



L'utilisation
des
PROTECTEURS
OBLIGATOIRE

FOR 35R

Dossier

LA MÉTROLOGIE AU SERVICE DE LA PRÉVENTION DES RISQUES PROFESSIONNELS

❶ La mesure: intérêts et limites dans la démarche de prévention du risque chimique

P. 24

❷ La mesure de terrain en physiologie du travail: intérêts, outils et précautions d'usage

P. 31

❸ Prévention du risque vibratoire: évaluation de l'exposition et dosimètres intégrés aux machines

P. 40

❹ La mesure en biométrie: évaluer les polyexpositions et leurs effets sur la santé, un nouveau défi

P. 46

❺ Analyse spatio-temporelle des expositions professionnelles aux agents chimiques et biologiques

P. 50

Dans une démarche de prévention des risques professionnels, il peut être utile de connaître avec plus ou moins de précision ou de certitude, des valeurs qui permettent de caractériser un risque, pour hiérarchiser ou dimensionner les actions à mener en vue de le réduire.

Ce dossier propose plusieurs illustrations de l'apport de la métrologie. En effet, même s'il est convenu que « *mesurer n'est pas prévenir* », les développements de ces dernières années, tant du point de vue des méthodologies que des technologies permettent, dans de nombreux domaines, de mettre en œuvre des mesures utiles en prévention. Concernant la prévention du risque chimique, la mesure de la concentration de substances est le seul moyen d'objectiver l'exposition et d'identifier les dangers potentiels. En physiologie du travail, la mesure vise principalement à évaluer la charge physique de travail, globalement (corps entier) ou localement (par segment corporel). Pour la prévention du risque vibratoire, l'utilisation de dosimètres est ici traitée à travers l'étude d'un cas concret de vibrations transmises aux membres supérieurs. La biométrie, en tant qu'activité de surveillance utilisant des « biomarqueurs », cherche à objectiver l'imprégnation de salariés exposés à des substances chimiques. Enfin, quelques exemples concrets de méthodes non « classiques » de mesure ou d'estimation des risques liés à la présence de polluants dans l'air des lieux de travail et de leur apport en prévention, sont présentés.

THE USE OF METROLOGY IN OCCUPATIONAL RISK PREVENTION – *In an occupational risk prevention approach, it could be useful to know with varying degrees of accuracy and certainty, the values for characterising a risk, in order to prioritise or structure the actions required to minimise the risk.*

This dossier illustrates several ways in which metrology is valuable. Even though it is agreed that “measuring is not preventing”, the developments over the past few years, both from a methodology and technology point of view, have made measurements useful for prevention in many areas.

LA MESURE: INTÉRÊTS ET LIMITES DANS LA DÉMARCHE DE PRÉVENTION DU RISQUE CHIMIQUE

La réduction des expositions aux substances chimiques est depuis plus de soixante ans un enjeu de santé pour les travailleurs et les entreprises. Dans une démarche de prévention des risques professionnels, il peut être utile, voire nécessaire, de connaître, avec plus ou moins de précision ou de certitude, des informations sur des compositions chimiques qui permettent d'apprécier un risque, pour hiérarchiser ou dimensionner les actions à mener en vue de réduire ce risque.

**BENOÎT
COURRIER**
INRS,
département
Métrologie
des polluants

L'évaluation du risque chimique (Cf. *En savoir plus*) est basée sur le couplage de la connaissance des dangers des substances (ou toxicité) et celle de l'exposition à ces substances. À ce jour, la mesure de la concentration des agents polluants est le seul moyen de déterminer objectivement l'exposition des travailleurs et contribue ainsi à identifier le risque chimique.

Depuis la fin des années 1970, les évolutions du monde du travail, marquées par la diminution des activités dans les secteurs primaire et secondaire, et leur explosion dans le secteur tertiaire..., ainsi que l'amélioration des conditions de travail, des connaissances et des techniques, tendent progressivement à réduire de plus en plus les concentrations de polluants auxquelles sont exposés les travailleurs.

Un ensemble de dispositions et de méthodes imposent ou permettent aux entreprises d'intégrer la mesure des expositions dans leur démarche de prévention: connaître les expositions des travailleurs permet alors d'orienter les décisions vers les actions de prévention les mieux adaptées.

Actuellement, la mesure de l'exposition à des agents chimiques concerne majoritairement des quantifications de polluants dans l'air des lieux de travail mesurées sur les personnes. En ce qui concerne l'évaluation du risque chimique, la mesure peut être décomposée en quatre phases:

- l'établissement de la stratégie à mettre en œuvre est la première étape conditionnant la représentativité des résultats obtenus. Depuis la publication du décret 2009-1570 du 15 décembre 2009¹, le concept de stratégie de mesurage a fait son apparition dans la

réglementation, décrivant précisément la démarche d'établissement de cette stratégie de mesure. Un préalable est la définition des objectifs des mesures: en effet, en fonction de la finalité des mesurages, la stratégie doit être dimensionnée et adaptée pour répondre aux besoins. Les prélèvements doivent être représentatifs des situations de travail et permettre de fournir une information la plus juste possible de l'exposition des travailleurs, en tenant compte de l'impact de nombreuses variables: environnement, production, gestes professionnels, etc.;

- les prélèvements sont réalisés pour être conformes à la stratégie établie précédemment. Cette deuxième phase requiert de déployer des compétences, du matériel et une méthodologie spécifique. Il ne s'agit pas seulement d'équiper des travailleurs avec des dispositifs de prélèvements, mais d'assurer avant tout la représentativité de ces prélèvements, en particulier en identifiant des activités ou des tâches particulières. Il est donc primordial que les prélèvements fassent l'objet d'un suivi rigoureux par les intervenants: par exemple, toutes les opérations réalisées par les travailleurs sont identifiées, leur durée consignée;
- les analyses, généralement en laboratoire, sont différenciées par rapport aux prélèvements, et font appel à des techniques d'analyse physico-chimique. Comme pour toutes les analyses, il convient de connaître les limites et performances des techniques mises en œuvre: pour cela, la détermination de critères de performance est nécessaire dans les conditions normales d'application d'une méthode, ce qui implique de prendre en compte les effets spécifiques de la matrice analysée: par exemple, quel peut être

l'impact de l'humidité sur la mesure? Quels sont les interférents à une technique analytique et quels sont leurs impacts sur le résultat de la mesure? ...;

- les résultats des analyses doivent ensuite être associés aux autres informations recueillies lors des prélèvements pour permettre de déterminer les expositions des travailleurs. Les concentrations atmosphériques ainsi obtenues sont exploitées en fonction des objectifs des mesurages: comparées à des valeurs de référence, elles peuvent donner lieu à une hiérarchisation des situations exposantes, à une appréciation de la performance d'une installation de prévention collective... Une mesure seule ne permet pas d'aboutir à la connaissance exacte de l'exposition d'un salarié, il est indispensable de traiter statistiquement les résultats de différents mesurages pour réduire les biais liés à la variabilité de la mesure de l'exposition des travailleurs.

Ces méthodes et techniques de mesure ont fait l'objet de nombreux travaux, pour aboutir à un consensus sur leur utilisation, souvent publiées dans des normes² ou des méthodes de référence, qui jouent un rôle important dans ce dispositif de surveillance et de contrôle. La mise à disposition de ces méthodes doit permettre aux préventeurs de se les approprier et de les appliquer (Cf. Encadré 1).

Les méthodes de mesurage sont issues de l'amélioration de méthodes développées depuis plusieurs dizaines d'années ou de travaux mettant en œuvre les meilleures techniques disponibles pour atteindre des niveaux de sensibilité et de précision, en adéquation avec les niveaux de polluants recherchés à ce jour. Chaque méthode fait l'objet d'une validation conforme aux référentiels normatifs internationaux avant d'être proposée en normalisation.

Une norme ne peut être adoptée qu'après un consensus obtenu auprès d'un groupe de personnes et il est d'usage que les membres de ces groupes soient des représentants des acteurs industriels, scientifiques, économiques ou politiques. Lors des discussions de normalisation, les arguments avancés peuvent, parfois, ne pas être factuels ou fondés sur des raisons scientifiques, mais reposer sur la défense des intérêts d'une partie au moins des participants. Ainsi, une norme, bien que basée sur un protocole précis et scientifiquement validé, peut proposer une méthode très générale laissant beaucoup de latitude lors de la mise en œuvre.

Les normes sont des documents d'application volontaire, elles peuvent devenir des documents d'application obligatoire, lorsqu'elles sont citées par la réglementation.

Réglementation

L'employeur doit prendre les mesures nécessaires pour assurer la sécurité et protéger la santé physique et mentale de ses salariés (Code du travail, art. L. 4121-1 et suivants), mais a également une obligation de résul-



© Grégoire Maisonneuve/NRS/2011

tats en matière de sécurité³. La législation relative à la prévention du risque chimique évolue en permanence et s'est densifiée progressivement. L'apparition de nouveaux produits et de nouveaux dangers, l'amélioration des connaissances en toxicologie, les progrès des techniques analytiques, la meilleure perception du risque chimique et des conséquences sur la santé..., sont autant de facteurs influant sur les modifications successives de la réglementation, pouvant paraître extrêmement complexe et difficile à respecter.

Mesures de prélèvement de fumées de soudage par le centre de mesures physiques de la Carsat Nord-Picardie.



Ces difficultés de mise en œuvre peuvent freiner le déploiement de la prévention du risque chimique, trop souvent perçue comme coûteuse. Il est aujourd'hui reconnu que la réglementation, imposant dans certains cas des mesures d'expositions régulières (décret n° 2009-1570 du 15 décembre 2009), est peu appliquée par certaines entreprises, en raison du coût de la mesure, de la complexité de la démarche, mais aussi, probablement, en raison de la méconnaissance des chefs d'entreprise de l'obligation de résultat en matière de prévention.

Par exemple, une évolution importante de ces dix dernières années concerne l'obligation de contrôles réglementaires des expositions à certains agents chimiques. Ces contrôles réglementaires obligatoires ont créé un véritable marché de l'analyse et du contrôle, attirant sur ce secteur des acteurs non experts, voire non formés. Les mesures d'exposition

doivent être réalisées par des organismes accrédités et donc réputés compétents pour procéder à de telles prestations. L'accréditation, délivrée par un organisme indépendant (le Comité français d'accréditation - Cofrac), atteste que lorsqu'un organisme réalise un contrôle, il applique scrupuleusement les méthodes de référence, garantissant à ses clients que la prestation réalisée répond aux exigences de la réglementation. Même s'ils respectent les méthodes et les normes, ce sont trop souvent des spécialistes d'une « démarche de mesure » plutôt que d'une démarche de prévention. Dans certains cas, des entreprises disposant des compétences en interne et connaissant leurs procédés seraient plus à même de faire des mesurages pertinents que les organismes accrédités.

Le prix des prestations de ces contrôles obligatoires est tel que des entreprises choisissent de ne pas respecter la loi: en effet, le coût des mesurages obligatoires peut mettre en péril l'existence de certaines d'entre elles. Par exemple, le coût annuel d'un contrôle obligatoire réglementaire de diagnostic de respect des VLEP aux poussières de bois varie, en fonction des cas, de 2000 € à près de 10000 €. Par ailleurs, dans certains cas, la pollution des lieux de travail est telle que la mesure n'est pas nécessaire pour conclure à des dépassements de seuils; il serait alors plus utile d'engager directement des actions de prévention, plutôt que de procéder à des mesures préalables.

Cet exemple montre que l'évolution de la réglementation, peut avoir des effets négatifs: le contrôle du respect des valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) peut parfois prendre le pas sur la mise en place d'actions de réduction des expositions.

Acteurs de la mesure des expositions

Comme précédemment évoqué, la mesure des expositions professionnelles à des agents chimiques doit faire l'objet d'un respect rigoureux des protocoles et méthodes. Les mesures sont réalisées par trois types d'acteurs principaux:

- les préventeurs, pour qui les mesures ne sont qu'une étape nécessaire à la prévention. Ils maîtrisent les techniques de prélèvement-analyse et recourent aux mesurages pour objectiver les actions de prévention qu'ils vont définir pour améliorer une situation observée. Par exemple, les services de prévention des Carsat (ainsi que les agents des Laboratoires interrégionaux de chimie ou des Centres interrégionaux de mesures physiques) disposent de l'ensemble des compétences pour évaluer et réduire le risque chimique: préventeurs de terrain et laboratoires d'analyse indépendants;
- les entreprises qui procèdent elles-mêmes à des mesures pour respecter la réglementation, considérant cela parfois, comme un objectif final et non comme une étape dans une démarche de prévention. Les organismes accrédités, réputés experts pour le mesurage, sont mandatés par les entreprises pour

ENCADRÉ 1

UN EXEMPLE DE MÉTHODES DE RÉFÉRENCE: MÉTROPOL

Toutes les informations relatives aux différentes étapes d'évaluation du risque chimique sont largement décrites par les fiches méthodologiques de la base de données MétroPol*. Les méthodes proposées ont été, pour la très grande majorité, développées par l'INRS et toutes ont été validées. Les organismes intéressés par l'évaluation des expositions professionnelles disposent ainsi d'un ensemble complet de protocoles et de méthodes robustes. La volonté de partager les méthodes et de les mettre largement à disposition des préventeurs est un élément fondateur de MétroPol. Les méthodes proposées par MétroPol sont reconnues, au plan national et international, pour la qualité du travail de mise au point et de validation de méthodes analytiques, physico-chimiques et biologiques des expositions atmosphériques. Les travaux permanents de développement et d'actualisation des protocoles sont un moyen de proposer des solutions de mesure adaptées aux besoins renouvelés des préventeurs, afin qu'ils disposent d'outils sensibles et spécifiques répondant aux exigences de la réglementation ou aux besoins de la prévention. Les méthodes ne sont pas déconnectées de la réalité du terrain; au contraire, les solutions proposées cherchent en permanence à être les plus efficaces possibles: réduction des coûts, efficacité optimale, sensibilité et spécificité adaptées aux besoins, facilité de mise en œuvre. Les travaux de l'INRS sont parfaitement indépendants. Ils visent l'objectivité et la validité scientifique et technique, à des fins de prévention des risques professionnels. Les critères retenus par l'INRS pour la validation d'une méthode de prélèvement, d'analyse ou de traitement des résultats, sont basés sur des données scientifiques ou techniques validées par les pairs *via* les publications scientifiques internationales à comité de lecture et conformes à des besoins ciblés de prévention.

* Consultable sur: <http://www.inrs.fr/publications/bdd/metropol.html>



© Serge Morillon/NRS/2014

Mesurage de la pulvérulence de poudres avec un tambour rotatif.

procéder aux contrôles réglementaires dans l'objectif de vérifier le respect des valeurs limites d'exposition professionnelle aux substances chimiques (VLEP)⁴ ;

- les autres acteurs de la prévention qui ne disposent pas nécessairement de tous les moyens (en particulier techniques) pour mettre en œuvre les mesures des expositions conformément aux référentiels normatifs ou techniques. Ils peuvent alors avoir recours à des méthodes alternatives, apportant de l'information pertinente, mais manquant parfois de précision. « *Ce qu'on cherche, on le trouve*⁵ » : cette affirmation définit la limite principale de la mesure. Il faut également ajouter que toute personne ayant effectué des mesures sait qu'une mesure est systématiquement associée d'une erreur : une mesure n'est jamais parfaitement « juste ». Ces limites connues des mesures des expositions professionnelles sont associées soit à la démarche mise en œuvre, soit aux techniques elles-mêmes.

Une démarche complexe ?

Avant de procéder à des mesures d'exposition, il est nécessaire de réaliser une évaluation initiale du risque chimique. Il existe différentes méthodes d'évaluation du risque qui nécessitent toutes d'avoir une bonne connaissance de l'activité de l'entreprise et de la production pour identifier les différentes substances chimiques utilisées directement, ou produites par les process. Même si certains outils innovants⁶ aident et guident lors du repérage des substances, l'investissement (en temps ou financier), même s'il est délégué à

un acteur extérieur peut rebuter. L'évaluation peut très vite devenir complexe si le nombre de substances présentes est trop important. En effet, il est peu probable qu'une situation de travail n'expose les opérateurs qu'à une seule substance chimique et les situations de polyexposition rendent très vite complexes les démarches d'évaluation et de mesurage : il est alors nécessaire d'utiliser différentes techniques de prélèvements et de mesures.

Comme précédemment évoqué pour les mesures, le coût de l'évaluation initiale du risque chimique pour des entreprises de petite taille, avec des moyens réduits, peut aussi s'avérer réhibitioire⁷.

La présence de produits chimiques dangereux n'est pas systématiquement identifiée : défaut d'étiquetage, émission secondaire lors du process, quantités faibles mises en œuvre, dangers non connus... Cette identification sera plus difficile si la chimie ne fait pas partie du cœur de métier de l'entreprise.

Compte tenu de la complexité de certaines situations, les intervenants ne détiennent pas toujours le niveau d'expertise requis pour établir la stratégie de mesurage, pour procéder aux prélèvements et aux analyses ou pour aider les entreprises dans leur démarche de prévention.

Limites des méthodes

Les méthodes d'évaluation du risque chimique, d'établissement de la stratégie de mesurages et d'analyse présentent des faiblesses. La première d'entre elles est certainement qu'elles s'appuient quasi exclusi-





© Serge Morillon/INRS/2016

Banc de génération d'aérosols organiques « semi-volatils » : tests sur le comportement de matière prélevée à l'intérieur de dispositifs de prélèvement individuel. Les chercheurs de l'INRS peuvent maîtriser la concentration en particules, la granulométrie, la concentration en vapeur.

vement sur des mesures d'exposition par inhalation, sans que soient prévues les mesures d'objectivation de l'imprégnation des travailleurs par des techniques de biométrie (Cf. article page 46) qui incluent tous les modes d'exposition⁸.

Pour des personnes non sensibilisées ou mal informées sur le risque chimique, d'autres risques peuvent sembler prioritaires parce que plus facilement visibles ou appréhendables. Ainsi, tout le monde peut être gêné par le bruit en pénétrant dans un atelier mal insonorisé ou dans un local bruyant. La nécessité d'évaluer le risque lié au bruit est alors évidente. En revanche, un produit chimique dangereux n'a pas forcément d'odeur et les conséquences sur la santé peuvent être différées. L'évaluation du risque chimique peut ainsi être considérée comme secondaire.

Les méthodes de prélèvements et d'analyses évoluent continuellement pour répondre aux besoins.

La recherche de méthodes de plus en plus sensibles, utilisant les meilleures techniques analytiques disponibles, semble complexifier les protocoles analytiques : les concentrations recherchées sont de plus en plus proches des limites de performances des appareils, ce qui impose une rigueur de mise en œuvre des méthodes et une bonne connaissance de l'impact des facteurs d'influence. Par exemple, lorsque des méthodes d'analyse utilisant la gravimétrie sont remplacées par des mesures par chromatographie en phase gazeuse, les compétences et le matériel nécessaires doivent évoluer et imposent une technicité particulière, spécifique à la nouvelle méthode. Le coût des appareils utilisés est plus élevé, conduisant nécessairement à l'augmentation du coût des méthodes analytiques et limitant le déploiement de ces techniques dans les entreprises. Ces évolutions permanentes peuvent induire des ruptures dans la continuité des échelles de résultats des mesures et rendre impossible la comparaison des niveaux d'expositions à différents moments : par exemple, pour la mesure du chrome VI, la méthode utilisée en 2020 est au moins 20 fois plus sensible que celle de 2006. Une autre limite de la mesure est liée au temps entre le prélèvement et la connaissance du résultat. C'est une faiblesse des méthodes dites « en différé », que ce soit pour les prélèvements qui seront analysés en laboratoire ou les données des mesures « en temps réel », qui vont devoir être exploitées avant d'être interprétables. Le temps entre le prélèvement et le résultat varie de quelques heures à plusieurs jours, voire semaines, en fonction de la complexité de la mesure. Il peut donc y avoir un décalage temporel préjudiciable, entre le besoin urgent de documenter une situation de travail ou une exposition et la connaissance du résultat⁹. Par ailleurs, le nombre de produits chimiques utilisés est en augmentation et, parfois, leur présence dans un procédé de fabrication est méconnue. Compte tenu des contraintes scientifiques (temps, difficultés techniques) liées à la connaissance de leur dangerosité et à la validation des méthodes de mesure, il est peu probable que tous les produits chimiques puissent disposer d'une méthode de mesurage permettant de déterminer les expositions des salariés¹⁰.

Intérêt de la mesure

Malgré toutes les limites identifiées, la mesure est la seule solution existante d'objectivation des expositions à un danger d'origine chimique. Connaître les expositions, est un préalable pour pouvoir choisir et adapter les solutions de prévention :

- sans mesure des expositions, il serait difficile de hiérarchiser ou prioriser les situations à risques pour adapter, dimensionner et déployer des solutions de prévention ;
- sans le suivi métrologique des expositions des salariés, il serait difficile de déterminer des valeurs d'exposition professionnelle, dont le respect garantit

aux travailleurs que les expositions ont des effets moindres sur la santé, réduisant suffisamment les risques de survenue de pathologie¹¹.

Connaître les expositions associées à une situation permet donc d'engager, si nécessaire, des actions de prévention sinon immédiates, du moins rapides. Connaître les expositions associées à un ensemble de situations semblables définies par des descripteurs (métier, tâche, produits...) permet d'identifier des situations à risques et d'engager des actions de prévention à plus grande échelle, au niveau d'une profession ou d'un secteur d'activité, par exemple.

Les mesures d'expositions mettent en œuvre des méthodes validées pour l'établissement de la stratégie, le prélèvement ou l'analyse. La validation de ces méthodes, bien que fastidieuse et parfois complexe, garantit à l'utilisateur que la mesure sera représentative de la situation observée, à une incertitude près, qui doit être connue. La validation inclut les effets de la matrice analysée¹². Il n'est pas indispensable de vouloir systématiquement mesurer précisément les expositions, il faut savoir adapter la précision de la mesure à l'objectif des mesurages: la précision d'une mesure dans l'objectif de l'établissement d'un diagnostic de respect des VLEP doit être optimale, alors qu'une mesure ayant pour objectif de comparer les niveaux de concentrations à différents postes de travail peut être moins précise. Cependant, dans ces deux cas, il convient de connaître la marge d'erreur possible de la mesure.

Les méthodes de mesure en « temps réel » existent depuis de nombreuses années (tubes détecteurs colorimétriques, par exemple) et les méthodes tendent à se développer pour réduire le temps entre la mesure et la connaissance du résultat. Les développements associés à ce type de mesure portent sur les techniques, pour les rendre plus spécifiques et plus sensibles vis-à-vis des polluants (quand ils sont connus et que les techniques de mesures existent), mais aussi sur l'exploitation des données issues des mesurages. Ce type de techniques permet de connaître les expositions court terme, mais surtout de connaître les « pics » auxquels sont exposés les travailleurs.

Les avancées dans les domaines techniques et scientifiques permettent de proposer des méthodes de plus en plus sensibles et spécifiques: des méthodes qui apportaient une information sur la présence d'une substance ont été remplacées par des méthodes la qualifiant et la quantifiant avec précision et dans certains cas, les mesures peuvent maintenant se faire en temps réel. Les évolutions rapides des performances de calcul des outils informatiques et des logiciels permettent de capitaliser les données d'exposition dans des bases de données¹⁴. Quand les mesures sont suffisamment robustes et fiables, il est possible de les organiser et de les capitaliser. Par exemple, des données recueillies sur plusieurs années et clairement identifiées par un ensemble d'informations décrivant

les situations observées, peuvent être exploitées pour connaître, par exemple, des concentrations *a priori* de ces situations. Les outils de modélisation offrent alors la possibilité de calculer l'évaluation des expositions selon des variables, comme le secteur d'activité, la tâche ou le métier, les substances chimiques... Ces outils d'aide à l'évaluation peuvent limiter le recours à la mesure lors d'une première étape et propose des modèles d'exposition professionnelle et ainsi, aider à la décision dans le cadre de la hiérarchisation et de la prévention des risques chimiques.

Bien que perfectible, la démarche de mesure des expositions fait aujourd'hui l'unanimité. Les limites identifiées ne doivent pas remettre en cause son intérêt pour la prévention, mais doivent inciter les préventeurs à garder un regard critique sur les conclusions qu'ils peuvent tirer des mesurages.

Conclusion

Dans la démarche d'évaluation des risques professionnels, il existe différents moyens d'obtenir des informations sur les niveaux d'exposition des travailleurs, des moyens simples à des solutions très complexes. Chaque outil de mesure doit donc être adapté au besoin et à l'objectif attendu: il n'est pas nécessaire de recourir à des techniques de mesurage extrêmement sensibles et précises, si l'objectif est de disposer d'une information « approximative ». Il faut adapter les moyens et les outils au besoin. Pour cela, il existe un panel très large de techniques disponibles: de l'avis d'expert, qualitatif, à la mesure la plus précise nécessitant de déployer des ressources techniques importantes.

Évaluer les risques professionnels n'impose pas d'utiliser systématiquement la mesure: l'avis d'expert ou les outils d'aide *a priori* par exemple, sont des solutions qui permettent de ne pas réaliser de mesure. L'évaluation peut être une approche qualitative, permettant d'identifier et de procéder à une hiérarchisation des différents risques et mettant en œuvre l'expertise et des solutions techniques peu précises, peu sensibles et apportant un niveau d'information nécessaire. Il existe des techniques de mesures rapides donnant une information sur les concentrations, qui s'apparente à une approche par niveaux, telles que l'outil Seirich.

Dans la continuité d'une évaluation qualitative, il peut être nécessaire ou obligatoire d'améliorer la connaissance des situations de travail et des expositions associées; il s'agit de l'étape de caractérisation. Cette phase nécessite d'utiliser des méthodes et techniques qui définissent avec autant de précision et d'exhaustivité que possible les situations de travail et les expositions professionnelles. Les méthodes, stratégies, prélèvements et analyses, peuvent s'avérer complexes à mettre en œuvre, et imposer de nombreuses compétences ou ressources techniques. Par ailleurs, il faut garder à l'esprit que la caractérisation dépend de l'état des connaissances et des techniques au moment où elle est réalisée, elle ne sera donc jamais complète.



ENCADRÉ 2 QUELLE DIFFÉRENCE ENTRE MESURE ET MESURAGE ?

Le mot « mesure » a, dans la langue française courante, plusieurs significations. Il intervient cependant à de nombreuses reprises pour former des termes, suivant en cela l'usage courant et sans ambiguïté. On peut citer, par exemple: instrument de mesure, appareil de mesure, unité de mesure, méthode de mesure. C'est également la raison pour laquelle le mot « mesurage » a été introduit pour qualifier l'action de mesurer.

En savoir plus : https://www.bipm.org/utls/common/documents/jcgm/JCGM_200_2012.pdf

La mesure ne doit pas être considérée comme la finalité d'une démarche de prévention, mais comme une étape constitutive de cette démarche, que ce soit dans le cadre de l'évaluation, de la caractérisation ou de l'application de la réglementation. Les mesures doivent toujours être suivies de prises de décisions et d'actions si nécessaire, car mesurer n'est pas prévenir. Dans ce dossier, sont évoqués les points suivants pour illustrer au mieux les relations parfois complexes entre la métrologie, sa place dans l'évaluation des risques ou l'organisation de la prévention, dans les domaines suivants: la mesure de terrain en physiologie du travail: intérêts, outils et précautions d'usage (pp. 31-39); la prévention du risque vibratoire et les dosimètres intégrés aux machines (pp. 40-45); la mesure en biométrie, l'évaluation des expositions et de leurs effets sur la santé (pp. 46-49); et l'analyse spatio-temporelle des expositions professionnelles aux agents chimiques et biologiques (pp. 50-56). ●

1. Décret n°2009-1570 du 15 décembre 2009. Cf. En savoir plus.
2. Par exemple, la norme EN 689. Cf. En savoir plus.
3. Cour de cassation, chambre sociale, 22 février 2002, pourvoi n°99-18389.
4. Pour plus d'information sur les VLEP: aide-mémoire technique, INRS, ED 984 et outil 65 accessibles sur www.inrs.fr
5. « Ce qu'on cherche, on peut le trouver; mais ce qu'on néglige nous échappe » (Sophocle. In: Œdipe roi, traduit du grec ancien).
6. Par exemple: Seirich, outil pour évaluer les risques chimiques en entreprise, développé par l'INRS et le réseau Assurance maladie - Risques professionnels (AM-RP), avec l'appui de partenaires institutionnels et professionnels. Cf. En savoir plus.
7. Même si l'évaluation des risques et la réalisation du Document unique (DU) sont des obligations réglementaires au sens du Code du travail (article L 4121-1 et suivants). L'INRS et le réseau AM-RP mettent à disposition des TPE et PME des outils d'aide à l'évaluation des risques. Cf. En savoir plus.

8. La biométrie consiste à mesurer dans le sang, l'urine, les cheveux ou l'air expiré des travailleurs exposés le niveau d'un indicateur biologique d'exposition à une substance chimique pour évaluer l'exposition réelle et au mieux les risques pour la santé, en donnant un reflet de la quantité de produit ayant pénétré dans l'organisme par toutes les voies possibles: par inhalation, par passage cutané et par ingestion.

9. Notamment, la variabilité des tâches est étudiée lors de l'établissement de la stratégie de mesurage.

10. Tous les produits chimiques ne disposent pas de VLEP (valeurs limites d'exposition professionnelle), qui font l'objet d'un consensus social, alors qu'une méthode est nécessaire voire indispensable pour évaluer le risque (danger, exposition) de toute substance ou mélange chimique.

11. Dans le respect des mesures de prévention du risque chimique: suppression, substitution possible par des produits ou procédés moins dangereux, etc. Si ces mesures ne peuvent être mises en œuvre, d'autres moyens (notamment de protection collective, voire individuelle si ce n'est pas possible) devront aussi être étudiés.

12. Par exemple, l'influence de l'environnement sur une mesure: le milieu (eau, air, solide) a un impact sur la mesure, etc.

13. Par exemple, Colchic et Scola sont deux bases de données d'exposition professionnelles alimentées respectivement par les services du Réseau AM-RP, et par les organismes accrédités pour le contrôle du respect des VLEP. Voir par exemple: www.hst.fr (Page « Base de données » dans le sommaire).

14. Solvex est une base de données regroupant plus de 703000 résultats d'exposition professionnelle aux substances chimiques utilisées en milieu de travail. Cf. En savoir plus.

POUR EN SAVOIR +

- Évaluation du risque chimique: www.inrs.fr/risques/chimiques/evaluation-risques.html
- Décret n°2009-1570 du 15 décembre 2009, relatif au contrôle du risque chimique sur les lieux de travail. Accessible sur: www.legifrance.gouv.fr
- Norme EN 689: Exposition sur les lieux de travail - Mesurage de l'exposition par inhalation d'agents chimiques - Stratégie pour vérifier la conformité à des valeurs limites d'exposition professionnelle. Bruxelles, CEN, 2018 (en cours de révision).
- Outil Seirich pour l'évaluation des risques chimiques en entreprise: www.seirich.fr
- Outils d'aide à l'évaluation des risques mis à disposition par l'INRS pour les entreprises: www.inrs.fr/demarche/evaluation-risques-professionnels/ce-qu-il-faut-retenir.html
- Valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP): Outil n° 65, INRS. Accessible sur: www.inrs.fr/media.html?refINRS=outil65; publication ED 984, INRS. Accessible sur: www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%20984
- Base de données Solvex: www.inrs.fr/publications/bdd/solvex.html.

LA MESURE DE TERRAIN EN PHYSIOLOGIE DU TRAVAIL: INTÉRÊTS, OUTILS ET PRÉCAUTIONS D'USAGE

La mesure en physiologie du travail vise principalement à évaluer la charge physique de travail, de façon globale (corps entier) ou locale (par segment corporel).

Selon l'objectif poursuivi, différents outils sont utilisables sur le terrain et accessibles aux préventeurs. Des précautions méthodologiques sont toutefois à considérer lors de ces mesures effectuées sur l'humain.

KÉVIN
DESBROSSES,
LAURENT
CLAUDON,
ADRIANA
SAVESCU
INRS,
département
Homme
au travail

Les outils de mesure en physiologie ne cessent de se développer et deviennent pour certains accessibles au plus grand nombre, à l'instar des montres « fitness » analysant en continu la fréquence cardiaque, la typologie des activités physiques effectuées, le nombre de pas réalisés ou encore la qualité du sommeil. La notion de mesure, d'évaluation, de comparaison de données physiologiques se démocratise et prend également toute sa place dans la sphère professionnelle. Si les outils de mesure en physiologie du travail étaient auparavant principalement destinés aux chercheurs, l'offre s'ouvre dorénavant à une cible plus large. Ainsi, des préventeurs s'équipent de ces outils ou s'entourent de prestataires de services pour réaliser des mesures physiologiques en entreprise. Au regard de ces évolutions, il semble intéressant de dresser une liste, non exhaustive, des possibilités existantes pouvant être déployées par un préventeur en entreprise. Cet article vise ainsi à décrire la mesure en physiologie du travail au travers de son intérêt pour la prévention, des objectifs qui sous-tendent son usage et des principaux outils et paramètres à considérer. Des précautions méthodologiques, liées notamment au fait de réaliser des mesures sur des personnes, sont également abordées, afin d'éclairer le préventeur sur ce qui doit être mis en œuvre lors du recueil de données pour garantir des résultats fiables, interprétables et représentatifs de la situation de travail analysée.

Intérêts et objectifs de la mesure en physiologie du travail

La physiologie du travail est l'étude des réponses de l'organisme (le corps humain) à une tâche ou une activité de travail. Si cette discipline permet aux

chercheurs de mettre en lumière et de documenter les principaux effets du travail sur l'organisme, son utilisation permet également, notamment dans le cadre d'interventions en prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles (AT/MP), de répondre à des problématiques plus spécifiques. Ainsi, sur le terrain, c'est-à-dire hors situation expérimentale conduite en laboratoire, les mesures physiologiques permettent principalement d'évaluer la charge physique, les contraintes ou les astreintes¹ associées à l'activité réalisée, et ce à un niveau global (relatif à la mobilisation du corps entier), ou local (correspondant à la sollicitation d'un ou de quelques segments corporels). Au-delà de la charge physique, la mesure en physiologie peut également être employée pour appréhender la charge mentale de travail.

Au regard des différentes fonctions du corps humain (cardiaque, respiratoire, musculaire...), de la multitude des conditions de travail (ambiance thermique, manutention manuelle de charges...) et des diverses caractéristiques des opérateurs (genre, âge, ancienneté...), les possibilités de mesure en physiologie du travail sont étendues. Toutefois, la mesure ne doit pas être une finalité, elle doit servir une action de prévention. Habituellement, elle permet de répondre à trois objectifs principaux : mieux comprendre une situation, comparer diverses situations entre elles et comparer une situation à des valeurs de référence. La mesure permet en effet de mieux comprendre une situation en fournissant des informations non détectables par l'observation de l'activité ou la perception des opérateurs. La mesure permet aussi de comparer diverses situations, pour évaluer, par exemple, la moins « sollicitante », ou encore pour évaluer l'efficacité d'actions de prévention mises en



œuvre sur la charge physique de travail (comparaison avant/après modifications). Enfin, quand elles existent, des valeurs de référence permettent de situer la tâche de travail en termes de niveaux quantifiés de contraintes ou d'astreintes.

Pour couvrir les différentes adaptations de l'organisme à l'activité réalisée, il existe une multitude de techniques et d'outils, dont certains sont utilisables en situation de travail. Chaque technique de mesure ayant sa spécificité, ses avantages et ses inconvénients, il convient de bien connaître ses caractéristiques pour choisir et utiliser la mesure la plus pertinente au regard de l'objectif poursuivi, mais également au regard de la nature de l'activité. Par exemple, dans un contexte de fatigue musculaire au niveau des épaules lors d'un travail répétitif des membres supérieurs, la mesure de l'activité des muscles deltoïdes et trapèzes semble appropriée pour apporter certains éléments de compréhension. À l'inverse, cette mesure n'aura *a priori* aucun sens physiologique dans une action de prévention des lombalgies.

Les principales techniques et les paramètres à considérer

Un certain nombre de techniques peuvent être mobilisées pour réaliser des mesures physiologiques en entreprise. Les principales sont présentées ici pour exposer en quoi leur utilisation peut revêtir, pour le préventeur, un intérêt dans une action de prévention des AT/MP.

La mesure de la fréquence cardiaque

L'évaluation de la fréquence cardiaque (FC) peut permettre de déterminer :

- la charge physique globale, au travers de la FC de travail ;
- l'astreinte thermique, au moyen de la mesure des extrapulsations cardiaques thermiques (EPCT) ;
- et la charge mentale, par l'analyse de la variabilité cardiaque.

Pour caractériser la charge physique globale de travail, les principaux paramètres analysés sont la FC de repos, la FC moyenne et les pics de FC [1, 2]. Ces pics de FC permettent notamment de connaître l'intensité maximale de l'effort cardiaque au cours d'une activité de travail mais également, couplés à un suivi chronologique de l'activité, de mettre en évidence les tâches les plus contraignantes sur le plan cardiaque. Il est recommandé, lors d'une activité professionnelle, que les pics de FC ne doivent pas dépasser 85% de la FC maximale. Cette dernière peut être estimée par l'équation suivante :

$$FC \text{ max théorique} = 207 - 0,7 \times \text{âge} \quad (\text{formule 1})$$

La FC de repos et la FC moyenne permettent par ailleurs de calculer la grandeur nommée coût cardiaque absolu (CCA) :

$$CCA = FC \text{ moy} - FC \text{ repos} \quad (\text{formule 2})$$

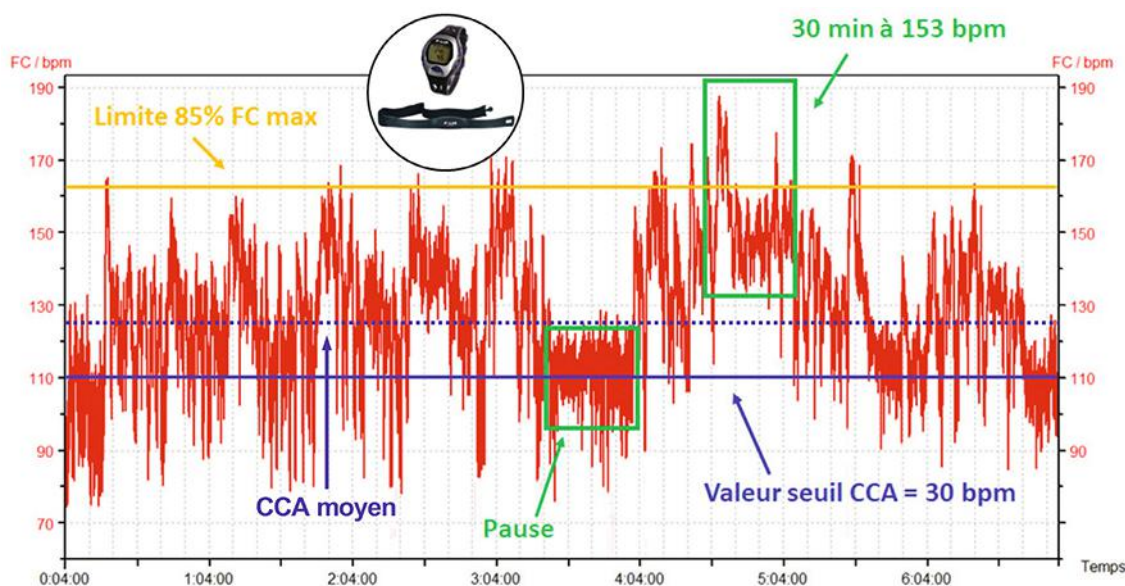
Le CCA est l'indicateur de la charge physique globale moyenne d'une activité. En moyenne, pour une activité d'au moins quatre heures, le CCA ne devrait pas dépasser 30 battements par minute (bpm), valeur limite d'astreinte cardiaque correspondant à un travail jugé comme pénible physiquement (Cf. Figure 1). Il est à noter que le coût cardiaque peut également être exprimé en fonction des capacités cardiaques maximales de chaque personne. Il s'agit du coût cardiaque relatif (CCR) :

$$CCR = CCA / (FC \text{ max} - FC \text{ repos}) \quad (\text{formule 3})$$

Toutefois, cette formule nécessite de connaître la FC maximale réelle, qui peut s'avérer complexe à recueillir, ou de se baser sur une estimation de sa valeur (formule 1), pouvant induire une imprécision dans le calcul. Il est également important de souligner que ces calculs sont dépendants de la valeur de la FC de repos. Celle-ci devra donc être évaluée avec rigueur. S'il est souvent compliqué de mesurer une « vraie » FC de repos (lors d'une nuit de sommeil), une mesure acceptable nécessite de respecter une période de repos assis ou couché d'au moins dix minutes, au calme (sans bruit ambiant ni discussion avec les collègues), dans un environnement thermique confortable (20-25°C), avant de commencer l'activité de travail.

La FC permet également d'évaluer l'astreinte thermique au moyen de la mesure des extrapulsations cardiaques thermiques EPCT [3], correspondant à l'augmentation résiduelle de la FC survenant à l'issue d'un exercice physique ou d'une exposition à la chaleur. Cette augmentation reflète un mécanisme de dissipation de la chaleur corporelle accumulée au cours de l'exposition. Plus précisément, il s'agit de comparer la moyenne de la FC de repos mesurée aux 3^e, 4^e et 5^e minutes de post-exposition à la FC de repos (pré-exposition). Une valeur de 30 bpm² d'EPCT correspond approximativement à une élévation de 1°C de chaleur corporelle, limite admissible d'astreinte thermique au travail (selon la norme NF EN ISO 9886 [4]).

Enfin, la FC peut être utilisée pour appréhender la charge mentale de travail. Dans ce cadre, c'est la variabilité de la FC qui est analysée. Elle correspond à la variation de la durée de l'intervalle de temps séparant deux battements cardiaques. Des indicateurs temporels et fréquentiels permettent de caractériser cette variabilité cardiaque [5]. La FC étant régulée par le système nerveux autonome, l'étude de sa variabilité au cours du temps permet d'évaluer l'équilibre entre les systèmes nerveux sympathique et parasympathique. Une charge mentale élevée peut influencer cet équilibre et induire une réduction de la variabilité cardiaque. Il est



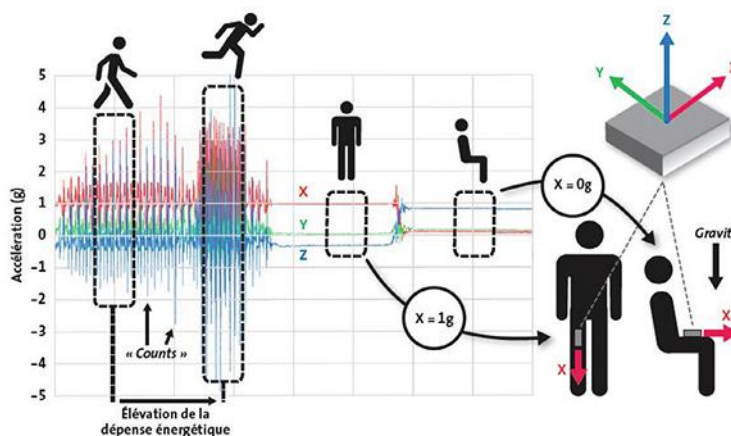
↑ FIGURE 1 Cardiofréquencemètre d'un ripeur lors d'une collecte d'ordures ménagères effectuée en monoripage. Le coût cardiaque absolu (CCA) moyen et certains pics de fréquence cardiaque sont supérieurs aux valeurs seuils recommandées, soulignant la forte charge physique associée à cette activité.

toutefois important de rappeler que la variabilité cardiaque est une donnée physiologique dépendant de l'influence de nombreux mécanismes et que son évaluation et son interprétation nécessitent ainsi certaines précautions.

Par ailleurs, d'un point de vue matériel, deux principales technologies permettent de recueillir la FC: l'une est optique, l'autre électrique. Pour la première, le flux sanguin associé à chaque battement cardiaque est détecté à l'aide de photodiodes placées au contact de la peau. C'est la technologie que l'on retrouve par exemple dans les montres « fitness ». La seconde méthode nécessite le positionnement d'électrodes au contact de la peau, à proximité du cœur, afin de recueillir le signal électrique du muscle cardiaque. Ces électrodes peuvent être adhésives (comme pour un électrocardiogramme) ou intégrées dans une ceinture thoracique (comme pour certaines montres de sport; exemple dans la Figure 1). Il est à noter que ce système est plus fiable que la technologie optique. C'est ainsi ce type de cardiofréquencemètre, avec ceinture thoracique, qui est habituellement employé lors d'activités de travail.

La mesure du mouvement humain

Les accéléromètres sont des capteurs fréquemment utilisés pour évaluer le mouvement humain. Le principe technique réside dans la mesure de l'accélération d'un segment corporel au moyen d'un capteur positionné sur celui-ci. Les accéléromètres peuvent être intégrés dans différents supports, tels qu'un téléphone portable, une montre ou encore un boîtier miniature. En physiologie du travail, les accéléromètres sont principalement utilisés pour estimer la dépense énergétique ou analyser les mouvements ou les postures [6] (Cf. Figure 2). Ainsi, à partir des



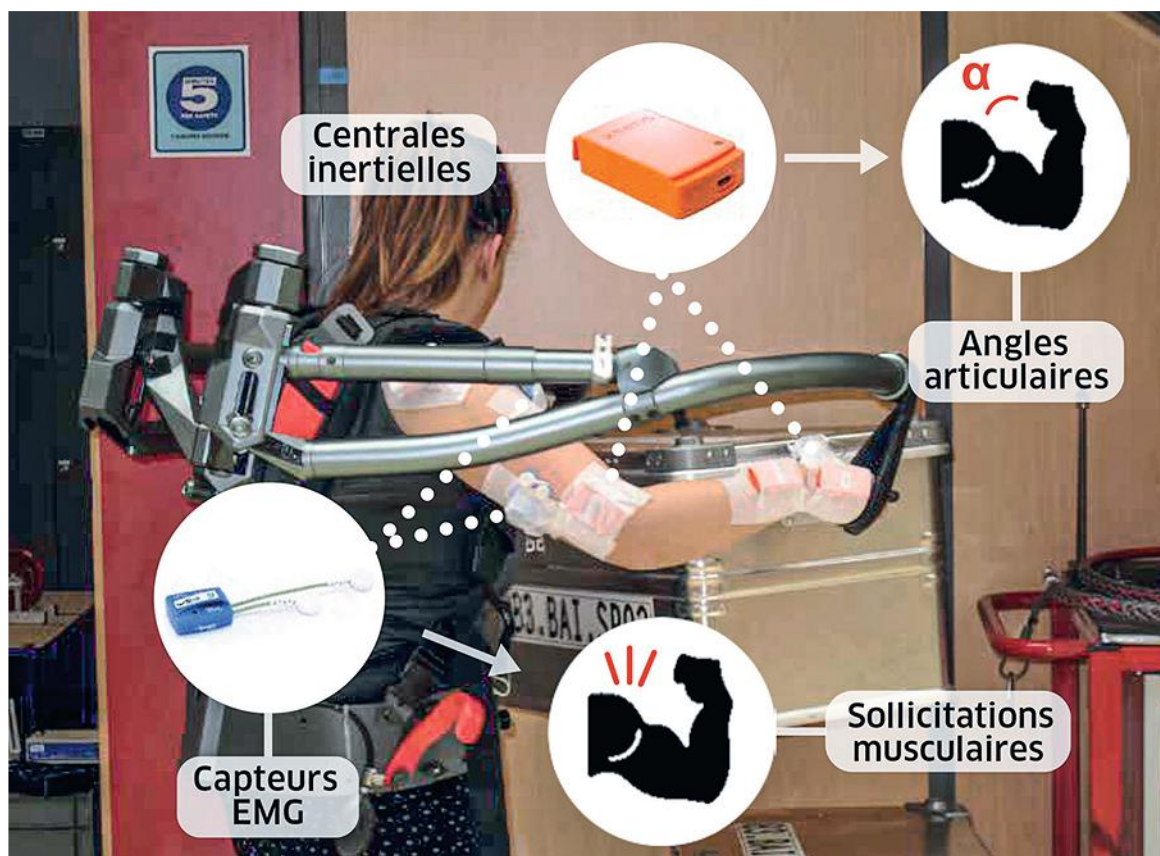
↑ FIGURE 2 Exemple d'utilisation de données d'un accéléromètre positionnés sur la cuisse. Les signatures accélérométriques permettent de détecter les postures et mouvements effectués, et l'analyse des counts (pics d'accélération répétés) permet d'estimer la dépense énergétique (source: illustration extraite de [6]).

données recueillies, il est tout d'abord possible d'évaluer les pics d'accélération répétés (« counts ») qui permettent de calculer, en fonction de leurs fréquence et amplitude, la dépense énergétique liée à l'activité réalisée.

Les accélérations peuvent également être analysées pour faire ressortir des « signatures accélérométriques », représentatives de différents mouvements ou postures. Ainsi, un accéléromètre positionné sur la cuisse permet par exemple de connaître le temps passé assis, debout, en marchant, en courant ou en pédalant.

Enfin, la mesure de l'accélération permet de connaître certaines caractéristiques du mouvement réalisé (sa vitesse par exemple), mais également la position du segment corporel par rapport à l'axe gravitaire (la





↑FIGURE 3 Équipement d'un opérateur au moyen de capteurs électromyographiques (EMG) et de centrales inertielles pour évaluer les sollicitations musculaires et les angles articulaires lors de l'utilisation d'un exosquelette d'assistance des membres supérieurs.

verticale) dans le cas de postures statiques ou de mouvements lents. Il est donc possible de mesurer l'angle d'élévation des bras, ou l'angle d'inclinaison du dos par rapport à la verticale, lorsqu'un accéléromètre est positionné sur ces segments corporels [7]. Toutefois, pour des mouvements plus dynamiques ou pour le calcul d'angles articulaires, il sera nécessaire d'utiliser une technologie plus adaptée.

La mesure des angles articulaires

L'analyse des angles articulaires du corps humain, objective et quantifiée, nécessite l'utilisation d'une technologie de mesure et d'un protocole associé. À ce jour, de nombreuses solutions existent, chacune présentant des exigences de fonctionnement spécifiques. L'une de ces technologies est celle des capteurs inertielles. Ils présentent une bonne précision de mesure, couplée à une grande flexibilité d'utilisation. Un capteur inertiel se compose de plusieurs capteurs élémentaires: un accéléromètre 3D, un gyroscope 3D et un magnétomètre 3D. L'association des informations de ces trois capteurs se fait par l'utilisation d'un algorithme de fusion de données. Son principe est d'estimer, puis de corriger les dérives de chacun des capteurs en utilisant les informations des autres. Les capteurs inertielles apportent ainsi des informations d'orientation par rapport à un sys-

tème global associé au Nord magnétique et à l'axe de gravitation terrestre. L'utilisation de ces systèmes de capteurs inertielles est possible en entreprise, sous certaines conditions liées à l'environnement. Une attention particulière doit en effet être portée à une possible perturbation magnétique pouvant induire des erreurs de mesure et, en conséquence, à des conclusions erronées.

Méthodologiquement, pour l'estimation des angles articulaires, plusieurs étapes sont nécessaires [8]: le positionnement des capteurs, la calibration du système et le calcul des angles. Les capteurs doivent être positionnés sur chaque segment corporel adjacent aux articulations analysées et ce, en suivant des recommandations spécifiques, de manière à éviter au maximum des mouvements parasites des capteurs sur la peau (Cf. Figure 3). Ensuite, une phase de calibration (statique et/ou dynamique) doit être réalisée. Elle permet d'établir une correspondance entre les capteurs inertielles et les segments corporels (généralement représentée sous forme d'un avatar) (Cf. Figure 4). Pour le calcul des angles, différents modèles cinématiques, associés au système, peuvent être utilisés. Enfin, en fonction de l'objectif recherché, les paramètres d'analyse pourront être, par exemple, l'angle moyen associé à son écart type ou le temps passé dans différentes plages angulaires

(par exemple, selon les normes NF EN 1005-4 et NF EN 1005-5 [4]).

La mesure de l'activité musculaire

L'électromyographie (EMG) de surface est la technique la plus courante pour évaluer le niveau de sollicitation musculaire. Elle consiste à enregistrer, au moyen d'électrodes collées sur la peau, l'activité électrique de muscles superficiels (Cf. Figure 3). Pour une même position, plus l'activité électrique est importante, plus le muscle est sollicité. Afin de recueillir un signal de qualité, il est nécessaire de réaliser au préalable une préparation de la peau (nettoyage, rasage et légère « abrasion » de la couche superficielle) de façon à diminuer l'impédance inter-électrodes. Les électrodes doivent ensuite être positionnées correctement au regard des muscles étudiés, en accord avec les recommandations existantes [9].

Une particularité de l'EMG est que, pour un effort musculaire donné, son amplitude est variable d'un individu à un autre. Il est donc nécessaire de procéder à l'enregistrement de valeurs de référence, de façon à exprimer les mesures recueillies en situation de travail en pourcentage de ces valeurs. En situation de travail, la façon de recueillir ces valeurs de référence la plus fréquemment utilisée nécessite l'enregistrement de l'activité musculaire au repos, puis lors de contractions maximales volontaires (CMV) en condition statique³. Ceci permet d'enregistrer l'EMG maximal des muscles et ainsi, de connaître à quel pourcentage de leur maximum ils sont sollicités lors de l'activité de travail. Enfin,

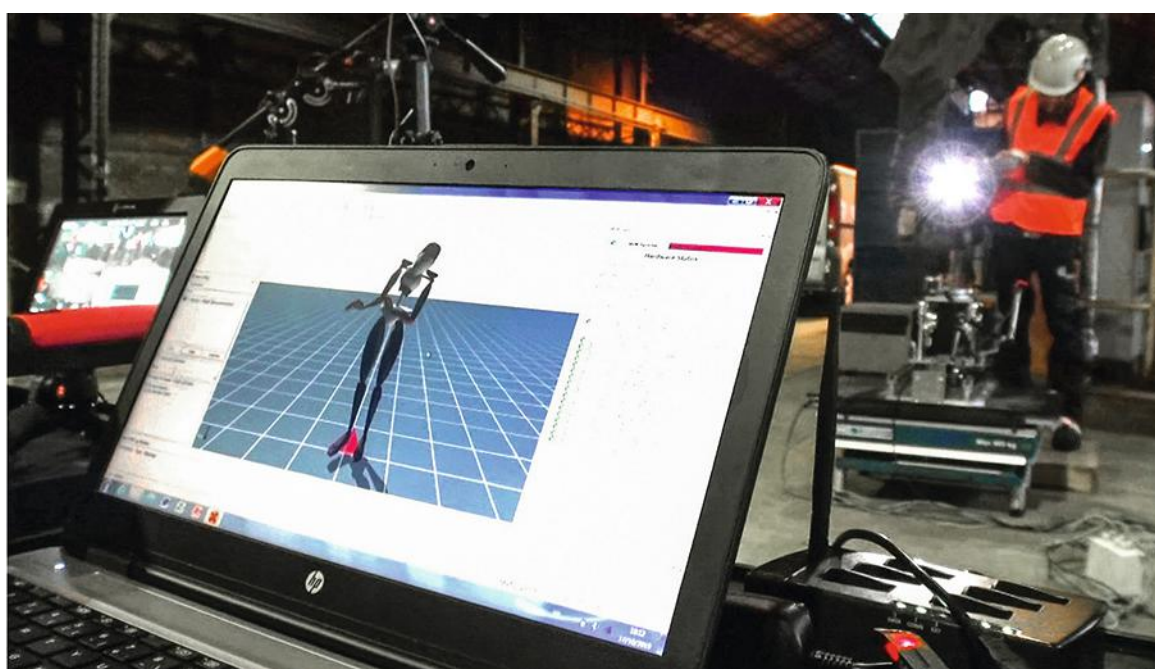
pour ce qui concerne l'analyse des données, de nombreux descripteurs peuvent être calculés, à la fois dans le domaine temporel ou fréquentiel selon les objectifs recherchés (comparaison de deux situations de travail, recherche de fatigue musculaire...). Le plus fréquemment utilisé est la valeur RMS (*Root Mean Square*, représentant la puissance moyenne équivalente du signal), calculée sur des périodes de 50 à 500 millisecondes, selon le caractère statique ou dynamique de la situation de travail considérée. L'EMG permet ainsi une approche très fine de l'activité d'un muscle. Toutefois, le recueil, le traitement et l'interprétation des nombreux signaux peuvent s'avérer complexes et coûteux en temps. Ainsi, à l'heure actuelle, même si la mesure de l'activité musculaire devient matériellement accessible aux préventeurs, elle reste toutefois une technique principalement destinée à la recherche scientifique.

Quelques exemples de mesures physiologiques réalisées sur le terrain

Afin d'illustrer l'usage des techniques de mesures précédemment décrites, sont présentés ici quelques exemples d'interventions en entreprise, menées par l'INRS pour répondre à différents objectifs: mieux comprendre une situation; comparer diverses situations entre elles; ou comparer une situation à des valeurs de référence.

Comparaison de deux modes d'organisation de collecte d'ordures ménagères

Il s'agissait ici d'évaluer la charge physique de travail liée à la collecte d'ordures ménagères effectuée



↑ FIGURE 4 Opérateur équipé, sous ses vêtements de travail, de 17 capteurs inertielles permettant d'analyser les angles articulaires des membres supérieurs, inférieurs et du tronc. La technologie sans fil permet ici une représentation, en direct, des angles articulaires sous forme d'avatar.



en monoripage (MR, un seul ripeur à l'arrière du camion) au regard de la collecte réalisée en biripage (BR, avec deux ripeurs) [10]. Vingt-deux ripeurs ont participé à ces mesures. Dix tournées ont été effectuées en monoripage et six en biripage. Les données recueillies pour chaque agent de collecte étaient, entre autres, la fréquence cardiaque ainsi que le niveau et le type d'activité physique, réalisées au moyen d'accéléromètres. Le coût cardiaque absolu (CCA), ainsi que le nombre de pas effectués et le temps passé dans chaque type d'activité (assis, debout statique, marche, course), ont été calculés pour chaque participant. Les résultats ont tout d'abord mis en avant une durée relative passée en posture debout statique plus faible et une durée de marche plus longue pour l'organisation en MR (monoripage) par rapport au BR (biripage), soulignant le fait que le MR pouvait procurer moins de temps de récupération (sur le marchepied, par exemple) et plus de déplacements pédestres. Ce résultat était confirmé par le nombre de pas effectués: en moyenne, ≈16 600 pour le MR et ≈12 300 pour le BR. Cela représente environ 3,5 km supplémentaires parcourus à pied en MR.

Cette élévation du niveau de sollicitation physique était à mettre en lien avec l'élévation du CCA: 29 bpm en BR et 39 bpm en MR. Il est à noter que ce CCA était proche de la valeur limite d'astreinte cardiaque (30 bpm) pour le BR, confirmant le caractère physique de l'activité de collecte d'ordures ménagères, et dépassait largement cette valeur en MR (Cf. Figure 1).

Ces mesures physiologiques ont ainsi permis de conclure que, dans les situations de travail analysées, l'organisation en MR était particulièrement contraignante sur le plan physique et qu'il était nécessaire de revoir ses modalités de mise en place pour préserver la santé et la sécurité des ripeurs.

Évaluation des conséquences physiologiques de l'usage d'un exosquelette

L'objectif poursuivi dans cette étude de terrain, lancée à la demande d'une entreprise, était de mieux comprendre les effets de l'usage d'un exosquelette d'assistance des membres supérieurs lors de différentes tâches de manutention [11]. Il s'agissait pour cette entreprise de valider ou non l'utilisation d'un exosquelette pour ces tâches particulières. Pour cela, huit participants (quatre hommes et quatre femmes) ont réalisé trois tâches avec et sans exosquelette (situation de référence). Les sollicitations musculaires ont été quantifiées par la technique d'EMG de surface (Cf. Figure 3) d'une part, pour des muscles du membre supérieur, tels que le deltoïde antérieur (DA) et le triceps brachial (TB) et, d'autre part, pour des muscles posturaux, tels que les lombaires et le tibial antérieur. Des capteurs inertiels ont également été utilisés pour évaluer les angles

articulaires des membres supérieurs (Cf. Figure 3). Les résultats ont montré que l'exosquelette permettait de réduire le niveau de sollicitation du muscle assisté (DA) jusqu'à 73% selon la tâche réalisée. Toutefois, il a aussi été mis en évidence que l'autre muscle du membre supérieur étudié (TB) pouvait voir son activité EMG augmentée jusqu'à 116% avec l'utilisation de l'exosquelette, par rapport à la situation de référence. Selon la tâche réalisée, les muscles posturaux pouvaient également être davantage sollicités par l'usage de l'exosquelette. Enfin, la mesure des angles posturaux a mis en évidence que la conception de l'exosquelette engendrait une extension accrue des bras lors de la marche, avec port de charge. Cette modification posturale pourrait être à l'origine d'une sollicitation plus importante des muscles du dos, du fait de l'augmentation du bras de levier des forces mises en jeu. En conclusion, ces mesures ont permis de mieux comprendre les répercussions physiologiques de l'usage d'un exosquelette et, ainsi, de valider, selon la tâche réalisée, l'apport de ce dispositif en termes de prévention des troubles musculo-squelettiques.

Mesure des astreintes thermiques dans une papeterie

L'exposition à des contraintes thermiques importantes, occasionnées par certains processus de production, est présente dans de nombreuses entreprises. C'est dans ce contexte que l'INRS a été sollicité afin d'évaluer les astreintes thermiques dans une entreprise papetière et notamment, celles de salariés intervenant dans la partie sécherie d'une machine à papier [12]. La fréquence cardiaque a été recueillie en continu auprès de 22 opérateurs de production réalisant diverses opérations dans la machine à papier. Pour l'ensemble des activités observées, les extrapulsations cardiaques thermiques (EPCT) présentaient une valeur moyenne de 14 bpm. Toutefois, même si les opérations pouvaient être de durées relativement courtes (de quelques minutes à pratiquement une heure), il a pu être observé des valeurs de 31 bpm lors d'interventions consécutives à une casse de la feuille de papier, ou de 40 bpm lors d'opérations de nettoyage de certains éléments de la machine. Ces valeurs, qui témoignaient de contraintes thermiques élevées, dépassaient la limite fixée à 30 bpm (selon la norme NF EN ISO 9886 [4]).

Au regard de ces résultats, des mesures organisationnelles (effectif accru à certaines périodes, durée d'exposition limitée, temps et conditions de récupération appropriés) ou individuelles (information sur les risques du travail en ambiance chaude, encouragement à la pratique d'une activité physique régulière) ont été proposées. Ces résultats ont également conduit à une recommandation de surveillance médicale renforcée pour ces salariés.

FOCUS / Mesures physiologiques : des précautions méthodologiques à considérer

En tout premier lieu, il est nécessaire d'avoir l'accord d'une personne pour recueillir des données physiologiques la concernant. Au-delà de l'aspect éthique de cette démarche, une participation volontaire des opérateurs est le gage d'une bonne conduite du protocole de mesure. Le fait que les outils précédemment décrits enregistrent des données corporelles, associé à une possible inquiétude de surveillance de l'activité de travail, doit être considéré. Une information préalable sur les objectifs et les données collectées, et une conduite de la mesure par des personnes qualifiées (services de santé au travail, prestataires, universitaires...) sont nécessaires pour garantir le bon usage des données et la participation des salariés [14]. À noter également : il existe un cadre réglementaire relatif aux recherches impliquant la personne (humaine)¹. Ainsi, si les mesures envisagées vont au-delà de l'analyse de la situation de travail et ont pour objectif le développement de connaissances biologiques ou médicales, elles doivent alors répondre aux exigences de cette loi.

Par ailleurs, les possibilités de mesures en physiologie du travail sont étendues et peuvent apporter de nombreuses informations. Toutefois, pour obtenir des résultats pertinents, représentatifs de la situation de travail et utiles dans une action de prévention, il est indispensable de respecter certaines précautions méthodologiques lors de la collecte, de l'analyse et de la présentation des données. Celles-ci étant recueillies sur des personnes, il est nécessaire de considérer l'existence de variabilités interindividuelles (genre, âge, antécédents médicaux, condition physique...) et intra-individuelles (moments de la journée, état de

fatigue...) et d'en tenir compte dans la constitution de l'échantillon. Le nombre de participants doit ainsi, dans la mesure du possible, être suffisamment important. Pour des données physiologiques, on estime généralement qu'un échantillon minimal de dix personnes permet de prendre en compte la variabilité interindividuelle présente pour une situation de travail donnée. Ainsi, il n'est pas envisageable d'évaluer de façon pertinente une situation de travail en réalisant des mesures sur seulement un ou deux opérateurs. D'autre part, pour une même personne, il est également conseillé de répéter les mesures de façon à intégrer une partie de la variabilité intra-individuelle. Ensuite, lorsque les données ont été recueillies dans les règles de l'art, se pose la question de l'interprétation des résultats. En effet, l'accès à ces derniers peut être facilité avec le développement des outils d'analyse permettant des traitements automatisés, et de plus en plus sophistiqués, des données. Mais leur interprétation nécessite toujours une compréhension minimale de la façon dont les données ont été traitées et des mécanismes physiologiques sous-jacents pour apporter une signification aux valeurs chiffrées. Ainsi, lors de la réalisation de mesures physiologiques, il faudra veiller à s'entourer de personnes ayant des connaissances dans le domaine de la physiologie (médecin du travail, prestataire qualifié, universitaires compétents dans le domaine...). Il est également conseillé de coupler cette mesure objective à une évaluation subjective, liée au ressenti des opérateurs. La complémentarité de ces données permet souvent d'apporter des éléments de compréhension additionnels.

Des précautions existent également quant à la présentation des résultats. Les paramètres recueillis sont des données personnelles qui ne doivent en aucun cas être présentées par individu. Il est nécessaire de moyenniser les données des participants de façon à anonymiser les résultats et, par la même occasion, d'obtenir des valeurs globales représentatives de la situation de travail. La personne en charge des mesures devra également préserver toute confidentialité vis-à-vis de ces données individuelles. Au regard des résultats, il est par ailleurs important de garder à l'esprit que les données recueillies l'ont été dans des conditions spécifiques, et que leur généralisation à d'autres situations ou d'autres entreprises peut s'avérer inappropriée. ●

1. Loi n° 2012-300 du 5 mars 2012, dite « loi Jardé ».
En savoir plus : [www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=J](http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000025441587&categorieLien=id)



© Serge Morillon/INRS/2019

Tests avec exosquelettes
lors de tâches de manutention.



Réaménagement d'un site de production automobile pour intégrer de nouvelles technologies au bénéfice de la santé et sécurité au travail.



© Patrick Delapierre pour l'INRS/2019

Comparaison de deux types de cœliochirurgie : standard *versus* assistée par robot

La cœliochirurgie, technique permettant de réaliser des interventions mini-invasives pour un nombre croissant de gestes chirurgicaux, impose aux chirurgiens des positions de travail contraignantes et fatigantes pouvant, à long terme, conduire à l'apparition de troubles musculo-squelettiques. Une intervention a été menée auprès de 23 chirurgiens, afin de comparer notamment les sollicitations musculaires et la charge mentale lors d'interventions réalisées soit en cœliochirurgie standard, soit en cœliochirurgie assistée par robot [13]. Les résultats ont montré une sollicitation des muscles lombaires, trapèzes et fléchisseurs des doigts, à droite comme à gauche, significativement plus élevée au cours de la cœliochirurgie standard. Pour exemple, la valeur RMS du trapèze droit était en moyenne, lors de l'opération assistée par robot, de $11,1 \pm 8,8\%$ de la CMV, alors qu'elle était de $27,8 \pm 10,8\%$ lors de l'opération manuelle, soulignant ainsi une activité musculaire plus importante avec la technique non assistée. De plus, il a été observé une augmentation significative de la valeur RMS pour les muscles trapèzes, entre le début et la fin d'intervention en cœliochirurgie standard. Cette augmentation traduisait la survenue de fatigue musculaire au niveau des trapèzes lors de ce type d'intervention.

Concernant la charge mentale, il a été observé une diminution de la variabilité cardiaque entre la phase de repos et l'intervention et ce, pour les deux types de cœliochirurgie. Les valeurs les plus faibles

d'arythmie ont été observées parmi les chirurgiens novices dans la pratique de la technique robotisée, ou lorsque la difficulté de l'intervention augmentait. Ces résultats pourraient traduire une augmentation de la charge mentale des chirurgiens débutants par rapport aux plus expérimentés, mais aussi avec l'augmentation de la complexité de l'intervention. L'ensemble de ces résultats a notamment permis d'informer les chirurgiens, d'une part sur le fait que leur charge mentale avait tendance à diminuer avec l'accroissement de leur expérience en cœliochirurgie assistée par robot et, d'autre part, sur le fait que ce type d'intervention semblait s'accompagner d'une réduction de leurs sollicitations musculaires et de leur fatigue par rapport à la cœliochirurgie standard.

Analyse des angles articulaires des opérateurs du secteur automobile

Une étude a été menée dans le secteur automobile pour évaluer les contraintes biomécaniques des membres supérieurs lors de diverses tâches. Les angles articulaires et plus particulièrement ceux du poignet, articulation difficile à observer car parfois masquée derrière les composants de la voiture, ont été mesurés au moyen de capteurs inertiels. Lors des opérations de pose d'inserts (clipsage d'éléments sur le châssis), l'analyse de ces angles a été réalisée en les comparant à des valeurs de référence d'angles articulaires de confort des membres supérieurs (selon la norme NF EN 1005-5 [4]). Il a été observé que les angles de flexion / extension du poignet étaient, en grande partie, dans la plage angulaire

de confort. Les angles d'abduction/adduction du poignet étaient quant à eux fréquemment en dehors des valeurs de référence lors de la pose d'inserts, mais aussi lors de l'approvisionnement avec des inserts placés dans une caisse dédiée.

Ce type d'analyse, très utile dans la conception des lieux de travail et du processus de fabrication, a permis, dans cet exemple, d'illustrer que non seulement la pose de certains inserts, mais aussi le positionnement de la caisse d'approvisionnement étaient à intégrer dans la reconception de ce poste. Certaines de ces informations, impossibles à évaluer par observation, ont été révélées par la mesure et ont permis de mieux comprendre les contraintes associées à la tâche. Il est également apparu que, dans certaines situations de travail, la technique de mesure utilisée pouvait être perturbée par l'environnement électromagnétique et ne permettait donc pas de recueillir des données fiables d'angles articulaires. Ce constat souligne le fait qu'il est nécessaire de maîtriser le fonctionnement de la technologie utilisée et les précautions liées à son usage.

Conclusion

À travers cette présentation de différentes techniques de mesures physiologiques pouvant être mobilisées lors d'actions de prévention, force est de constater que le champ des possibles est vaste. La réalisation de mesures pouvant être plus ou moins complexe et chronophage, un choix devra être fait en fonction de l'objectif poursuivi et des outils et compétences disponibles. Par ailleurs, si la mesure permet d'obtenir des indicateurs objectifs, au travers d'une valeur chiffrée, et peut faire ressortir ce qui ne peut pas toujours être observé, il est toutefois important de garder à l'esprit que la mesure n'est pas une fin en soi. C'est un outil, complémentaire d'autres modalités d'évaluation, d'aide à la compréhension de la situation de travail sur lequel il est possible de s'appuyer pour formuler des préconisations lors d'une action de prévention des AT/MP. Il est enfin nécessaire de conduire ces mesures physiologiques dans le respect des règles éthiques et réglementaires, en comprenant l'activité effectuée, pour donner du sens aux mesures et permettre d'interpréter les résultats obtenus en relation avec la situation de travail évaluée. ●

1. Les contraintes correspondent à l'ensemble des exigences du travail, relatives à un poste donné, dans des conditions de travail données (organisationnelle, technique et humaine). Les astreintes sont l'ensemble des conséquences objectives et subjectives entraînées par les exigences du travail sur l'opérateur.

2. Battements par minute.

3. Lorsque la réalisation d'efforts maximaux peut s'avérer être difficile pour le participant (contraction maximale des muscles lombaires par exemple) ou lorsque la situation de travail concernée est très peu sollicitante (faibles niveaux d'EMG), les valeurs de référence peuvent être enregistrées en conditions statiques sous-maximales (par exemple, bras tendus à l'horizontal dans le plan frontal pour les muscles trapèzes).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] MEYER J.-P. – La fréquence cardiaque, un indice d'astreinte physique ancien servi par une métrologie moderne. *Documents pour le Médecin du Travail*, 1996, 68, TL 20, pp. 315-322.
- [2] MEUNIER P. – Cardiofréquencemétrie pratique en milieu de travail. Paris, Éditions Docis, 2010.
- [3] MEYER J.-P., TURPIN-LEGENDRE E., GINGEMBRE L., HORVAT F., DIDRY G. – Évaluations des astreintes thermiques à l'aide de la fréquence cardiaque. Les extrapulsations cardiaques thermiques (EPCT). *Références en santé au travail*, 2014, 140 (TM 34), pp. 83-94. Accessible sur : www.rst-sante-travail.fr
- [4] NORMES NF EN 1005-4 (2008, indice de classement Afnor: X 35-106-4, 24 p.) – Sécurité des machines – Performance physique humaine. Partie 4: évaluation des postures et mouvements lors du travail en relation avec les machines. NF EN 1005-5 (2007, classement Afnor: X 35-106-5, 76 p.) – Partie 5: Appréciation du risque relatif à la manutention répétitive à fréquence élevée. NF EN ISO 9886 (2004, classement Afnor: X 35-207, 24 p.) – Ergonomie – Évaluation de l'astreinte thermique par mesures physiologiques. Paris, Afnor. Accessibles sur : www.boutique-afnor.org (site payant).
- [5] TASK FORCE REPORT – Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *Circulation*, 1996, 93 (5), pp. 1043-1065.
- [6] DESBROSSES K. – Évaluation du comportement sédentaire au travail : quels outils? *Références en santé au travail*, 2020, 162 (TM 57), pp. 51-60. Accessible sur : www.rst-sante-travail.fr
- [7] DAHLQVIST C., HANSSON G.A., FORSMAN M. – Validity of a small low-cost triaxial accelerometer with integrated logger for uncomplicated measurements of postures and movements of head, upper back and upper arms. *Appl Ergon*, 2016, 55, pp. 108-116.
- [8] BOUVIER B., DUPREY S., CLAUDON L., DUMAS R., SAVESCU A. – Upper limb kinematics using inertial and magnetic sensors: Comparison of sensor-to-segment calibrations. *Sensors (Basel)*, 2015, 15 (8), pp. 18813-18833.
- [9] HERMENS H., FRERIKS B., MERLETTI R. ET AL. – European recommendations for surface electromyography - Results of the SENIAM project. Enschede (Pays-Bas), Roessingh Research and Development, 1999.
- [10] DELECROIX B., SALMON I., DESBROSSES K., VIEIRA M., ADAM A. – Développement du monoripage et conditions de travail : une étude de l'INRS. *Références en Santé au Travail*, 2017, 152 (TF 249), pp. 53-63.
- [11] THEUREL J., DESBROSSES K. – Usage d'un exosquelette d'assistance des bras : bénéfices et contraintes lors de tâches de manutention. *Hygiène et Sécurité du Travail*, 2018, 251 (NT 62), pp. 62-68. Accessible sur : www.hst.fr
- [12] PAYOT L., MEYER J.-P., DIDRY G. – Les contraintes physiques et thermiques des opérateurs en sécherie de papeterie. INRS, coll. Notes scientifiques et techniques, 1997, NST 160. Accessible sur : www.inrs.fr
- [13] HUBERT N., GILLES M., DESBROSSES K., MEYER J.-P. ET AL. – Ergonomic assessment of the surgeon's physical workload during standard and robotic assisted laparoscopic procedures. *Int J Med Robot*, 2013, 9 (2), pp. 142-147.
- [14] GROSJEAN V., GOVAERE V. – TIC et objets connectés : quels enjeux de santé au travail? *Hygiène et sécurité du travail*, 2016, 244, pp. 108-112. Accessible sur : www.hst.fr

PRÉVENTION DU RISQUE VIBRATOIRE: ÉVALUATION DE L'EXPOSITION ET DOSIMÈTRES INTÉGRÉS AUX MACHINES

Cet article propose une évaluation de l'intérêt et des limites de dosimètres intégrés aux machines vibrantes, au sein de la démarche de prévention du risque vibratoire. Cette démarche est présentée à travers l'étude d'un cas concret de vibrations transmises aux membres supérieurs. Les méthodes existantes d'évaluation de l'exposition sont détaillées. Leurs résultats sont comparés aux mesures effectuées à l'aide d'un dosimètre embarqué.

MAËL AMARI
INRS,
département
Ingénierie des
équipements
de travail

Le corps humain est exposé aux vibrations lorsqu'il entre en contact avec un système mécanique qui lui transmet des oscillations¹ dans une ou plusieurs directions de l'espace. La grandeur physique utilisée pour quantifier les vibrations est l'accélération². Les vibrations transmises aux membres supérieurs concernent les utilisateurs de machines portatives énergisées, qu'elles soient électriques, pneumatiques ou thermiques (perforateur, meuleuse, ponceuse, marteau-piqueur, clé à choc, etc.). Les vibrations créées par le moteur de la machine et le contact de son outil avec le matériau travaillé se propagent dans les mains, les coudes et les épaules de l'opérateur. Ce type d'exposition professionnelle, lorsqu'elle est prolongée, peut avoir des effets néfastes sur la santé. Pour le système main-bras, les atteintes peuvent être de nature vasculaire, neurologique ou ostéo-articulaire au niveau du coude, du poignet et de la main (arthrose du coude, maladies de Kienböck et de Köhler caractérisées par une nécrose de certains os du poignet, phénomène de Raynaud³, anévrisme ou thrombose de l'artère cubitale, etc.). Ces pathologies sont reconnues comme maladies professionnelles au titre du tableau n° 69 du Régime général de la Sécurité sociale [1]. On dénombre en moyenne 200 cas par an pour les atteintes du système main-bras. Elles représentent un coût direct de 8,5 M€ pour les employeurs [2]. Les symptômes les plus courants sont des picotements dans les mains, une sensation d'engourdissement, une faiblesse musculaire ou le déclenchement d'une crise du syndrome de Raynaud. Le froid et

les efforts de poussée sont enfin des cofacteurs de risque avérés.

Il revient à l'employeur de mettre en place une démarche de prévention du risque qui consiste notamment à identifier les sources vibratoires pour limiter l'exposition des salariés. Différentes méthodes permettent d'effectuer cette estimation: les mesures normalisées au poste de travail, l'exploitation des bases de données d'exposition ou l'estimation à partir des valeurs d'émission vibratoire des machines déclarées par les fabricants.

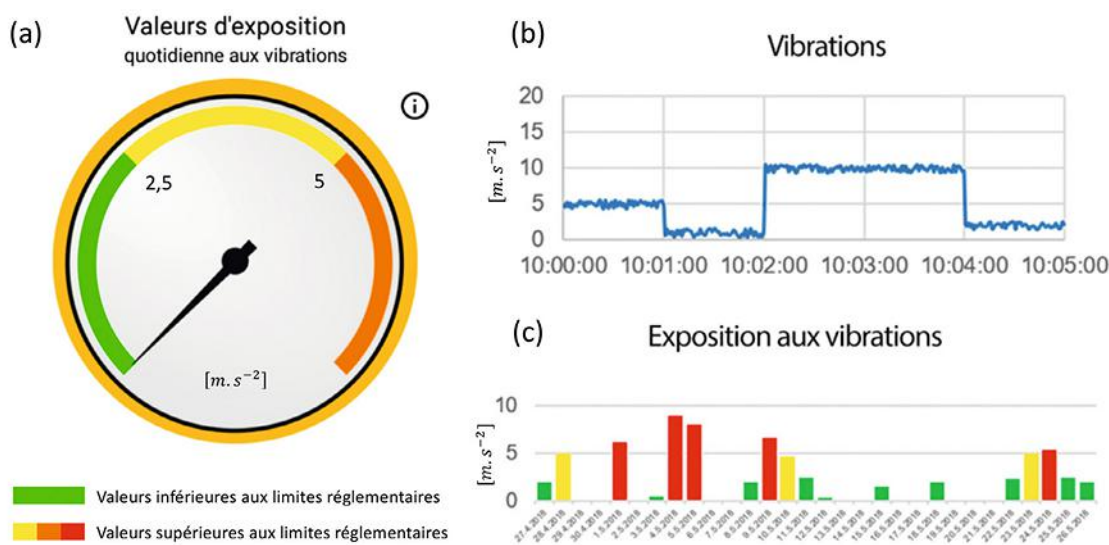
On constate l'apparition récente de machines portatives équipées d'accéléromètres. Ils sont intégrés à leurs cartes électroniques internes. Ce type de machine mesure en temps réel la valeur d'exposition de son utilisateur. Cette information est accessible par affichage ou grâce à une application (Cf. Figure 1). L'historique d'utilisation de la machine sur plusieurs heures ou plusieurs jours est également disponible.

Cet article propose de mesurer l'intérêt et les limites de tels dispositifs au sein de la démarche de prévention du risque vibratoire.

Démarche de prévention

Dans la mesure du possible, la démarche de prévention du risque vibratoire doit être mise en place dès la phase de conception du poste de travail [4]. Elle consiste pour l'employeur à:

- identifier les sources vibratoires;
- hiérarchiser, planifier et réaliser les actions de réduction;
- former et informer les salariés;



← FIGURE 1 Exposition aux vibrations mesurée par le dosimètre intégré à une machine portable. (a) Exposition quotidienne de l'utilisateur. (b) Historique de l'émission vibratoire de la machine sur plusieurs minutes. (c) Historique de l'exposition quotidienne de l'utilisateur sur plusieurs jours (source : figure adaptée de [3]).

- contrôler et assurer l'efficacité des mesures mises en place.
- L'identification des sources vibratoires s'effectue à partir :
 - de la machine et des conditions d'utilisation (type, durée, vitesse, outil rotatif ou percutant, vétusté, froid, efforts de poussée, etc.);
 - de l'opérateur (pathologies, plaintes, positions de travail, gestes répétitifs, exposition au froid, efforts exercés, etc.);
 - d'estimations de l'exposition effectuées soit par la mesure, soit par l'exploitation de bases de données d'exposition, soit en dernier recours, par l'utilisation des valeurs d'émission déclarées par les fabricants.
- Concrètement, les actions de prévention consistent en priorité à :
 - choisir l'équipement le plus approprié à la tâche (machine plus puissante, moins lourde, équipements adaptés, etc.);
 - réduire les vibrations à la source (machine moins vibrante par nature, systèmes antivibratiles);
 - réduire la transmission des vibrations (poignées antivibratiles);
 - réduire l'exposition (gants antivibratiles, efficaces uniquement pour les fréquences supérieures à 200 Hz);
 - garantir la santé et la sécurité de l'opérateur par des mesures organisationnelles (rotations de poste, modification du processus de fabrication, sensibilisation des opérateurs, action sur les cofacteurs de risque).

Exemple d'application

La démarche de prévention du risque vibratoire est illustrée par l'étude d'un cas concret d'exposition aux vibrations transmises aux membres supérieurs: une chaudronnerie fabrique des bennes à destination d'une entreprise de construction de camions de chan-

tier. Elle assemble pour cela des plaques, ainsi que des profilés en acier achetés auprès d'un fournisseur. Sur la ligne de production principale, une machine automatique soude les plaques les unes aux autres (dimensions: 3 x 3 m, épaisseur = 5 mm). Elles sont ensuite mises en forme par pliage. Les profilés sont soudés manuellement pour renforcer la structure. L'ensemble doit alors être préparé pour l'atelier de peinture avant d'être expédié au client.

Analyse du poste de travail

Le poste de travail concerné est situé en amont de l'atelier de peinture, juste après la rectification des cordons de soudure. La tâche de travail consiste à améliorer l'état de surface des pièces. L'opérateur utilise pour cela une ponceuse orbitale pneumatique. L'utilisation de cette machine varie au jour le jour. Elle dépend principalement de la cadence de production et de la qualité des réglages de la machine de souder automatique. Il convient d'adapter le grain des abrasifs à l'état de surface initial des parties à traiter. En poste depuis plusieurs années, l'opérateur déclare utiliser la ponceuse en moyenne deux heures par jour. Cette machine est entretenue périodiquement par son fabricant. Les équipements de protection individuelle obligatoires sont des lunettes de protection, des protections auditives ainsi que des gants anticoupures. L'opérateur se plaint d'une fatigue excessive et de douleurs musculaires diffuses, liées aux forces de poussée qu'il doit exercer pour travailler correctement.

Actions de prévention

Les ponceuses appartiennent à la catégorie des machines rotatives réputées vibrantes [5]. L'exposition de l'opérateur est prolongée. Le risque vibratoire est probablement augmenté par le cofacteur que représente la force de poussée exercée par l'opérateur.



MACHINE	ANCIENNE	NOUVELLE
Énergie	Pneumatique	Électrique
Type	orbitale	orbitale excentrique
Diamètre [mm]	77	150
Excentricité [mm]	-	2,5
Puissance [W]	250	350
Poids [Kg]	1,2	1
Fréquence de rotation [Hz]	80	66
Système antivibratile	-	équilibre de balourd
Équipements	-	plateau amovible, protège-plateau amovible
Valeur déclarée [m.s ⁻²]	3,1	2,4
Facteur K*	1,5	1,5

↑TABLEAU 1
Caractéristiques techniques de l'ancienne et de la nouvelle ponceuse.

* Facteur multiplicatif permettant de comparer les valeurs d'émission entre différentes familles de machine.

Le processus de fabrication de la pièce ne peut pas être changé. La tâche de travail nécessite l'expertise d'un opérateur. Elle ne peut pas être automatisée. Les actions de prévention se concentrent alors en priorité sur la réduction des vibrations à la source. La ponceuse est remplacée par une ponceuse excentrique, plus puissante et moins lourde (Cf. Tableau 1). L'analyse du poste de travail, des échanges avec l'opérateur ainsi que des essais préliminaires permettent de s'assurer que cette nouvelle machine est adaptée à la tâche de travail. Elle est *a priori* moins vibrante car elle possède un équilibreur de balourd, un plateau et un protège-plateau amovible. La valeur d'émission déclarée par le fabricant est également inférieure à celle de l'ancienne machine. La mise en place d'une poignée antivibratile pour la réduction de la transmission des vibrations entre la machine et l'opérateur n'est pas possible, car sa main est placée directement sur le corps de la machine.

L'utilisation de gants antivibratiles pour diminuer l'exposition n'est pas recommandée en dessous de 200 Hz. Elle est de plus incompatible avec le port de gants anticoupures.

L'opérateur est invité à faire bon usage de son matériel en s'assurant de :

- choisir la vitesse de fonctionnement la plus faible possible, tout en respectant les préconisations du fabricant pour le travail de l'acier ;
- maintenir en bon état le plateau et le protège-plateau de la machine, pour ne pas introduire de valeur de balourd supplémentaire, les changer dès que nécessaire ;
- centrer l'abrasif sur le plateau ou le protège-plateau ;
- limiter ses efforts en adaptant son geste pour « laisser travailler » la machine autant que possible ;

- se protéger contre le froid qui favorise le déclenchement de crises du syndrome de Raynaud.

Évaluation de l'exposition

Réglementation

La réglementation française impose aux employeurs de respecter des prescriptions minimales de sécurité relatives à l'exposition des travailleurs aux vibrations [6, 7]. Elle définit pour cela une méthode d'évaluation de l'exposition, ainsi que des valeurs limites d'exposition. Il convient ainsi d'estimer la dose vibratoire journalière A(8), conformément aux préconisations de la norme Iso 5349-1 [8]. La valeur de A(8) doit ensuite être comparée aux valeurs réglementaires :

A(8) ≤ 2,5 m.s⁻² pour les valeurs limites déclenchant l'action de prévention (VLA) ;

A(8) ≤ 5 m.s⁻² pour les valeurs limites d'exposition (VLE).

Dose vibratoire journalière A(8)

La dose vibratoire journalière A(8) est calculée à partir de la valeur d'émission vibratoire de la machine (a_{nv}) ainsi que de la durée d'exposition des salariés (T) normalisée sur une période de référence T₀ de huit heures, selon la formule :

$$A(8) = a_{nv} \sqrt{\frac{T}{T_0}} \text{ [m.s}^{-2}\text{]}$$

L'émission vibratoire a_{nv} prend en compte les accélérations à l'interface homme-machine, ainsi que la réponse dynamique du corps selon la direction et les fréquences des vibrations. La durée d'exposition T correspond à la durée effective d'exposition aux vibrations, qui peut être différente de la durée d'utilisation de la machine.

La Figure 2 illustre la comparaison d'une valeur de A(8) aux valeurs réglementaires. La zone verte représente les valeurs de a_{nv} et de T pour lesquelles les valeurs de A(8) sont inférieures à la limite d'action. La zone orange représente celles supérieures à la limite d'action, mais inférieures à la limite d'exposition et la rouge celles supérieures à la limite d'exposition. La dose A(8) augmente plus vite avec l'émission a_{nv} de la machine qu'avec la durée d'exposition T du salarié.

Méthodes d'évaluation de l'exposition

→ Mesures normalisées au poste de travail

Le protocole de mesure de l'exposition aux vibrations consiste à fixer rigidement des accéléromètres sur la machine (Cf. Figure 3). Ils se placent au point d'entrée des vibrations dans le corps. Ils sont orientés selon les trois directions de l'espace (X: avant-arrière, Y: latéral, Z: vertical). Dans un dosimètre, ces trois capteurs sont le plus souvent intégrés dans un seul boîtier. Ils doivent être étalonnés régulièrement. Pour

que la mesure soit fiable, il convient de disposer d'un certificat de calibration.

De telles mesures ne sont pas simples à réaliser. Elles nécessitent l'intervention de personnel qualifié pour équiper les machines, utiliser le matériel de mesure et exploiter les résultats. L'achat du matériel, son étalonnage et sa maintenance sont des opérations coûteuses. L'organisation des essais doit enfin être effectuée en coordination avec les équipes de travail, pour s'adapter aux contraintes de production et perturber le moins possible l'activité de l'entreprise. De même, il est contraignant de répéter ce type d'essais pour suivre l'exposition d'un salarié sur une longue période. D'un point de vue pratique, on mesure souvent sur une période restreinte mais représentative de l'activité de l'opérateur. Elle peut être comprise entre quelques minutes et plusieurs heures selon la stationnarité de la tâche. La durée d'exposition effective aux vibrations T est alors estimée à partir des mesures et des descriptions par l'opérateur de ses différentes tâches.

→ Bases de données d'exposition

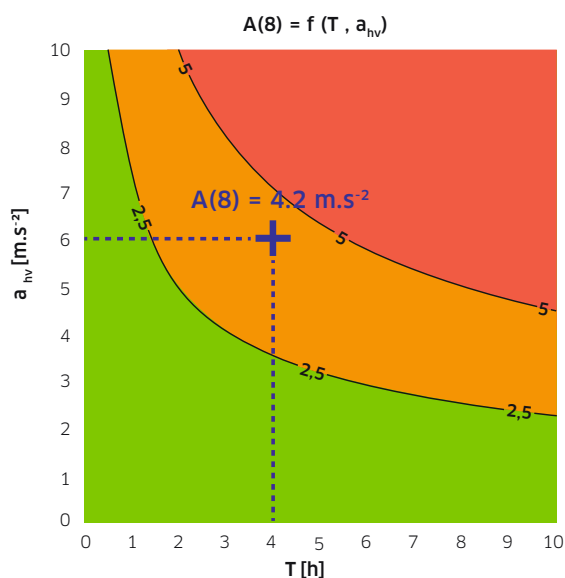
La meilleure alternative à la mesure consiste à utiliser les bases de données d'exposition créées par l'INRS avec l'aide des Centres de mesures physiques (CMP) des Carsat/Cramif ou d'autres instituts de prévention européens. Ces bases rassemblent les résultats de mesures effectuées conformément à la réglementation. Elles concernent toutes les familles de machines vibrantes les plus courantes, qu'il s'agisse de vibrations transmises aux membres supérieurs ou à l'ensemble du corps.

L'INRS a développé un Outil simplifié d'évaluation des expositions aux vibrations (Osev) (Cf. Figure 4) [9]. Il est accessible librement sur le site Internet de l'INRS. Pour réaliser une évaluation, il convient de sélectionner le type de la machine, les conditions d'utilisation (puissance, poids, entretien, formation de l'opérateur, etc.), ainsi que la durée d'utilisation. L'application calcule alors une estimation de l'exposition de l'opérateur basée sur une approche statistique de valeurs obtenues dans des conditions similaires. Les résultats sont comparés aux valeurs limites d'exposition par l'application. Ils sont accompagnés de préconisations pour réduire l'exposition.

L'avantage de cet outil est qu'il permet d'estimer rapidement l'exposition vibratoire journalière sans posséder de connaissances détaillées sur la méthode d'évaluation. Sa principale limite est qu'il repose sur des situations de travail courantes, qui peuvent ne pas refléter la spécificité de la machine ou de la tâche de travail étudiées.

→ Valeurs déclarées par les fabricants

Les fabricants ont pour obligation de fournir des informations sur l'émission vibratoire de leurs machines. Elles figurent dans la notice d'utilisation.



←FIGURE 2 Dose vibratoire journalière $A(8) = 4,2$ $m.s^{-2}$ d'une machine portable d'émission $a_{hv} = 6$ $m.s^{-2}$ utilisée pendant $T = 4$ h. La valeur limite d'action VLA = $2,5$ $m.s^{-2}$ est atteinte en $T_{VLA} = 1,4$ h. La valeur limite d'exposition VLE = 5 $m.s^{-2}$ le serait en $T_{VLE} = 5,6$ h.



←FIGURE 3 Fixation d'un dosimètre pour la mesure de l'exposition aux vibrations transmises aux membres supérieurs.

La page présente le logo de l'Assurance Maladie Risques Professionnels, OSEV mb et l'INRS. Le titre principal est "Outil Simplifié d'Évaluation des expositions aux Vibrations main-bras". Le texte explique que l'OSEV Main-Bras est une application pour estimer l'exposition vibratoire journalière. Il précise qu'il n'est pas nécessaire de réaliser des mesures ou d'avoir des connaissances détaillées. Un bouton "Démarrer l'évaluation" est visible.

↑FIGURE 4 Outil simplifié d'évaluation des expositions aux vibrations (OSEV) développé par l'INRS [9].

Ces valeurs déclarées sont dérivées de codes d'essais européens normalisés. Elles sont mesurées en laboratoire. Le protocole consiste à placer la machine sur un banc d'essai et à effectuer des mesures reproductibles dans une seule direction



TABLEAU 2 →
Évaluations de l'exposition journalière A(8) par la mesure, l'exploitation de bases de données, l'utilisation des valeurs déclarées par le fabricant. Comparaison avec les mesures du dosimètre intégré.
T = 2h.

Méthode	ANCIENNE MACHINE		NOUVELLE MACHINE	
	Émission	Exposition	Émission	Exposition
	a_{nv} [m.s ⁻²]	A(8) [m.s ⁻²]	a_{nv} [m.s ⁻²]	A(8) [m.s ⁻²]
Mesure normalisée	5,9	3	4,5	2,3
Osev	5,4	2,7	4,8	2,4
Valeurs déclarées	4,6	2,3	3,6	1,8
Dosimètre intégré	-	-	4,7	2,4

Un opérateur effectue des retouches avec une ponceuse.

de vibration. Les acheteurs peuvent ainsi comparer des machines d'une même famille. Les valeurs mesurées au poste de travail peuvent être très différentes des valeurs déclarées. L'exposition réelle est évidemment spécifique à chaque situation. Malgré cela, les valeurs d'émission peuvent être utilisées pour procéder à une estimation de l'exposition quotidienne. Il convient simplement de multiplier la valeur déclarée par un facteur K, qui dépend du type de machine. Lorsque

les valeurs déclarées sont inférieures à 2,5, il y a lieu d'utiliser 2,5. S'il n'y a pas de meilleure indication et qu'une gamme de facteur est donnée, on retient la plus forte valeur.

Actuellement, il est important de remarquer que les codes d'essais ont tendance à sous-estimer les émissions par rapport à une utilisation réelle. En cas de renouvellement du matériel, les spécifications des machines sont également sujettes à changement sans préavis des constructeurs. Par conséquent, cette méthode d'évaluation de l'exposition n'est à utiliser qu'en dernier recours.

Dosimètre intégré

Les machines équipées d'accéléromètres mesurent en temps réel la valeur d'émission et la durée d'utilisation. Elles proposent le calcul de l'exposition de leur utilisateur tout au long de l'activité de travail. Cette information est accessible en temps réel.

La principale limite est qu'il convient de s'assurer du bon fonctionnement de ces dispositifs avant toute utilisation au service de la prévention. Pour cela, il est possible de comparer les résultats fournis par la machine à ceux d'un dosimètre normalisé, pour lequel des étalonnages réguliers permettent de détecter un éventuel dysfonctionnement (panne, dérive de la sensibilité des capteurs, etc.).

À cette condition, les informations fournies par ces dosimètres embarqués peuvent s'avérer utiles à la démarche de prévention du risque vibratoire. Elles peuvent par exemple servir à sensibiliser et informer l'opérateur sur son exposition. Son temps de travail et les réglages de sa machine peuvent être adaptés pour diminuer la dose reçue. Son activité peut être adaptée à l'évolution de la dose, au fur et à mesure de la journée (autre tâche, rotation de poste, etc.).

Efficacité des mesures de prévention

→ Évaluations de l'exposition

Les résultats des différentes méthodes d'évaluations pour l'ancienne et la nouvelle machine sont présentés dans le *Tableau 2*. Ils sont comparés aux informations fournies par le dosimètre embarqué sur la machine de remplacement. La durée d'exposition T est de 2h.



© Fabrice Dimier pour l'INRS/2015

Chaque méthode donne des résultats différents. La plus précise est la mesure normalisée. Elle fait apparaître une diminution de l'exposition aux vibrations suite au changement de machine. Cette tendance se retrouve dans les prédictions réalisées grâce aux bases de données ou aux valeurs déclarées qui minimisent quant à elles clairement l'exposition.

Les valeurs mesurées par dosimètre intégré dans la ponceuse sont proches des mesures normalisées. Ce dosimètre intégré peut donc être utilisé pour suivre l'exposition de l'opérateur tout au long de son activité de travail.

→ Efficacité des mesures de prévention

L'utilisation de la nouvelle ponceuse permet d'atteindre une dose journalière inférieure à la valeur limite déclenchant l'action de prévention (VLA). Cette estimation correspond à une durée d'exposition moyenne de deux heures, susceptible d'être dépassée.

À la suite de cette intervention, l'opérateur a été sensibilisé au risque vibratoire. Son encadrement est invité à surveiller sa durée d'exposition et peut pour cela utiliser le dosimètre intégré à la nouvelle machine. En cas de dépassement, il revient à son employeur de limiter au maximum l'exposition. Le poste de travail peut par exemple être occupé par un autre opérateur.

Conclusion

La situation étudiée illustre l'importance de la mise en place d'une démarche complète de prévention du risque vibratoire. Les choix techniques et les actions qui entraînent la diminution la plus importante de l'exposition ont été entrepris sans avoir recours à une évaluation quantifiée.

Qu'il s'agisse de mesure normalisée, d'exploitation de bases de données d'exposition ou d'utilisation des valeurs déclarées, cet exemple révèle que la qualité de l'évaluation de l'exposition dépend avant tout de la pertinence des informations utilisées par le préventeur.

La dose vibratoire journalière reçue par le salarié dépend de l'émission vibratoire de la machine et de la durée d'exposition de l'opérateur. La précision apportée par la métrologie dans l'estimation quotidienne de ces deux grandeurs n'est pas de premier ordre. Celle-ci dépend en effet majoritairement de la variation journalière de production, ainsi que de la manière dont l'opérateur utilise sa machine. Pour ces raisons, les actions de prévention du risque vibratoire doivent avant tout viser à choisir la machine la plus adaptée à la tâche de travail, en orientant ce choix en faveur de la machine la moins vibrante. Lorsque cela est possible, ces recommandations doivent être prises en compte dès la phase de conception du poste de travail.

S'ils ne remplacent pas l'expertise du préventeur et sous réserve de s'assurer qu'ils fournissent des informations correctes, les dosimètres intégrés aux machines vibrantes peuvent être utilisés dans la phase d'évaluation du risque. Ils peuvent également s'avérer utiles pour la diffusion de messages de prévention dans l'entreprise, ainsi que pour le contrôle de l'efficacité dans le temps de mesures mises en place par l'employeur. ●

1. *Mouvements périodiques autour d'une position d'équilibre ou d'une trajectoire moyenne.*
2. *Variation de la vitesse en fonction du temps, qui s'exprime en m.s⁻².*
3. *Affection parfois nommée « syndrome des doigts blancs ».*
4. *Les fabricants ont pour obligation de fournir des informations sur l'émission vibratoire de leurs machines. Elles s'expriment en m.s⁻² et figurent dans la notice d'utilisation.*

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **PAGE WEB INRS** - Tableaux des maladies professionnelles du régime général (RG) et du régime agricole de la Sécurité sociale en France - Tableau n° 69 du RG. INRS. Accessible sur : www.inrs.fr/publications/bdd/mp/tableau.html?refINRS=RG%2069.
- [2] **CAISSE NATIONALE DE L'ASSURANCE MALADIE (CNAM)** - Risque MP 2010: sinistralité détaillée par CTN, numéro de risque, numéro de tableau MP et syndrome, 2013.
- [3] **PRÉSENTATION GOOGLE PLAY**. Accessible sur : <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.mirka.MyMirka&hl=fr>.
- [4] **DOSSIER WEB INRS** - Vibrations transmises aux membres supérieurs. Accessible sur : www.inrs.fr/risques/vibration-membres-superieurs/ce-qu-il-faut-retenir.html.
- [5] **PAGE WEB INRS** (lien PDF direct) - Ponceuses. Accessible sur : www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/Focus-Ponceuses/Focus-Ponceuses.pdf.
- [6] **DIRECTIVE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL** du 25 juin 2002 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (vibrations). Accessible sur : www.legifrance.gouv.fr/.
- [7] **DÉCRET N° 2005-746 DU 4 JUILLET 2005** relatif aux prescriptions de sécurité et de santé applicables en cas d'exposition des travailleurs aux risques dus aux vibrations mécaniques et modifiant le Code du travail (deuxième partie; Décrets en Conseil d'État). Accessible sur : www.legifrance.gouv.fr/.
- [8] **Norme NF EN ISO 5349-1** - Vibrations mécaniques - Mesurage et évaluation de l'exposition des individus aux vibrations transmises par la main. Partie 1: Exigences générales. Afnor, avril 2002. Accessible sur : www.boutique.afnor.org/norme/ (site payant).
- [9] **OUTIL WEB INRS N° 59 - OSEV** (outil simplifié d'évaluation de l'exposition aux vibrations) mains-bras. Accessible sur : www.inrs.fr/media.html?refINRS=outil59.

LA MESURE EN BIOMÉTROLOGIE: ÉVALUER LES POLYEXPOSITIONS ET LEURS EFFETS SUR LA SANTÉ, UN NOUVEAU DÉFI

L'INRS utilise la biométrie, ou surveillance biologique pour évaluer le risque chimique en milieux professionnels. Cette discipline scientifique cherche à objectiver l'imprégnation de salariés ayant été exposés à des substances chimiques, au moyen de mesures de concentration de substances ciblées, ou de leurs métabolites, dans des matrices biologiques (urine, sang, condensat de l'air exhalé) recueillies lors d'interventions en entreprise. L'objectif est d'évaluer avec précision les risques professionnels et d'anticiper les effets délétères pour la santé des salariés.

ALAIN
ROBERT,
PIERRE
CAMPO
INRS,
département
Toxicologie et
biométrie

La biométrie

La biométrie permet d'évaluer l'imprégnation (dose interne) des salariés à une substance chimique, alors qu'ils réalisent une tâche dans leur milieu professionnel. Sa spécificité est qu'elle mesure l'exposition globale (réelle) des travailleurs en prenant en compte l'ensemble des sources d'exposition, qu'elles soient professionnelles ou environnementales¹, et de toutes les voies d'intoxication, par inhalation, par voie digestive (les allers et retours main-bouche sont considérables au cours d'une journée) ou même par voie percutanée. Enfin, la biométrie, permet aussi de prendre en compte la charge de travail, le stress thermique, le port de protections individuelles (EPI), les particularités physiologiques ou pathologiques du salarié, ainsi que ses habitudes (tabagisme, onychophagie...) ou les facteurs influençant les niveaux de dose interne (imprégnation, absorption par voie digestive, etc.) [1].

Les collectes d'échantillons nécessaires à la conduite des études de l'INRS ne se font qu'en entreprise avec la participation de salariés volontaires, en poste. L'objectif est de réaliser les recueils d'échantillons biologiques dans des conditions auxquelles les salariés sont habituellement confrontés, un atout indéniable pour ne pas sous-estimer une imprégnation (dose interne), dont on sait qu'elle varie en fonction de plusieurs paramètres liés aux conditions de travail. Par exemple, un salarié en poste peut être soumis à une charge de travail (physique et mentale) qui influence certains paramètres, comme la fréquence respiratoire et la fréquence cardiaque, deux données déterminantes dans l'absorption des substances

dispersées dans l'air. Aujourd'hui, il est clairement admis qu'une charge physique de travail élevée peut augmenter l'absorption – et donc la dose interne – d'une substance ou, en d'autres termes, la quantité de cette substance (métabolisée ou non) présente dans l'organisme des salariés, au moment du recueil. Cette dose interne, qui est la somme de la quantité de substance elle-même et de ses métabolites dans tous les compartiments de l'organisme, n'est pas directement mesurable. Avant de mettre en place une biométrie des expositions, il faut connaître la toxicocinétique de la substance, définie par les caractéristiques de son absorption, sa distribution, sa métabolisation et son élimination, mais également sa toxicodynamique, qui définit son mécanisme d'action toxique. Ces prérequis sont indispensables pour sélectionner les biomarqueurs d'exposition ou Indicateurs biologiques d'exposition (IBE) les plus pertinents pour évaluer au mieux le degré du travailleur. De plus, la distribution des toxiques dans l'organisme va dépendre de leur lipophilie/hydrophilie, mais également de la compétition entre plusieurs toxiques (solvant ou alcool, par exemple). Enfin, la cinétique d'élimination des substances ou de leurs métabolites dépend de l'ensemble des paramètres physiologiques qui viennent d'être décrits. On comprendra alors que la variabilité des caractéristiques physiologiques, anatomiques et métaboliques (spécifiques à chaque individu) puisse expliquer les raisons pour lesquelles plusieurs travailleurs exposés à une même concentration de contaminant peuvent présenter des différences de concentrations des IBE mesurés (variabilité inter- et intra-individuelle).

Les polyexpositions

Dans la grande majorité des cas, les expositions professionnelles se déclinent en polyexpositions aux produits chimiques, parfois même en expositions multifactorielles (bruit, produits chimiques, charge physique, horaires atypiques). Les polyexpositions aux produits chimiques concernent tous les secteurs professionnels et sont un sujet de préoccupation en santé au travail, les effets sanitaires associés restant largement inexplorés (additivité, synergie ou inhibition?) [2]. Les mesures de prévention prises pour diminuer les risques dans un secteur donné sont, la plupart du temps, établies pour diminuer les risques associés à une exposition à un produit chimique, ou éventuellement, une liste de substances préalablement établie (analyse ciblée). Par exemple, dans le secteur de recyclage des déchets, les travailleurs sont susceptibles d'être exposés à un mélange de substances chimiques dont la composition n'est pas connue *a priori* (phtalates, bisphénols, retardateurs de flamme, polychlorobiphényles, métaux, ...). Il est donc essentiel de caractériser de façon exhaustive les polyexpositions aux produits chimiques, pour mieux évaluer leurs effets sanitaires induits. L'approche biométriologique en santé au travail consiste à réaliser des dosages de biomarqueurs d'exposition et d'effets précoces dans les fluides biologiques.

Les indicateurs d'effets précoces

Les indicateurs d'effets précoces, associés à une exposition à des xénobiotiques, sont des molécules ou des indicateurs de dysfonctionnement endogènes dont la présence réversible ne constitue pas un risque pérenne pour la santé des salariés. En effet, ces indicateurs sont des signes avant-coureurs d'une pathologie que l'on peut éviter, à condition de réduire le niveau de l'imprégnation auquel le salarié est soumis. Leur analyse dans les fluides biologiques est délicate, en raison de concentrations qui sont parfois voisines d'états de trace.

Aujourd'hui, ces indicateurs d'effets précoces peuvent être décelés dans des matrices biologiques, comme l'urine et le condensat d'air exhalé. Deux études en cours, dans les secteurs de la projection thermique et du recyclage des piles/batteries/accumulateurs, ainsi que les projets OxiGenoCOM et HBM4EU entrent dans le cadre de recherches à l'INRS², dans lesquelles des marqueurs de toxicité rénale, d'inflammation pulmonaire et du stress oxydant ont fait l'objet de mesures de biométriologie dans des échantillons urinaires, sanguins et de condensats d'air exhalé³ [3].

Les évolutions vers le métabolome et l'approche métabolomique

Apparu à la fin des années 1990 en analogie aux notions de génome (ensemble des gènes d'un organisme), de transcriptome (ensemble des ARN messagers contenus dans un milieu biologique) et de

protéome (ensemble des protéines contenues dans un milieu biologique), le métabolome fait référence à l'ensemble des métabolites contenus dans un système biologique donné: organismes, cellules, tissus ou fluides biologiques tels que l'urine et le plasma [4]. Le métabolome, appelé « endo-métabolome » se réfère essentiellement aux métabolites endogènes, alors que le « xéno-métabolome » concerne les métabolites exogènes, incluant les xénobiotiques tels que la plupart des toxiques industriels. Le métabolome représente donc un ensemble de métabolites possédant des propriétés physico-chimiques très variées, un poids moléculaire généralement compris entre 50 et 1500 Da et couvrant une large gamme de concentration.



© Serge Morillon/INRS/2019

La métabolomique, la science omique qui étudie le métabolome, permet de comprendre l'évolution d'un organisme dont l'Homme en fonction de son environnement, d'accélérer la mise en évidence de biomarqueurs d'exposition et/ou d'effets, ainsi que leurs interrelations métaboliques. Les travaux de recherche utilisant l'approche métabolomique sont de plus en plus nombreux, aussi bien en population générale qu'en population professionnelle. Pour illustrer cette tendance, rappelons que Baker *et al.* ont montré l'intérêt de l'utilisation d'une approche métabolomique non ciblée, pour relier les expositions professionnelles au manganèse à leurs effets neurotoxiques [5]. Similairement à l'étude de Baker, des équipes ont caractérisé des perturbations métaboliques liées à des expositions professionnelles,

Biométriologie des mycotoxines: utilisation de la spectrométrie de masse à haute résolution.



comme par exemple chez des travailleurs exposés au benzo[a]pyrène et au trichloroéthylène [6,7], au 2,3,7,8-tétrachloro-dibenzo-p-dioxine (TCDD) [8], suite à une intoxication sévère à la dioxine [9], ou exposés aux composés per- et polyfluoroalkylés (PFAS) et à l'acrylamide [10-12].

Il existe deux grandes approches pour les études métabolomiques, à savoir les stratégies ciblées et non ciblées. La première stratégie consiste à détecter et à quantifier un nombre limité de substances chimiques prédéterminées, nécessitant la disponibilité et l'utilisation de standards de référence. La deuxième, l'approche non ciblée, vise à obtenir un profil métabolique aussi exhaustif que possible. Dans ce type d'approche, l'identification des substances est obtenue en interrogeant des bases de données. L'analyse métabolomique non ciblée comprend plusieurs grandes étapes spécifiques :

- la collecte et la préparation des échantillons ;
- l'acquisition des spectres de masse ;
- le prétraitement des données ;
- l'exploitation statistique des données obtenues ;
- l'identification des signaux d'intérêt biologique à l'aide de bases de données publiques et privées ;
- la validation ou normalisation pour éviter tous les biais analytiques et obtenir des résultats robustes qui peuvent être échangés avec d'autres laboratoires.

L'obtention de profils ou empreintes métaboliques (chromatogrammes haute résolution) est conditionnée par la bonne réalisation de ces différentes étapes.

Haute résolution et évolution vers le non-ciblé

L'approche non ciblée consiste à obtenir une empreinte spectrale globale de l'échantillon aussi exhaustive que possible, permettant de visualiser toutes les molécules détectables par l'analyseur, quelles que soient leurs structures ou leurs natures. Cette empreinte spectrale est l'équivalent d'un instantané de plusieurs milliers de molécules de l'échantillon même si, dans un premier temps, nous ne disposons d'aucune information quant à leur identité ; l'avantage est que l'on peut mener des investigations sur des molécules non ciblées *a posteriori*, en réexaminant ces données, dans une démarche épidémiologique pour en étudier les effets sanitaires qui pourraient émerger avec le temps, en fonction des progrès des connaissances concernant des pathologies liées aux polyexpositions.

Dans le cadre de la biométrie en milieu professionnel, il sera donc possible de rechercher dans un échantillon biologique recueilli en entreprise, toutes les substances auxquelles les salariés auraient pu être exposés à leur poste de travail, pendant la semaine de prélèvements.

Ainsi, cette empreinte spectrale globale nous permettra de répondre à des questions du type : quels

sont les mélanges de substances auxquels les salariés sont exposés sur leur poste de travail ? la molécule X d'intérêt en 2020 était-elle déjà présente dans ces échantillons en 2018 ? Le cas échéant, existait-il des différences entre les différents échantillons analysés ?

Les informations recueillies permettront de mener des analyses statistiques comparatives : quelles molécules sont discriminantes d'une exposition professionnelle (comparaison exposés/témoins) ? Ces molécules apparaissent-elles au cours de la journée de travail et sont-elles en quantités significativement plus importantes en fin de poste ou en fin de semaine (comparaison début de poste/fin de poste) ? Si certaines molécules présentent un intérêt particulier (forte abondance, évolution au cours du temps en relation avec un biomarqueur d'exposition), une recherche peut être envisagée pour identifier ces molécules. Pour cela, la masse exacte obtenue lors de l'analyse non ciblée sera utilisée pour définir une formule brute et une proposition de structure. Les conditions de travail ont évolué et la mise en place de mesures de prévention, de protections collectives et individuelles dans les entreprises diminuent fortement les expositions professionnelles dans certains secteurs d'activité, nécessitant des outils de mesure de plus en plus sensibles et spécifiques ; la sensibilité pour pouvoir détecter réellement tous les travailleurs professionnellement exposés, en limitant les faux négatifs, la spécificité pour ne détecter que les personnes réellement exposées, en limitant les faux positifs. Cette notion de spécificité est d'autant plus importante, que la mesure en biométrie est réalisée sur des échantillons biologiques complexes, comme l'urine et le sang. Sur de tels échantillons, les interférences potentielles avec la molécule d'intérêt sont plus importantes ; les « faux positifs » pourront donc être plus fréquents.

La spectrométrie de masse en tandem (MS/MS) est aujourd'hui la technique la plus utilisée, compte tenu de sa sensibilité et spécificité, pour quantifier des composés dans les milieux biologiques. Cette technique est utilisée à l'INRS depuis le début des années 2000 en biométrie pour la détection de toxiques industriels et/ou de leurs métabolites, sans oublier la détection des biomarqueurs d'effets précoces. La MS/MS est cependant restreinte à la quantification d'une liste préétablie de substances, de préférence chimiquement proches. Elle ne permet donc pas d'identifier un composé inconnu dans une matrice biologique complexe, en raison d'une résolution trop basse et d'une mesure de masse pas suffisamment précise. Elle est par conséquent peu adaptée pour identifier et quantifier tous les biomarqueurs dans le contexte d'une polyexposition.

Les récentes avancées techniques en chimie analytique, comme le couplage entre la chromatogra-

phie liquide ultra-haute performance (UHPLC) et la spectrométrie de masse à haute résolution (HRMS) permettent aujourd'hui d'envisager de faire systématiquement des analyses non ciblées sur les échantillons biologiques recueillis en entreprise, avec suffisamment de sensibilité et spécificité, pour identifier le maximum de composés auxquels les salariés sont exposés (xéno-métabolome) puis de les quantifier en fonction des standards analytiques disponibles. Cette approche permet également d'identifier simultanément des métabolites endogènes, comme des biomarqueurs d'effets précoces associés à ces polyexpositions.

En sachant que les empreintes spectrales globales contiennent *a priori* toutes les informations concernant les polyexpositions des salariés et leurs effets associés au moment de la campagne de prélèvements, la nécessité de les conserver sous forme de base de données interne est encore plus prégnante que pour des analyses classiques, car les informations qu'elles contiennent peuvent être réinterrogées à tout moment, pour vérifier la présence d'autres toxiques, identifier de nouveaux biomarqueurs d'effets et entreprendre d'autres études. Cette base de données spectrales s'incrémentera au fil du temps et aura pour vocation d'être pérenne. Elle constituera un outil essentiel pour interroger les empreintes globales acquises sur nos plateformes analytiques, provenant de salariés suivis dans le cadre d'études futures.

Conclusion

L'approche « métabolomique » appliquée aux expositions professionnelles sera investiguée par l'INRS dans les années futures. Elle constitue une acquisition de compétences nouvelles, essentielles pour une évaluation globale du risque. La richesse de l'information contenue dans une empreinte chimique obtenue avec la HRMS apportera un regard nouveau sur l'évaluation des polyexpositions professionnelles et leurs effets sur la santé des salariés. Le champ d'applications en santé au travail est vaste. L'approche métabolomique permettra d'apporter des réponses aux différentes demandes d'évaluation en biométrie auxquelles nous ne pouvons pas répondre efficacement actuellement : le traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques, le traitement des sols pollués. Les polyexpositions et leurs effets sur la santé pourront également être étudiés dans d'autres secteurs industriels, comme le stockage de céréales (mycotoxines et phytosanitaires) ou le recyclage des piles/batteries/accumulateurs (métaux et composés organiques). ●

1. En biométrie, on doit évaluer, en particulier pour les substances ubiquitaires, les niveaux d'exposition environnementale (provenant généralement de l'alimentation). En entreprise, on suit en particulier

une population intermédiaire à la population générale : celle des salariés non professionnellement exposés, issus du secteur administratif par exemple.

2. Voir par exemple : Participez à la recherche – Projet HBM4EU. Hygiène et sécurité du travail, juin 2020, 259, p. 101.

3. La plupart de ces études se terminent fin 2021 et quelques marqueurs, parmi ceux étudiés, devraient ressortir du lot. Dans le projet européen HBM4EU et le futur projet PARC, les indicateurs d'effets précoces sont des sujets qui intéressent de près les chercheurs et les spécialistes de la prévention.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE MÉDECINE DU TRAVAIL – Recommandation de bonnes pratiques, surveillance biologique des expositions professionnelles aux agents chimiques. SFMT, 2015.
- [2] CLERC F., BERTRAND N., LA ROCCA B. – Taking multiple exposure into account can improve assessment of chemical risks. *Annals of Work Exposures and Health*, 2018, 62 (1), pp. 53-61.
- [3] HOPF N.B., BOURGKARD E., DEMANGE V., HULO S. ET AL. – Early effect markers and exposure determinants of metalworking fluids among metal industry workers: protocol for a field study. *JMIR Res Protoc*, 2019, 8(8).
- [4] DETTMER K., HAMMOCK B.D. – Metabolomics: a new exciting field within the "omics" sciences. *Environ Health Perspect*, 2004, 112 (7), pp. 396-397.
- [5] BAKER M.G., SIMPSON C.D., LIN Y.S. ET AL. – The use of metabolomics to identify biological signatures of manganese exposure. *Ann. Work Expo. Health*, 2017, 61(4), p. 406.
- [6] WALKER D.I., PENNELL K.D., UPPAL K. ET AL. – Pilot metabolomewide association study of benzo(a)pyrene in serum from military personnel. *J Occup Environ Med*, 2016a, 58, pp. 44-52.
- [7] WALKER D.I., UPPAL K., ZHANG L. ET AL. – High-resolution metabolomics of occupational exposure to trichloroethylene. *Int J Epidemiol*, 2016b, 45, pp. 1517-1527.
- [8] SABERI-HOSNIJEH F., PECHLIVANIS A., KEUN H. ET AL. – Serum metabolomic perturbations among workers exposed to 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin (TCDD). *Environ Mol Mutagen*, 2013, 54, pp. 558-565.
- [9] JEANNERET F., BOCCARD J., BADOUD F. ET AL. – Human urinary biomarkers of dioxin exposure: analysis by metabolomics and biologically driven data dimensionality reduction. *Toxicology Letters*, 2014, 230, pp 234-243.
- [10] LU Y., KE G., LI X. ET AL. – Exposure to per- and polyfluoroalkyl substances relates to oxidative stress, fatty acid β -oxidation disorder, and kidney injury in a manufactory in China. *Environ. Sci. Technol*, 2019, 53, pp. 9800-9809.
- [11] YAO X., CAO D., WANG F. ET AL. – An overview of omics approaches to characterize the effect of perfluoroalkyl substances in environmental health. *Trends in Analytical Chemistry*, 2019, 121, p. 115367.
- [12] WANG S.Y., YU C.P., PAN Y.L. ET AL. – Metabolomics analysis of serum from subjects after occupational exposure to acrylamide using UPLC-MS. *Molecular and Cellular Endocrinology*, 2017, 444, pp. 67-75.

ANALYSE SPATIO-TEMPORELLE DES EXPOSITIONS PROFESSIONNELLES AUX AGENTS CHIMIQUES ET BIOLOGIQUES

L'objectif de cet article est de présenter quelques exemples concrets de méthodes non « classiques » de mesure d'exposition ou d'estimation des risques liés à la présence de polluants dans l'air des lieux de travail et leur apport en prévention. Ces méthodes de mesure non conventionnelles ne se substituent pas aux méthodes réglementaires, mais s'avèrent intéressantes pour apporter des informations utiles à la prévention.

BRUNO
GALLAND,
PATRICIA
DIRRENBARGER,
KARINE
GÉRARDIN,
RONAN
LEVILLY,
PATRICK
MARTIN,
PHILIPPE
DUQUENNE,
INRS,
département
Ingénierie
des procédés

Éléments de contexte

Tout employeur est tenu d'assurer la sécurité et la protection de la santé de ses travailleurs. Pour y parvenir, il lui est nécessaire d'identifier les risques professionnels et de les gérer en conséquence. Dans le cas des risques chimiques et biologiques, cette identification n'est pas toujours aisée et une analyse approfondie peut s'avérer nécessaire, afin de compléter les connaissances sur certaines situations de travail. Dans ce contexte, l'analyse spatiotemporelle des expositions professionnelles apporte de nombreuses possibilités. En règle générale, lorsqu'il s'intéresse aux expositions professionnelles, l'employeur associe souvent les notions de mesures en entreprise et de contrôle réglementaire. Le contrôle des niveaux d'exposition représente en effet l'un des moyens à disposition de la prévention. Il s'agit notamment de mettre en œuvre des méthodes de mesure des expositions individuelles qui visent à vérifier la conformité des niveaux d'exposition des salariés vis-à-vis des valeurs réglementaires. Ces méthodes de mesure en différé aboutissent à des valeurs moyennes sur huit heures qui sont comparées aux valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP), mais sans prise en compte de la variabilité dans le temps. Néanmoins, des prélèvements de courte durée permettent également une comparaison à la valeur limite court terme (VLCT) sur 15 minutes en prenant soin d'identifier les plages horaires pertinentes pour les réaliser. D'autre part, les mesures correspondantes doivent s'appuyer sur

une stratégie de prélèvement exhaustive pour être pleinement exploitables. C'est de fait bien en amont de la réalisation de la mesure qu'il est important de collecter le maximum d'informations, pour améliorer la compréhension des situations de travail et des expositions associées.

Dans cette optique, la mise en œuvre de méthodes de mesure plus prospectives, adaptatives et non nécessairement réglementaires, s'avère intéressante. Comme toute méthode, ces méthodes non conventionnelles possèdent quelques limites mais elles emploient des outils pertinents pour apporter des informations utiles à la prévention. L'ensemble des méthodes de mesures est assez large et peut, par exemple, être utilisé dans les situations suivantes.

Analyse du poste de travail comportant éventuellement des mesures

Il s'agit notamment de collecter des informations sur les situations de travail qui permettront :

- de se prononcer sur les conditions d'exposition aux dangers;
- d'apporter des éléments nécessaires pour définir/affiner les moyens de prévention ciblés et adaptés et les valider.

Parmi les méthodes plus prospectives, adaptatives et non nécessairement réglementaires, on peut citer :

- des méthodes permettant d'objectiver et de mesurer des expositions individuelles par le biais d'instruments de mesure en temps réel et qui peuvent être associées à des méthodes de mesure en différé;

- des méthodes visant à réaliser une cartographie spatiotemporelle des concentrations en polluants (instruments de mesure en temps réel, réseau de capteurs etc.). Elles peuvent aider à définir ou affiner les stratégies de prélèvement individuel;
- des études de poste associant de la mesure avec un suivi de la tâche plus ou moins automatisé (vidéo, information sur les procédés, relevés sur tablette, codage des gestes, outil Captiv¹, etc.);
- des méthodes de trajectographie (outil Dactari²).

Modélisation ou application des modèles de calculs probabilistes³

L'ensemble des méthodes évoquées sont complémentaires. Elles peuvent apporter un supplément d'information sur les situations de travail, aider à comprendre la chronologie des événements dans le temps et dans l'espace. Elles disposent d'une certaine flexibilité, ce qui permet de les adapter à des situations ou conditions particulières, de les sélectionner dans les stratégies de mesures et de les déployer en fonction de la situation. L'objectif de l'article est de présenter quelques exemples concrets des méthodes en question et de leur apport en prévention des risques professionnels.

Objectiver les expositions individuelles

Afin d'évaluer l'exposition d'un opérateur à des polluants identifiés dans l'air des lieux de travail, la méthode la plus couramment utilisée consiste à prélever l'atmosphère à l'aide d'un support adapté, puis à analyser cet échantillon en laboratoire de façon différée. Ce prélèvement peut être réalisé à l'aide d'une pompe d'échantillonnage (en mode actif) ou simplement par diffusion de l'air sur le support (en mode passif). Les résultats obtenus peuvent être comparés à des VLEP, lorsqu'elles existent.

Bien que les méthodes de mesure individuelles en différé permettent de mettre en évidence les expositions, elles n'offrent pas la possibilité directe d'identifier les éléments à l'origine de ces expositions (lieux fréquentés, tâches réalisées, gestes pratiqués, etc.), et leur contribution respective.

Les mesures en temps réel conduisent à des résultats souvent corrélés à ceux donnés par les mesures en différé; elles présentent l'avantage d'apporter une information complémentaire sur la variation des teneurs en polluant dans le temps et dans l'espace.

Les deux méthodes peuvent être utilisées simultanément, comme le montre l'équipement d'un travailleur sur la *Figure 1*.

En suivant l'opérateur ainsi équipé et en notant les zones de travail qu'il traverse (soit de façon manuscrite, soit de façon automatisée sur une tablette dans laquelle les lieux sont précodés), il est alors possible d'identifier les zones à risque que ce dernier fréquente au cours de son poste. Ces informations



↑ **FIGURE 1** Travailleur équipé de dispositifs de prélèvement pour analyse en différé (en haut à droite) et d'instruments de mesure en temps réel (dont un détecteur passif à photo-ionisation (PID) pour la mesure des composés organiques volatils (en haut à droite) et un détecteur multigaz (en bas à gauche) comportant un capteur électrochimique d'ammoniac).
 1. Détecteur multigaz (ammoniac) 2 et 3. Dispositifs de mesure en différé pour les polluants particulaires et gazeux 4. Détecteur PID (COV)

sont en effet synchronisées avec le(s) profil(s) de concentrations mesurées en temps réel et exprimées en parties par million volumique (ppm_v).

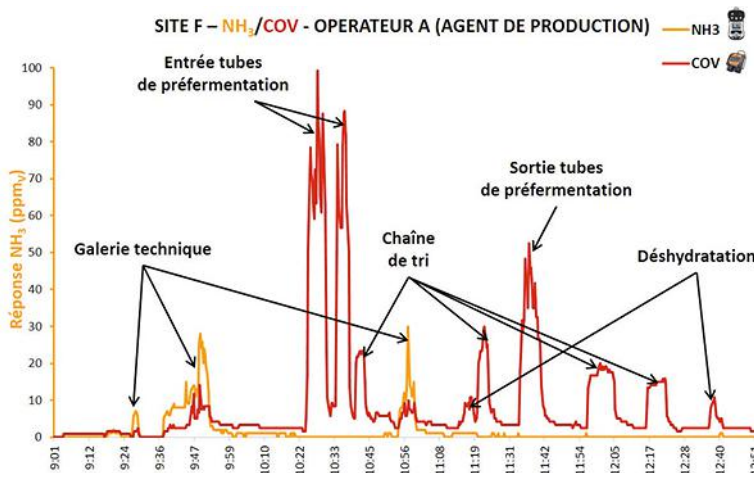
La *Figure 2* illustre le suivi d'un agent de production dans une unité de méthanisation. Pour l'opérateur suivi, les concentrations en gaz ammoniac (NH₃) et en composés organiques volatils (COV) ont été enregistrées en temps réel sur la durée du poste. Ce suivi a permis d'identifier les zones polluées par ces composés et qui sont traversées par l'opérateur durant son poste. Lors de l'utilisation des dispositifs de détection en temps réel, il est important de bien connaître les appareils utilisés et leurs performances métrologiques, notamment les produits non ciblés susceptibles de faire réagir la cellule considérée. Dans l'exemple cité dans la *Figure 2*, il s'avère que le capteur PID utilisé pour la détection des COV est également sensible à l'ammoniac. Afin de différencier quel composé gazeux, entre l'ammoniac et les vapeurs organiques, fait réagir le capteur PID, il est nécessaire de placer en parallèle sur la figure le profil de concentrations mesuré par une cellule électrochimique de mesure de l'ammoniac. Les détecteurs NH₃ et le capteur PID permettent d'obtenir des profils de concentration similaires lors des phases de travail dans des atmosphères avec présence d'ammoniac. En dehors de ces zones, le détecteur PID révèle la présence de COV. En plus de la mise en évidence de l'exposition de l'opérateur,



l'association de ces deux détecteurs, dont les enregistreurs ont été synchronisés, permet d'identifier des zones à pollution spécifique: en particulier, sur cette unité de méthanisation, la présence majoritaire de COV au niveau des tubes de préfermentation et de la chaîne de tri ainsi que la présence de NH₃ dans la galerie technique.

Identifier les tâches exposantes: association de la détection en temps réel à des outils d'étude de postes

L'exposition individuelle étant objectivée, il est souvent nécessaire de réaliser une étude plus fine du poste de travail, afin de proposer des évolutions visant à diminuer ou à supprimer l'exposition des opérateurs. Il est alors possible d'associer des



↑ FIGURE 2 Évolution de l'exposition d'un agent de production dans une unité de méthanisation. Suivi en temps réel de la concentration exprimée en ppm_v en COV et en ammoniac dans l'atmosphère.



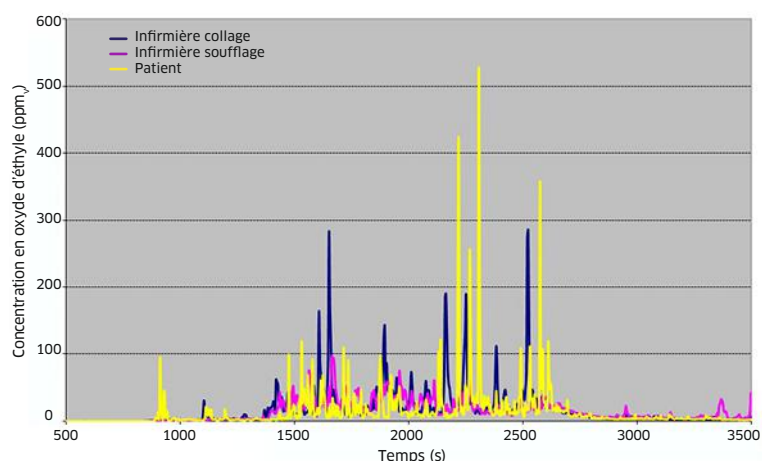
↑ FIGURE 3 Collage d'une électrode sur un patient fictif.

Chaque infirmière est équipée d'un détecteur à lecture directe de type PID visible au-dessus de la tête du mannequin (appareil gris) et d'un tube de charbon actif (visible sur l'épaule gauche de l'infirmière de face), couplé à une pompe de prélèvement individuel, pour une analyse en différé de la concentration en oxyde d'éthyle.

détecteurs ou analyseurs temps réel à des techniques telles que la vidéo, le codage d'événements, etc. Le système Captiv (Centrale d'acquisition de la pollution informé par vidéo, développé par l'INRS) est un exemple d'outil informatique dédié à cette finalité: sa fonction principale est de synchroniser les données d'exposition issues d'un ou plusieurs détecteurs à la vidéo du poste de travail. Ce dispositif a été déployé dans deux hôpitaux lors d'une campagne de mesure de l'exposition à des vapeurs d'oxyde d'éthyle lors de la pose par collage d'électrodes pour l'enregistrement d'électro-encéphalogrammes (EEG) chez des patients. L'opération, mise en œuvre par deux infirmières, consiste à placer des dizaines d'électrodes à l'aide d'une colle contenant l'oxyde d'éthyle sur le crâne du patient. Une soufflette est ensuite utilisée pour évaporer rapidement le solvant, afin d'obtenir un séchage rapide et un collage quasi instantané (Cf. Figure 3). Pour le suivi en temps réel des pics d'exposition lors



© Serge Morillon/INRS/2014



↑FIGURE 4 Profils d'exposition à l'oxyde d'éthyle des deux infirmières et du patient fictif lors d'une séance simulée de pose d'électrodes.

Ces courbes mettent en évidence une exposition par inhalation des infirmières aux vapeurs d'oxyde d'éthyle. L'exposition du patient est aussi démontrée, même si cela n'était pas le sujet de l'étude. Cette constatation a été un argument supplémentaire pour convaincre de la nécessité de substituer la colle à base de solvant par une colle aqueuse lorsque cela était techniquement possible, notamment pour les examens de courte durée.



© INRS

↑FIGURE 5 Copie d'écran du système Captiv.

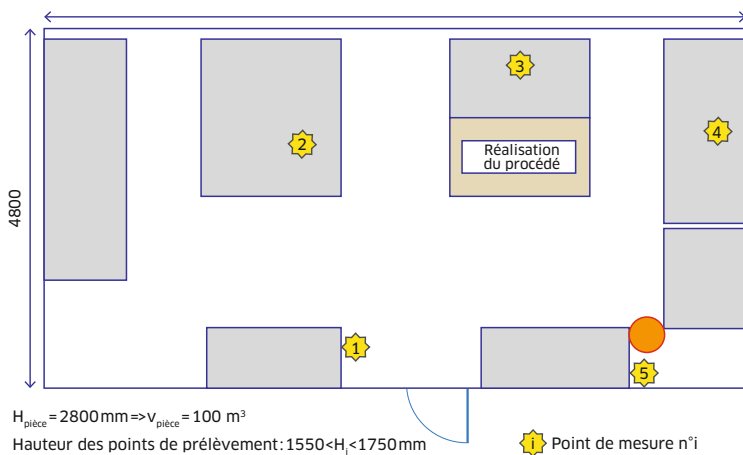
Elle montre, de manière synchronisée, les expositions à l'oxyde d'éthyle des deux infirmières (graphe du milieu pour l'infirmière en charge du soufflage et graphe du bas pour l'infirmière en charge du collage) ainsi que du patient (graphe du haut) et la vidéo de la phase de travail correspondante.

de la phase de travail, les deux opératrices ont été équipées d'un détecteur à photo-ionisation passif de faible encombrement, préalablement étalonné en laboratoire. En supplément, le patient, simulé par un mannequin, a également été équipé d'un PID. Les profils d'exposition sont représentés sur la Figure 4. Il apparaît que l'exposition de l'infirmière qui maintient l'électrode lors de la phase de collage est plus importante (tracé en bleu) que celle de sa collègue qui manipule la soufflette (tracé en rose). Les mesures indiquent également que le patient est potentiellement exposé (tracé en jaune - l'exposition des patients était hors du cadre de l'étude). Une copie d'écran du système Captiv (Cf. Figure 5) met en évidence que les pics sont bien imputables à l'évaporation rapide de l'oxyde d'éthyle lors de chaque usage de la soufflette.

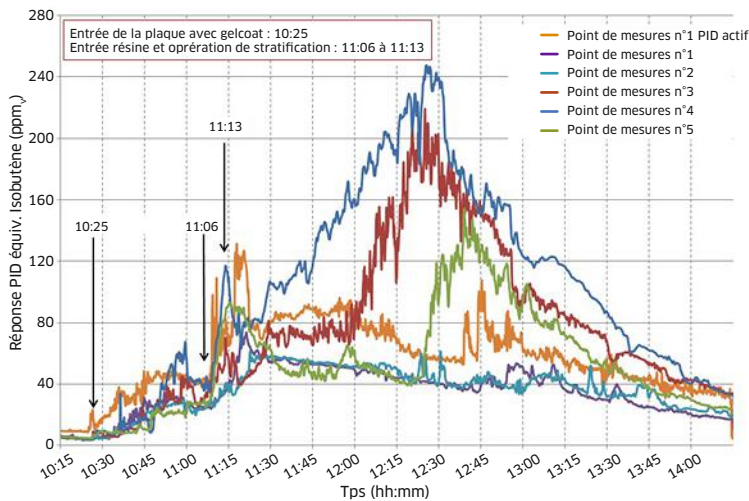
Le recours à ce type d'outils permet de présenter facilement les résultats de l'étude de poste à tous les acteurs de l'entreprise et de disposer d'éléments

incontestables permettant l'adhésion du collectif pour la mise en place de solutions de prévention. Outre ce volet didactique, cela permet également à tous d'émettre facilement des propositions correctives pour améliorer les conditions de travail. Dans le cas présent, il a été proposé de substituer la colle à base de solvant par une colle aqueuse, de mettre en place un système de captage et également, de modifier la façon de travailler en évitant de diriger le jet de la soufflette en direction des voies respiratoires de l'infirmière en charge du collage. Pour l'un des hôpitaux participant à l'étude, les éléments présentés (dont l'exposition du patient) ont permis la substitution de la colle contenant l'oxyde d'éthyle par une colle aqueuse et les infirmières ont donc modifié leur mode opératoire en conséquence





↑ FIGURE 6 Plan du local avec l'emplacement des points de mesures entourant l'endroit où est réalisé le procédé émissif. Durant la totalité du procédé, la porte reste fermée, hormis durant quelques secondes au moment de la sortie de l'opérateur à l'issue de l'application des produits.



↑ FIGURE 7 Pollution du local au cours du temps en vapeurs organiques (exprimées en ppm_v équivalent isobutylène).
 Le niveau de pollution augmente après la fin du procédé de stratification et la sortie de l'opérateur.



↑ FIGURE 8 Géolocalisation manuelle sur le dispositif Dactari.

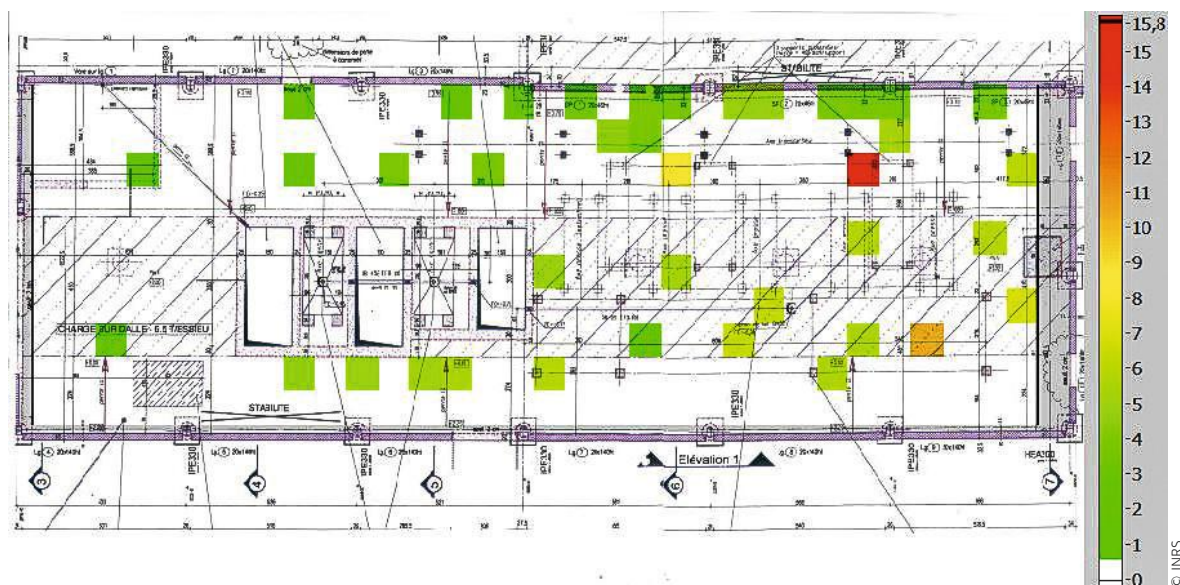
(temps de séchage plus long). On peut déplorer que la moindre adhésion des électrodes sur le crâne du patient, lors de l'usage de la colle aqueuse, ne puisse pas permettre de procéder à une substitution de colle dans tous les cas; mais cette étude a cependant permis au personnel infirmier d'adapter ses gestes professionnels, lors de l'usage de la soufflette sur le volet du dosage et de l'orientation du jet d'air de séchage.

Mettre en évidence l'émissivité des produits/ procédés: déploiement de plusieurs détecteurs en simultanément dans un local de travail

La détection en temps réel peut aussi constituer un outil utile pour caractériser l'émissivité de polluants par des produits ou des procédés et observer l'évolution au cours du temps de la pollution de l'atmosphère.

Une campagne de mesures a été réalisée pour caractériser l'exposition à des vapeurs de solvants lors d'une opération d'application de résine composite pour la réalisation de pièces d'aménagement. L'opération est réalisée dans un local de 100 m³ dépourvu de ventilation (Cf. Figure 6). Afin de caractériser l'émission lors du procédé, cinq points de mesures équipés au total de neuf détecteurs de type PID ont été installés. Un point de mesure pouvait être équipé de un à trois PID, afin de comparer entre eux des instruments aux caractéristiques métrologiques différentes. Les détecteurs ont été vérifiés à l'aide de deux bouteilles étalon d'isobutylène (10 et 100 ppm_v), avant et après chaque essai. En cas d'écart constaté supérieur à 5%, imputable à un encrassement du capteur, les mesures ont été rejetées. Les mesures à lecture différée par prélèvement sur des tubes de charbon actif ont révélé la présence majoritaire de vapeurs de styrène, de méthacrylate de méthyle et d'acétone. Les PID permettent de suivre l'évolution de la concentration en vapeurs organiques dans l'atmosphère de la pièce au cours du temps, mais ne permettent pas de discriminer les vapeurs entre elles. Les concentrations sont alors exprimées en ppm_v équivalent isobutylène. Les données recueillies par l'ensemble des détecteurs sont en quantité importante. Le graphique de la Figure 7 illustre un exemple d'exploitation.

Le niveau en vapeurs organiques dans la salle augmente dès l'entrée des produits utilisés au cours du procédé (10h25). Après l'opération de stratification qui consiste à juxtaposer sur la plaque de gelcoat quatre couches successives de résine et de fibres de verre, et dont la fin coïncide avec la sortie de l'opérateur (11h13), la concentration en COV continue d'augmenter (durant la période de séchage de la pièce manufacturée), puis décroît lentement. Il apparaît clairement que la pollution du local est imputable au procédé, et que c'est la phase de séchage qui est fortement émissive, c'est



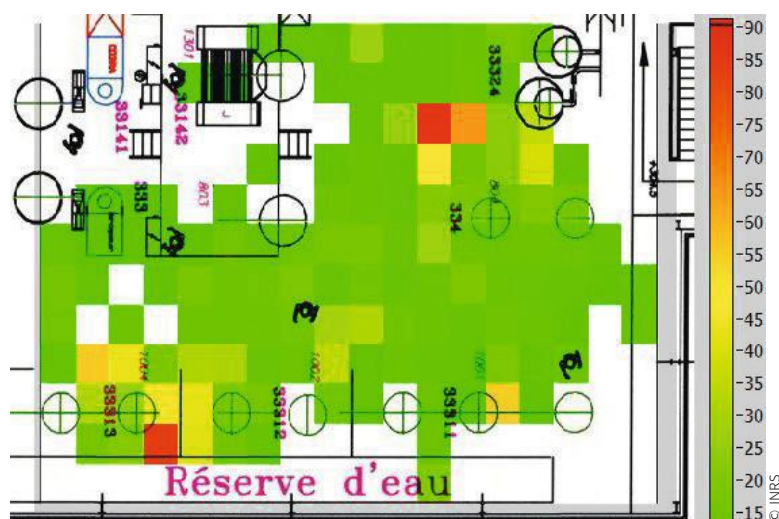
↑ FIGURE 9 Cartographie de zone 2D dans un atelier de presses en traitement des déchets.

La concentration en NH_3 est représentée par des carrés de couleur allant du vert (plus faible concentration mesurée) au rouge (plus forte concentration mesurée).

à dire après la fin des actions de l'opérateur. D'un point de vue spatial, la partie droite du local où le procédé a été mis en œuvre présente les plus fortes concentrations en COV (détecteur 4), mais cette pollution se répand dans l'intégralité de la pièce. Trois heures après la fin des opérations manuelles de l'opérateur, les niveaux de concentration en COV dans la pièce restent encore compris entre 20 et 40 ppm_v en équivalent isobutylène. Les prélèvements sur charbon actif analysés *a posteriori* en laboratoire permettent de donner une concentration moyenne (3 h 30 de prélèvement) des polluants principaux : 83 ppm_v pour le styrène, 23 ppm_v pour l'acétone et 18 ppm_v pour le méthacrylate de méthyle. Cependant, il est difficile de corréler les résultats issus des mesures indirectes avec ceux des mesures directes. En effet, les PID sont 4 (resp. 2,5) fois plus sensible au styrène qu'au méthacrylate de méthyle (resp. acétone). De plus, l'étude ne permet pas de certifier que les émissions de chacun des produits ont lieu au même moment. L'installation d'un système de captage est fortement recommandée et, dans l'attente de sa réalisation, il est impératif d'empêcher l'accès à la salle à tout opérateur, tant que le niveau de pollution n'aura pas décliné suffisamment.

Déploiement de l'outil Dactari pour l'analyse de situations de travail

L'outil Dactari (Dispositif d'acquisition et de trajectographie pour l'analyse du risque individuel), développé par l'INRS permet de réaliser de manière simultanée et synchronisée, l'acquisition des données d'exposition professionnelle d'un opérateur à son poste de travail tout en repérant et enregistrant au cours du temps sa position dans l'atelier (géolocalisation). Ce système permet ensuite l'analyse



↑ FIGURE 10 Cartographie d'exposition de l'opérateur aux solvants.

de ces informations, dans le but de proposer des solutions de prévention adaptées au poste étudié et ciblées sur les activités ou les zones les plus exposantes.

L'outil Dactari est associé à un dispositif de caractérisation de l'exposition. Il est compatible avec tout type de détecteur portable équipé d'un enregistreur interne des données en temps réel. Il permet de réaliser deux types d'investigation :

- une cartographie de zone: le capteur est porté par le préventeur. Celui-ci se déplace dans la zone d'intérêt en s'autogéolocalisant manuellement sur le dispositif grâce à une tablette tactile sur laquelle le plan de la zone est enregistré (Cf. Figure 8). Cela permet de localiser les zones polluées telles que les sources d'émissions et les zones d'accumulations ;



- un suivi d'opérateur : le détecteur est porté par un opérateur. Ses déplacements dans son espace de travail sont enregistrés à distance par le préventeur pendant l'exécution des tâches habituelles de l'opérateur. Ceci permet de déterminer l'exposition de l'opérateur dans le temps et l'espace. À la suite de la collecte des données, le logiciel dispose de fonctionnalités permettant d'extraire sous forme de graphique :
 - la distribution de l'exposition dans l'espace de travail qui est une moyenne spatiale des concentrations mesurées ;
 - la distribution spatiale des temps de présence qui est le cumul des temps de présence de l'opérateur en chaque lieu.

En multipliant la durée d'exposition par la concentration mesurée, l'outil Dactari permet d'avoir accès à la dose de pollution reçue par l'opérateur aux différents points du poste de travail.

Cet outil a été utilisé par exemple pour effectuer une cartographie de la pollution dans un atelier de presses dans le secteur de la méthanisation des déchets. Le but est d'objectiver la distribution spatiale de la concentration en ammoniac dans cet atelier. La carte présentée sur la *Figure 9* indique des concentrations en ammoniac entre 0 et 15,8 ppm_v. L'analyse de cette cartographie fait apparaître que c'est dans la zone droite du plan que se situent les concentrations en ammoniac les plus élevées. Cela peut s'expliquer par le fait que c'est à cet endroit que sont situées les presses et que cette zone ne présente pas d'ouverture pour l'aération. Plus précisément, on constate que l'une des presses émet plus d'ammoniac que les autres (carré rouge). Ces résultats indiquent qu'une investigation plus poussée du système d'aspiration de cette presse est nécessaire. Lors d'une autre campagne, l'outil Dactari a été utilisé pour effectuer une cartographie de l'exposition d'un opérateur à son poste de travail. Il s'agit d'une entreprise de préparation d'encres et l'objectif était de suivre l'exposition aux COV. L'opérateur a donc

été équipé d'un détecteur PID. Le poste étudié correspond au broyage et à la dilution des encres. Les concentrations se situent entre 15 et 90 ppm_v de solvants totaux en équivalent isobutylène.

L'analyse de la cartographie obtenue permet d'identifier deux zones où l'exposition de l'opérateur est la plus élevée (carrés rouges et orange) (Cf. *Figure 10*). Les niveaux d'exposition aux solvants les plus significatifs sont observés à proximité des broyeurs. La figure indique les points d'exposition dans ces zones. Cette représentation a permis de sensibiliser l'entreprise à la nécessité de mettre en place de solutions de prévention ciblées sur les zones les plus exposantes.

Synthèse et perspectives de développement

Les exemples présentés dans cet article reflètent les possibilités qu'offre actuellement l'association de détecteurs en temps réel avec les outils technologiques disponibles (logiciels, outils informatiques, matériels vidéo, dispositifs de positionnement...), pour la caractérisation de postes de travail dans le temps et l'espace et la promotion de solutions de prévention. Ces techniques en temps réel sont un complément essentiel aux mesures réglementaires pour limiter les expositions professionnelles.

Les technologies évoluent sans cesse et de nouveaux développements sont en phase de test au sein de l'INRS dans le but d'accroître la panoplie des solutions techniques à disposition des préventeurs, dont par exemple :

- un réseau d'une vingtaine de balises autonomes sans fil pour la mesure de composés chimiques et de particules en temps réel. Associé à un travail en cours sur la représentation cartographique des concentrations, ce réseau permettra le maillage de postes de travail étendus ;
- un dispositif vidéo dont le déclenchement est asservi à la réponse d'un détecteur, ce qui permettra de n'enregistrer que les séquences vidéo lors d'événements générant une pollution ou une exposition significatives ;
- un système de positionnement automatique d'un opérateur dans son environnement de travail, à l'aide de quatre balises réceptrices autonomes à poste fixe, et d'un émetteur porté par le sujet pour suivre ses déplacements dans les zones de travail. ●

1. *Captiv*: Centrale d'acquisition de la pollution informée par vidéo (outil développé par l'INRS). Voir par exemple l'article: *Exposition aux solvants organiques lors de la pose d'électrodes pour électroencéphalogrammes de longue durée* (Cf. En savoir plus).

2. *Dactari*: Dispositif d'acquisition et de trajectographie pour l'analyse du risque individuel (outil développé par l'INRS). Voir: <http://www.inrs.fr/services/innovation/evaluation-diagnostic/dactari.html>

3. *Estimation de la probabilité de présence et de l'exposition sans mesure, mais à confirmer par des mesures.*

POUR EN SAVOIR +

- DIRRENBARGER P. *et al.* – Évaluation de l'exposition à l'ammoniac: apport de la détection en temps réel. *Hygiène et Sécurité du Travail*, sept. 2018, 252 (NT 65), pp. 66-72. Accessible sur: www.hst.fr
- MARTIN P. *et al.* – Exposition aux solvants organiques lors de la pose d'électrodes pour électro-encéphalogrammes de longue durée. *Documents pour le médecin du travail*, 2011, 127 (TF 194), pp. 397-408. Accessible sur: www.inrs.fr
- MARTIN P. – Cartographier l'exposition individuelle aux substances chimiques. *Hygiène et Sécurité du Travail*, mars 2017, 246 (NT 47), pp. 52-56. Accessible sur: www.hst.fr