

DOSES INHALÉES, CHARGES DE TRAVAIL ET CONDITIONS CLIMATIQUES

Christian Fortin^a et Alain Steve Comtois^b

^a Centre of santé et services sociaux de la Montagne, Santé au travail, Montréal.

^b Université du Québec à Montréal, Département de Kinanthropologie, Montréal.

En hygiène du travail, les techniciens et les hygiénistes échantillonnent les contaminants présents dans l'air afin d'évaluer les effets des expositions professionnelles sur la santé et le bien-être des travailleurs. Les niveaux de risque associés à l'inhalation de ces contaminants sont évalués en comparant les concentrations mesurées et probables à différentes limites d'exposition. Afin d'interpréter correctement les données, il est nécessaire de bien comprendre les hypothèses et les faits physiologiques utilisés pour établir les limites d'exposition. Cette conférence aborde certains faits parfois méconnus et certaines hypothèses fondamentales, en relation avec d'autres faits très significatifs de la physiologie humaine. Elle montre clairement comment prendre en considération les effets des charges métaboliques, de la température et de la pression de l'air sur les doses inhalées. Elle montre également l'importance des différentes erreurs qui peuvent être faites à ce sujet lorsqu'on ne prend pas ces effets en considération. Elle propose enfin une méthode permettant d'évaluer correctement les doses inhalées par les travailleurs, puis d'ajuster en conséquence les limites d'exposition à recommander dans des situations spécifiques.

Termes clés : Dose inhalée. Dépense métabolique. Température et pression de l'air. Limites admissibles d'exposition.

Introduction

En hygiène industrielle, les techniciens et les hygiénistes échantillonnent l'air afin de caractériser l'exposition des travailleurs à des contaminants présents dans l'air qu'ils respirent. Les principaux facteurs à considérer sont: a) les effets éventuels sur la santé, la sécurité et le bien-être des travailleurs; b) les concentrations mesurées des divers polluants; c) les durées possibles de l'exposition dans diverses conditions (scénarios d'exposition); et d) les limites admissibles à recommander. Les résultats d'échantillonnage sont utilisés conjointement avec les données de la physiologie humaine pour estimer les doses inhalées en milieu de travail. L'échantillonnage biologique ou d'autres considérations permettent par ailleurs de déterminer l'importance des doses acquises par les autres voies de pénétration dans l'organisme. À l'aide des données disponibles en toxicologie, les doses estimées servent ensuite à recommander des moyens préventifs mieux adaptés, ainsi que des limites d'exposition admissibles (LEA) plus appropriées.

Les limites admissibles de l'OSHA et de l'ACGIH sont deux LEAs communément utilisées par les praticiens en hygiène du travail. Pour de nombreuses

substances, ces limites sont fondées sur une dose jugée acceptable chez la grande majorité des travailleurs, acquise au cours d'un travail de huit heures, cinq jours par semaine, pour des expositions répétées à long terme. Les deux LEAs précédentes réfèrent aux conditions atmosphériques de température et de pression normales (TPN), 298,2⁰K (25⁰C) et 101,3 kPa (760 mm de mercure).

Le travailleur type

Les deux LEAs reposent sur l'hypothèse qu'un travailleur masculin standard de 70 kg inhale 10 m³ d'air TPN en 8 h de travail. Cela se traduit par 10,7 m³ aux conditions BTPS au niveau des poumons, conditions définies par la température normale du corps (37⁰C), une pression atmosphérique normale (101,3 kPa), et un air saturé en vapeur d'eau (6,3 kPa ; 47 mm Hg).

En physiologie du travail, le volume BTPS inhalé par le travailleur masculin standard de 70 kg varie de 9,6 m³ pour un travail léger, à 16,8 pour un travail modéré, et à 24 pour un travail optimal, une variation totale de 150 % (voir **Tableau I**).^(1,2) Les débits nécessaires peuvent grimper à 38,4 m³ par 8 h pour un travail

dit maximal et à 57,6 pour un travail épuisant, au moins sur de courtes périodes. Il est par conséquent très important de considérer les charges métaboliques imposées aux travailleurs afin d'estimer correctement les doses inhalées. Le **Tableau I** montre par ailleurs clairement que le volume de 10 m³ représente en fait beaucoup mieux la dépense énergétique des travaux légers que celle des modérés.

Le travailleur standard ne correspond pas à un travailleur moyen, ainsi qu'on tend à le supposer. L'histoire du travailleur standard est très intéressante mais trop longue pour être discutée ici.^(3,4) Pour un travailleur masculin, il est défini comme ayant un poids de 70 kg, une stature de 178 cm et une surface corporelle de 1,8 m².^(5,6) Ces caractéristiques moyennes sont en fait celles qui étaient observées, au début des années 1960 en Amérique du Nord, chez les jeunes hommes adultes (18-24 ans) n'ayant pas plus de 10 % de graisse corporelle.^(1,4,6) Ces moyennes sont très différentes de celles des travailleurs. Le **Tableau II** montre que, autour de 1960-1962, chez les travailleurs masculins, le poids moyen était de 77,5 kg, alors que les 70^e et 95^e centiles de poids étaient respectivement de 84 et 100 kg.^(1,8) Au cours des quarante dernières années, la moyenne et l'écart-type du poids ont augmenté rapidement. L'augmentation a été

plus rapide à l'extrémité supérieure de la distribution. Récemment, entre 1999 et 2002 aux États-Unis, chez les hommes adultes entre 25 et 54 ans, le poids moyen était 84,2 kg, tandis que les 70^e et 95^e centiles étaient de 95 et 115 kg.⁽⁹⁾ Le **Tableau III** montre une évolution similaire dans les différents intervalles d'âges. Le **Tableau IV** permet de suivre cette l'évolution à partir des résultats globaux de trois enquêtes successives réalisées aux États-Unis dans le cadre des National Health and Nutrition Examination Surveys (NHANES).⁽⁹⁾ L'augmentation rapide de la moyenne et de l'écart-type chez les 18 à 65 ans est très claire. Le **Tableau V** a été calculé à partir de données récentes⁽⁹⁾.

Tous ces tableaux soulèvent la question de savoir quel est le pourcentage de la population à protéger a priori, avec les normes et pratiques recommandées en hygiène du travail : s'agit-il de seulement 20 % (≤ 70 kg) ? de 70 % (≤ 95 kg) ou de 95 % (≤ 115 kg) ? La plupart des intervenants en santé au travail répondront sans doute qu'il faut viser une proportion d'au moins 90 % ou la fraction la plus grande possible, et traiter le reste cas par cas (protection particulière, sélection, formation, entraînement et contrôle systématique).

Tableau I : Caractérisation du travail physique chez un sujet masculin type de 70 kg

| Activités | Watts | Litres d'air par mn | m ³ d'air par 8 h | Respirations par mn | Battements du cœur par mn | Erreur systématique sur la dose |
|-------------------|--------|---------------------|------------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------------------|
| Repos | 83 | 8 | 3,8 | 12 | 70 | - |
| Travail léger | 243 | 20 | 9,6 | 14 | 100 | 0 % |
| Travail modéré | 523 | 35 | 16,8 | 15 | 120 | 75 % |
| Travail optimal | 697 | 50 | 24,0 | 16 | 140 | 150 % |
| Travail fatiguant | 872 | 60 | 28,8 | 20 | 160 | 200 % |
| Travail maximal | 1047 | 80 | 38,4 | 25 | 180 | 300 % |
| Travail épuisant | > 1047 | 120 | 57,6 | 30 | > 180 | 500 % |

Notes : 1. 1 W = 0,239 cal/s = 0,860 kcal/h = 3,60 kJ/h and 300 kcal/h = 258 W.

2. Volumes aux conditions BTPS (37^oC, 101,3 kPa et atmosphère saturée de vapeur d'eau).

Tableau II. Centiles du poids corporel chez les hommes adultes, entre 25 et 54 ans, aux États-Unis, entre 1960-1962 et 1999-2002

| Hommes | Années | Centiles | | | | |
|------------|-----------|----------|-----------|------|-----------|-----|
| | | 5 | 30 | 50 | 70 | 95 |
| Poids (kg) | 1960-1962 | 60 | 70 | 77,5 | 84 | 100 |
| | 1999-2002 | 55 | 75 | 84,2 | 95 | 115 |

Tableau III. Variation du poids en kg chez les hommes adultes en fonction de l'âge, États-Unis, 1960-1962

| Hommes | Tranches d'âges en années | | | | | | | |
|--------|---------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | Centiles | 18 - 79 | 18 - 24 | 25 - 34 | 35 - 44 | 45 - 54 | 55 - 64 | 65 - 74 |
| 95 | 96,2 | 97,1 | 101,2 | 99,3 | 99,3 | 96,6 | 93,9 | 89,8 |
| 50 | 75,3 | 71,2 | 76,7 | 77,6 | 77,6 | 74,8 | 73,0 | 66,2 |
| 5 | 57,2 | 56,2 | 58,5 | 60,8 | 59,4 | 55,8 | 53,1 | 48,5 |

Tableau IV. Moyennes et écarts-types estimés chez les 18-65 ans, États-Unis

| Intervalle d'âge | Enquête NHANES | Hommes (kg) | | | Femmes (kg) | | |
|------------------|-----------------|--------------|--------------|-------|--------------|--------------|-------|
| | | Moy. | s | n | Moy. | s | n |
| 18-65 | II : 1976-1980 | 78,65 | 13,23 | 4 711 | 65,47 | 13,77 | 5 187 |
| | III : 1988-1994 | 82,19 | 16,18 | 625 | 69,45 | 16,55 | 7 182 |
| | IV : 1999-2002 | 85,47 | 19,03 | 1 908 | 74,55 | 19,32 | 2 202 |

* Les estimés sont pondérés par les poids des échantillons de chaque enquête.

Tableau V. Variation du poids en kg avec l'âge chez les hommes adultes, États-Unis, 1999-2002

| Hommes | Intervalles d'âges en années | | | | | | | |
|--------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Centiles | >=20 | 20-74 | 20-29 | 30-39 | 40-49 | 50-59 | 60-74 |
| 95 | 113,8 | 106,5 | 115,0 | 116,1 | 117,2 | 116,7 | 115,7 | 107,3 |
| 50 | 85,0 | 78,9 | 84,6 | 86,7 | 88,3 | 86,8 | 87,0 | 83,1 |
| 5 | 56,1 | 51,3 | 54,1 | 57,3 | 59,3 | 56,8 | 58,3 | 58,8 |

Dans de nombreuses tâches, les coûts métaboliques et les volumes respiratoires sont tout simplement proportionnels au poids du travailleur.^(5, 6) Par exemple, un travail modéré exige 15,6 m³ d'air TPN chez un travailleur type de 70 kg, 19,0 chez un de 85 kg et 25,6 chez un de 115 kg, une variation totale de 64 %. Pour d'autres tâches, toutefois, notamment celles de manutention manuelle, l'accroissement des coûts métaboliques est généralement beaucoup plus rapide (segments de parabole ou de courbe logistique).^(6, 10)

Pour l'hygiéniste, ces accroissements sont particulièrement intéressantes à noter parce qu'elles amènent plusieurs réflexions. Dans les domaines de la pharmacologie et de toxicologie environnementale, les risques associés à l'exposition aux substances chimiques ou médicamenteuse, sont généralement évalués par unité de poids corporel. En supposant que tous les autres facteurs restent inchangés, une dose donnée implique des doses plus faibles par unité de poids corporel et

des risques réduits pour ceux qui ont un poids supérieur au poids de référence. Ce sont par conséquent les personnes de petit poids qui mènent l'extrémité haute de la distribution des risques. Dans ces domaines, le taux métabolique par mètre carré et la surcharge pondérale sont utilisés principalement pour adapter les doses recommandées aux enfants, ou pour extrapoler les dépenses métaboliques entre les espèces. Pour la population générale, il suffit généralement de considérer le métabolisme de base, le métabolisme au repos et le métabolisme des activités légères, lesquels dépendent essentiellement de la masse musculaire et très peu de la masse grasse. Le métabolisme de travail, toutefois, dépend de la masse totale du corps ou des parties du corps qui bougent pendant le travail.^(1, 6, 10)

En hygiène du travail, étant donné l'importance de l'exposition par la voie respiratoire, il est essentiel de considérer convenablement les volumes d'air inhalés par les travailleurs en fonction de leur charge physique

de travail. Ainsi, par exemple, chez des volontaires exposés à 50 ppm de toluène, des efforts physiques d'une intensité relativement faible (production nette de 50 W et coût total de 250 W environ) ont donné une concentration alvéolaire d'environ 1,8 à 2,0 fois plus élevés que celles mesurées au repos.⁽¹¹⁾ Par ailleurs, le poids des poumons et la surface d'échange gazeux pulmonaire sont respectivement peu corrélé et très peu corrélée au poids corporel. À l'âge adulte, ils n'augmentent plus avec le poids corporel. Cela signifie qu'un travailleur sain pesant plus de 70 kg peut inhaler, par exemple, beaucoup plus de silice par m² de surface pulmonaire qu'attendu à partir des hypothèses actuelles qui sous-tendent les LEAs.

À l'occasion, certains suggèrent qu'il n'est pas vraiment nécessaire de considérer le poids des travailleurs pour estimer les doses inhalées, puisque des facteurs de sécurité sont intégrés dans la conception des LEAs. Nous ne sommes pas d'accord avec cette suggestion pour trois raisons. Premièrement, ces facteurs ne sont pas conçus au départ afin d'accommoder des écarts importants vis-à-vis des hypothèses de base. Par exemple, l'ACGIH écrivait en 2003 :

“... the safety factors of most substances are not of such a magnitude as to take care of gross deviations. For example, continuous, heavy work at temperature above 25 °C WBGT, or overtime extending the work-week more than 25 %, might be considered gross deviations.”⁽¹²⁾

Or, nous parlons ici de facteurs nettement plus importants que 25 %. Deuxièmement, il n'est pas recommandé en prévention d'utiliser les facteurs de sécurité comme marges de sécurité. Troisièmement, il s'agit d'une pratique courante et recommandée, en physiologie de travail, en ergonomie et en hygiène du travail, d'ajuster les estimations des coûts métaboliques en fonction du poids des travailleurs. Ceci est nécessaire parce que les tableaux de dépense énergétique sont traditionnellement construits pour représenter le travailleur type de 70 kg (ou la travailleuse type de 60 kg). Par exemple, le NIOSH⁽⁵⁾ recommande d'appliquer les corrections en fonction du poids du travailleur, afin d'évaluer correctement les coûts métaboliques d'activités spécifiques :

- p. 4: “... For a worker that has other than 70-kg weight, the metabolic heat shall be corrected by the factor (actual worker weight in kg/70kg). Thus for a 85 kg worker, the factor would be $(85/70) = 1.21$ and the appropriate estimate for metabolic heat would be $1.21 * 5.1 = 6.2$ kcal/min for the duration of the task.”

- p. 18: “The values are in kcal/min ... for the “standard worker” defined as one who weighs 70 kg (154 lbs) and has a body surface area of 1.8 m² (19.4 ft²). For workers who are smaller or larger than the standard worker, appropriate correction factors must be applied ...”.

Pour estimer les doses inhalées, il est nécessaire d'évaluer les volumes inhalés, en les mesurant sur le terrain, directement ou indirectement, ou en les estimant à partir d'autres données, comme on le verra après le paragraphe suivant.

Contrôle respiratoire

Plusieurs spécialistes en hygiène industrielle semblent croire, contrairement aux faits physiologiques, qu'il n'y a pas de changements importants dans les volumes respiratoires, à un niveau de travail donné, avec la température de l'air, la pression atmosphérique prévalente et l'altitude. Certains affirment qu'il s'agit seulement d'une approximation utile en certaines circonstances. D'autres y voient un phénomène inattendu mais qui s'expliquerait par le mécanisme général de l'adaptation physiologique humaine. D'autres encore tentent de l'expliquer en référant au plateau de la courbe de saturation en oxygène de l'hémoglobine, et au fait que l'O₂ n'a pas d'impact direct sur la ventilation respiratoire, tant que sa pression partielle alvéolaire ne tombe pas en dessous de 8 kPa (60 mm de mercure). Or, ceci se produit en pratique au-dessus de 3 000 m d'altitude.^(1,13) Ainsi, en utilisant des faits physiologiques secondaires mais en négligeant d'autres faits beaucoup plus importants, certains spécialistes arrivent à des conclusions erronées. En réalité, les changements observés dans le volume courant et la fréquence respiratoire sont petits mais, multipliés par 480 minutes par jour, ils peuvent donner des volumes additionnels importants, ainsi qu'on le montre dans le paragraphe suivant.

Le plateau de la courbe de saturation n'est en fait impressionnant qu'en laboratoire, là où la pression partielle d'oxygène peut être ajustée à des niveaux bien plus élevés que les 20 kPa (150 mm Hg) observés au niveau de la mer, et où la pression partielle de CO₂ peut être maintenue fixe. Par ailleurs, dans l'organisme, du point de vue d'un globule rouge qui fait le tour du circuit sanguin, la pente de la courbe avant le plateau est beaucoup plus abrupte et changeante qu'en laboratoire.^(1,13) Ce ne serait pas une bonne idée de placer un point de contrôle sur cette courbe, afin de d'avoir un système de contrôle fiable et

précis de la ventilation pulmonaire. L'organisme humain est beaucoup mieux fait que cela. La solution choisie par la nature est d'utiliser plutôt la concentration de bioxyde de carbone dans le liquide céphalo-rachidien (LCR) comme stimulus principal des centres respiratoires situés dans le cerveau. Cette concentration est liée très directement à celle du sang, de telle sorte que :

"Carbon dioxide acts as a stimulus to the respiratory center in the brain stem, **and the CO₂ tension in the blood is by far the most significant factor of control.**" ⁽¹⁴⁾

Manifestement, il s'agit là d'un excellent choix pour une variable de contrôle. La courbe de dissociation du CO₂ n'a pas de plateau ni de maximum local, et elle est pratiquement linéaire dans une plage large, utile et centrée autour d'environ 5,3 kPa (40 mm Hg) de pression partielle de CO₂.

La précision du contrôle

Le système de contrôle de l'appareil respiratoire est très sophistiqué et très précis. Il intègre des signaux provenant de plusieurs types de récepteurs mécaniques et chimiques, et de diverses régions du corps. Il existe de nombreuses connaissances à ce sujet à propos des récepteurs dans les muscles, le thorax et les poumons, le cerveau et l'aorte.

Le stimulus CO₂ a un impact rapide et direct sur la ventilation pulmonaire. Le contrôle s'effectue essentiellement par le système nerveux central (SNC): a) environ 80 % des récepteurs sensibles au CO₂ sont présents dans le cerveau, où ils contrôlent les niveaux de CO₂ dans le liquide céphalo-rachidien (LCR) ; les centres respiratoires du SNC sont également modulés par les concentrations en ions H⁺ du LCS (voir ci-dessous), et b) environ 20 % sont présents en périphérie, principalement dans les corpuscules carotidiens et aortiques. La réponse caractéristique au CO₂ est due à la stimulation des récepteurs centraux et non à celle des récepteurs périphériques. Les corpuscules carotidiens et aortiques répondent seulement aux variations importantes de la pression artérielle partielle du CO₂ mais restent insensibles à de faibles variations de la pression partielle de ce gaz dans les alvéoles. Toute augmentation de CO₂ dans le sang entraîne une augmentation de la ventilation pulmonaire, et toute baisse entraîne une diminution. Des variations de la pression partielle de CO₂ aussi faibles que 1,3 kPa (10 mm Hg) par rapport à la normale de 5,3 kPa (40 mm Hg) sont

rapidement corrigées par le système respiratoire, aussi bien au repos que durant l'activité physique.

Le stimulus pH a également un impact direct sur la ventilation pulmonaire, par suite de la présence de récepteurs spécialisés, sensibles au pH, sur les surfaces latérales du bulbe rachidien, ainsi que dans les corpuscules carotidiens et aortiques. Ces récepteurs stimulent la ventilation pulmonaire lorsque la concentration de protons (ions H⁺) augmente. Et cela se produit quand il y a : a) une augmentation des coûts métaboliques (en relation avec une augmentation des acides lactique et carbonique), b) une augmentation de l'acide carbonique dans le sang (P_aCO₂), et c) anoxémie (manque d'O₂ dans le sang).

Le stimulus O₂, enfin, a un effet direct sur l'excitabilité et la sensibilité des centres respiratoires à la concentration artérielle de CO₂ (C_aCO₂), laquelle devient contrôlée de plus en plus étroitement par le SNC, au fur et à mesure que l'excitabilité et la sensibilité des centres respiratoires augmentent. Or, l'excitabilité des centres respiratoires augmente avec l'anoxémie, ainsi qu'avec l'acidose métabolique associée à l'anoxémie. Par conséquent, le stimulus O₂ contribue indirectement au contrôle de la respiration.

Température et pression de l'air

Pour un travail physique à une puissance donnée (watts ou kcal/h), le nombre de molécules inhalées (et donc la masse inhalée) d'O₂ est indépendant de la température et de la pression de l'air, tout comme la masse de CO₂ exhalée ou excrétée. Cela signifie que les volumes pulmonaires inhalés, lorsque ramenés en unités normalisées telles que dans les conditions NTP ou BTPS, sont indépendants de la température et de la pression de l'air. En conséquence, les volumes d'air inhalés par les travailleurs dépendent directement de la température et de la pression de l'air sur le terrain. Par exemple, à Montréal, si un travail exige 15,6 m³ d'air à TPN, il en exigera 15,0 m³ par un temps beau et sec (293,15 °K, 102,3 kPa, 30 % H.R.), et 17,4 m³ avec un temps chaud et changeant (303,15 °K, 96 kPa, 100 % H.R.), une variation totale de 15,7 %.

La variabilité des données associées à la météo peut être considérée comme une erreur aléatoire dans une série d'études indépendantes, ou comme source de variation systématique entre deux études. Pour l'hygiéniste industriel, il est avantageux dans les deux cas, de séparer cette source de variabilité dans les données en les rapportant aux conditions TPN. Cela facilite la comparaison entre diverses études, entre des jours

différents, des saisons ou des années différentes, ainsi qu'entre des groupes différents de travailleurs. Toutefois, cela ne signifie pas que l'impact potentiel de cette variabilité sur l'inhalation de poussières solubles, par exemple, devrait être oublié.

Volumes inhalés et altitude

En physiologie du travail, en médecine opérationnelle et en médecine du sport, les relations précises entre l'altitude, les volumes inhalés et l'acclimatation à l'altitude sont bien connues. La fréquence respiratoire et le volume courant s'accroissent régulièrement avec l'altitude, même chez les populations bien acclimatées.^(1, 2, 4) Ces accroissements contribuent à maintenir une pression partielle d'O₂ plus élevée et une pression partielle de CO₂ plus faible dans les alvéoles, ce qui facilite les échanges pulmonaires. Surtout, cela réduit effectivement l'acclimatation physiologique qui serait autrement nécessaire.

Par exemple, le travailleur type masculin de 70 kg faisant un travail modéré inspirera 15,6 m³ d'air par 8 h de travail au niveau de la mer (0 m), 17,7 à 1 000 m et 20,1 à 2 000 m. Sa fréquence respiratoire augmentera de 15 cycles par minute (c/mn) à 0 m, à 15,5 à 1 000 m et à 16,6 à 2 000 m. Son volume courant passera de 2,38 litres par inspiration à 1 000 m, à 2,54 à 2 000 m. Entre 0 et 2 000 m d'altitude, aucune autre adaptation physiologique n'est nécessaire, chez la grande majorité des personnes faisant un travail léger à modéré. La fréquence cardiaque ne change même pas. Cependant, le seuil de réaction varie selon les travailleurs, la durée d'exposition et d'autres facteurs. Pour certains travailleurs souffrant d'hypoxie, d'une affection cardiaque ou d'un risque de phlébite, le médecin du travail préférera probablement utiliser plutôt un seuil de 1 500 m. C'est d'ailleurs pourquoi la pression de l'air dans la cabine des passagers et de l'équipage des avions commerciaux, est fixée à une pression minimum équivalant à 1 500 m pour les vols intercontinentaux et à 2 000 m pour les intracontinentaux.⁽²⁾

Acclimatation au-dessus de 2000 m

À partir de 2 000 m, plusieurs autres processus d'acclimatation physiologique démarrent.^(1, 2, 13) Dans les premières heures, la fréquence respiratoire, le volume courant, la fréquence cardiaque et le volume systolique augmentent. Durant les premiers jours, les processus suivants sont observés: a) hémococoncentration (réduction de l'eau dans le sang, ce qui augmente le transport d'oxygène mais également la viscosité sanguine et le travail du cœur), b) augmentation de

l'hémoglobine dans les globules rouges et c) de la myoglobine des muscles, d) augmentation de l'affinité de l'hémoglobine pour l'O₂ (grâce à l'augmentation dans les globules rouges de la 2-3 diphosphoglycérate, un produit de la glycolyse), e) changements adaptatifs dans la courbe de saturation en O₂ (dans des directions opposées mais favorables dans les poumons et dans le sang), et f) un accroissement de la sécrétion d'érythropoïétine (ÉPO). Ce dernier changement va entraîner une augmentation du nombre de globules rouges après 4 à 6 semaines. Ce long délai correspond au cycle de maturation des globules rouges. Au même moment, une augmentation de la densité des mitochondries et des capillaires sanguins sera également observée, permettant une réduction progressive du débit et du travail cardiaques. En dépit de tous ces processus d'acclimatation, les volumes inhalés restent supérieurs à ceux du niveau de la mer, même chez les populations acclimatées depuis longtemps.⁽¹⁾ En conséquence, il est nécessaire dans tous les cas de considérer les volumes réellement inhalés par les travailleurs, pour avoir un bon portrait de leur exposition à des contaminants de l'air. Il est également nécessaire de considérer la nature de ces contaminants. Par exemple, la concentration d'un gaz dans le sang est proportionnelle à sa pression partielle dans les alvéoles, par la loi de Henry. Dans le cas d'une poussière, d'autres lois et propriétés pertinentes doivent être prises en considération, en relation avec, par exemple, la solubilité des poussières ou leurs propriétés aérodynamiques.

Acclimatation sous le niveau de la mer

Pour un travailleur de la construction dans un caisson pressurisé sous l'eau (construction ou entretien des piles d'un pont, par exemple), ou un mineur de fond dans les profondeurs du sol, les mécanismes d'acclimatation décrits ci-dessus sont tout simplement inversés. La fréquence respiratoire et le volume courant diminuent avec la pression (ou la profondeur), pour un coût métabolique donné. Toutefois, il est probable que les volumes inhalés seront plus importants que pour des travaux en apparence comparables effectués au niveau de la mer. En effet, il faut tenir compte alors d'au moins deux facteurs supplémentaires : a) le poids et l'encombrement des équipements personnels et des outils utilisés par ces travailleurs, et b) leur environnement chaud et humide. Le premier facteur accroît rapidement les coûts métaboliques du travail et les volumes d'air inhalés qui leur sont associés.⁽¹⁾ Le second facteur accroît les volumes respiratoires, au moins par

le coût métabolique mesurable associé à la lutte contre la chaleur. Dans d'autres contextes industriels, en particulier dans les atmosphères pas trop humides, des volumes inhalés supplémentaires pourront provenir du fait qu'il est possible de respirer de façon plus rapide et superficielle, pour évacuer de la chaleur. Par ailleurs, la solubilité d'un gaz augmente proportionnellement avec sa pression partielle. Cela signifie que les risques d'intoxication sont plus grands dans une atmosphère pressurisée ou en dessous du niveau de la mer. Ceci est bien illustré en particulier par le cas du monoxyde de carbone émis par des pompes et d'autres appareils à moteurs diesel.

Approche préventive

L'approche suivante a été utilisée par l'un d'entre nous depuis près de 25 ans. Les responsables du programme de santé et sécurité d'une entreprise, ou les membres du comité de santé et sécurité d'un établissement, choisissent un poids mieux adapté que 70 kg pour représenter les travailleurs de leur organisation. L'objectif consiste à couvrir une proportion importante des travailleurs associés aux situations visées par l'intervention ou la démarche. Bien des cadres sont à l'aise avec un travailleur type de 85 kg. Certains n'hésitent pas à adopter un travailleur de 100 kg comme référence. Cela dépend en partie de leur perception générale du nombre de travailleurs au-dessus de la limite choisie. Généralement, ils préfèrent avoir une seule norme pour l'établissement ou l'organisation, mais ils acceptent aisément une norme spécifique pour couvrir les besoins particuliers d'un département ou d'un travailleur. Dans tous les cas, ce sont les travailleurs les plus à risque qui servent à déterminer les limites admissibles internes, et les marges de sécurité adoptées par l'organisation.

Au cours de l'échantillonnage, les volumes inhalés par les travailleurs sont mesurés ou estimés, puis les volumes correspondants pour le travailleur type de référence sont estimés selon les règles de l'art. Les doses absorbées par la voie respiratoire sont ensuite évaluées à partir de ces volumes. Les limites admissibles de référence, provenant généralement de l'OSHA ou de l'ACGIH, sont transformées en doses admissibles en les multipliant par 10 m^3 à TPN. Ces doses ne sont pas calculées par unité de masse corporelle, par suite de la mauvaise corrélation entre la surface d'échange pulmonaire et le poids corporel. Les limites admissibles recommandées sont ensuite calculées en divisant les doses admissibles par les volumes inhalés correspondant aux poids de référence choisis. Pour fins de

contrôle, la même opération peut être faite avec le poids et les volumes inhalés de chaque travailleur. Dans certains cas, les limites recommandées sont données en fonction des limites pour différentes catégories de travaux, par exemple : travaux légers, moyens et lourds (10, 20 et 30 m^3 d'air). Naturellement, ce travail peut s'effectuer en collaboration avec un médecin du travail ou un toxicologue. Les limites recommandées pour certaines substances ne changeront pas quand, par exemple, elles proviennent principalement des effets irritants pour les yeux, la peau ou l'odorat.

L'estimation des volumes respiratoires peut être réalisée à l'aide des observations terrain et d'un tableau des coûts métaboliques. Par ailleurs, il est relativement facile aujourd'hui de mesurer directement les volumes inhalés durant de courtes périodes. Cependant, dans le cas d'échantillonnages répétés durant 8 heures, il est beaucoup plus facile, précis et pratique de les mesurer indirectement et en continu, en utilisant la relation entre le rythme cardiaque et le coût métabolique total. Cette relation est linéaire dans la fourchette comprise entre les travaux légers et lourds, et plus précisément entre 80 et 150 battements par minute bpm).⁽¹¹⁵⁻²¹⁾ Certains auteurs considèrent suspecte l'intervalle entre 80 et 100 bpm, parce qu'en dessous de 100, le rythme cardiaque se caractérise par une variabilité plus grande, et qu'il semble plus facile alors de l'influencer par des facteurs psychologiques ou posturaux, du moins en pourcent de variation. Cependant, cet inconvénient n'est pas très significatif en pratique lorsqu'on utilise une moyenne mobile sur quelques minutes comme indicateur, plutôt que le rythme instantané ou qu'une moyenne mobile sur 0,5 à 1 mn.

Le coût métabolique peut être estimé en fonction de la fréquence cardiaque (F_c) en utilisant, par exemple, les équations ci-dessous, établies à partir des données publiées par Brouha :⁽¹⁶⁾

- pour les hommes :

$$M_h = 5,84 F_c - 439 \quad (1)$$

- pour les femmes :

$$M_f = 4,62 F_c - 387 \quad (2)$$

où $M_{h \text{ or } f}$ est en kcal/h et F_c en bpm.

Ces deux équations sont valides pour un très large éventail de conditions environnementales, et présentent un impressionnant coefficient de détermination (R^2) de 0,87. De plus, dans des conditions environnementales connues, il est possible d'utiliser des équations

tions plus précises avec un R^2 nettement meilleur. Par exemple, à $22,2^{\circ}\text{C}$ et 50 % d'humidité relative, les équations suivantes ont été établies à partir de données du même auteur :

- pour les hommes :

$$M_h = 6,47 F_c - 475 \quad (3)$$

- pour les femmes :

$$M_f = 5,11 F_c - 402 \quad (4)$$

avec un R^2 of 0,94 pour chacune des deux équations.

Les volumes requis par le travail peuvent alors être déduits des coûts métaboliques, par des calculs simples ou en consultant un tableau ad-hoc. Dans les environnements chauds, il est nécessaire en principe d'estimer aussi les volumes associés à la thermorégulation. Cela peut être fait à l'aide de la littérature ou par de courts échantillonnages ponctuels des volumes d'air inhalés.

Par ailleurs, il est préférable en pratique, et pas difficile du tout, de prendre le temps nécessaire pour étalonner la relation entre le rythme cardiaque et le coût métabolique de chaque travailleur sélectionné pour un échantillonnage, ou tout au moins pour un échantillon représentatif des travailleurs. Cela ne prend que 20 à 30 minutes environ par groupe de travailleurs, pour leur faire passer un *step-test* normalisé, tels que ceux décrits par Scherrer⁽¹⁾ et d'autres.⁽²²⁻²⁴⁾ Cet étalonnage peut être fait soit dans les journées précédant l'échantillonnage, soit au début de la période d'échantillonnage.

Lorsque les volumes inhalés ont été estimés aussi bien que possible, il est relativement facile d'estimer ensuite les doses associées aux concentrations des contaminants de l'air. Les concentrations mesurées en mg par m^3 à des conditions données (sur le terrain, TPN ou BTPS) seront multipliés par les volumes inhalés en m^3 dans les mêmes conditions. Les doses inhalées sont ensuite comparées avec les doses admissibles déduites des limites de référence, et avec les limites recommandées en fonction du poids, de la catégorie de travail et des conditions choisies. L'évaluation des doses absorbées par les travailleurs se poursuit en prenant en considération, au besoin, les propriétés pertinentes des contaminants concernés, dont les coefficients d'affinité des solvants (eau, graisses et protéines), les effets systémiques, les effets synergiques et les autres voies d'entrée dans l'organisme.

Conclusion

Il est généralement reconnu que la réponse biologique à une substance particulière varie considérablement d'une personne à l'autre, et chez une même personne, quelle que soit la concentration de cette substance dans l'air.⁽²⁵⁾ Il y a pour cela de nombreuses raisons possibles, dont les variations au niveau de la sensibilité individuelle, de l'état de santé et des conditions de travail ou environnementales.

Cet article montre clairement qu'une partie importante de cette variation peut provenir des variations de la charge de travail, ainsi que des effets de l'environnement sur les volumes d'air inhalés. À notre avis, dans de nombreuses situations particulières, ces sources de variation sont en fait amplement suffisantes pour expliquer la plus grande partie des grandes variations notées dans la littérature scientifique et technique.

L'analyse des risques auxquels sont exposés les travailleurs devrait généralement considérer les doses de polluants auxquelles ils sont exposés par voie respiratoire. En effet, même lorsque les concentrations mesurées sont inférieures aux limites admissibles du RSST par des facteurs de 2 à 5 fois, les doses inhalées peuvent néanmoins être significatives ou très significatives, et requérir une gestion éclairée et proactive des risques de surexposition biologique.

Remerciements

Les auteurs remercient chaleureusement les personnes suivantes pour leur soutien, suggestions ou commentaires : M. Michel Gérin et M. Denis Bégin au département de Santé environnementale et Santé au travail de l'Université de Montréal; M. André Dufresne au département d'Épidémiologie, de Biostatistiques et de Santé au travail de l'Université McGill; Mme Sylvie Nadeau et M. Jean Arteau au département de Génie mécanique de l'École de Technologie Supérieure; M. Daniel Imbeau de la Chaire de recherche du Canada en Ergonomie, à l'École Polytechnique de Montréal; M. Gaëtan Handfield du CSSS des Faubourgs; Mme Hélène Cyr, Mme Marie Pelletier et M. Frédéric Bouchard du service de Santé au travail du CSSS de la Montagne.

Références

1. **Scherrer, J. and others:** *Précis de physiologie du travail. Notions d'ergonomie.* Paris : Masson, 1981.
2. **Desoille, H., J. Scherrer, R. Truhaut, et al. :** *Précis de médecine du travail.* Paris : Masson, 1984.
3. **Federation of American Societies for Experimental Biology:** *Metabolism.* Compiled and edited by Altman, Philip L. and Dittmer, Dorothy S., pp. 85-385. Bethesda, Maryland, 1968.
4. **American Physiological Society:** *Handbook of Physiology. Section 4: Adaptation to the Environment.* Section Editors: Dill, D.B., E.F. Adolph and C.G. Wilber. Washington, D.C., 1964
5. **NIOSH:** *Occupational exposure to hot environments. Criteria for a recommended standard.* Revised criteria 1986. National Institute for Occupational Safety and Health. DHHS (NIOSH) Publication No 86-113. (1986)
6. **Spitzer, H. and Th. Hettinger:** Tables donnant la dépense énergétique en calories pour le travail physique. *L'Étude du travail*, 164:35-42, 165 :25-43, 166 :38-52, 168 :33-50. (1965)
7. **Howard W.S., A. Damon, R. McFarland, and J. Roberts:** *National Health Survey 1962: Weight, Height and Selected Body Dimensions of Adults, United States 1960-1962.* Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, Public Health Service Publication no. 1000 Series 11, no. 8, June, 1965.
8. **Panero, J., and M. Zelnik:** *Human dimension and interior space: a source book reference standards.* Whitney Library of Design. New-York: Watson-Guptill Publications. London: The Architectural Press, 1979.
9. **Portier, K., J.K. Tolson, and S.M. Roberts:** Body Weight Distributions for Risk Assessment. *Risk Analysis*, 27(1):11-26. (2007)
10. **LEHMANN, G.:** *Physiologie pratique du travail.* Paris: Les Éditions d'organisation, 1955.
11. **Nadeau, V., G. Truchon, M. Brochu, and R. Tardif:** Effects of Physical Exertion on the Biological Monitoring of Exposure of Various Solvents Following Exposure by Inhalation in Human Volunteers: I. Toluene. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 3:9, 481-489. (2006)
12. **ACGIH:** *2003 TLVs and BEIs.* Cincinnati, Ohio: ACGHI Worlwide, 2003.
13. **Haab, P.:** *Abrégé de Physiologie respiratoire.* Cameroun : Faculté de Médecine et des Sciences Biologiques de l'Université de Yaoundé, 2003.
14. **Clayton, G.D., and F.E Clayton (Eds.):** *Patty's Industrial Hygiene and Toxicology.* Vol. I: General Principles. John Wiley and Sons, 1978.
15. **Kroemer, K.H.E., Kroemer, H.B. and Kroemer-Elbert, K.E.:** *Ergonomics : How to Design for Ease and Efficiency.* Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2001.
16. **Brouha, L.:** *Physiologie et industrie.* Paris: Gauthier-Villars, 1963.
17. **RAOUF, A., T.M. WATER AND A. MAGED:** *A Study of variations in Human Performance, Volume 1.* Windsor, Ontario, Canada: Depart. Ind. Eng., Univ. of Windsor. Submitted to the Labor Safety Council of Ontario, 1977.
18. **TRUDEAU, F. and D.A. Bouchard:** *Reproductibilité de la relation fréquence cardiaque-consommation d'oxygène.* Rapport A-466. Montréal (Québec) Canada: IRSST, 2006.
19. **MAIRIAUX, P. AND J. MALCHAIRE:** *Le travail en ambiance chaude : principes, méthodes et mise en œuvre.* Paris : Masson, 1990.
20. **MALCHAIRE, J.:** Méthodologie générale d'interprétation des enregistrements continus de fréquence cardiaque aux postes de travail. *Cahiers de médecine du travail*, XXV(4):188-186. (1988)
21. **Vogt, J.J., M.T. Mayer-Schwartz, B. Metz, and R. Foehr:** Motor, thermal and sensory factors in heart rate variation: a methodology for indirect estimation of intermittent muscular work and environmental heat loads, *Ergonomics*, 16(1):45-60. (1973)
22. **NIELSEN, R. AND J.-P. MEYER:** Evaluation of metabolism from heart rate in industrial work. *Ergonomics*, 30(3):563-572. (1987)
23. **MEYER, J.P. AND F. HORWAT:** Débit ventilatoire de travail. Élaboration et validation de méthodes indirectes d'évaluation au moyen de la fréquence cardiaque et de l'observation d'activité. *Documents du médecin du travail*, 76:343-350. Paris, France: INRS. (1998)
24. **MEYER, J.P. ET FLENGHI, D.:** Détermination de la dépense énergétique de travail et des capacités cardio-respiratoires maximales à l'aide d'un exercice sous-maximal sur step-test. *Documents pour le médecin du travail*, 64:245-252. Paris, France: INRS. (1995)
25. **ACGIH:** *2007 TLVs and BEIs.* Based on the Documentation of the Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents, and Biological Exposures Indices. ACGIH, Cincinnati, Ohio. p.3. (2007)