claudette M. Dufresne
Julie McCabe*



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

NOS RECHERCHES

travaillent pour vous !

Mission

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

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

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

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

Pour en savoir plus

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

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CNESST. Abonnement : <https://abonnement.lacsst.com/prevention>

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
2016
ISBN : 978-2-89631-889-6 (PDF)
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
et de la valorisation de la recherche
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
Juillet 2016

Prévention des risques chimiques et biologiques

Études et recherches

RAPPORT R-930

Bilan du programme de contrôle de la qualité de la numération des fibres

Avis de non-responsabilité

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

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

*Chantal Dion, Daniel Drolet
Gabrielle Chamberland
Claudette M. Dufresne
Julie McCabe
IRSST*

*Avec la collaboration de
France Labrèche
IRSST*

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca



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

ÉVALUATION PAR DES PAIRS

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

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier madame Catheline Pelletier, technicienne de laboratoire à l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST), pour son aide dans le suivi des échantillons, monsieur Gilles Bensimon, informaticien à l'IRSST, pour la création de la base de données des résultats ainsi que mesdames Maryse Gagnon et Ginette Vadnais, bibliothécaires à l'IRSST, pour leur contribution à la recherche bibliographique. La révision du texte et la mise en page du document ont été réalisées sous les bons soins de mesdames Lucie Madden et Manon Lévesque, de l'IRSST.

SOMMAIRE

L'exposition aux fibres aéroportées en milieu de travail est mesurée à l'aide d'une technique de numération par microscopie optique à contraste de phase. La numération des fibres comporte un biais et une très grande variabilité qui peuvent être limités par de bonnes pratiques de contrôle de la qualité. Conformément aux exigences des méthodes officielles, québécoise et internationales, les laboratoires (ou les compteurs) effectuant de telles analyses doivent participer à un programme de contrôle de la qualité interlaboratoires sur des échantillons représentatifs de leurs activités afin d'évaluer le degré de fiabilité de leurs résultats.

Le présent rapport propose un bilan du programme de contrôle de la qualité de l'IRSST, de 1992 à 2011, élaboré à partir d'échantillons prélevés dans différents secteurs d'activité québécois (textile, mines, chantiers d'enlèvement de matériaux contenant de l'amiante, freins et démantèlement de fours industriels) et contenant des fibres minérales artificielles (FMA) et de l'amiante (amosite ou chrysotile ou en mixité - chrysotile + FMA ; chrysotile + gypse fibreux).

L'objectif principal de cette activité de recherche était de faire le bilan du programme de contrôle de la qualité de la numération de fibres de l'IRSST par l'exploitation de la base de données générée de 1992 à 2011. Pour ce faire, l'objectif spécifique a été de mettre en évidence, par une analyse longitudinale, les différents déterminants reliés aux échantillons et aux compteurs, pouvant contribuer à la précision et à la variabilité de la numération des fibres.

Une banque de lames, constituée à partir de 132 échantillons, a circulé auprès de 660 participants, dont 52 compteurs de référence, tout au long des 79 rondes couvertes par ce bilan. Les 32 777 résultats générés ont été consignés dans une base de données qui a permis de relier les caractéristiques des échantillons (secteur d'activité, type de fibres, mixité de fibres et densité de fibres) et les caractéristiques des compteurs (statut – référence (R) ou non-référence (NR), affiliation, expérience et participation). Des requêtes spécifiques et des analyses croisées par combinaison des caractéristiques liées aux échantillons et aux compteurs ont permis d'étudier l'influence de différents déterminants et d'en vérifier la signification statistique, à l'aide d'une analyse de variance.

Les compteurs R obtiennent un coefficient de variation (CV) moyen de 17 %, deux fois moins élevé que celui des compteurs NR (35 %), toutes variables confondues. La justesse moyenne, obtenue en divisant les résultats des compteurs NR par leur valeur cible (résultats des compteurs R), est de 1,06 (indiquant une surestimation de 6 %).

De tous les paramètres ayant un effet statistiquement significatif ($p < 0,001$) sur la justesse des résultats de numération de fibres, le type de fibres est le plus déterminant suivi du secteur d'activité, de la densité de fibres et finalement de l'affiliation du compteur.

Ainsi, pour tous les types de fibres, le CV des compteurs R est constant ($< 20\%$), à l'exception du mélange chrysotile + gypse fibreux (22 %). Pour les compteurs NR, le CV varie de 27 à 40 % selon : amosite $<$ FMA $<$ chrysotile + FMA $<$ chrysotile $<$ chrysotile + gypse fibreux. Les biais les plus importants sont observés pour les échantillons contenant seulement du chrysotile (-18 à +12 %) ou en mixité avec gypse fibreux (+15 %), alors que les résultats sont plus justes lorsqu'il s'agit de fibres d'amosite (1 %). Les compteurs ont généralement une moins bonne performance avec des échantillons contenant du chrysotile. En effet, les fibres de chrysotile sont fines, courbées et moins visibles sous le microscope optique que les fibres d'amosite ou les FMA.

Pour les différents secteurs d'activité, la variabilité (ou CV) des compteurs R demeure relativement stable (16 à 19 %) tandis que celle des compteurs NR augmente de 30 à 59 % selon : textile < freins < enlèvement < mines < démantèlement. Un biais positif moyen de 2 à 12 % est observé selon les secteurs : freins < textile \approx enlèvement < démantèlement < mines. Le textile représente donc le secteur d'activité dont le niveau de difficulté d'analyse est le plus faible. Les échantillons provenant du secteur du textile sont composés majoritairement de fibres et contiennent peu de particules interférentes.

La variabilité et la justesse des numérations sont également influencées par la charge ou la densité de fibres. Le CV est plus élevé pour les échantillons de faible densité (39 %) que pour ceux de densité élevée (25 %). La justesse est meilleure pour les échantillons de densité élevée (-3 %) que pour ceux de faible densité (+ 13 %). Il s'agit d'un phénomène connu : les compteurs ont tendance à surestimer le nombre de fibres dans un échantillon peu chargé tandis que les résultats sont sous-estimés lorsque la densité est plus élevée.

Lorsque les résultats de deux déterminants significatifs sont combinés, le type de fibres et le secteur d'activité, le facteur type de fibres est toujours prépondérant. La combinaison enlèvement-chrysotile seule présente la plus grande difficulté d'analyse tant sur le plan de la variabilité que celui de la justesse.

L'expérience des compteurs en lien avec leur affiliation semble avoir un effet sur la variabilité et la justesse des résultats. Ainsi, les compteurs des firmes privées (consultants), qui représentent 93,3 % de tous les participants, ont généré des CV plus élevés pour tous les types de fibres et tous les secteurs d'activité. Or, un taux d'embauche élevé a été observé tout au long du programme pour ce groupe, générant ainsi un nombre important de compteurs inexpérimentés, ce qui pourrait expliquer la variabilité croissante des résultats. En effet, plus de 71 % de tous les compteurs n'avaient pas d'expérience au moment de leur première participation. Même si la variabilité des compteurs NR augmente légèrement dans le temps, probablement en raison de la moins bonne performance des nouveaux compteurs, une amélioration de la justesse est observée avec l'expérience effective.

Les taux de réussite du programme de l'IRSST (95,1 %) et du programme britannique AFRICA (90-95 %) sont similaires, alors que ceux des programmes espagnol (85-87 %), belge (81 %) et français (85 %) sont moins élevés. Les conditions contribuant à une meilleure performance sont liées au type de fibres (FMA et amosite), au secteur d'activité (textile) et à la densité (> 800 f/mm²).

La variabilité élevée de la numération des fibres témoigne de la nécessité de participer à un programme interlaboratoires afin d'améliorer la performance d'une telle technique d'analyse. La faible performance des compteurs moins expérimentés souligne le besoin de formation supplémentaire. Considérant l'influence significative des variables reliées aux échantillons (type de fibres, secteur d'activité et densité de fibres), le maintien d'une banque d'échantillons variés, représentatifs des milieux de travail, est fortement suggéré dans la continuité du programme de contrôle de la qualité de la numération des fibres de l'IRSST.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	I
SOMMAIRE	III
TABLE DES MATIÈRES	V
LISTE DES TABLEAUX	IX
LISTE DES FIGURES	XI
1. INTRODUCTION	1
2. ÉTAT DES CONNAISSANCES	3
3. OBJECTIFS DE RECHERCHE	5
4. MÉTHODOLOGIE	7
4.1 Échantillons	7
4.1.1 Prélèvements dans les milieux de travail	7
4.1.2 Provenance des échantillons et types de fibres	8
4.1.3 Constitution de la banque d'échantillons du programme.....	8
4.1.4 Détermination de la valeur cible	8
4.1.5 Critères de classification de la performance des compteurs	9
4.2 Compteurs	9
4.2.1 Répartition des compteurs selon leur affiliation	9
4.2.2 Évolution du nombre de compteurs dans le temps	10
4.2.3 Répartition géographique des compteurs.....	11
4.2.4 Répartition des compteurs selon le genre	11
4.2.5 Répartition des compteurs – référence et non-référence	12
4.2.6 Taux de participation des compteurs aux différentes rondes	12
4.2.7 Expérience initiale des compteurs.....	12
4.3 Base de données (résultats 1992-2011)	13
4.3.1 Constitution de la base de données	13
4.3.2 Répartition des données	14
4.4 Analyse et traitement des résultats	17

5. RÉSULTATS	19
5.1 Échantillons	19
5.1.1 Résultats en fonction de la provenance des échantillons (secteurs d'activité)	19
5.1.2 Résultats en fonction du type de fibres et de la mixité	20
5.1.3 Résultats en fonction de la densité	22
5.1.4 Résultats en fonction du secteur d'activité et du type de fibres	23
5.1.5 Évolution des résultats en fonction de la répétition des échantillons	24
5.2 Compteurs	25
5.2.1 Variabilité et justesse des numérations (R et NR)	25
5.2.2 Variabilité et justesse des numérations dans le temps	26
5.2.3 Résultats selon l'expérience des compteurs	28
5.2.4 Résultats selon l'affiliation des compteurs	29
5.3 Relations entre échantillons et compteurs	29
5.3.1 Relation entre la provenance des échantillons (secteurs d'activité) et l'affiliation des compteurs	29
5.3.2 Relation entre le type de fibres et l'affiliation des compteurs	31
5.4 Performance (taux de réussite) en fonction de différents déterminants	32
5.4.1 Distribution des hors limites pour l'ensemble des résultats	32
5.4.2 Distribution des hors-limites selon le secteur d'activité	32
5.4.3 Distribution des hors limites selon le type de fibres et la mixité	33
5.4.4 Distribution des hors limites selon la catégorie de densité	34
5.5 Analyse multivariée	35
6. DISCUSSION	37
6.1 Paramètres pouvant influencer la variabilité et la justesse des résultats de numération des fibres	37
6.1.1 Type de fibres et mixité	38
6.1.2 Secteurs d'activité	39
6.1.3 Densité de fibres	40
6.1.4 Combinaison secteur d'activité et type de fibres	40
6.1.5 Affiliation et expérience des compteurs	41
6.2 Taux de réussite et comparaison entre différents programmes	42
7. CONCLUSION	47
8. RECOMMANDATIONS	49

ANNEXE A : STRUCTURE DE LA BASE DE DONNÉES PERMETTANT	
L'EXPLOITATION DES RÉSULTATS.....	55
ANNEXE B : STATISTIQUES DESCRIPTIVES	57

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Répartition des échantillons selon le secteur d'activité et le type de fibres	8
Tableau 2 : Répartition géographique des 660 compteurs	11
Tableau 3 : Résultats de l'analyse de variance effectuée sur les rangs pour les NR	36
Tableau 4 : Valeurs de référence et limites d'acceptabilité pour différents programmes.....	43
Tableau 5 : Taux de réussite des compteurs du programme de l'IRSST calculés en fonction des critères des différents programmes.....	44

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Système de prélèvement à huit cassettes	7
Figure 2 : Pourcentage des compteurs en fonction de leur affiliation.....	10
Figure 3 : Évolution de la participation des compteurs selon leur affiliation	10
Figure 4 : Répartition des participants au programme en fonction du genre	11
Figure 5 : Taux de participation des compteurs durant le programme	12
Figure 6 : Distribution de l'expérience initiale à l'entrée dans le programme	13
Figure 7 : Répartition des résultats générés par secteur d'activité.....	14
Figure 8 : Répartition des résultats selon le type de fibres (amiante seul ou échantillon mixte) .	15
Figure 9 : Distribution des résultats par catégorie de densité	15
Figure 10 : Répartition des résultats des compteurs de référence et des non-références	16
Figure 11 : Distribution des résultats en fonction de l'affiliation des compteurs	16
Figure 12 : Variabilité moyenne (CV) des résultats (R et NR) en fonction du secteur d'activité .	19
Figure 13 : Justesse des résultats (NR) en fonction du secteur d'activité	20
Figure 14 : Variabilité des résultats (R et NR) en fonction du type de fibres et de la mixité	21
Figure 15 : Justesse des résultats (NR) en fonction du type de fibres et de la mixité	21
Figure 16 : Variabilité des résultats (R et NR) en fonction des catégories de densité	22
Figure 17 : Justesse des résultats (R et NR) en fonction des catégories de densité	23
Figure 18 : Variabilité (haut) et justesse (bas) en fonction du secteur d'activité et du type de fibres pour les NR.....	24
Figure 19 : Densité moyenne pour les répétitions de deux échantillons dans le temps	25
Figure 20 : Variabilité (gauche) et justesse (droite) des résultats pour les 79 rondes (R et NR) 26	
Figure 21 : Évolution de la variabilité des numérations (R et NR) dans le temps.....	27
Figure 22 : Évolution de la justesse des numérations (R et NR) dans le temps.....	27
Figure 23 : Justesse des résultats en fonction de l'expérience effective des compteurs R (haut) et NR (bas)	28

Figure 24 : Variabilité (gauche) et justesse (droite) des numérations (R et NR) selon l'affiliation des compteurs	29
Figure 25 : Variabilité (haut) et justesse (bas) des résultats (NR) selon la provenance des échantillons et l'affiliation des compteurs	30
Figure 26 : Variabilité (haut) et justesse (bas) des résultats (NR) selon le type de fibres et l'affiliation des compteurs	31
Figure 27 : Pourcentage des résultats hors limites (inférieure et supérieure) et distribution des résultats en fonction du ratio de densité (NR/R) pour tous les résultats des NR ...	32
Figure 28 : Distribution des résultats hors limites (inférieure et supérieure) en fonction du secteur d'activité	33
Figure 29 : Distribution (%) des résultats hors limites (inférieure et supérieure) selon le type de fibres et la mixité	34
Figure 30 : Distribution (%) des résultats hors limites (inférieure et supérieure) en fonction de la densité	34
Figure 31 : Ratio des résultats hors limites (inférieure/supérieure) en fonction de la densité	35

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AAT : Asbestos Analysts Testing Proficiency Program (AIHA, États-Unis)

AFRICA : Asbestos Fibre Regular Informal Counting Arrangement (Royaume-Uni)

AIHA : American Industrial Hygiene Association

ANOVA : Analyse de variance

CSTC : Code de sécurité pour les travaux de construction

CV : Coefficient de variation

FMA : Fibres minérales artificielles

HSE : Health and Safety Executive (Royaume-Uni)

IHPAT-AIHA : Industrial Hygiene Proficiency Analytical Testing Program de l'AIHA

MCA : Matériaux contenant de l'amiante

MOCP : Microscopie optique à contraste de phase

NIOSH : National Institute for Occupational Safety and Health (États-Unis)

NR : Non-référence (compteurs)

OMS : Organisation mondiale de la Santé

PAT : Proficiency Analytical Testing program

PICC-FA : Programa Interlaboratorios de Control de Calidad de Fibras de Amianto (Espagne)

R : Référence (compteur)

RICE : Regular Inter-laboratory Counting Exchange (Royaume-Uni)

RSST : Règlement sur la santé et la sécurité du travail

1. INTRODUCTION

Au Québec, le Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST, 2014) et le Code de sécurité pour les travaux de construction (CSTC, 2014) régissent les normes à respecter pour assurer la protection de la santé des travailleurs. Ces deux règlements requièrent des prélèvements réguliers selon le *Guide d'échantillonnage des contaminants de l'air en milieu de travail* (IRSST, 2012) et exigent que les numérations des fibres soient effectuées en accord avec la méthode IRSST 243 (IRSST, 1995) ou une méthode dont la précision est équivalente.

Les concentrations de fibres aéroportées dans les milieux de travail sont mesurées à partir de l'échantillonnage de l'air sur des membranes filtrantes, qui sont ensuite montées sur lames afin d'être analysées par microscopie optique à contraste de phase (MOCP), une méthode rapide et économique. Comparativement aux autres méthodes d'analyse des contaminants en milieu de travail, la numération des fibres comporte une très grande variabilité, qui peut être limitée par de bonnes pratiques de contrôle de la qualité (Abell *et al.*, 1989; Crawford, 1992; Ogden *et al.*, 1986; Tombes et Calpin, 1988; Walton, 1982). La méthode québécoise (IRSST, 1995), tout comme les méthodes internationales de l'Organisation mondiale de la Santé (OMS, 1998), du Health and Safety Executive (HSE, 1995) et du National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH, 2003), exige que les laboratoires (ou les compteurs) qui effectuent la numération des fibres dans l'air participent à un programme de contrôle de la qualité interlaboratoires sur des échantillons représentatifs de leurs activités afin d'évaluer le degré de fiabilité de leurs résultats.

Depuis 1992, l'IRSST a instauré un tel programme de contrôle de la qualité pour la numération des fibres avec des échantillons contenant de l'amiante (amosite ou chrysotile), des fibres minérales artificielles (FMA) et des échantillons mixtes (chrysotile et FMA ; chrysotile et gypse fibreux). Une des particularités du programme de l'IRSST réside dans le fait que les échantillons distribués aux compteurs ont été prélevés dans des milieux de travail réels et sont donc représentatifs des activités d'analyse normales (Dion *et al.*, 2000). Les échantillons proviennent de l'industrie du textile, des mines, de chantiers d'enlèvement de matériaux contenant de l'amiante (MCA), d'une industrie de fabrication de freins et du démantèlement de fours industriels.

Les compteurs participants reçoivent une série de quatre échantillons tous les trimestres afin de déterminer leur justesse et leur variation par rapport à une valeur cible, déterminée par un groupe de compteurs de référence. Après une réussite à trois échanges consécutifs, selon des critères spécifiques, le compteur reçoit un certificat confirmant sa performance qui sera valide tant qu'il participera et satisfera aux exigences du programme¹.

¹ <http://www.irsst.qc.ca/cq-fibres.html>

2. ÉTAT DES CONNAISSANCES

Le comptage de fibres est subjectif et la qualité du résultat est *et al t* influencée notamment par la perception du compteur au moment de l'analyse. En effet, le comptage repose sur des décisions de l'analyste qui doit considérer ou non une fibre selon des critères bien définis. L'acuité visuelle du compteur, sa formation, sa motivation et son expérience sont des paramètres importants dans la qualité de l'analyse (Harper et Bartolucci, 2003; Harper., 2012; Paik *et al.*, 1994). Un ajustement optimal du microscope (calibration) est crucial, à chaque jour de comptage, tel qu'exigé par les méthodes officielles de numération d'analyses (Grzebyk *et al.*, 2005; Harper *et al.*, 2009; Pang et Harper, 2008).

La qualité des résultats de la numération de fibres, mesurée par la variabilité ou coefficient de variation (CV) et le biais (ou la justesse), peut dépendre de plusieurs paramètres liés aux échantillons ou aux compteurs. Chacun de ces facteurs peut avoir un effet sur le compte final. Outre les critères dimensionnels des fibres (longueur (l) > 5 µm; diamètre (d) < 3 µm; l/d > 3:1), d'autres aspects du comptage ont déjà été investigués, incluant les types de fibres, la morphologie ou forme des fibres (asbestiforme et fragments de clivage), le chevauchement des fibres, des fibres en faisceaux, la présence importantes de particules, etc. (Abell *et al.*, 1989; Baron, 2003).

Des erreurs dues au type de fibres peuvent avoir un impact sur la mesure de l'exposition. Ainsi, pour les fibres de chrysotile dont le diamètre peut être près ou inférieur à la limite de résolution du microscope optique (0,2 µm), certaines d'entre elles ne seront pas visibles et la concentration sera donc sous-estimée (biais négatif). Par contre, pour l'amosite, les erreurs seraient dues à des mesures incorrectes de la longueur des fibres trop près de 5 µm; la variabilité est augmentée et le biais peut être négatif ou positif. Ces deux types d'erreurs peuvent être limités par la formation des compteurs avec des lames de références dont la densité est connue (Pang et Harper, 2008).

Lorsqu'un compteur procède à des numérations répétées sur une même lame, il peut évaluer sa capacité à reproduire ce résultat et déterminer sa variabilité (coefficient de variation – CV intracompteur). Si le même exercice est réalisé avec des compteurs d'un même laboratoire ou d'autres laboratoires, le CV intralaboratoire et le CV interlaboratoires peuvent aussi être déterminés. La variabilité d'un résultat de numération de fibres sur un même échantillon augmente selon : $CV_{\text{intracompteur}} < CV_{\text{intralaboratoire}} < CV_{\text{interlaboratoires}}$. La variabilité intracompteur correspond généralement à la moitié de la variabilité interlaboratoires. Pour des échantillons optimalement chargés (100 – 1300 f/mm²) et avec un faible fond particulaire, le CV_{intracompteur} peut être aussi faible que 10 % (Baron et Shulman, 1987). Un CV_{intralaboratoire} de 17-22 % a été rapporté pour des laboratoires performants. La méthode NIOSH 7400 donne une valeur estimée très conservatrice pour le CV_{interlaboratoires} de l'ordre de 45 % (Abell *et al.*, 1989). Cette dernière valeur est d'ailleurs utilisée dans les situations où le CV_{interlaboratoires} n'est pas connu (NIOSH, 2003).

La qualité de la numération des fibres est toujours un sujet de préoccupation sur le plan de la surveillance de l'exposition aux fibres d'amiante (NIOSH, 2011). Malgré sa variabilité importante, la méthode de numération des fibres en MOCF est encore très utilisée en routine, internationalement. Cependant, un contrôle de la qualité efficace ainsi que la participation à un

programme d'échanges interlaboratoires permettent de diminuer la variabilité de cette méthode et d'améliorer la performance des compteurs (Crawford, 1992).

Plusieurs pays ont des obligations d'accréditation tandis que d'autres ne requièrent qu'une participation à un programme d'échanges interlaboratoires. Des programmes nationaux et internationaux de contrôle de la qualité de la numération des fibres existent avec différents types d'échantillons et des critères variés d'évaluation des laboratoires (Arroyo et Rojo, 1998; Crawford, 1992; Crawford et Cowie, 1984; Kauffer, 1992; Schlecht et Shulman, 1986). Les programmes les plus connus sont : l'Asbestos Fibre Regular Informal Counting Arrangement (AFRICA) et le Regular Inter-laboratory Counting Exchange (RICE) (Royaume-Uni), le Proficiency Analytical Testing program PAT et le Asbestos Analysts Testing Proficiency Program (AAT) de l'American Industrial Hygiene Association (AIHA, États-Unis), le Programa Interlaboratorios de Control de Calidad de Fibras de Amianto (PICC-FA) de l'Espagne, le programme français et le programme belge. Leurs différences reposent principalement sur les critères de détermination des valeurs de référence et les limites de performance.

3. OBJECTIFS DE RECHERCHE

L'objectif principal de la présente activité de recherche était de faire le bilan du programme de contrôle de la qualité de la numération de fibres de l'IRSST par l'exploitation de la base de données générée de 1992 à 2011. Pour ce faire, l'objectif spécifique était de mettre en évidence, par une analyse longitudinale, les différents déterminants pouvant contribuer à la variabilité de la numération des fibres.

4. MÉTHODOLOGIE

4.1 Échantillons

4.1.1 Prélèvements dans les milieux de travail

Des échantillons représentatifs de différents secteurs industriels ont été prélevés, conformément au *Guide d'échantillonnage des contaminants de l'air* (IRSST, 2012). Un système de prélèvement muni d'un dispositif de séparation de débit utilisant des orifices critiques (figure 1) a permis la génération d'une série de huit à douze cassettes, munies de membranes filtrantes, en parallèle. Chaque série de prélèvements donnait lieu à un maximum de 32 à 48 lames équivalentes, correspondant à des portions de membranes montées de façon permanente (Dion *et al.*, 2000). L'échantillonnage a été effectué à l'aide de pompes à haut débit (de type Gilian, modèle AirCon 520AC, 0 à 20 L/min ou modèle AirCon2, 0 à 30 L/min).

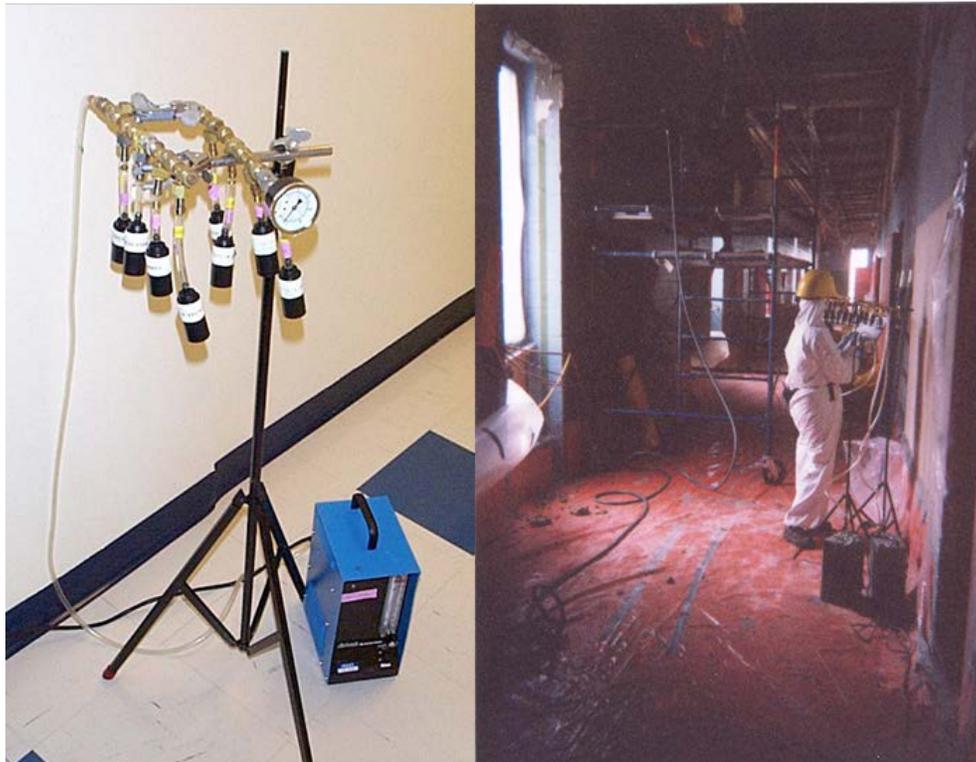


Figure 1 : Système de prélèvement à huit cassettes

Un contrôle de la qualité des échantillons a été réalisé préalablement par les compteurs de l'IRSST. Les échantillons, divisés en quarts de membrane, et montés de façon permanente sur lames, ont été analysés pour vérifier l'homogénéité du dépôt de poussières et en estimer les densités de fibres afin de s'assurer que les résultats respectent les limites d'applicabilité de la méthode de numération IRSST 243 (entre 100 et 1300 f/mm²).

4.1.2 Provenance des échantillons et types de fibres

Les échantillons, qui ont circulé pendant la période couverte par cette étude, ont été prélevés dans cinq secteurs d'activité : textile (chrysotile et fibres minérales artificielles - FMA) ; mines d'amiante (chrysotile); produits de friction/fabrication de freins (chrysotile); chantiers d'enlèvement de MCA (chrysotile et amosite); et démantèlement de fours industriels (FMA – fibres céramiques). Certains de ces échantillons contenaient plus d'un type de fibres. Cette mixité se retrouve exclusivement dans des échantillons contenant du chrysotile, en présence de FMA ou de gypse fibreux. La répartition des échantillons selon le secteur d'activité, le type de fibres et la mixité est présentée au tableau 1.

Tableau 1 : Répartition des échantillons selon le secteur d'activité et le type de fibres

Secteur d'activité	Type de fibres et mixité					Total
	Chrysotile seul	Amosite seul	FMA seul	Chrysotile + FMA	Chrysotile + gypse	
Démantèlement			4			4
Enlèvement	4	26		4	4	38
Friction/freins	18					18
Mines	19					19
Textile	33		11	9		53
Total	74	26	15	13	4	132

4.1.3 Constitution de la banque d'échantillons du programme

Ces 132 échantillons ont permis de constituer une banque de lames qui a été distribuée, de mai 1992 à novembre 2011, aux participants, à raison de quatre échantillons par ronde. Un compteur qui aurait participé aux 79 rondes de ce bilan aurait fourni une somme globale de 316 résultats.

Soixante-trois (63) échantillons ont été utilisés une seule fois tandis que 69 ont été repris de deux à 14 fois dans différentes rondes. Ainsi, plus de 50 % des échantillons ont été analysés au moins à deux reprises par les compteurs.

4.1.4 Détermination de la valeur cible

La valeur cible d'un échantillon est déterminée par 12 compteurs qui ont été sélectionnés pour constituer le groupe de référence (R). Pour chacun des échantillons d'une ronde, la moyenne arithmétique des résultats des compteurs R, exprimée en densité de fibres (f/mm²), l'écart-type et le coefficient de variation ont été calculés, puis pris en compte à des fins de comparaison pour les autres participants (NR). Notons que les compteurs R et les compteurs NR participaient au programme en même temps et que tous les résultats, R et NR, étaient traités simultanément.

Le groupe de référence, dont les compteurs étaient affiliés à différents secteurs d'activité devait rencontrer certaines exigences, dont au moins deux années de participation réussie à un programme d'échanges interlaboratoires. De plus, les résultats moyens des compteurs R devaient se trouver entre 0,75 et 1,33 de la valeur cible avec un coefficient de variation intracompteur inférieur ou égal (\leq) à 30 % pour la présente série et un coefficient de variation intracompteur cumulatif \leq 25 %. Ces critères pour le groupe de référence étaient similaires à ceux utilisés par le système interlaboratoires français (Kauffer, 1992). Autant que possible, les mêmes personnes devaient être conservées afin de constituer un groupe de référence stable dans le temps.

4.1.5 Critères de classification de la performance des compteurs

Chaque envoi consistait en une série de quatre échantillons préférablement de densités différentes, et provenant de milieux identiques ou mixtes. Les résultats des compteurs étaient comparés à la valeur cible et étaient exprimés sous la forme d'un ratio de densité ($\text{densité}_{\text{compteur}}/\text{densité}_{\text{référence}}$). Le compteur devait obtenir des résultats se situant entre 0,55 et 2,20 inclusivement de la valeur cible pour au moins trois échantillons sur quatre. Cette plage d'acceptabilité était similaire à celle du programme de contrôle de la qualité britannique AFRICA (Crawford, 1992). La reconnaissance de la performance du compteur, obtenue après sa réussite à trois envois consécutifs, était maintenue tant qu'il satisfaisait à ces exigences. Les modalités de fonctionnement du programme sont décrites sur le site internet de l'IRSST².

Le présent rapport ne discutera que des critères de performance reliés aux échantillons individuels et ne portera donc pas sur la réussite à une ronde ni sur la reconnaissance de la performance des compteurs.

4.2 Compteurs

Un total de 660 participants ont été inscrits à une ou plusieurs des 79 rondes du programme, tout au long de la période couverte par ce bilan.

4.2.1 Répartition des compteurs selon leur affiliation

Les participants provenaient de trois secteurs différents : des compteurs de firmes privées ou des consultants (C), des compteurs des mines (M) et des compteurs gouvernementaux (G) - laboratoires publics (IRSST, ministère de l'Environnement et de la Faune³) et laboratoires universitaires. La figure 2 présente la répartition des compteurs selon leur affiliation.

² <http://www.irsst.qc.ca/cq-fibres.html>

³ Maintenant appelé ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC)

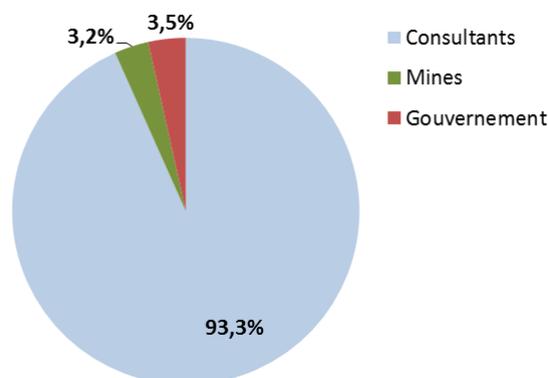


Figure 2 : Pourcentage des compteurs en fonction de leur affiliation

4.2.2 Évolution du nombre de compteurs dans le temps

Entre 1992 et 2011, le nombre de participants à chaque ronde est passé de 31 à 219, répartis dans 88 laboratoires ou entreprises. Le nombre de compteurs est relativement constant dans le temps pour les secteurs des laboratoires gouvernementaux (ou universitaires) et des mines. Par contre, une augmentation importante du nombre de compteurs est observée dans le secteur des firmes privées (consultants) œuvrant principalement dans le domaine de la surveillance de chantier lors de travaux d'enlèvement de MCA.

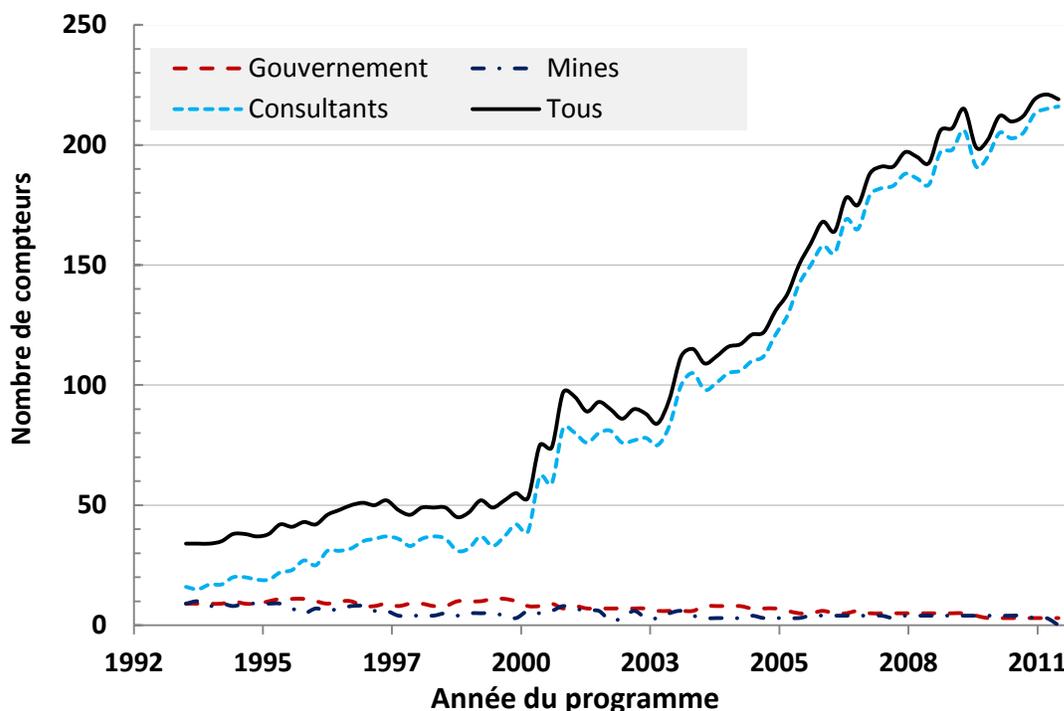


Figure 3 : Évolution de la participation des compteurs selon leur affiliation

4.2.3 Répartition géographique des compteurs

Le tableau 2 présente la répartition géographique de l'ensemble des participants. Au début du programme (mai 1992), la majorité des inscriptions provenait du Québec (93,5 %) et le reste de l'Ontario. À la fin de 2011, 53 % des participants provenaient de l'extérieur du Québec, dont 39 % de l'Ontario. Sept participants des États-Unis se sont joints au programme pour une courte période. Pour l'ensemble du programme, plus de la moitié des inscriptions provenait de l'extérieur du Québec.

Tableau 2 : Répartition géographique des 660 compteurs

Provenance	Nombre de compteurs
Québec	322
Ontario	219
Nouvelle-Écosse	50
Alberta	20
Manitoba	17
Colombie-Britannique	12
États-Unis	7
Nouveau-Brunswick	6
Terre-Neuve	7
Total	660

4.2.4 Répartition des compteurs selon le genre

La figure 4 présente la répartition des 660 participants au programme selon leur genre.

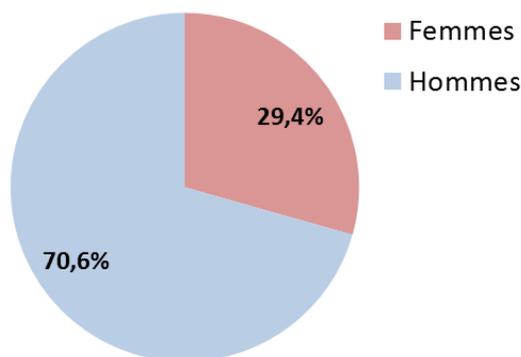


Figure 4 : Répartition des participants au programme en fonction du genre

4.2.5 Répartition des compteurs – référence et non-référence

Parmi les 660 participants, 52 ont été retenus pour leur compétence afin de constituer le groupe des 12 compteurs R, à une ou plusieurs rondes. Ces compteurs ont déterminé la valeur cible des échantillons des différentes rondes à laquelle les résultats des autres compteurs, NR, étaient comparés.

4.2.6 Taux de participation des compteurs aux différentes rondes

La figure 5 montre le taux de participation de l'ensemble des compteurs inscrits au programme, entre 1992 et 2011. Près de 75 % d'entre eux (492/660) n'ont participé qu'à 20 % ou moins des rondes tandis que moins de 2 % des participants ont fourni des résultats pour plus de 80 % des rondes. Seulement trois compteurs sur les 660 ont été inscrits à toutes les rondes ciblées dans le présent bilan.

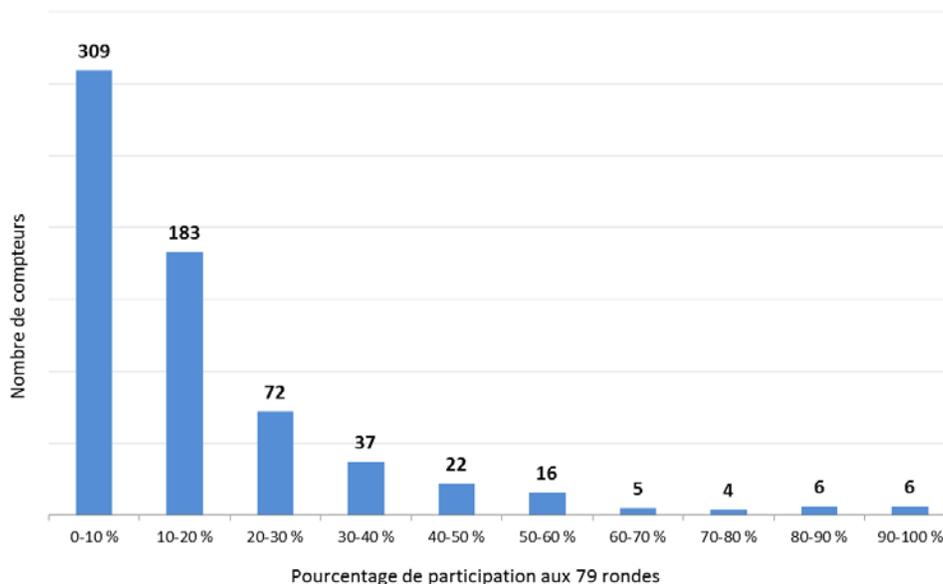


Figure 5 : Taux de participation des compteurs durant le programme

Les compteurs R ont eu une durée moyenne de participation de 14,5 années comparativement à 6,2 années pour les compteurs NR. La durée moyenne de participation pour tous les compteurs était de 7,2 années.

4.2.7 Expérience initiale des compteurs

L'expérience du compteur témoigne généralement de sa connaissance et de sa maîtrise de la technique analytique. Le nombre d'années d'expérience dans la numération des fibres était documenté lors de l'inscription du participant. La figure 6 présente la distribution de l'expérience

des compteurs. Plus de 71 % d’entre eux (470/660) n’avaient pas d’expérience au moment de leur première participation.

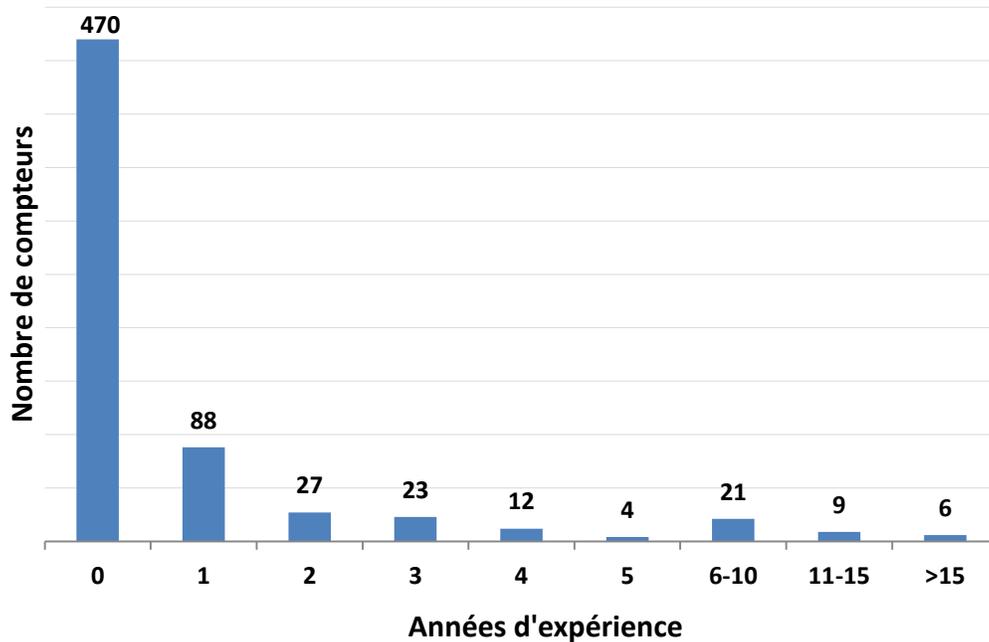


Figure 6 : Distribution de l’expérience initiale à l’entrée dans le programme

4.3 Base de données (résultats 1992-2011)

4.3.1 Constitution de la base de données

Les données provenant du programme de contrôle de qualité de la numération des fibres ont été consignées dans une base de données de type PROGRESS à la Direction des ressources informatiques de l’IRSST. Chacune des tables de cette base de données a été exportée dans autant de tables EXCEL. Certaines modifications ont été nécessaires. Par exemple, des champs « dates » avec des erreurs de format (texte plutôt que nombre), des lignes dont des informations étaient manquantes, des séries sans résultats, ont dû être corrigés, complétés et uniformisés afin de s’assurer de leur utilisation adéquate. De plus, les résultats (densités et rapports à la valeur cible) n’étaient pas directement liés aux échantillons et à leurs caractéristiques. Aussi, il a fallu générer, par programmation, une table de l’ensemble des résultats (32 777 enregistrements) et une table intermédiaire pour créer le chaînon manquant entre chacun des résultats et l’échantillon. Cela a permis de relier les caractéristiques des échantillons (secteurs d’activité, type de fibres, mixité de fibres et densité de fibres) et les caractéristiques des compteurs (statut du compteur - référence ou non-référence, affiliation du compteur, expérience et taux de participation au programme).

De plus, des données pertinentes sur les échantillons et les compteurs, en version papier ou électronique, n’avaient pas toutes été colligées dans des tables depuis le début du programme. La majorité de ces données se trouvaient dans les archives conservées à l’extérieur des murs de

l'IRSST et ont été rapatriées dans nos locaux. Elles ont été insérées manuellement et mises en relation avec les tables de la base de données principale.

Les tables corrigées ou nouvelles ont par la suite été exportées dans ACCESS et des relations entre elles ont été construites en appliquant, lorsque cela était possible, un concept d'intégrité référentielle. Une table intermédiaire permettant le lien entre les rondes et les échantillons a également été construite afin d'analyser les caractéristiques des échantillons, les caractéristiques des compteurs et chacun des résultats individuels. La structure de cette base de données se trouve à l'annexe A.

L'étude de l'influence des différents déterminants liés aux échantillons et aux compteurs a, par la suite, été réalisée en procédant à des requêtes spécifiques et à des analyses croisées, après exportations dans EXCEL, en appelant des combinaisons particulières de ces déterminants.

4.3.2 Répartition des données

À partir des 32 777 données colligées dans la base de données, il a été possible de documenter la distribution des résultats en fonction des différentes caractéristiques liées aux échantillons et aux compteurs.

4.3.2.1 Échantillons

4.3.2.1.1 Secteurs d'activité

Les 32 777 résultats générés à partir des 132 échantillons ayant circulé dans les différentes rondes sont répartis selon leur provenance, à la figure 7. Le secteur de l'enlèvement de MCA est prépondérant.

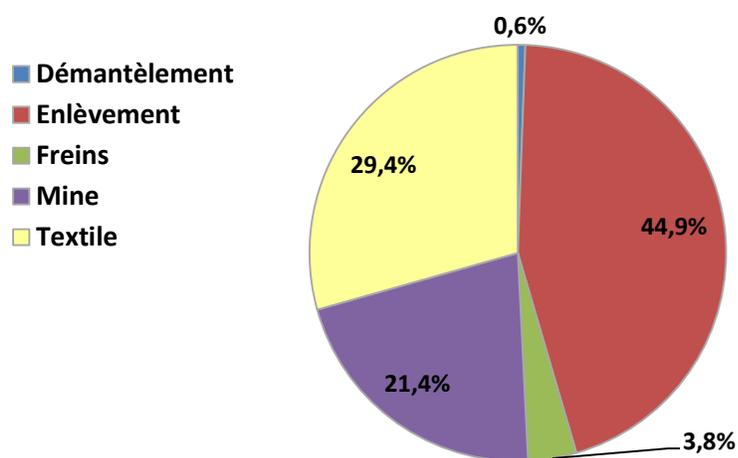


Figure 7 : Répartition des résultats générés par secteur d'activité

4.3.2.1.2 Type de fibres et mixité

La figure 8 montre la répartition des données pour le type de fibres, en fonction d'un seul type de fibres ou en mélange avec une autre fibre (mixité). Ainsi, près de 74 % des résultats provenaient d'échantillons ne contenant qu'un seul type de fibres (chrysotile, amosite ou FMA).

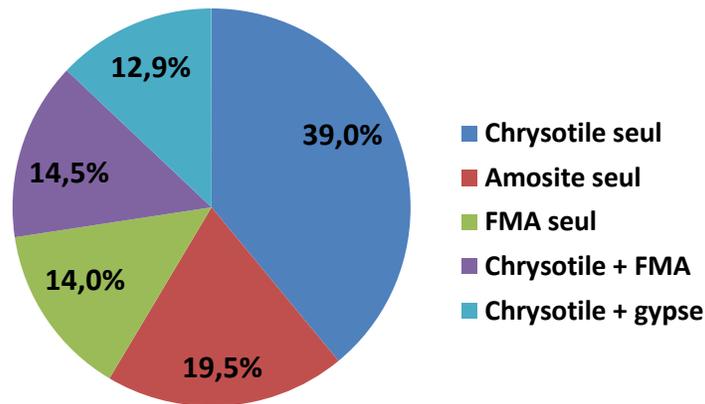


Figure 8 : Répartition des résultats selon le type de fibres (amiante seul ou échantillon mixte)

4.3.2.1.3 Catégories de densité

La méthode IRSST 243 recommande des densités optimales de fibres s'échelonnant de 100 à 1300 f/mm². La figure 9 montre la distribution de l'ensemble des résultats en fonction de cinq catégories de densité.

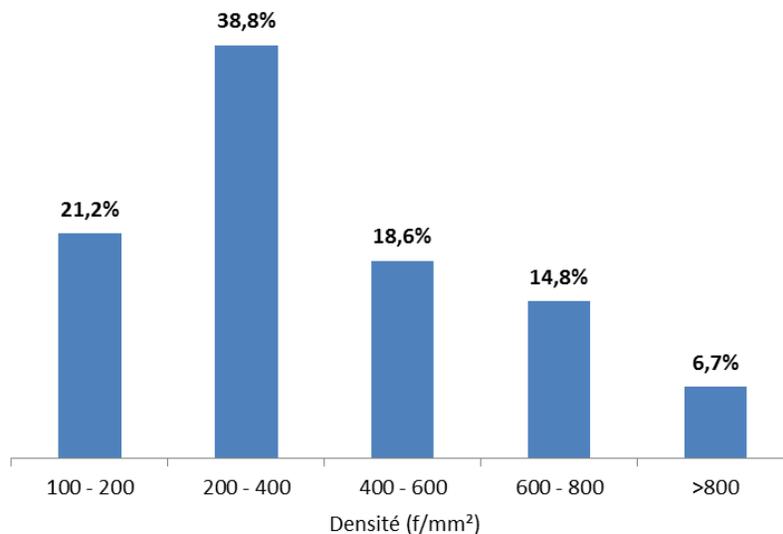


Figure 9 : Distribution des résultats par catégorie de densité

4.3.2.2 Compteurs

4.3.2.2.1 Données des compteurs - références et non-références

À chaque ronde, un nombre fixe de 12 compteurs de référence s’ajoutait aux autres participants (non-référence) dont le nombre était variable. Comme présenté à la figure 10, près de 12 % des 32 777 résultats ont été produits par les compteurs de référence.

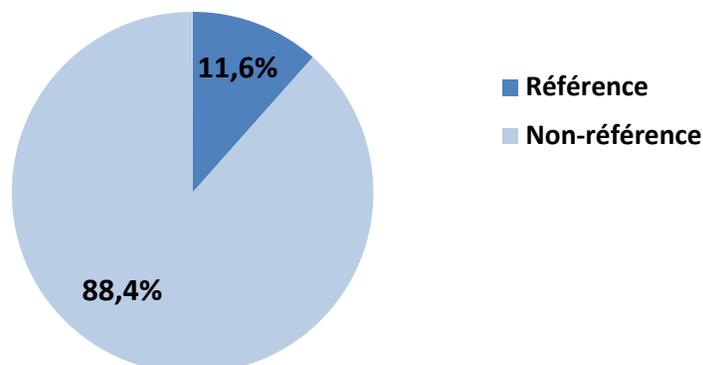


Figure 10 : Répartition des résultats des compteurs de référence et des non-références

4.3.2.2.2 Données selon l’affiliation des compteurs

La figure 11 présente la répartition des résultats générés par les compteurs en fonction de leur affiliation : secteur des mines (M), laboratoires gouvernementaux (G) ou entreprises privées ou firmes de consultants (C). Près de 88 % des résultats proviennent de compteurs affiliés à des entreprises de consultants.

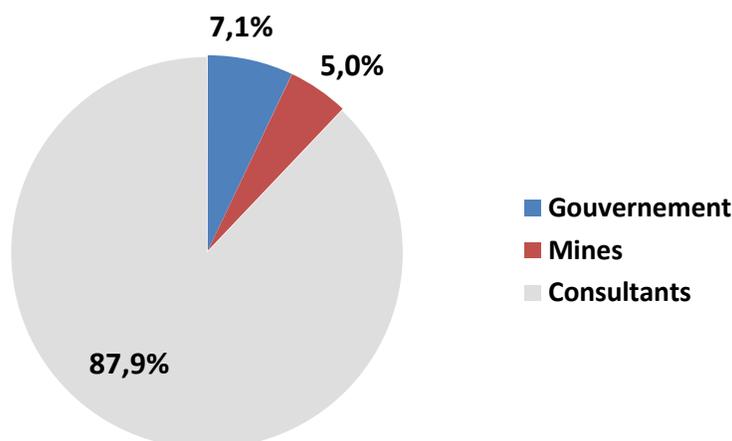


Figure 11 : Distribution des résultats en fonction de l’affiliation des compteurs

4.4 Analyse et traitement des résultats

À partir des données colligées dans la base de données, les résultats ont été exploités en fonction de différents paramètres reliés aux échantillons (provenance ou secteur d'activité, type de fibres, mixité, densité de fibres et répétition des échantillons) et aux compteurs (statut – référence ou non-référence, affiliation et expérience). Pour ce faire, chacune des 32 777 données est représentée par un ratio qui provient du résultat d'un compteur, soit une densité de fibres mesurée, divisé par une valeur cible, soit la densité moyenne des douze compteurs de référence ($\text{ratio} = \text{densité}_{\text{NR}}/\text{densité}_{\text{R}}$), pour un échantillon donné à une ronde donnée. En d'autres mots, le ratio représente la justesse d'un résultat par rapport à une valeur de référence. Les ratios moyens de densité pour des compteurs de référence sont toujours près de l'unité tandis que ceux des autres compteurs sont variables.

La variabilité, ou le coefficient de variation (CV), a été calculée pour les résultats des compteurs, NR et R, selon : écart-type des ratios divisé par la moyenne des ratios. Les résultats ont été étudiés pour les échantillons (secteur d'activité, type de fibres (et mixité) et densité de fibres) et les compteurs (affiliation et expérience), un paramètre à la fois, mais aussi en fonction de couples de paramètres (secteur d'activité et type de fibres, provenance des échantillons et affiliation des compteurs, type de fibres et affiliation des compteurs).

La distribution des valeurs de ratios a été analysée visuellement à l'aide de boîtes à moustaches (« boxplots ») (Annexe B) et le test de Kolmogorov-Smirnov a été appliqué pour en déterminer la normalité. Une analyse non paramétrique de la variance des rangs (Thomas *et al.*, 1999) a ensuite été effectuée après exclusion des données des compteurs de référence afin de mettre en évidence les paramètres significatifs pouvant être déterminants dans la performance des compteurs « non-référence ». Cette analyse consiste en trois étapes. Après avoir ordonné des variables indépendantes (secteur d'activité, type de fibres, catégorie de densité de l'échantillon, affiliation des compteurs) et une variable dépendante (ratio des densités de fibres (NR/R)), une analyse de variance (ANOVA) a été effectuée sur les rangs des variables ordonnées et la signification statistique a été vérifiée sur une table de Chi deux à l'aide de la statistique L , où $L = [(N-1) * (\text{somme des carrés de la variable} / \text{somme des carrés totale})]$. Les logiciels Excel (de la suite Microsoft Office 2010) et SPSS® version 22.0.0.0 (*Statistical Package for the Social Sciences*, un produit IBM®) ont été utilisés pour les analyses statistiques.

5. RÉSULTATS

La distribution des ratios ($\text{densité}_{\text{NR}}/\text{densité}_{\text{R}}$), sous la forme de boîtes à moustaches (« boxplots »), ainsi que les statistiques descriptives (nombre de résultats, moyenne arithmétique, écart-type et coefficient de variation), sous la forme de tableaux, sont présentées à l'annexe B, pour différents paramètres reliés aux échantillons et aux compteurs.

5.1 Échantillons

5.1.1 Résultats en fonction de la provenance des échantillons (secteurs d'activité)

La figure 12 présente la variabilité moyenne en fonction des différents milieux de prélèvement (secteurs d'activité), pour les compteurs de référence et pour les autres compteurs. Pour l'ensemble des résultats, la moyenne des CV du groupe R a été de 17 % comparativement à 35 % pour les NR. Les CV les plus faibles ont été observés avec des échantillons du secteur du textile (R et NR). Le secteur du démantèlement de fours industriels a montré la variabilité la plus importante (59 %) chez les compteurs NR, trois fois plus élevée que chez les compteurs R (18 %). Notons que pour ce secteur d'activité, le nombre de résultats était relativement faible (126 NR et 61 R). Ces échantillons ont été comptés au tout début du programme (en 1994) lorsque le nombre de participants total était restreint (50 NR). Cela peut avoir eu un impact sur la variabilité des résultats.

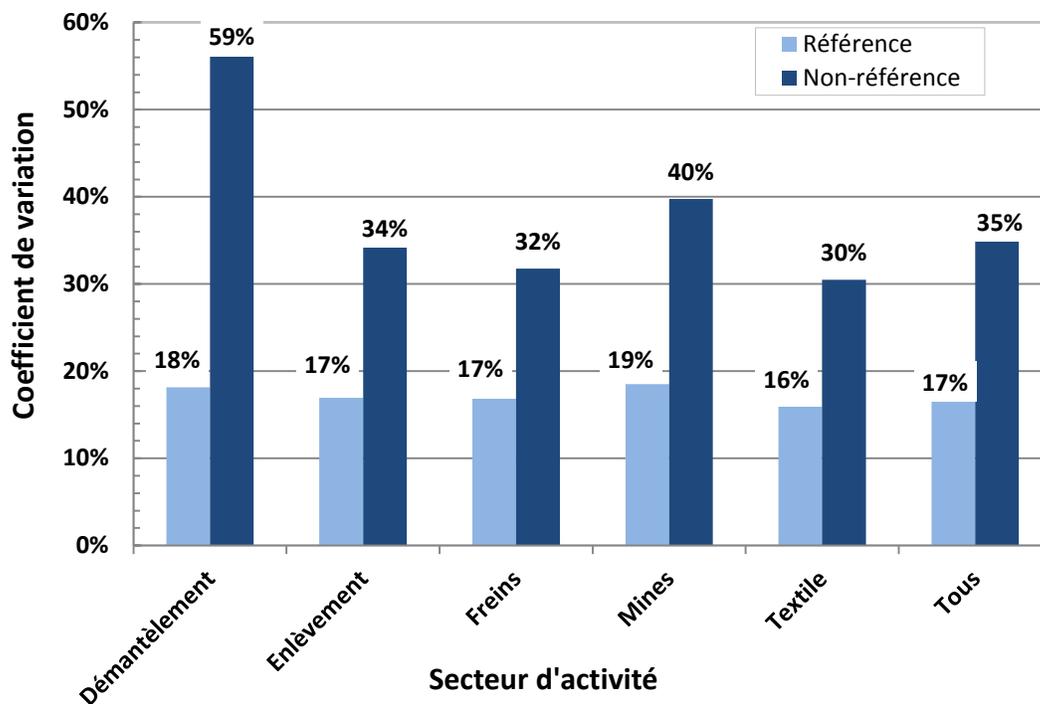


Figure 12 : Variabilité moyenne (CV) des résultats (R et NR) en fonction du secteur d'activité

La figure 13 présente la justesse des résultats, exprimée par la moyenne des ratios (d_{NR}/d_R) déterminés en fonction des différents secteurs d'activité. Les ratios pour les compteurs de référence sont toujours autour de l'unité (ligne pointillée) tandis que les ratios des compteurs NR ont varié de 1,02 à 1,12, démontrant un biais positif, ou une surestimation des résultats, qui est plus important pour les secteurs des mines et du démantèlement.

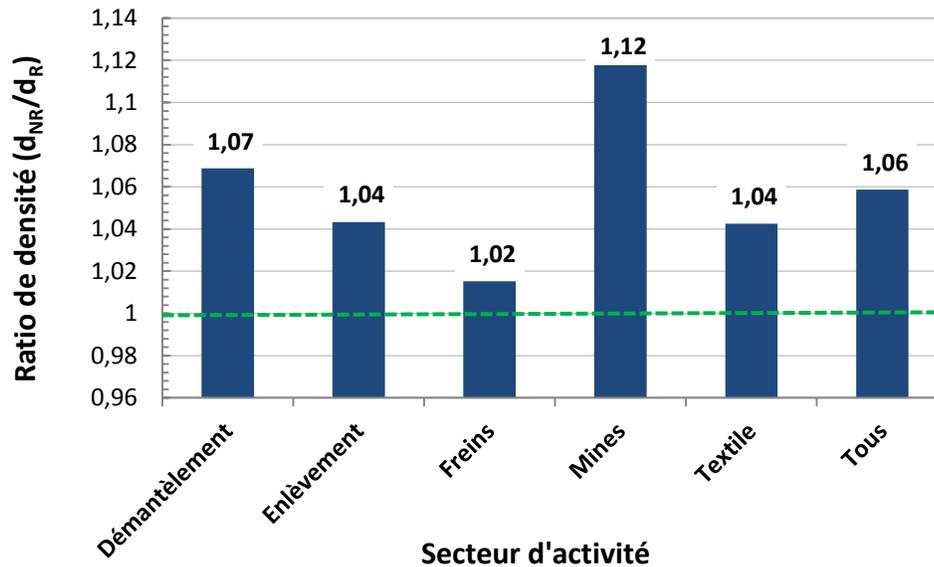


Figure 13 : Justesse des résultats (NR) en fonction du secteur d'activité

5.1.2 Résultats en fonction du type de fibres et de la mixité

La figure 14 présente la variabilité des résultats en fonction du type de fibres (chrysotile, amosite et FMA seuls ainsi qu'en mixité - chrysotile + FMA et chrysotile + gypse fibreux). Pour les différents types de fibres, seuls ou en mélange, les moyennes des CV du groupe référence varient relativement peu, de 15 à 22 %, comparativement à celles des compteurs NR qui sont près de deux fois plus élevées, soit de 27 à 40 %. Les CV les plus élevés ont été observés pour des échantillons contenant du chrysotile, seul ou en mélange, tant pour les compteurs R que pour les compteurs NR. Une variabilité moindre est observée pour les échantillons contenant de l'amosite (R : 15 % ; NR : 27 %) et ceux contenant seulement des FMA (R : 15 % ; NR : 29 %).

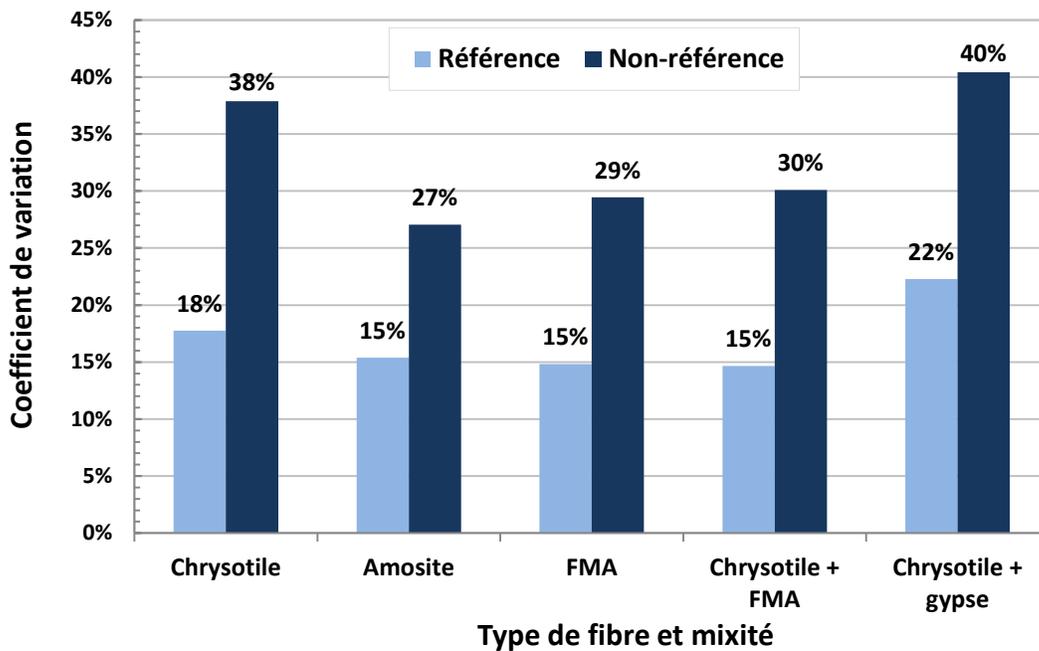


Figure 14 : Variabilité des résultats (R et NR) en fonction du type de fibres et de la mixité

La figure 15 présente les ratios moyens (d_{NR}/d_R) calculés en fonction du type de fibres et de la mixité. Les résultats pour les échantillons mixtes contenant du chrysotile et du gypse fibreux ont été moins justes avec un biais positif de 15 %, suivis par ceux des FMA seules avec un biais de 10 %, tandis que les échantillons mixtes contenant du chrysotile avec FMA ont été sous-estimés (biais négatif de 3 %). Les échantillons avec amosite ont donné le moindre biais (1 %).

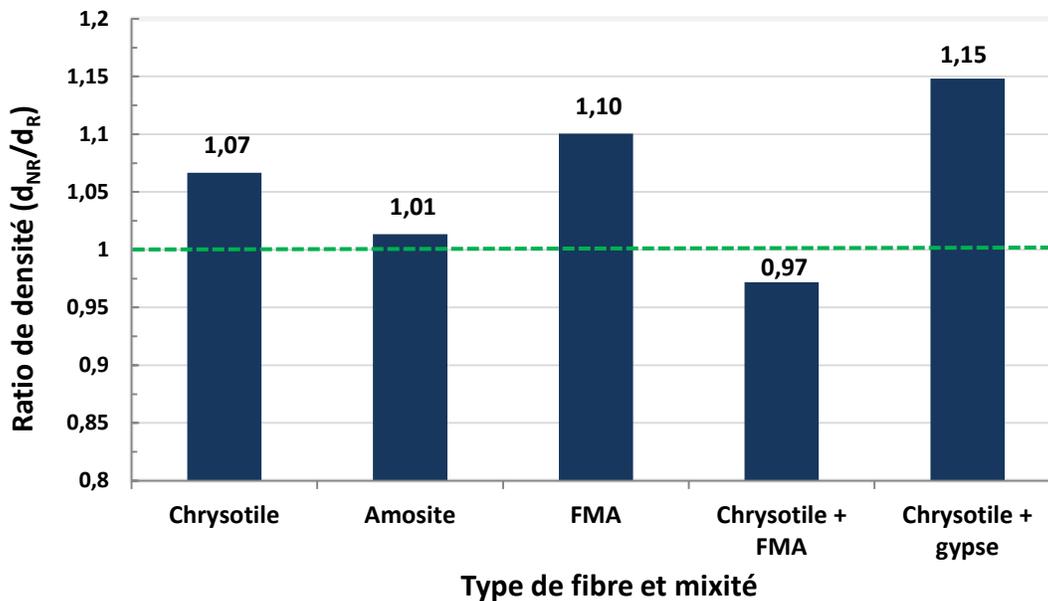


Figure 15 : Justesse des résultats (NR) en fonction du type de fibres et de la mixité

5.1.3 Résultats en fonction de la densité

La figure 16 présente les CV moyens en fonction de la densité des fibres. Pour les différentes gammes de densité, la moyenne des CV du groupe R varie peu, de 15 à 18 %, comparativement à la moyenne des compteurs NR qui est jusqu'à deux fois plus élevée, soit de 25 à 39 %. La variabilité des comptes des NR est nettement plus élevée pour les échantillons de faibles densités.

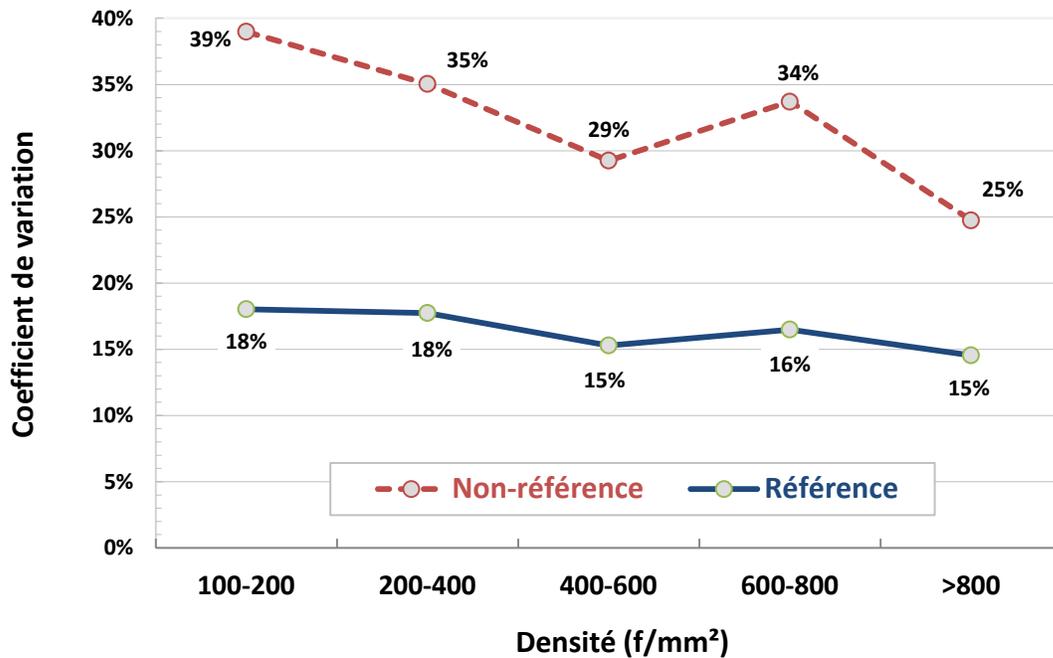


Figure 16 : Variabilité des résultats (R et NR) en fonction des catégories de densité

Les moyennes des ratios en fonction des catégories de densité sont présentées à la figure 17. Les rapports de densité, comme attendu, sont de 1 pour le groupe R. Par contre, les ratios moyens diminuent avec la densité pour le groupe NR ; ils varient de 1,13 (biais positif de 13 %) pour la gamme de densité 100-200 f/mm² à 0,97 (biais négatif de 3 %) pour des échantillons plus chargés (> 800 f/mm²).

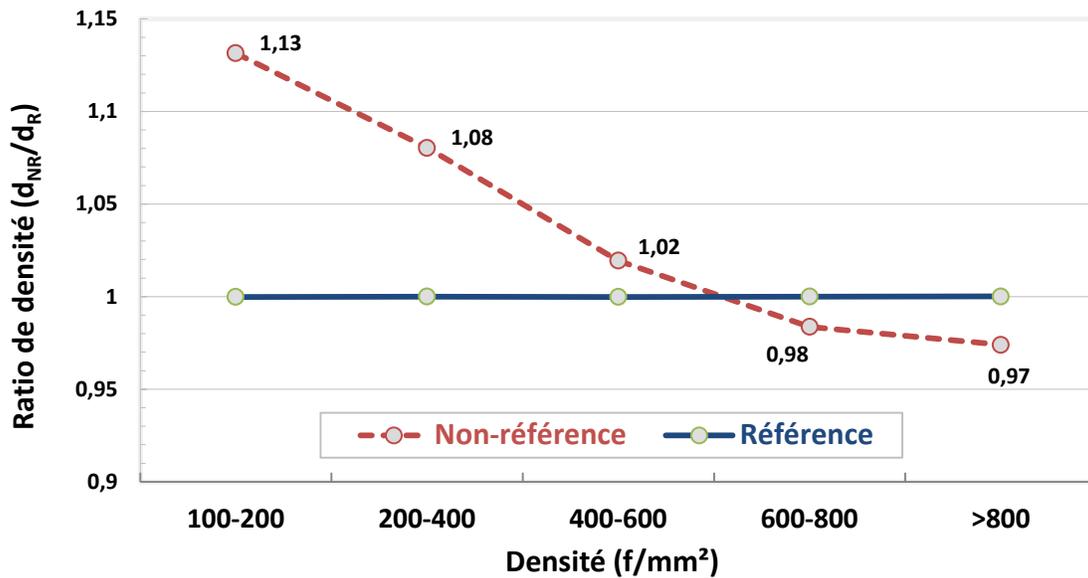


Figure 17 : Justesse des résultats (R et NR) en fonction des catégories de densité

5.1.4 Résultats en fonction du secteur d'activité et du type de fibres

La figure 18 montre la relation entre deux paramètres, soit le secteur d'activité et le type de fibres, seules ou en mixité. Seuls les résultats des compteurs NR ont été retenus pour cette relation. Le graphique du haut, illustrant la moyenne des CV, met en évidence que le secteur du démantèlement de fours industriels, avec FMA seulement, comporte des échantillons dont la difficulté d'analyse est accrue (CV de 59 %). Le secteur de l'enlèvement avec chrysotile présente également une variabilité élevée : chrysotile seul (55 %), chrysotile + gypse (40 %) et chrysotile + FMA (31 %) tandis que l'enlèvement avec de l'amosite fournit des résultats moins variables (27 %). Les secteurs des mines et des freins ont généré des résultats dont la variabilité était de 40 % et 32 % respectivement. Les échantillons provenant du secteur du textile présentent une variabilité moindre avec FMA (28 %) et chrysotile + FMA (25 %), et un peu plus élevée avec le chrysotile seul (33 %).

La justesse (figure 18, graphique du bas) varie dans le secteur de l'enlèvement selon que les échantillons contenaient seulement du chrysotile (biais négatif de 18 %), du chrysotile + gypse (biais positif de 15 %), du chrysotile + FMA (biais positif de 2 %) ou seulement de l'amosite (+ 1,4 %). Les secteurs des mines de chrysotile (biais positif de 12 %), du textile, avec FMA (+10 %) et avec chrysotile + FMA (8%), et du démantèlement avec FMA (+7 %) ont également donné des biais élevés tandis que les numérations pour les secteurs des freins-chrysotile, et du textile-chrysotile ont obtenu une très bonne performance, avec un biais de +1,5 % et 0 %, respectivement.

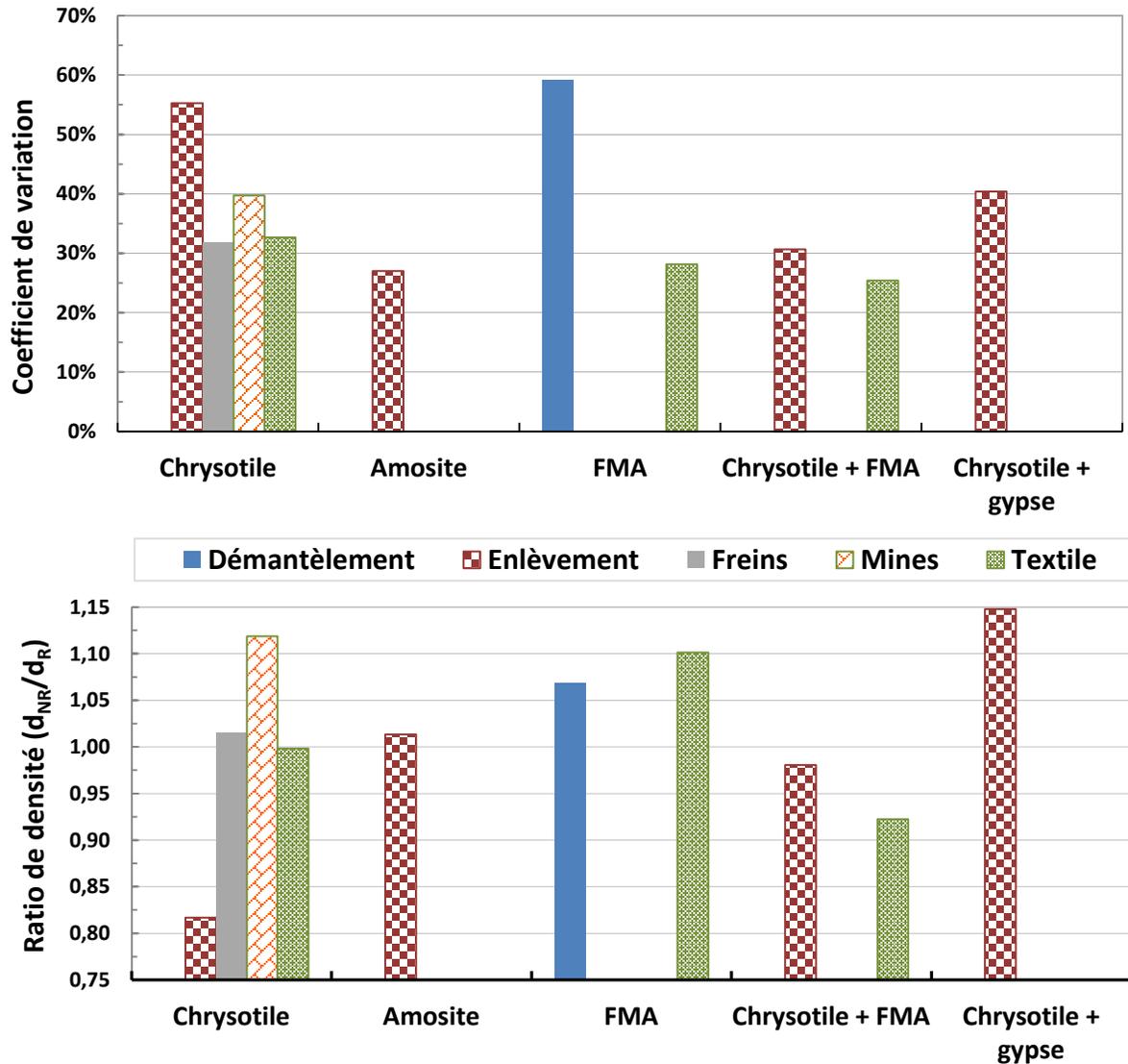


Figure 18 : Variabilité (haut) et justesse (bas) en fonction du secteur d'activité et du type de fibres pour les NR

5.1.5 Évolution des résultats en fonction de la répétition des échantillons

Plus de 50 % des 132 échantillons utilisés dans le programme pour ce bilan ont circulé à plusieurs reprises. Un exemple de suivi des résultats sur plusieurs années pour deux de ces échantillons de densités différentes est montré à la figure 19. Pour ces échantillons, qui ont été utilisés 14 et 12 fois respectivement, les résultats de comptage sont relativement stables dans le temps : échantillon 1 – densité_{NR} = 530 f/mm² (CV_{NR} = 6 %), densité_R = 519 f/mm² (CV_R = 5 %) ; échantillon 2 – densité_{NR} = 192 f/mm² (CV_{NR} = 6 %), densité_R = 177 f/mm² (CV_R = 8 %). Il n'y a pas d'évidence que, durant cette période de temps, les lames se soient détériorées.

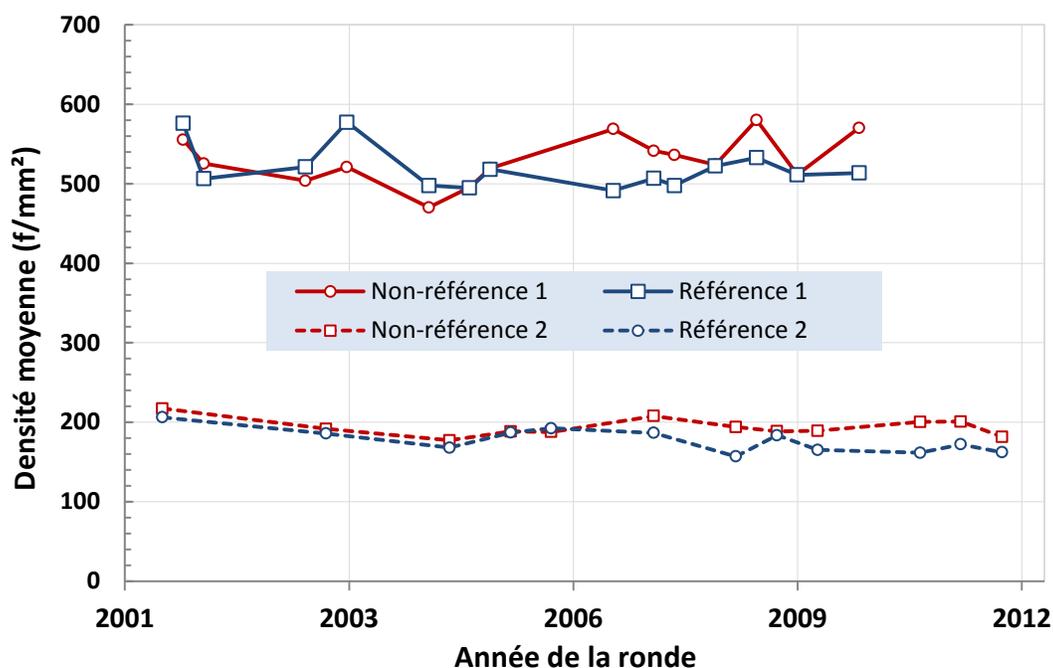


Figure 19 : Densité moyenne pour les répétitions de deux échantillons dans le temps

5.2 Compteurs

5.2.1 Variabilité et justesse des numérations (R et NR)

La figure 20 compare la variabilité (CV) et la justesse ($\text{densité}_{NR}/\text{densité}_R$) des numérations entre le groupe R et le groupe NR, pour l'ensemble des 79 rondes. Le CV moyen des compteurs NR est deux fois plus élevé que celui des compteurs R. Comme attendu, le ratio moyen des densités des compteurs R est toujours autour de l'unité, tandis que celui des compteurs NR suggère un biais positif de l'ordre de 6 %.

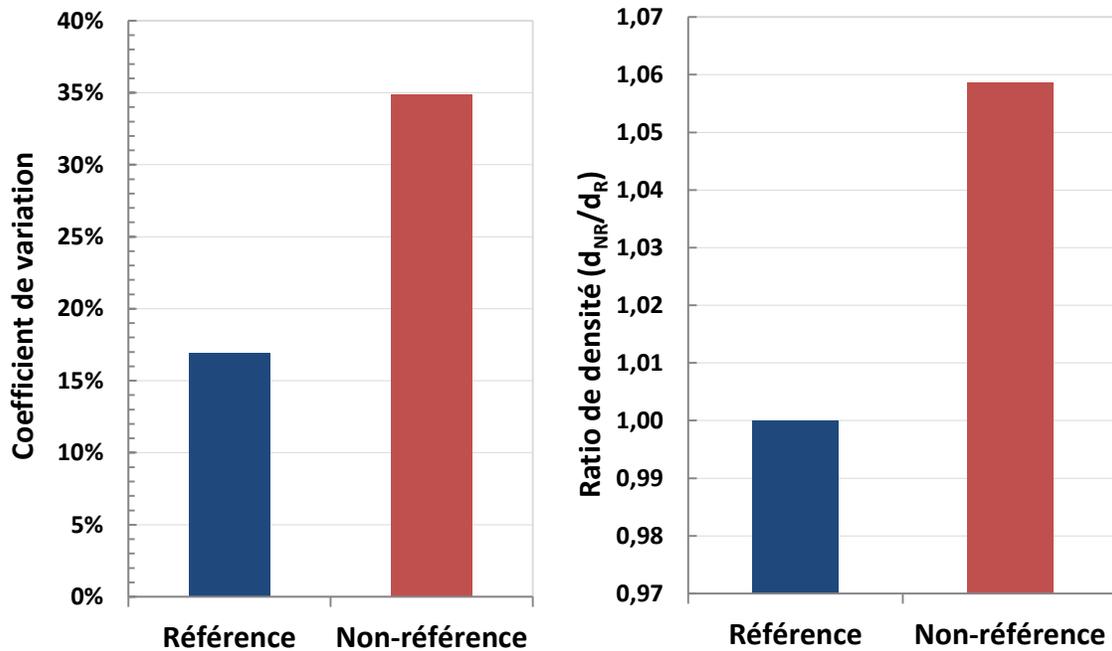


Figure 20 : Variabilité (gauche) et justesse (droite) des résultats pour les 79 rondes (R et NR)

5.2.2 Variabilité et justesse des numérations dans le temps

La figure 21 présente les coefficients de variation moyens pour les 79 rondes du présent bilan. En raison des critères plus sévères retenus pour les compteurs R, leurs CV sont toujours inférieurs à ceux des compteurs NR, par un facteur d'environ deux. Une tendance à une augmentation des CV est observée dans le temps, relativement faible pour les compteurs R, mais plus marquée pour le groupe NR. L'évolution de la justesse dans le temps est présentée à la figure 22. Une sous-estimation de la densité est surtout observée en début de programme (ratio négatif) tandis que, par la suite, une surestimation est nettement présente (ratio positif).

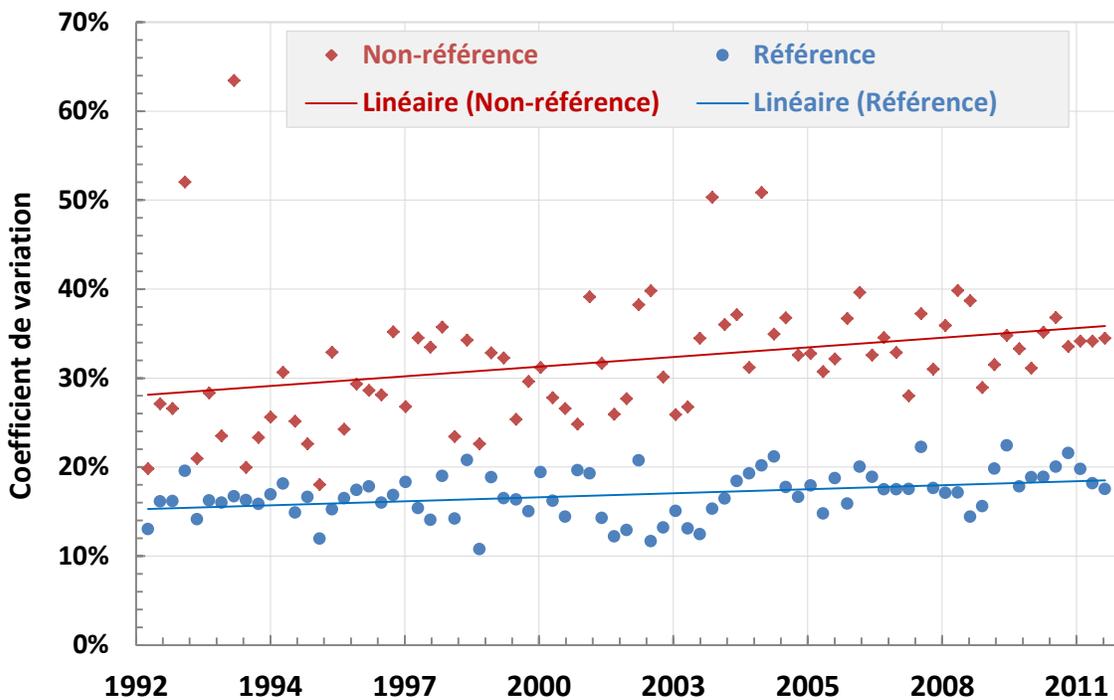


Figure 21 : Évolution de la variabilité des numérations (R et NR) dans le temps

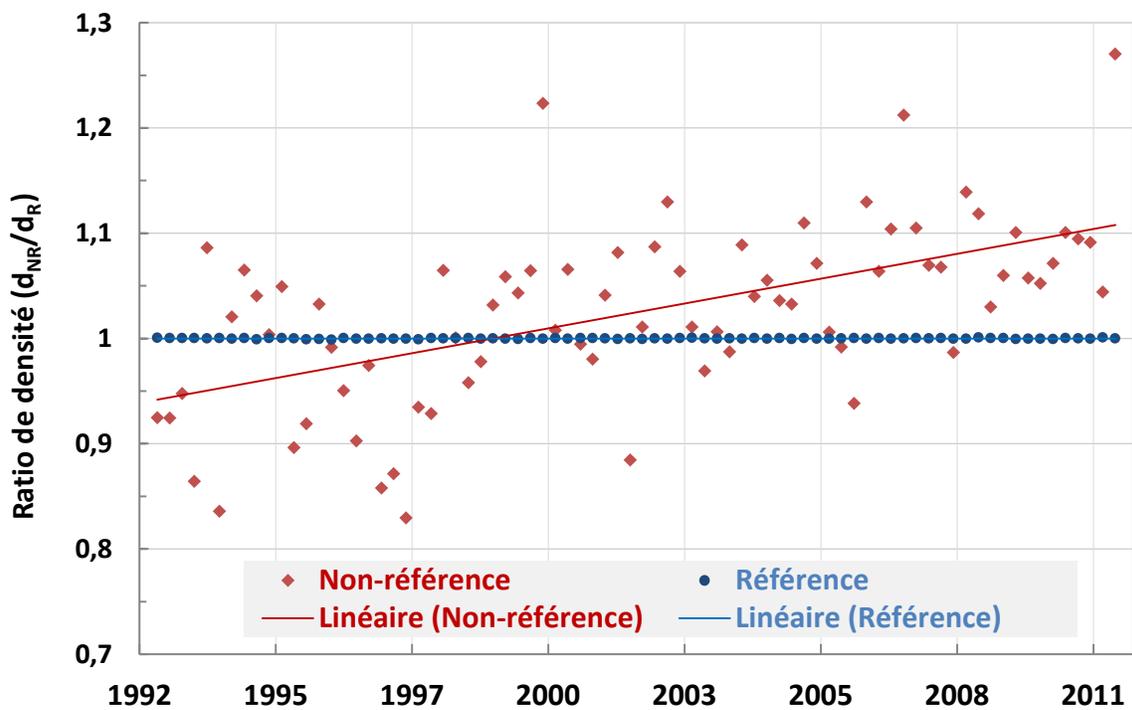


Figure 22 : Évolution de la justesse des numérations (R et NR) dans le temps

5.2.3 Résultats selon l'expérience des compteurs

Les compteurs accumulent des années d'expérience effective lorsqu'ils participent aux différentes rondes. L'expérience effective correspond à l'expérience initiale, à l'entrée dans le programme, à laquelle s'ajoutent les années de participation. La figure 23 illustre la justesse des résultats des compteurs R (graphique du haut) et des compteurs NR (graphique du bas) en fonction de leur expérience effective. Les lignes pointillées correspondent aux limites d'acceptabilité des résultats (0,55 et 2,2). Pour les compteurs R, les ratios de densité se concentrent autour de un et varient peu avec les années d'expérience effective. Par contre, pour les compteurs NR, le nuage de points se déploie en un triangle, plus ou moins étendu pour les 20 premières années d'expérience effective, puis se compare aux compteurs R pour les années suivantes.

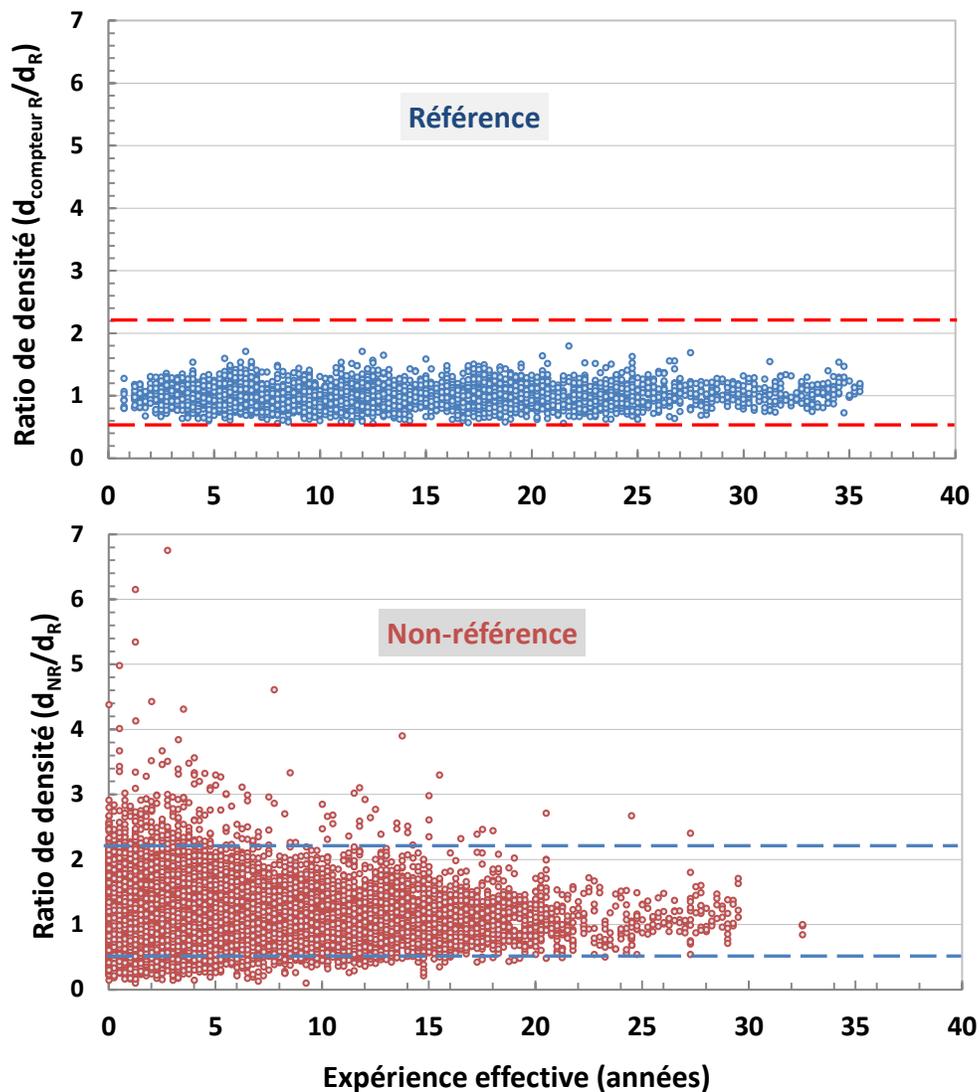


Figure 23: Justesse des résultats en fonction de l'expérience effective des compteurs R (haut) et NR (bas)

5.2.4 Résultats selon l’affiliation des compteurs

La figure 24 montre la variabilité et la justesse de tous les résultats selon l’affiliation (gouvernement, mines et consultants) et le statut (R ou NR) des participants. Les coefficients de variation sont plus élevés chez les compteurs NR affiliés à des firmes de consultants. Un biais positif de l’ordre de 6 % est observé pour les compteurs NR des firmes de consultants et des organismes gouvernementaux, comparativement à 2 % pour les compteurs NR des mines. Rappelons que les compteurs consultants sont majoritaires; ils représentent 93,3 % de tous les participants, comparativement aux compteurs gouvernementaux (3,5 %) et aux compteurs des mines (3,2 %).

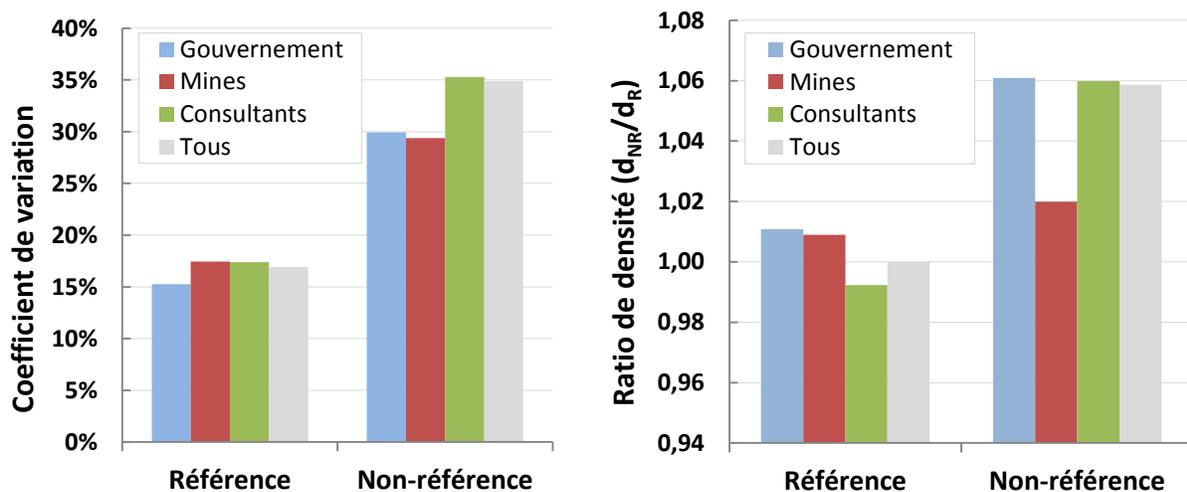


Figure 24 : Variabilité (gauche) et justesse (droite) des numérations (R et NR) selon l’affiliation des compteurs

5.3 Relations entre échantillons et compteurs

Pour les relations établies, afin de mettre en évidence les paramètres directement liés aux échantillons et aux compteurs, seuls les résultats provenant des participants non-références ont été considérés.

5.3.1 Relation entre la provenance des échantillons (secteurs d’activité) et l’affiliation des compteurs

La figure 25 illustre la variabilité et la justesse des résultats selon la provenance des échantillons et l’affiliation des compteurs. Pour tous les secteurs d’activité, les CV les plus élevés sont observés chez les compteurs consultants tandis que les compteurs des mines démontrent une variabilité plus faible pour les secteurs des mines, des freins et du textile. Du point de vue de la justesse, les consultants ont les meilleurs résultats pour le secteur de l’enlèvement, tout comme les compteurs des mines pour leurs propres échantillons. Inversement, les compteurs des mines ont un biais positif de 7 % pour les échantillons d’enlèvement tandis que les consultants ont

surestimé les échantillons des mines avec plus de 11 %. Notons que le nombre d'échantillons était restreint pour le démantèlement (FMA) et pour l'enlèvement de matériaux contenant du chrysotile seulement, soit 126 et 113 résultats respectivement.

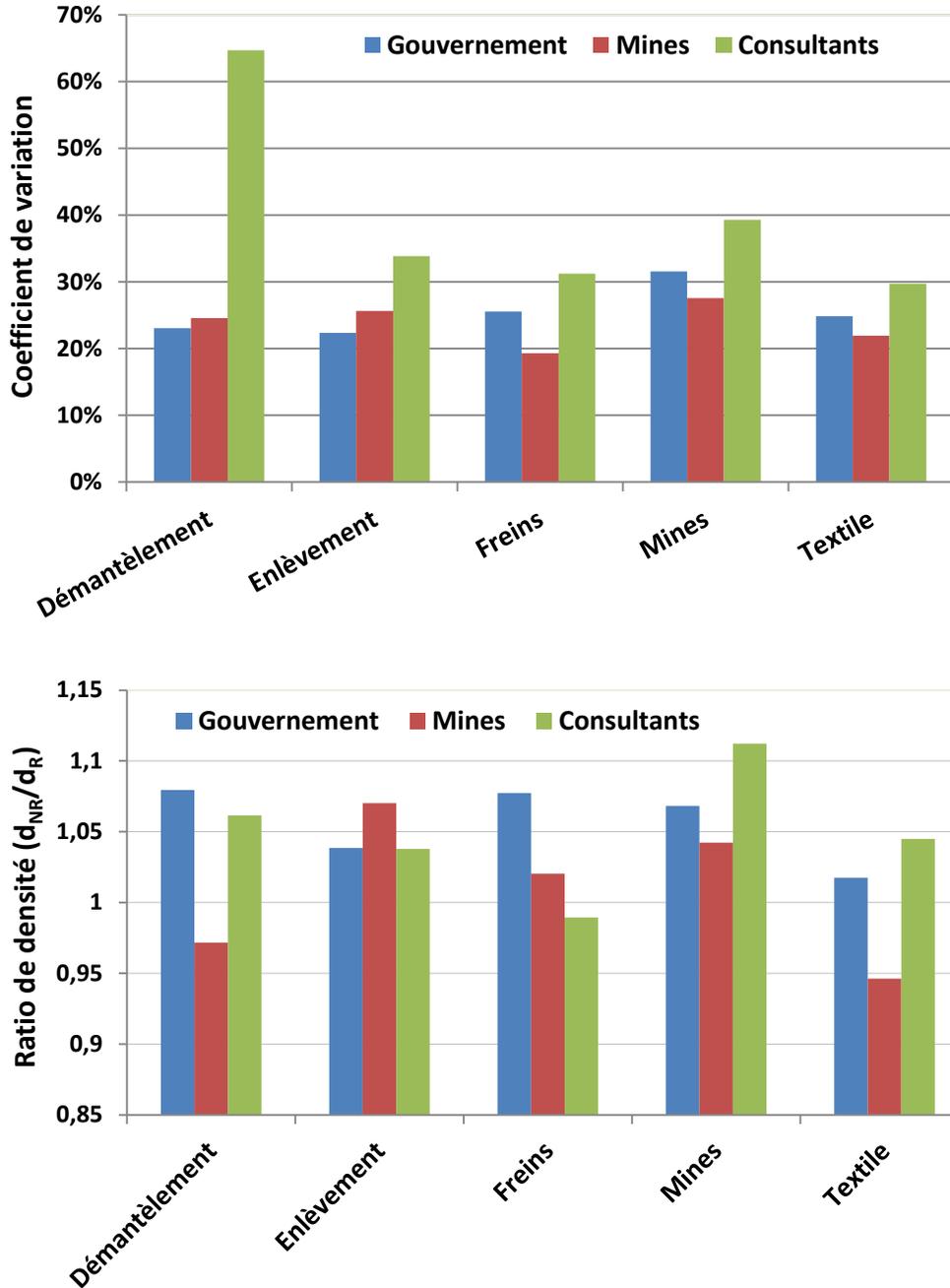


Figure 25 : Variabilité (haut) et justesse (bas) des résultats (NR) selon la provenance des échantillons et l’affiliation des compteurs

5.3.2 Relation entre le type de fibres et l’affiliation des compteurs

La figure 26 illustre la variabilité et la justesse des résultats selon le type de fibres et l’affiliation des compteurs. Pour tous les types de fibres, des variabilités accrues sont observées pour les compteurs issus des firmes de consultants. Les compteurs des mines obtiennent généralement la variabilité la plus faible de toutes les catégories de participants, sauf pour les échantillons mixtes chrysotile + FMA et, de façon moins marquée, pour les échantillons d’amosite. Les compteurs des mines ont montré la moins bonne justesse lorsqu’ils évaluaient les lames contenant un mélange de chrysotile + gypse fibreux.

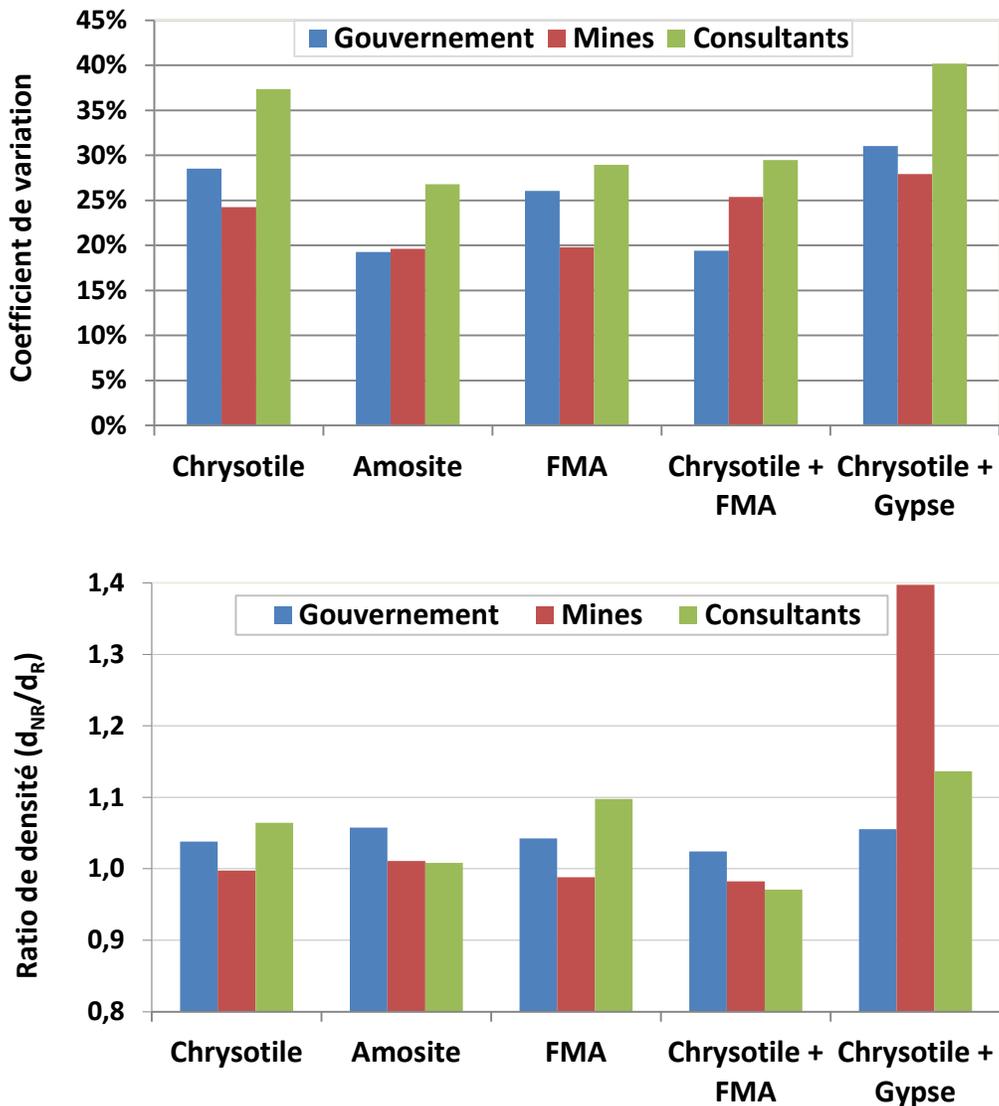


Figure 26 : Variabilité (haut) et justesse (bas) des résultats (NR) selon le type de fibres et l’affiliation des compteurs

5.4 Performance (taux de réussite) en fonction de différents déterminants

5.4.1 Distribution des hors limites pour l'ensemble des résultats

Selon les critères de réussite du programme de l'IRSST, les résultats de numération des compteurs doivent se situer entre 0,55 et 2,2 de la valeur cible. La figure 27 montre le pourcentage des résultats hors limites (inférieure et supérieure) ainsi que la distribution de tous les résultats des NR. Un taux de réussite de 95,1 % est observé pour l'ensemble des résultats; 3,9 % des résultats sont inférieurs à 0,55 tandis que 1,0 % sont supérieurs à 2,2. La courbe n'est pas symétrique avec un plus grand étalement vers les rapports de densité élevée, suggérant une tendance à la surestimation des résultats (biais positif).

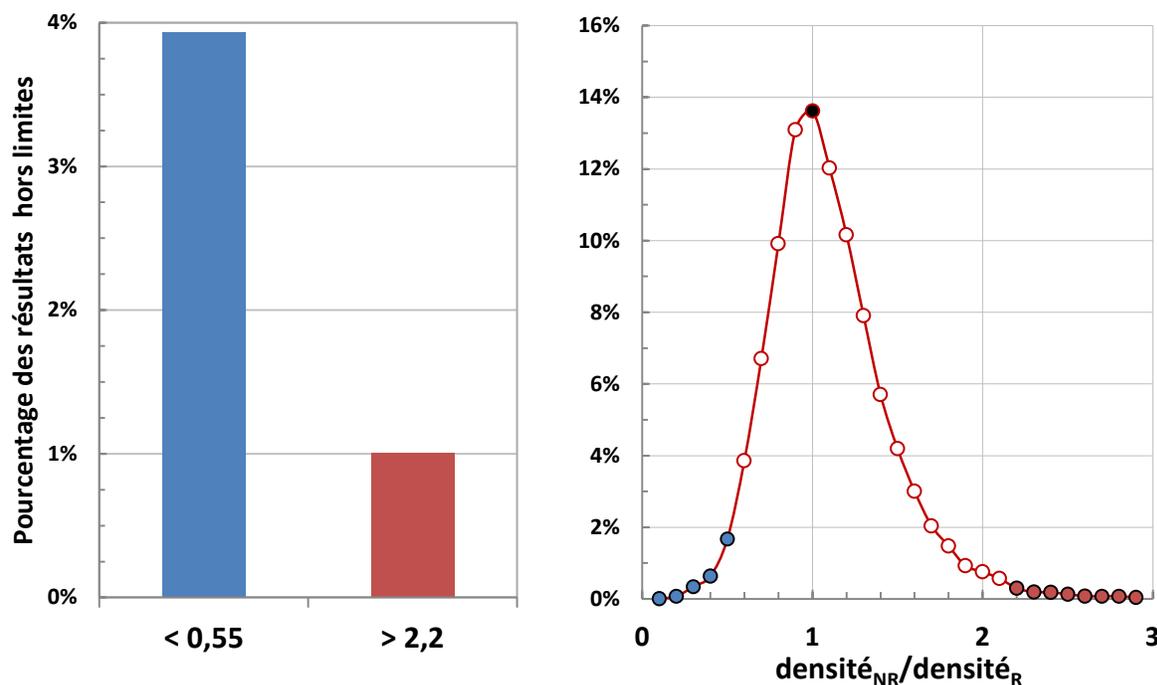


Figure 27 : Pourcentage des résultats hors limites (inférieure et supérieure) et distribution des résultats en fonction du ratio de densité (NR/R) pour tous les résultats des NR

5.4.2 Distribution des hors-limites selon le secteur d'activité

La distribution des résultats hors limites (inférieure et supérieure) en fonction de la provenance des échantillons est illustrée à la figure 28. Le taux de réussite [100 % - pourcentage hors limites (inférieure + supérieure)], le plus élevé est observé pour le secteur du textile (97,3 %), suivi par celui des freins (96,4 %), celui du démantèlement (96,3 %), celui de l'enlèvement (95,3 %) et celui des mines (93,8 %).

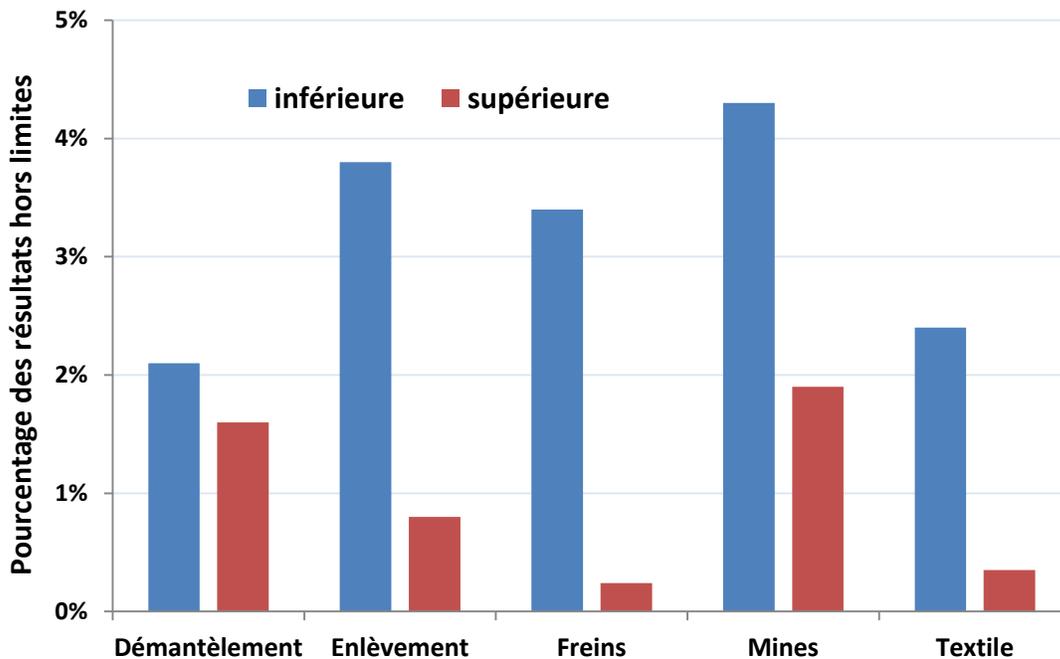


Figure 28 : Distribution des résultats hors limites (inférieure et supérieure) en fonction du secteur d'activité

Le taux des hors limites inférieures est toujours plus élevé que le taux des hors limites supérieures. Si on calcule le ratio « hors limite inférieure/hors limite supérieure », celui-ci varie de 1,3 (démantèlement) à 14 (freins).

5.4.3 Distribution des hors limites selon le type de fibres et la mixité

La figure 29 illustre la distribution des résultats hors limites, en fonction du type de fibres et de la mixité. Lorsqu'il y a de l'amosite ou des FMA seuls, les taux de réussite sont les plus élevés, soit 97,7 % et 98,3 % respectivement. Suivent les taux de réussite avec chrysotile + FMA (95,5 %) et chrysotile seul (93,7 %). Le mélange chrysotile + gypse fibreux constitue le type d'échantillons qui a obtenu le taux de réussite le plus bas avec 91,3 %.

Le taux des hors limites inférieures est toujours plus élevé que celui des hors limites supérieures. Ainsi, le ratio « hors limite inférieure/hors limite supérieure » diminue selon :

chrysotile + FMA (14 %) > amosite (11 %) > chrysotile (4 %) > chrysotile + gypse (3 %) > FMA (1,4%).

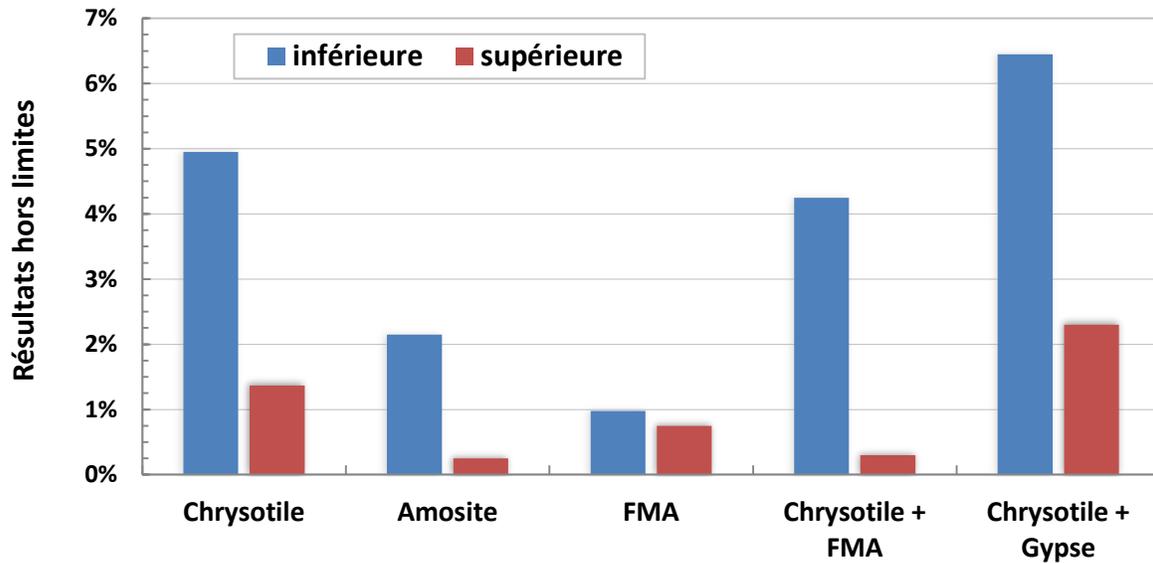


Figure 29 : Distribution (%) des résultats hors limites (inférieure et supérieure) selon le type de fibres et la mixité

5.4.4 Distribution des hors limites selon la catégorie de densité

La distribution des résultats hors limites en fonction de la densité des fibres est montrée à la figure 30. Les densités entre 600 et 800 f/mm², ont montré le taux de réussite le plus faible (93,3 %) tandis que les densités >800 f/mm² ont donné un taux de réussite de 98,1 %. Dans toutes les gammes de densité, le pourcentage des hors limites inférieures est plus élevé que celui des hors limites supérieures, ce qui est normal compte tenu des limites fixées (0,55 et 2,2) qui ne sont pas distribuées symétriquement par rapport à l'unité. Le taux de hors limites supérieures diminue avec la densité.

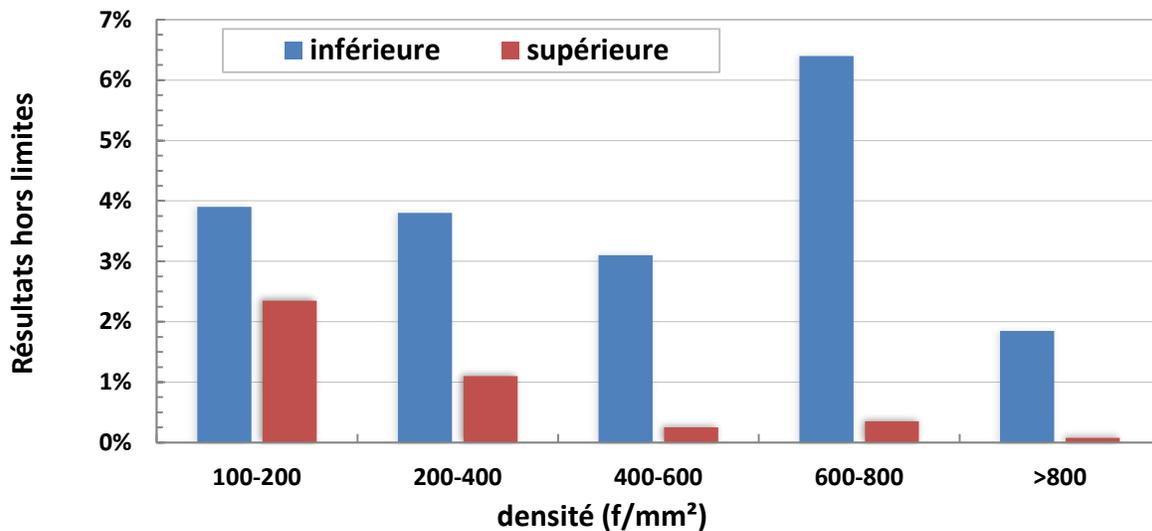


Figure 30 : Distribution (%) des résultats hors limites (inférieure et supérieure) en fonction de la densité

Comme illustré à la figure 31, le ratio « hors limite inférieure/hors limite supérieure » augmente rapidement de 1,7 à 34 fois, de la plus faible densité (100-200 f/mm²) à la densité supérieure (> 800 f/mm²). Cela suggère une forte tendance à la sous-estimation quand la densité des fibres est élevée.

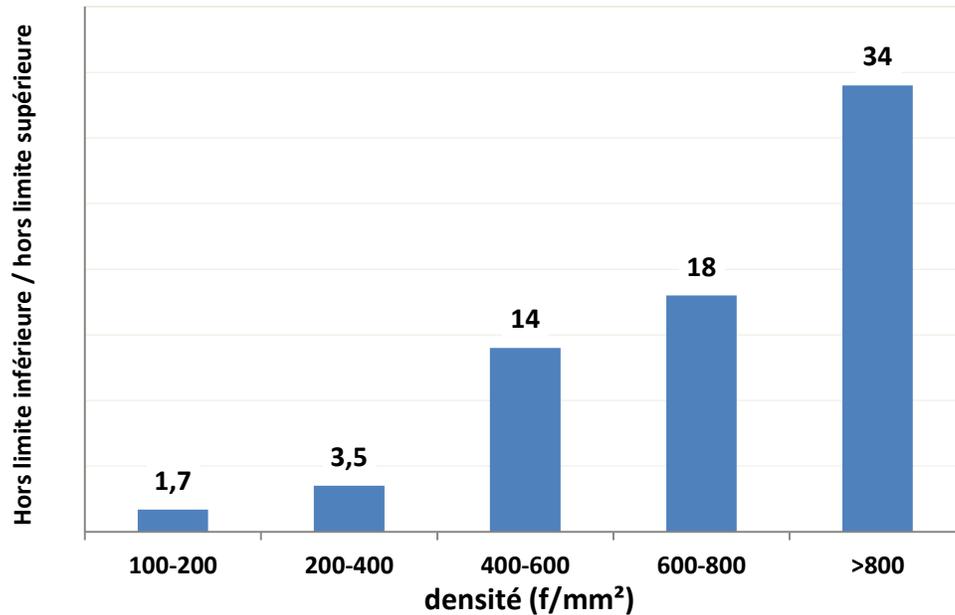


Figure 31 : Ratio des résultats hors limites (inférieure/supérieure) en fonction de la densité

5.5 Analyse multivariée

L'hypothèse d'une distribution normale des ratios de densité (NR/R) a été rejetée pour les différents déterminants à la suite de l'observation des boîtes à moustaches (Annexe B) et des résultats du test de Kolmogorov-Smirnov.

L'ANOVA des rangs, dont les résultats sont présentés au tableau 3, a montré que les déterminants qui contribuent significativement à la variabilité des ratios de densité sont, par ordre décroissant : type de fibres > secteur d'activité > catégorie de densité > affiliation des compteurs ($p < 0,001$). Des interactions statistiquement significatives ont également été observées pour les combinaisons de déterminants suivantes, en ordre décroissant : catégorie de densité*type de fibres > affiliation des compteurs*secteur d'activité > catégorie de densité*secteur d'activité > affiliation des compteurs*type de fibres ($p < 0,001$).

Tableau 3 : Résultats de l'analyse de variance effectuée sur les rangs pour les NR

Variabes	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carré moyen	$L^{(a)}$	Valeur de $p^{(b)}$
Affiliation des compteurs	1090590630,20	2	545295315,10	15,58	< 0,001
Catégorie de densité	3141440835,01	4	785360208,75	44,89	< 0,001
Secteur d'activité	3513253122,07	4	878313280,52	50,20	< 0,001
Type de fibres	9125370339,44	4	2281342584,86	130,39	< 0,001
Affiliation compteurs x Catégorie de densité	636461877,26	8	79557734,66	9,09	>0,05
Affiliation compteurs x Secteur d'activité	3331403325,58	8	416425415,70	47,60	< 0,001
Affiliation compteurs x Type de fibres	2821751023,82	8	352718877,98	40,32	< 0,001
Catégorie de densité x Secteur d'activité	2892025576,08	8	361503197,01	41,32	< 0,001
Catégorie de densité x Type de fibres	4464335620,50	6	744055936,75	63,79	< 0,001
Erreur	1929096536634,87	28924	66695358,06		
Total corrigé	2028223523357,49	28980			

^(a) $L = (N-1) \times r^2_{ANOVA}$ (où r^2_{ANOVA} = somme des carrés entre groupes/somme totale des carrés corrigée)

^(b) Signification statistique établie d'après une table de distribution du Chi deux

6. DISCUSSION

Des préoccupations concernant la variabilité élevée de la numération des fibres étaient déjà soulevées au sein de la communauté scientifique, dès le tout début de l'implantation de cette méthode. Les difficultés à obtenir des résultats comparables entre les compteurs de différents laboratoires ont alors été identifiées ainsi qu'un besoin d'échanger régulièrement des échantillons ou de participer à un programme de contrôle de la qualité (Beckett et Attfield, 1974). La variabilité peut être influencée par plusieurs déterminants attribuables à l'échantillon et/ou au compteur. Les sources de variation reliées au compteur sont dues notamment à sa difficulté à observer des fibres fines, près de la limite de visibilité de son microscope (0,2 µm). La visibilité des fibres peut être améliorée par la calibration et l'ajustement fin du microscope (Carton *et al.*, 1981). Les sources de variabilité dues aux échantillons sont la densité de fibres, le type de fibres (chrysotile, amphiboles ou FMA), la morphologie (fibrilles, fibres attachées à des particules, fibres agglomérées et fragments de clivage) (Gonzalez-Fernandez et Martin, 1986).

La préparation des échantillons et les règles de comptage sont également des sources d'erreurs observées dans les échanges interlaboratoires. Toutefois, les participants au programme de l'IRSST reçoivent des lames déjà montées, ce qui élimine les biais inhérents à leur préparation. De plus, les participants doivent utiliser la méthode de numération de l'IRSST, minimisant ainsi le biais lié aux critères de comptage (IRSST, 1995).

La difficulté d'évaluer l'exactitude et la précision d'une méthode aussi subjective que la numération des fibres est bien connue. Contrairement aux autres méthodes analytiques utilisées en surveillance de l'exposition, il est impossible d'avoir une valeur « vraie » de la densité de fibres sur une membrane. Ainsi, la moyenne des résultats de numération d'un échantillon par un certain nombre de laboratoires ou de compteurs est utilisée pour déterminer une « valeur de référence » et sa variabilité (Harper et Bartolucci, 2003). Puisque le groupe de référence est sélectionné selon des critères de compétence stricts, il est normal que la variabilité de leurs résultats soit inférieure à celle des autres compteurs, en plus d'une justesse gravitant autour de l'unité. Ainsi, pour tous les résultats et indépendamment du déterminant, le CV des références a toujours été deux fois moins élevé que le CV des autres compteurs.

6.1 Paramètres pouvant influencer la variabilité et la justesse des résultats de numération des fibres

La variabilité moyenne pour les 32 777 résultats générés dans cette étude est de 33,5 %. Ces résultats de numération proviennent des 660 compteurs ayant participé à au moins une des 79 rondes constituées chacune de quatre échantillons (total de 316 échantillons). Le coefficient de variation moyen des compteurs R est de 17 % tandis que celui des autres compteurs, NR, est de 35 %. Le ratio moyen de densité (d_{NR}/d_R) est de 1,06, indiquant que les résultats des compteurs NR sont surestimés de 6 %.

Des échanges de lames entre des participants des programmes espagnol PICC-FA et britannique AFRICA ont donné une variabilité semblable aux résultats du programme de l'IRSST. Ces échantillons provenaient de situations réelles de travail (textile, produits de friction et

enlèvement de MCA). Les CV obtenus pour huit lames comptées par 27 à 80 analystes ont varié de 28 à 45 % (Arroyo et Rojo, 1998).

Une autre étude a comparé trois programmes internationaux européens, RICE, PICC-FA et le programme de la Belgique. Des ratios de 0,94 à 1,01 ont été calculés, par rapport à la moyenne géométrique d'une valeur cible, pour 40 lames évaluées par six analystes (Jones *et al.*, 2005). Ces valeurs sont plus faibles que le ratio moyen observé pour les compteurs NR (1,06) de la présente étude. Cependant, les données de l'IRSST ont été obtenues avec beaucoup plus de lames comptées par un nombre largement supérieur d'analystes.

6.1.1 Type de fibres et mixité

Le niveau attendu de performance par un laboratoire compétent peut dépendre du type d'échantillons. Pour des échantillons provenant de milieux de travail, dont la densité se situe dans les limites acceptables de 100-1300 f/mm², le CV intralaboratoire se situerait entre 17-22% pour des laboratoires se conformant à un programme d'assurance qualité. Dans le cadre de la présente étude, la variabilité du groupe R, de l'ordre de 17 %, se compare donc à un CV intralaboratoire : elle est deux fois moins élevée que celle du groupe NR, soit ce qui est attendu pour un CV interlaboratoires qui peut être aussi élevé que 45 % (Baron et Shulman, 1987; Ogden, 1982).

Le CV des compteurs R, était relativement constant (< 20 %) pour les différents types de fibres, à l'exception des échantillons de chrysotile + gypse fibreux, pour lesquels le CV était de 22 %. Pour les compteurs NR, le CV a varié de 27 à 40 % selon : amosite < FMA < chrysotile + FMA < chrysotile < chrysotile + gypse fibreux.

Des biais positifs ont été observés avec une surestimation de l'ordre de 1 % (amosite) à 15 % (chrysotile + gypse); un biais négatif de 3 % a été obtenu pour les échantillons mixtes avec chrysotile + FMA. Les résultats démontrent donc que des échantillons mixtes contenant du chrysotile et FMA ou gypse fibreux constituent une difficulté accrue lors de la numération de fibres tant au regard de la précision que de l'exactitude. L'ANOVA a montré que le déterminant « type de fibres » a l'impact le plus significatif statistiquement sur les ratios de densité.

Plusieurs études ont rapporté de telles différences de variabilité pour la numération de l'amosite et du chrysotile, par microscopie optique à contraste de phase. Les compteurs sont généralement plus performants avec l'amosite qu'avec le chrysotile (Paik *et al.*, 1994). En effet, les fibres de chrysotile sont très fines, courbées et moins visibles que les fibres d'amphiboles, plus biréfringentes, rigides et de diamètre plus grand. De plus, l'indice de réfraction du chrysotile est très près de celui du milieu de montage des lames; ce qui occasionne un moins bon contraste et une visibilité diminuée (Harper *et al.*, 2009). Une surestimation de l'ordre de 38 % a été observée pour l'amosite, en raison de la prise en compte de fibres trop petites (< 5 µm) tandis que des fibres de chrysotile n'ont pas été comptées, car moins visibles, occasionnant une sous-estimation de 30 % (Harper *et al.*, 2009; Pang et Harper, 2008).

Ainsi, si le matériau ne contient que de l'amosite ou des FMA, la numération de fibres en sera facilitée. En effet, pour la présente étude, les CV des échantillons d'amosite et de FMA étaient

de 27 et 29 % respectivement, comparativement aux échantillons contenant du chrysotile seul et en mixité pour lesquels les CV ont varié de 30 à 40 %. Le gypse fibreux constitue une difficulté supplémentaire, probablement en raison de la longueur des fibres dont une forte proportion est inférieure à 5 µm. Cela exige que le compteur accorde une plus grande attention dans l'observation et la mesure des fibres individuelles.

Le programme américain PAT de l'AIHA a également enregistré, pour les années 1995 à 1997, des coefficients de variation variables selon le type de fibres : chrysotile (31,7 %); amosite (19,6 %) et FMA (26,8 %) (Schlecht et Groff, 1998). Malheureusement depuis 1998, l'AIHA ne publie plus les coefficients de variation réels, puisqu'une valeur maximale de 20 % est appliquée artificiellement, ce qui rend difficile toute comparaison avec ce programme.

6.1.2 Secteurs d'activité

Lorsque les résultats sont étudiés en fonction de la provenance des échantillons, la variabilité de la numération des compteurs NR augmente de 30 à 59 % selon les secteurs : textile < freins < enlèvement < mines < démantèlement. Toutefois, le CV des compteurs R demeure relativement stable (16 à 19 %). Un biais positif moyen de 2 à 12 % est observé, indiquant une surestimation qui augmente selon les secteurs : freins < textile = enlèvement < démantèlement < mines.

Les échantillons provenant du secteur du textile sont composés majoritairement de fibres (chrysotile et/ou FMA) et contiennent peu de particules interférentes; ce secteur est donc considéré comme relativement « propre ». Par contre, les secteurs de l'enlèvement, du démantèlement, des mines et des freins comportent des matériaux dont une partie importante n'est pas fibreuse. Les secteurs du démantèlement et de l'enlèvement, dont les activités génèrent un niveau d'empoussièrement élevé, présentent une difficulté accrue d'analyse en raison de la présence d'un fonds particulaire important et de fragments non asbestiformes. De plus, dans le secteur de l'enlèvement, il y a présence de différents types de fibres (chrysotile, FMA, gypse fibreux et amosite), dont la visibilité en MOCP est variable.

Une étude réalisée avec 16 laboratoires internationaux a permis de documenter les variabilités intralaboratoire et interlaboratoires pour des lames préparées à partir d'échantillons prélevés dans différents milieux de travail (amiante-ciment, mine et moulin, textile et produits de friction). Les CV intralaboratoires ont varié de 12 à 40 % tandis que les CV interlaboratoires ont fluctué de 27 à 85 % (Crawford *et al.*, 1982). Une autre étude réalisée par le NIOSH avec des échantillons-terrains a donné un CV intralaboratoire variant de 17 à 25 % et un CV interlaboratoires de 45 % (Baron et Shulman, 1987). D'ailleurs, en absence de précision sur la variabilité interlaboratoires, cette valeur est fixée à 45 % (NIOSH, 2003).

Les variabilités de numération chez les compteurs de référence du programme de l'IRSST sont comparables et même inférieures aux CV intralaboratoires publiés, démontrant une certaine homogénéité dans les pratiques des compteurs de référence. De plus, les CV des compteurs NR se situent dans les limites des CV interlaboratoires documentées avec des échantillons-terrains dans les deux études citées.

6.1.3 Densité de fibres

Pour les des différentes catégories de densité de fibres, la variabilité des résultats des compteurs R est relativement stable tandis que celle des compteurs NR est plus élevée pour les échantillons de faible densité (39 %) que pour ceux de densité plus élevée (25 %). Une meilleure justesse est observée à haute densité (biais négatif de 3 %) comparativement à basse densité (biais positif de 13 %). La catégorie de densité a d'ailleurs un impact statistiquement significatif ($p < 0,001$) sur la justesse. Les compteurs ont donc tendance à surestimer le nombre de fibres à de basses densités tandis que les résultats sont sous-estimés à des densités plus élevées. Le ratio moyen diminue avec la charge sur le filtre ainsi que le CV (à l'exception de la densité 600-800 f/mm²).

Les échantillons de faible densité sont affectés par une plus grande variabilité des comptes (Arroyo et Rojo, 2001; Paik *et al.*, 1994). En effet, l'efficacité du comptage serait fonction de la concentration des fibres sur le filtre (Cherrie *et al.*, 1986). À faible charge de fibres (< 100 f/mm²), les résultats de comptage auront tendance à être surestimés (biais positif) par rapport à une valeur cible, comparativement à des densités intermédiaires (100-1300 f/mm²). Cette surestimation serait due à une plus grande visibilité des fibres dans un champ visuel « propre ». Lorsqu'il y a peu de fibres, l'œil humain aura tendance à chercher plus attentivement les fibres. À charge élevée, les fibres peuvent être cachées par d'autres fibres et d'autres particules non fibreuses, une sous-estimation (biais négatif) est alors possible.

De plus, le type de fibres peut avoir un effet additif sur la variabilité de la numération liée à la densité de celles-ci. L'amosite, qui est plus visible, aura généralement un impact différent sur la justesse comparativement au chrysotile. Ainsi, à des densités de 100-200 f/mm², l'amosite a été estimée avec un biais positif de 4 % tandis que le chrysotile a été surestimé de 10 %. Pour les densités supérieures à 800 f/mm², le chrysotile et l'amosite ont été sous-estimés de 8 et 2 %, respectivement.

La plupart des méthodes officielles recommandent d'ailleurs des densités optimales de 100 à 1300 f/mm² (Baron, 2003). C'est la raison pour laquelle certains programmes interlaboratoires ont instauré des limites d'acceptabilité différentes pour les échantillons de faible densité (généralement < 64 f/mm²). Le programme de l'IRSST utilise des échantillons dont la densité inférieure minimale est de 100 f/mm².

6.1.4 Combinaison secteur d'activité et type de fibres

Lorsque les résultats de deux déterminants, soit le secteur d'activité et le type de fibres, sont combinés, le coefficient de variation des compteurs NR diminue selon les combinaisons suivantes : démantèlement (FMA) > enlèvement (chrysotile) > enlèvement (chrysotile + gypse) = mines (chrysotile) > textile (chrysotile) > freins (chrysotile) > enlèvement (chrysotile + FMA) > textile (FMA) > enlèvement (amosite) > textile (chrysotile + FMA).

Pour les mêmes combinaisons, la justesse s'améliore, par ordre croissant, selon : enlèvement (chrysotile) < enlèvement (chrysotile + gypse) < mines (chrysotile) < textile (FMA) < textile (chrysotile + FMA) < démantèlement (FMA) < enlèvement (chrysotile + FMA) < freins (chrysotile) < enlèvement (amosite) < textile (chrysotile).

Plusieurs paramètres peuvent avoir un impact sur la concentration de fibres dans l'air : le pourcentage de fibres dans le matériau, la friabilité des fibres et du matériau, un mélange de fibres, la matrice (autres composantes de l'échantillon) qui constitue le matériau, etc. Par exemple, dans le secteur de l'enlèvement d'amosite, où la teneur en fibres dans le matériau est généralement très élevée (> 90 %), les échantillons d'air sont donc constitués majoritairement de fibres. Par contre, lors de l'enlèvement de chrysotile, seul ou en mixité, la teneur en fibres dans les matériaux est moins élevée que celle de l'amosite. De plus, la présence d'autres fibres et de particules non fibreuses dans les matériaux vient ajouter à la complexité de l'analyse et augmenter la variabilité des résultats. Le démantèlement, tout comme l'enlèvement, est une activité qui génère des concentrations élevées de poussières dans l'air, tant fibreuses que non fibreuses. Cela expliquerait la grande variabilité de la numération des échantillons prélevés lors du démantèlement de fours industriels. Il en est de même, mais à un niveau moindre, pour le secteur des mines et des freins, où des particules non fibreuses viennent masquer les fibres fines de chrysotile. Le textile, avec chrysotile ou FMA ou en mélange chrysotile + FMA, représente un milieu « propre » dont les échantillons d'air sont constitués majoritairement de fibres. Toutefois, la présence de plusieurs types de fibres dans un échantillon peut augmenter le niveau de difficulté de la numération.

En résumé, outre le secteur du démantèlement de fours industriels avec FMA (CV = 59 % ; biais = + 8 %) qui représente une activité peu courante, c'est le secteur de l'enlèvement de matériaux contenant du chrysotile seul qui démontre la plus grande difficulté d'analyse tant sur le plan de la variabilité (55 %) que celui de la justesse des résultats (biais négatif de 18 %).

6.1.5 Affiliation et expérience des compteurs

L'affiliation des compteurs, tout comme les combinaisons affiliation*secteurs d'activité et affiliation*type de fibres, sont des déterminants statistiquement significatifs ($p < 0,001$) pour la variabilité des ratios des comptages.

Les compteurs sont généralement plus performants lorsqu'ils font la numération d'échantillons issus de leurs activités normales. La variabilité et la précision des numérations risquent d'être affectées si les analystes évaluent des échantillons hors routine. Par exemple, les échantillons des mines ne sont généralement comptés que par les compteurs des mines. Aussi, le démantèlement d'un four industriel avec FMA est une activité rarissime et les échantillons générés sont méconnus de la majorité des compteurs. Des échantillons contenant des FMA ne se retrouvent pas fréquemment dans les analyses de routine des compteurs des mines et des consultants, contrairement aux échantillons comportant de l'amiante. Le gypse fibreux, en plus d'être rare, se présente généralement sous forme de fibres courtes (près de 5 μm); ce type d'échantillons représente donc une difficulté accrue pour la majorité des compteurs.

Pour tous les secteurs d'activité et pour tous les types de fibres, la variabilité des numérations a été plus élevée chez les consultants, comparativement aux compteurs des mines et des organismes gouvernementaux, et ce, même avec des échantillons provenant de leurs activités courantes, soit l'enlèvement de MCA. Les résultats des compteurs des mines ont la meilleure variabilité pour les secteurs des mines, des freins et du textile, tandis que les compteurs gouvernementaux, plus familiers avec les différents secteurs d'activité, ont un meilleur CV pour les échantillons provenant du démantèlement ou de l'enlèvement. Les compteurs des mines ont

surestimé de 7 % les échantillons d'enlèvement comparativement à 4 % pour les consultants et les gouvernementaux; les consultants ont surestimé de 11 % les échantillons des mines, comparativement à 7 % et 4 %, pour les compteurs gouvernementaux et ceux des mines, respectivement. Les compteurs des mines démontrent généralement une bonne justesse pour tous les types de fibres. Toutefois, ils ont surestimé de 40 % les échantillons contenant un mélange de chrysotile + gypse fibreux, dans le secteur de l'enlèvement. Rappelons que 93,3 % des compteurs proviennent de firmes privées (ou consultants) et qu'ils ont généré 87,9 % des résultats.

Un roulement important des compteurs a été observé tout au long du programme : 85 % des compteurs ont participé à moins de 30 % des rondes. La durée moyenne de participation pour tous les compteurs était de 7,2 années (R = 14,5 années; NR = 6,2 années). Plus de 71 % des compteurs n'avaient pas d'expérience au moment de leur première participation. Or, l'expérience du compteur témoigne généralement de sa connaissance et de sa maîtrise de la technique analytique. Une étude a d'ailleurs rapporté que les résultats d'un débutant avec moins de trois mois d'expérience sont significativement plus élevés que ceux d'un compteur avec deux ans ou plus d'expérience (Paik *et al.*, 1994). Lorsqu'un compteur acquiert de l'expérience, il adopte une routine qui aura pour effet de diminuer la variabilité de ses résultats (Abell *et al.*, 1989; Schlecht et Shulman, 1986).

Tandis que la variabilité des compteurs NR augmente légèrement dans le temps, possiblement en raison d'un nombre important de nouveaux compteurs, une amélioration de la justesse de la numération est observée avec le nombre d'années d'expérience effective. La faible performance des compteurs moins expérimentés souligne le besoin de formation supplémentaire (Harper *et al.*, 2009).

6.2 Taux de réussite et comparaison entre différents programmes

Les résultats individuels des participants au programme de l'IRSST sont comparés à une valeur cible, soit à la moyenne arithmétique des résultats du groupe de référence (12 compteurs performants et expérimentés). Les limites d'acceptabilité se situent entre 0,55 et 2,2 de la valeur cible. Le taux de réussite moyen pour l'ensemble des résultats est de 95,1 %. Il est influencé par les différents déterminants, surtout ceux liés aux échantillons.

Ainsi, le taux de réussite pour les différents types de fibres est optimal avec les FMA (98,3 %) et l'amosite (97,7 %). Le mélange chrysotile +gypse, toujours plus problématique, a donné un plus faible taux de réussite (91,3 %). Le secteur d'activité affichant la meilleure performance est le textile (97,3 %) tandis que les échantillons des mines ont le taux de réussite le plus faible (93,8 %). Pour les différentes catégories de densité de fibres, le taux de réussite augmente avec la densité (à l'exception des densités 600-800 f/mm²). Le meilleur taux de réussite, 98,1 %, est obtenu pour la catégorie de densité > 800 f/mm².

À titre comparatif, le taux de réussite du programme britannique AFRICA (90-95 %) est similaire à celui de l'IRSST. Cependant, les taux de réussite des programmes espagnol (85-87 %), belge (81 %) et français (85 %) sont plus faibles (Arroyo et Rojo, 1998, 2001). Les critères d'acceptabilité des programmes AFRICA et de l'IRSST sont les plus permissifs.

Le tableau 4 présente les critères de performance (valeurs de référence et limites d’acceptabilité) pour huit programmes interlaboratoires (Arroyo et Rojo, 2001; Crawford, 1992; Crawford et Cowie, 1984; Dion *et al.*, 2000; Kauffer, 1992; Schlecht et Shulman, 1986).

Tableau 4 : Valeurs de référence et limites d’acceptabilité pour différents programmes

Programme	Valeur de référence (*)	Limites d’acceptabilité	Limites internes ^(d)
AFRICA	Médiane (15)	0,5 – 2	0,65 – 1,55
RICE	Médiane (15)	0,5 – 2	0,65 – 1,55
Belgique	Médiane (15)	0,6 – 1,67	0,75 – 1,33
France	Moyenne (?)	0,5 – 2 ^(a)	0,75 – 1,33
PICC-FA	Moyenne (tous) ^(b)	0,65 – 1,35	
IHPAT	Moyenne (?)	Moyenne \pm 3 σ ^(c) (CV à 20 %)	
AAR	Moyenne (?)	Moyenne \pm 3 σ ^(c)	
IRSST	Moyenne (12)	0,55 – 2,2	

(*) Nombre de compteurs utilisés pour établir la valeur de référence

(a) Le programme français utilise également un autre critère de non-performance (CV \geq 40 %)

(b) Avec exclusions des valeurs extrêmes (selon Dixon)

(c) σ = écart-type

(d) Classe supérieure de compteurs

Certains programmes utilisent la médiane d’au moins 15 résultats tandis que d’autres considèrent plutôt la moyenne arithmétique de tous les laboratoires. Les résultats des autres participants sont comparés à la valeur cible et normalisés (ratio du compte NR/compte R); les performances sont évaluées selon différents critères d’acceptabilité. L’utilisation de limites internes, plus sévères, permet de considérer une classe supérieure de compteurs. Ainsi, les limites internes de la Belgique et de la France (0,75 – 1,33) ont été retenues pour recruter les compteurs de référence du programme de l’IRSST.

À l’instar de celui de l’IRSST, le programme espagnol PICC-FA utilise des échantillons réels provenant du textile, de produits de friction et d’enlèvement de matériaux contenant de l’amiante. Les programmes AFRICA et RICE font circuler des échantillons des secteurs du textile (densité élevée) et de l’enlèvement de MCA durant des tests de clairance (faible densité). Les programmes de l’AIHA (IHPAT et AAR), fonctionnent avec des échantillons de fibres pures générées en laboratoire.

Les taux de réussite des participants ont été recalculés avec les critères du tableau 4, afin de comparer les différents programmes. Pour ce faire, les résultats des participants ont été traités avec les valeurs de référence calculées avec la moyenne arithmétique (groupe de référence et tous les compteurs) et avec la médiane (groupe de référence et tous les compteurs) et en appliquant les limites d’acceptabilité de chacun des programmes (tableau 5).

Tableau 5 : Taux de réussite des compteurs du programme de l'IRSST calculés en fonction des critères des différents programmes

Limites acceptables	Moyenne (Référence) ^(1,5,7,8)	Moyenne (Tous) ⁽⁶⁾	Médiane (Référence) ^(2,3,4)	Médiane (Tous)
0,55 - 2,2 ⁽¹⁾	95 %	95 %	95 %	96 %
0,55 - 2	95 %	95 %	95 %	95 %
0,5 - 2 ^(2,3)	96 %	96 %	96 %	97 %
0,65 - 1,35 ⁽⁶⁾	76 %	79 %	75 %	78 %
0,65 - 1,55 ^(2d, 3d)	84 %	86 %	84 %	86 %
0,6 - 1,67 ⁽⁴⁾	89 %	91 %	89 %	91 %
0,75 - 1,33 ^(4d, 5d)	67 %	69 %	67 %	70 %
$X \pm 3s$ (CV < 20 %) ⁽⁷⁾	87 %	95 %	88 %	95 %
$X \pm 3s$ ⁽⁸⁾	88 %	99 %	88 %	99 %

¹ : Critères IRSST

² : Critères AFRICA ^{2d} : Critères avec limites intérieures

³ : Critères RICE ^{3d} : Critères avec limites intérieures

⁴ : Critères Belgique ^{4d} : Critères avec limites intérieures

⁵ : Critères France ^{5d} : Critères avec limites intérieures

⁶ : Critères PICC-FA (exclusion des valeurs extrêmes). Note : pour les besoins de cette comparaison, aucune valeur n'a été exclue.

⁷ : Critères IHPAT (X = moyenne arithmétique; CV maximum de 20 %; les écarts-types sont ajustés en conséquence)

⁸ : Critères AAR sont semblables aux critères IHPAT (sans le critère sur CV maximum)

Le taux de réussite est peu influencé par la façon de déterminer la valeur de référence (moyenne arithmétique ou médiane). Lorsque la valeur cible est calculée par un groupe de référence, le taux de réussite est similaire à celui établi par tous les compteurs, tant par la moyenne arithmétique que par la médiane, sauf pour les programmes américains faisant intervenir l'écart-type. Le taux de réussite est alors beaucoup plus élevé lorsque les résultats de tous les compteurs (référence et non-référence) servent à fixer la valeur de référence (peu importe si l'on utilise la moyenne ou la médiane).

Ce sont surtout les limites d'acceptabilité (étendue des limites acceptables) qui ont un effet sur le niveau de performance. En resserrant les limites d'acceptabilité, le taux de réussite est plus faible, une variabilité moindre est alors permise et les participants doivent fournir une meilleure performance (Arroyo et Rojo, 1998). Le but d'un programme de contrôle de la qualité étant de réduire la variabilité des résultats, les limites de performance devraient être établies de façon à obtenir un taux de réussite raisonnable. Un taux de réussite d'environ 85 % a déjà été proposé,

toutefois plusieurs aspects doivent être pris en considération, dont le type de fibres et leur densité (Arroyo et Rojo, 2001).

Les critères de performance de l'IRSST étant actuellement des plus permissifs, les limites d'acceptabilité pourraient être modifiées pour obtenir un taux de réussite plus réaliste, par exemple, entre 85 et 89 %. Les limites d'acceptabilité des programmes américains, comparées à une valeur cible déterminée par un groupe de référence, pourraient être retenues : IHPAT et AAR. Les valeurs extérieures du programme belge (0,6 – 1,67) et les valeurs intérieures des limites d'acceptabilité des programmes britanniques, AFRICA et RICE (0,65 -1,55), avec la valeur cible estimée par un groupe de référence, constitueraient également de bons compromis.

7. CONCLUSION

La numération des fibres est une méthode subjective dont le biais et la grande variabilité, dus à différents paramètres liés aux échantillons et aux compteurs, peuvent être limités par de bonnes pratiques de contrôle de la qualité. De tous les paramètres ayant un effet statistiquement significatif sur la justesse des résultats de numération des fibres, le type de fibres est le plus déterminant, suivi du secteur d'activité, de la densité de fibres et finalement de l'affiliation du compteur. Lorsque les résultats de deux déterminants significatifs sont combinés, soit le type de fibres et le secteur d'activité, le facteur type de fibres est toujours prépondérant.

Les résultats de numération des échantillons contenant du chrysotile, seul ou en mixité, ont produit les variabilités les plus élevées. Les fibres de chrysotile sont fines, courbées et sont moins visibles sous le microscope optique que les fibres d'amosite ou les FMA; par conséquent, leur numération représente une difficulté d'analyse accrue. Le textile constitue le secteur d'activité avec la plus faible variabilité des résultats. En effet, les échantillons provenant de ce secteur sont composés majoritairement de fibres et contiennent peu de particules interférentes. La performance des comptages est diminuée à de faibles densités de fibres, comme indiqué par une variabilité élevée et une faible justesse. Les compteurs ont tendance à surestimer le nombre de fibres sur des échantillons de faibles densités tandis que les résultats sont sous-estimés lorsque les densités sont plus élevées. L'expérience des compteurs en lien avec leur affiliation semble avoir un effet sur la variabilité et la justesse des résultats. Ainsi, les compteurs des firmes privées (consultants), qui représentent 93,3 % de tous les participants, ont généré des CV plus élevés pour tous les types de fibres et tous les secteurs d'activités. Or, un taux d'embauche élevé a été observé tout au long du programme pour ce groupe, générant ainsi un nombre important de compteurs dont l'inexpérience peut expliquer la variabilité croissante des résultats.

La variabilité élevée de la numération des fibres témoigne de la nécessité de participer à un programme interlaboratoires pour améliorer la performance de la numération des fibres. La faible performance des compteurs moins expérimentés souligne le besoin de formation supplémentaire.

Considérant que la variabilité de la numération des fibres est influencée significativement par le type de fibres, la provenance des échantillons et la densité des fibres, il est important de continuer le programme de contrôle de la qualité avec des échantillons représentatifs des milieux de travail québécois. Ces échantillons devront donc contenir différents types d'amiante et de fibres minérales artificielles, et provenir de différents secteurs d'activité. L'établissement de la valeur cible des échantillons, à partir des résultats d'un groupe de référence (moyenne arithmétique ou médiane), doit être maintenu en raison des coefficients de variation élevés pour l'ensemble des compteurs, soit près du double de celui du groupe de référence.

8. RECOMMANDATIONS

Au regard de la continuité du programme de contrôle de la qualité de la numération des fibres de l'IRSST, il est suggéré de :

- Maintenir et alimenter une banque d'échantillons représentatifs des milieux de travail québécois, composés de différents types de fibres, de différents secteurs d'activité et de densités variées ;
- Conserver la détermination de la valeur cible (moyenne arithmétique ou médiane) par un groupe de compteurs expérimentés ;
- Modifier les critères d'acceptabilité de façon à abaisser le taux de réussite ;
- Développer un plan de formation plus rigoureux pour les compteurs inexpérimentés, outre les exigences requises, avant une première participation⁴, incluant une surveillance plus serrée qui pourrait faire l'objet de discussion entre les laboratoires participants et l'IRSST.

⁴ <http://www.irsst.qc.ca/laboratoires/programmes-reconnaissance/cq-fibres>

BIBLIOGRAPHIE

- Abell, M. T., Shulman, S. A. et Baron, P. A. (1989). The Quality of Fiber Count Data. *Applied Industrial Hygiene*, 4(11), 273-285.
- Arroyo, M. C. et Rojo, J. M. (1998). National versus international asbestos fibre counting schemes: Comparison between the Spanish Interlaboratory Quality Control Programme (PICC-FA) and the asbestos fibre regular informal counting arrangement (AFRICA). *Annals of Occupational Hygiene*, 42(2), 97-104.
- Arroyo, M. C. et Rojo, J. M. (2001). A proposal for harmonising laboratory performance assessment criteria in national asbestos fiber counting schemes. *Annals of Occupational Hygiene*, 45(6), 447-455.
- Baron, P. A. (2003). Measurement of fibers. *NIOSH Manual of Analytical Methods*, 143-166.
- Baron, P. A. et Shulman, S. A. (1987). Evaluation of the Magiscan Image Analyzer for Asbestos Fiber Counting. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 48(1), 39-46.
- Beckett, S. T. et Attfield, M. D. (1974). Inter-laboratory comparisons of the counting of asbestos fibres sampled on membrane filters. *Annals of Occupational Hygiene*, 17(2), 85-96.
- Carton, B., Kauffer, E., Derzko, G., Grosdemange, J. P. et Jeandel, B. (1981). Results of an asbestos counting trial performed in France in 1979. *Annals of Occupational Hygiene*, 24(1), 9-21.
- Cherrie, J., Jones, A. D. et Johnston, A. M. (1986). The Influence of Fiber Density on the Assessment of Fiber Concentration Using the Membrane Filter Method. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 47(8), 465-474.
- Code de sécurité pour les travaux de construction (CSTC), RLRQ. S-2.1, r.4. Éditeur officiel du Québec. Consulté le 11 novembre 2014.
http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=3&file=/S_2_1/S2_1R4.HTM
- Crawford, N. P. (1992). The RICE and AFRICA schemes for asbestos fibre counting. *Annals of Occupational Hygiene*, 36(1), 59-69.
- Crawford, N. P. et Cowie, A. J. (1984). Quality Control Of Airborne Asbestos Fiber Counts In The United Kingdom The Present Position. *Annals of Occupational Hygiene*, 28(4), 391-398.
- Crawford, N. P., Thorpe, H. L. et Alexander, W. (1982). A Comparison of the Effects of Different Counting Rules and Aspect Ratios on the Level and Reproducibility of Asbestos Fiber Counts, Part I: Effects on Level (Report No. TM/82/23), Part II: Effects on Reproducibility (Report No. TM/82/24). Edinburgh, Scotland Institute of Occupational Medicine.
- Dion, C., Perrault, G., Chamberland, C. et McCabe, J. (2000). Contrôle de la qualité de la numération des fibres. *Études et recherches. Rapport R-240*, 16 pages.

- Gonzalez-Fernandez, E. et Martin, F. R. (1986). Comparison of NIOSH and AIA Methods for Evaluating Asbestos Fibres: Effects of Asbestos Type, Mounting Medium, Graticule Type and Counting Rules. *Annals of Occupational Hygiene*, 30(4), 397-410.
- Grzebyk, M., Kauffer, E. et Freville, L. (2005). Proposal to adapt the Workplace Analysis Scheme for Proficiency (WASP) programme to fibre counting tests. *Annals of Occupational Hygiene*, 49(4), 325-334.
- Harper, M. et Bartolucci, A. (2003). Preparation and examination of proposed consensus reference standards for fiber-counting. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 64(2), 283-287.
- Harper, M., Lee, E. G., Slaven, J. E. et Bartley, D. L. (2012). An Inter-Laboratory Study to Determine the Effectiveness of Procedures for Discriminating Amphibole Asbestos Fibers from Amphibole Cleavage Fragments in Fiber Counting by Phase-Contrast Microscopy. *Annals of Occupational Hygiene*, 56(6), 645-659.
- Harper, M., Slaven, J. E. et Pang, T. W. (2009). Continued participation in an asbestos fiber-counting proficiency test with relocatable grid slides. *Journal of Environmental Monitoring*, 11(2), 434-438.
- IRSST (1995). Direction des laboratoires. Méthode analytique 243-1. *Numération des fibres. Notes et rapports scientifiques et techniques*. 22 p.
<http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/ma-243.pdf>
- IRSST. (2012). Direction des communications et de la valorisation de la recherche. *Guide d'échantillonnage des contaminants de l'air en milieu de travail*. 8^e édition, version 8.1.
<http://www.irsst.qc.ca/media/documents/pubirsst/t-06.pdf>
- HSE. Health and Safety Executive (1995) *Asbestos fibres in air: light microscope methods for use with the Control of Asbestos at Work Regulation*. MDHS 39/4 HSE Books ISBN 07176 0913 8.
- Jones, A. D., Arroyo, M. C., Grosjean, R., Tylee, B., Miller, B. G. et Brown, P. (2005). A comparison of fibre counting across three European national proficiency testing schemes. *Annals of Occupational Hygiene*, 49(4), 309-324.
- Kauffer, E. (1992). The asbestos fibre inter-laboratory counting exchange in France. *Cahiers de notes documentaires - Sécurité et hygiène du travail*, 147, 249-254.
- NIOSH (2003). Method 7400, Asbestos and other fibers by PCM. Schlecht PC and O'Connor PF, editors. *NIOSH manual of analytical methods.*, 4th edn DHSS (NIOSH) Pub. No. 2003-154.
- NIOSH (2011). *Current Intelligence Bulletin 62. Asbestos Fibers and Other Elongate Mineral Particles: State of the Science and Roadmap for Research*. .
- Ogden, T. L. (1982). *The reproducibility of asbestos counts*. Health and Safety Executive, Research Paper No. 18, 20 pages.

Ogden, T. L., Shenton-Taylor, T., Cherrie, J. W., Crawford, N. P., Moorcroft, S., Duggan, M. J., Treble, R. D. (1986). Within-laboratory quality control of asbestos counting. *Annals of Occupational Hygiene*, 30(4), 411-425.

OMS (1998). *Détermination de la concentration des fibres en suspension dans l'air. Méthode recommandée : la microscopie optique en contraste de phase (comptage sur membrane filtrante)*. Organisation mondiale de la Santé.

Paik, N.-W., Levine, S. P. et Schork, M. A. (1994). Intracounter, Intralaboratory, and Interlaboratory Variation of Asbestos Counting with Phase-Contrast Microscopy. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 9(7), 510-516.

Pang, T. W. et Harper, M. (2008). The quality of fiber counts using improved slides with relocatable fields. *Journal of Environmental Monitoring*, 10(1), 89-95.

Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST), RLRQ. S-2.1, r.13. Éditeur officiel du Québec. Consulté le 11 novembre 2014.

http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=3&file=/S_2_1/S2_1R13.HTM

Schlecht, P. C. et Groff, J. H. (1998). PAT Program. *Appl. Occup. Environ. Hyg.*, 13, 15-17.

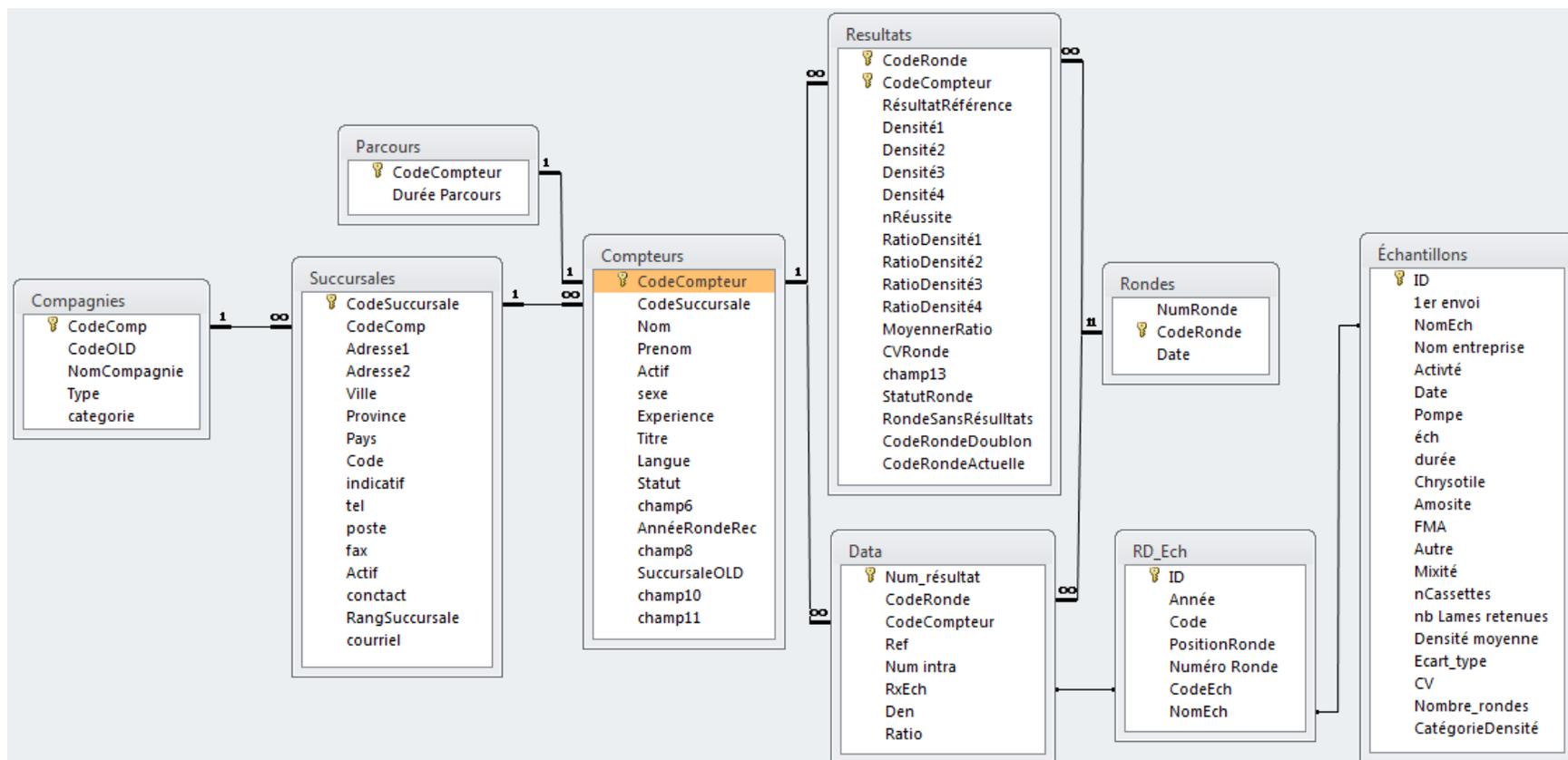
Schlecht, P. C. et Shulman, S. A. (1986). Performance of asbestos fiber counting laboratories in the NIOSH proficiency analytical testing (PAT) program. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 47(5), 259-269.

Thomas, J. R., Nelson, J. K. et Thomas, K. T. (1999). A Generalized Rank-Order Method for Nonparametric Analysis of Data from Exercise Science: A Tutorial. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 70(1), 11-23.

Tombes, C. et Calpin, J. A. (1988). A Simple Quality Control System for Evaluation of Interlaboratory Differences in Fiber Counting in Accordance with NIOSH 7400 Method. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 49(11), A695-A697.

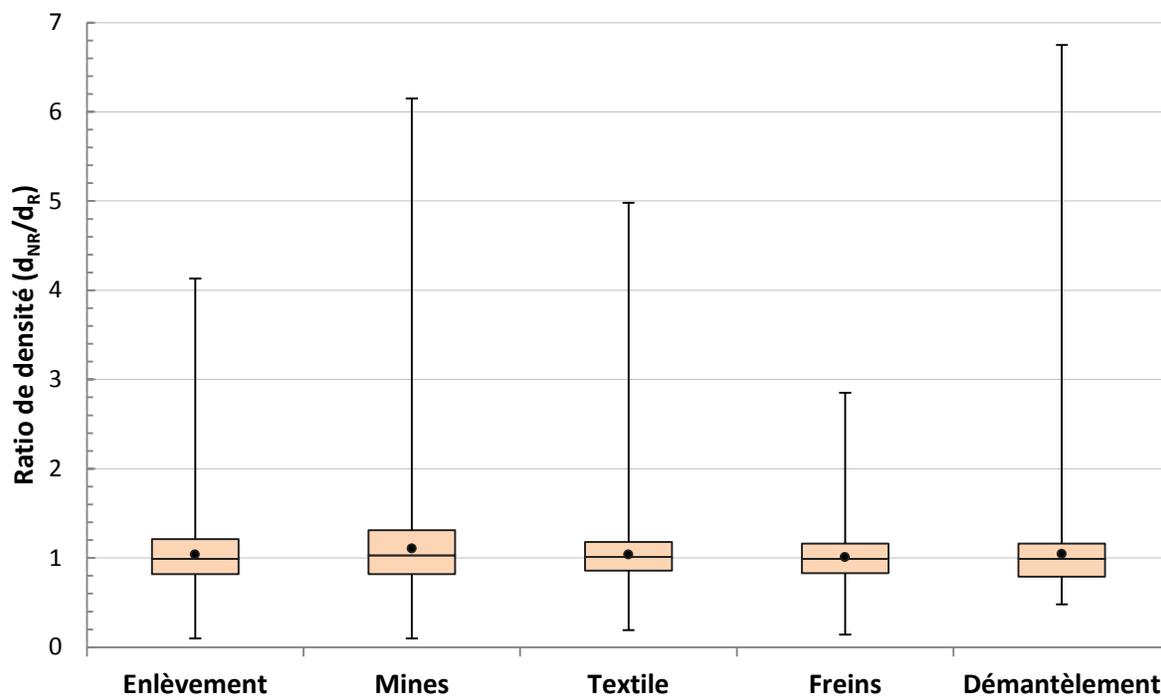
Walton, W. H. (1982). The nature hazards and assessment of occupational exposure to airborne asbestos dust: a review. *Annals of Occupational Hygiene*, 25(2), 117-247.

ANNEXE A : STRUCTURE DE LA BASE DE DONNÉES PERMETTANT L'EXPLOITATION DES RÉSULTATS



ANNEXE B : STATISTIQUES DESCRIPTIVES

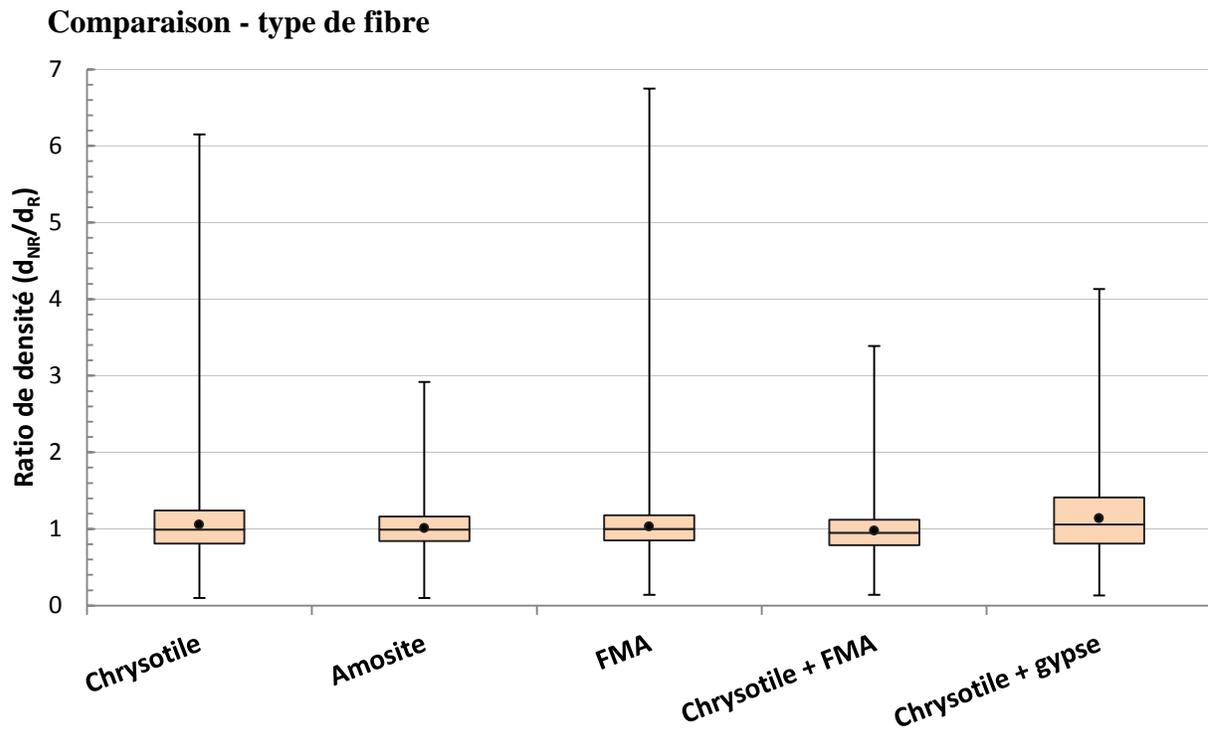
Comparaison - secteurs d'activité ⁵



Secteur d'activité	Nombre	Moyenne	Écart-type	CV
Enlèvement	14736	1,04	0,34	33%
Mines	6980	1,11	0,43	39%
Textile	9644	1,04	0,30	29%
Freins	1230	1,01	0,29	29%
Démantèlement	187	1,05	0,53	51%

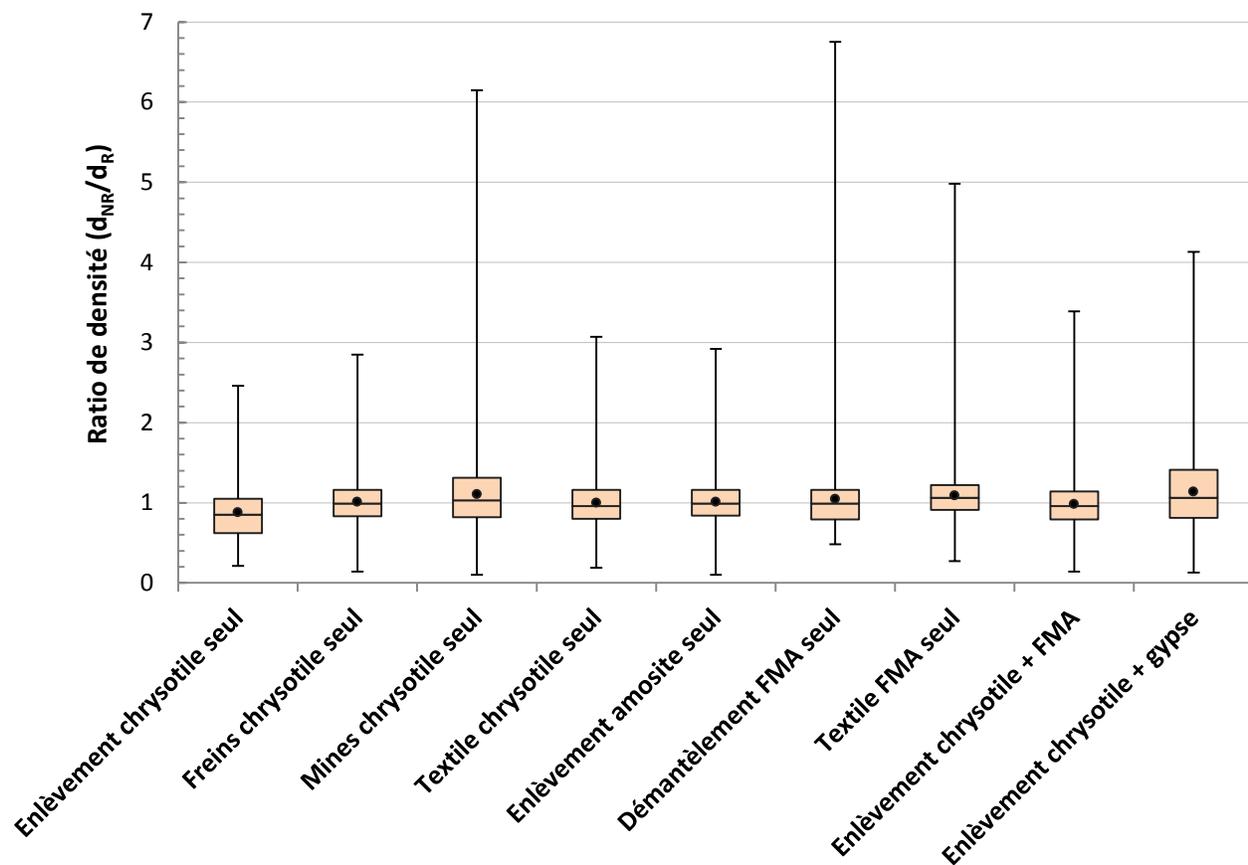
⁵ Tous les diagrammes en boîte à moustache de cette annexe présentent les données suivantes :

- Limite inférieure de la moustache : minimum
- Limite inférieure de la boîte : 25^e centile
- Ligne horizontale dans la boîte : médiane
- Limite supérieure de la boîte : 75^e centile
- Limite supérieure de la moustache : maximum
- Rond noir : moyenne arithmétique



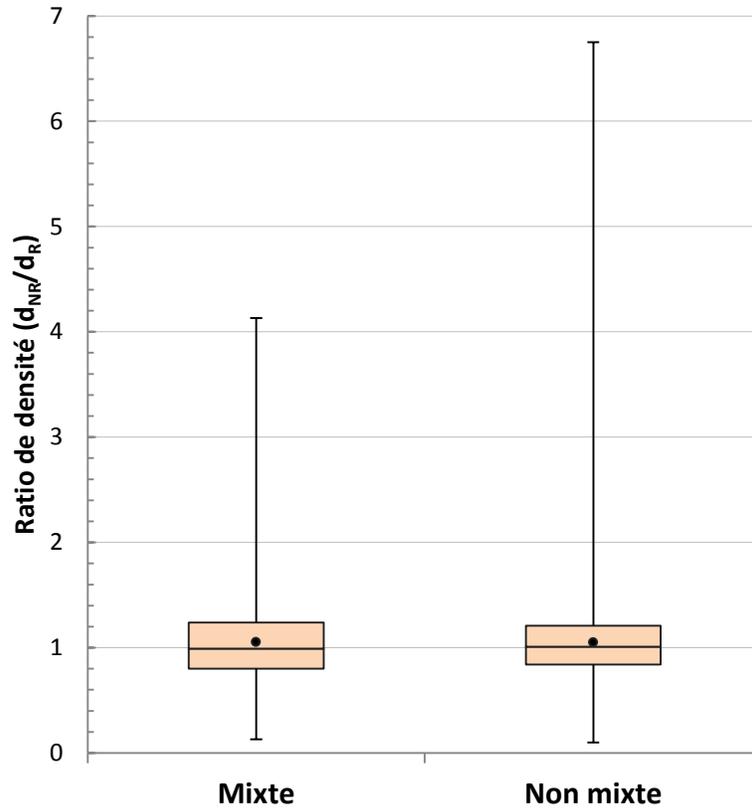
Type de fibre	Nombre	Moyenne	Écart-type	CV
Chrysotile	21770	1,06	0,38	36 %
Amosite	6405	1,01	0,26	26 %
FMA	9344	1,03	0,30	29 %
Chrysotile + FMA	4742	0,98	0,28	29 %
Chrysotile + gypse	4243	1,14	0,45	40 %

Comparaison - secteurs d'activité et type de fibre



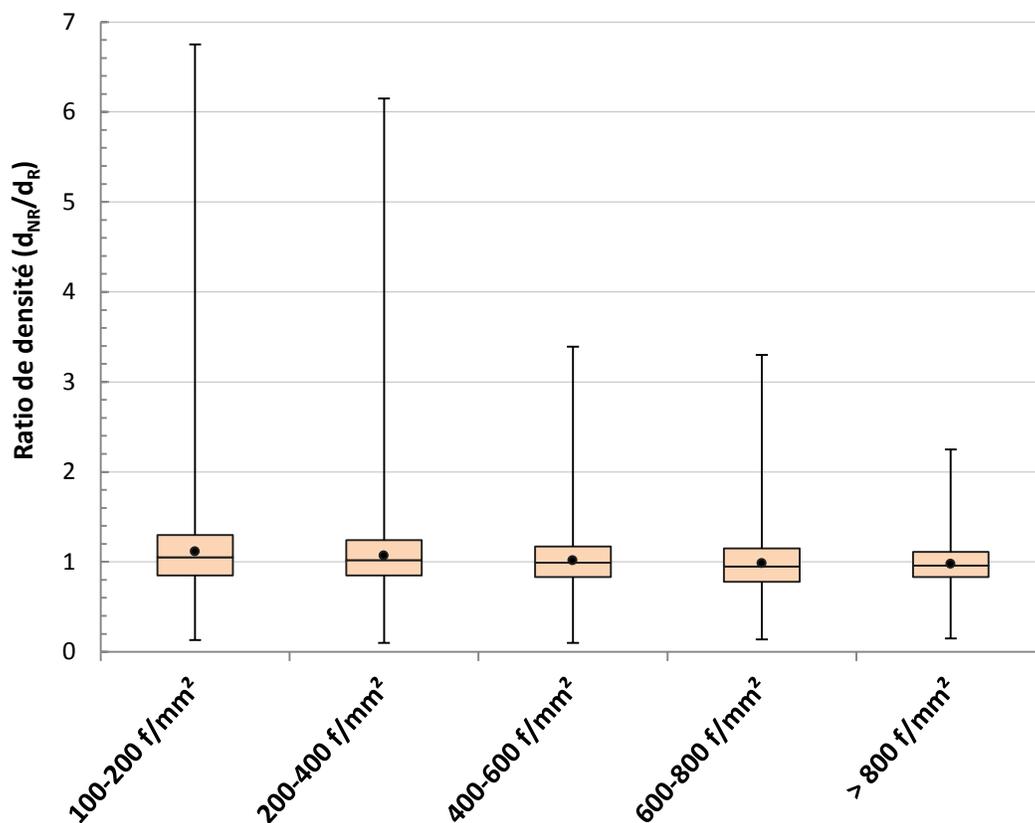
Activité et type de fibre	Nombre	Moyenne	Écart-type	CV
Enlèvement - chrysotile seul	173	0,88	0,40	45 %
Freins - chrysotile seul	1230	1,01	0,29	29 %
Mines - chrysotile seul	6980	1,11	0,43	39 %
Textile - chrysotile seul	4402	1,00	0,31	31 %
Enlèvement - amosite seul	6405	1,01	0,26	26 %
Démantèlement - FMA seul	187	1,05	0,53	51 %
Textile - FMA seul	4415	1,09	0,30	27 %
Enlèvement - chrysotile + FMA	3915	0,98	0,29	30 %
Enlèvement - chrysotile + gypse	4243	1,14	0,45	40 %

Comparaison - échantillons, mixte et non mixte

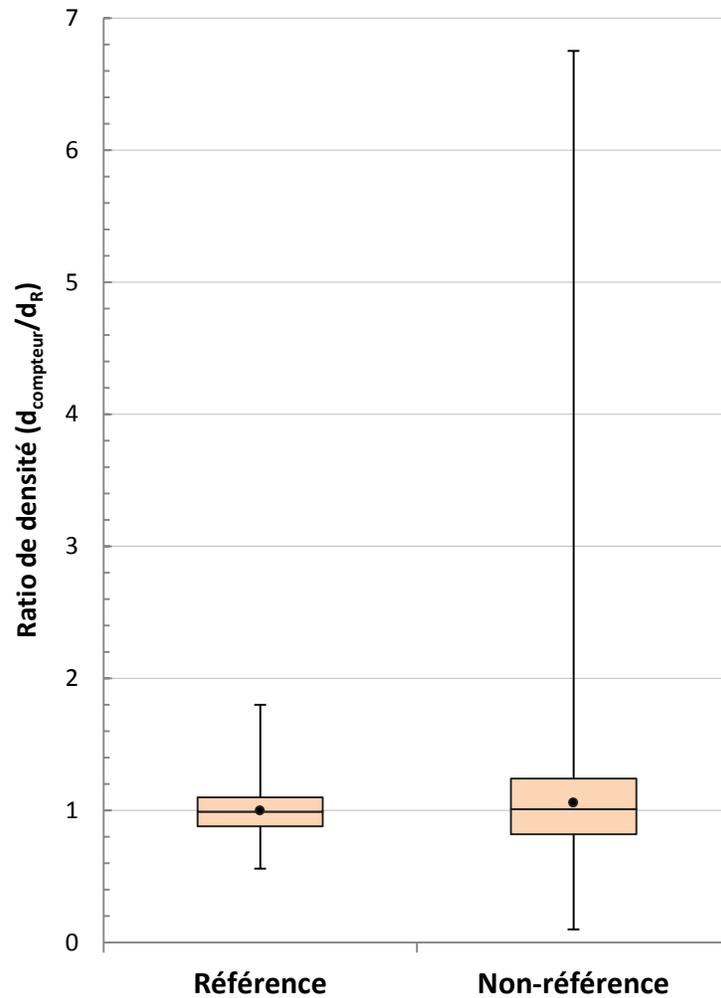


Mixité	Nombre	Moyenne	Écart-type	CV
Mixte	8985	1,05	0,38	36%
Non-mixte	23792	1,05	0,34	32%

Comparaison – densités de fibres

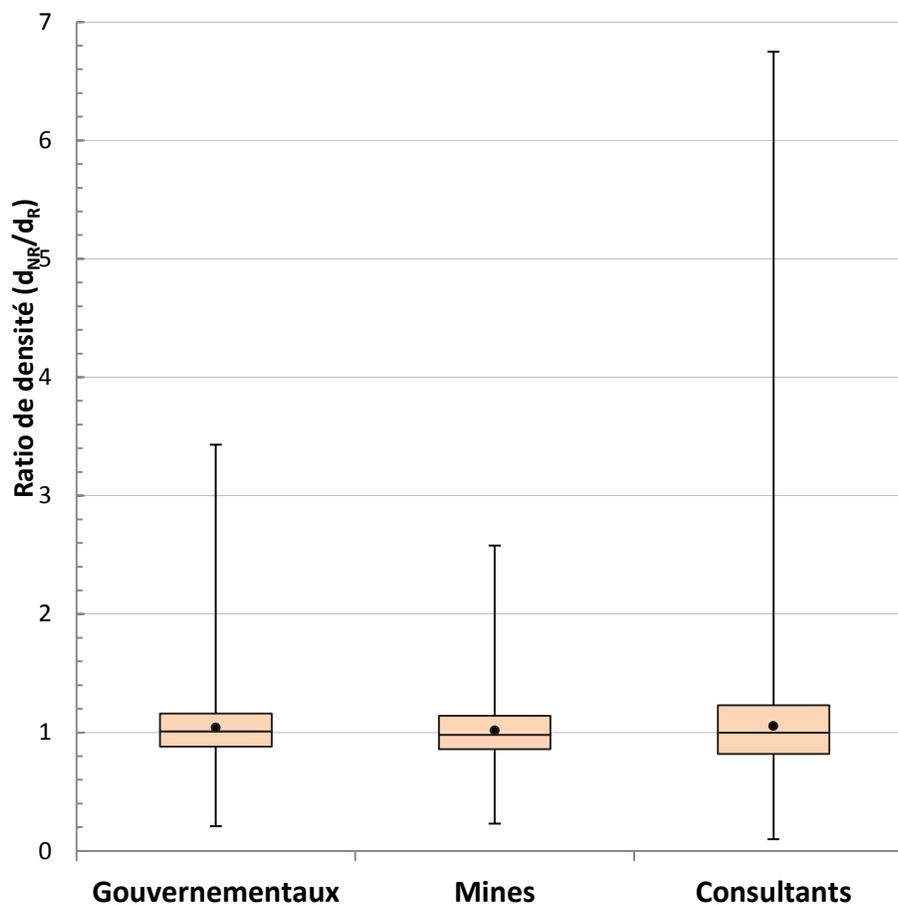


Densité (f/mm ²)	Nombre	Moyenne	Écart-type	CV
100-200	6935	1,12	0,42	38 %
200-400	12715	1,07	0,36	34 %
400-600	6086	1,02	0,28	28 %
600-800	4847	0,99	0,32	32 %
> 800	2194	0,98	0,23	23 %

Comparaison – compteurs, référence et non-référence

Compteur	Nombre	Moyenne	Écart-type	CV
Référence	3796	1,00	0,17	17 %
Non-référence	28981	1,06	0,37	35 %

Comparaison – affiliation des compteurs (Gouvernementaux, mines et consultants)



Affiliation des compteurs	Nombre	Moyenne	Écart-type	CV
Gouvernementaux	2320	1,04	0,27	26%
Mines	1644	1,02	0,25	25%
Consultants	28813	1,05	0,36	34%