

HYGIÈNE & SÉCURITÉ DU TRAVAIL

La revue technique de l'INRS
janvier • février • mars 2024

N° 274

/ Note technique /

Optimisation de la méthode de mesure des endotoxines dans l'air des lieux de travail

/ Étude de cas /

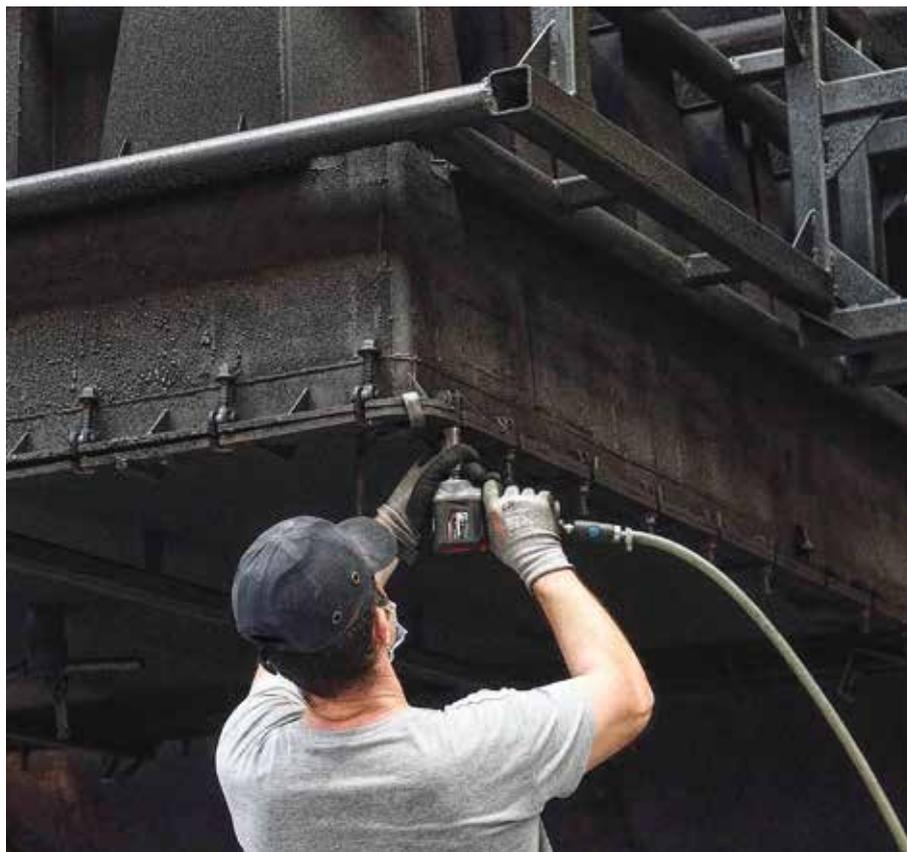
Approches coopératives métiers : retours d'expériences

/ Base de données /

Expositions professionnelles aux poussières de farine : extraits de la base Colchic (2014-2023)

/ Congrès /

Journée technique « Polyexpositions au travail »



Dossier

Vibrations mains – bras

L'INRS

L'Institut national de recherche et de sécurité (INRS) pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles est une association loi 1901, créée sous l'égide de la Caisse nationale de l'assurance maladie (Cnam). L'Institut est géré par un conseil d'administration paritaire composé, à parts égales, d'un collège représentant les employeurs et d'un collège représentant les salariés, présidé alternativement par un représentant d'un de ces collèges. Financé en quasi-totalité par l'Assurance maladie – Risques professionnels, à qui il apporte son concours, l'INRS inscrit son action dans le cadre des orientations de la branche Accidents du travail – maladies professionnelles (AT/MP). Ses domaines de compétences couvrent les risques physiques (bruit, vibrations, champs électromagnétiques, machines...), chimiques, liés aux substances comme aux procédés (solvants, poussières...), biologiques (infectieux, immunoallergiques...), électriques, incendie / explosion, psychosociaux et organisationnels... Sa mission est de contribuer à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles, et plus précisément:

- d'identifier les risques professionnels;
- d'analyser leurs conséquences sur la santé de l'homme au travail;
- de concevoir, de diffuser et de promouvoir des solutions de prévention auprès de tous les acteurs de la prévention: spécialistes des risques professionnels en entreprise ([Q]HSE, IPRP, cadres et fonctionnels en charge de la sécurité et de la santé au travail, animateurs de sécurité, personnes compétentes...), experts – conseil, chefs d'entreprise, élus CSE/CSSCT/CHSCT/RP, salariés, agents du réseau Assurance maladie – Risques professionnels (AM-RP), services de prévention et de santé au travail (interentreprises ou autonomes)...

Les activités de l'INRS s'organisent selon quatre axes (en plus des métiers supports): études et recherche, assistance, formation et information / communication.

> Notre métier, rendre le vôtre plus sûr



**Retrouvez-nous
sur le Web:**

**Ou abonnez-vous
en ligne sur:**

hst.fr 

ÉQUIPE DE RÉDACTION

Antoine Bondéelle
Rédacteur en chef, INRS
Patricia Bernard
Rédactrice en chef adjointe, INRS
Aline Marcelin (INRS),
Taina Grastilleur, Maud Foutieau
Corrections, secrétariat de rédaction
Amélie Lemaire (INRS),
Nathalie Florczak
Maquettes et infographies
Nadia Bouda
Iconographe, INRS
Sandrine Voulyzé
Chargée de fabrication, INRS
Nadège Marmignon
Assistante, INRS

COMITÉ ÉDITORIAL

Agnès Aublet-Cuvelier
Direction des Études et recherches,
INRS
Patricia Bernard, Antoine Bondéelle
Équipe de rédaction, INRS
Patrick Laine
Chef du département
Expertise et conseil technique, INRS
Louis Laurent
Directeur des Études et recherches,
INRS
Jean-Pierre Leclerc
Chef du département
Ingénierie des procédés, INRS
Fahima Lekhchine
Chef du département Information
et communication, INRS
Jérôme Triolet
Direction des applications, INRS
Delphine Vaudoux
Responsable du pôle
Publications périodiques, INRS

ONT PARTICIPÉ À CE NUMÉRO :

Lise Alonso, Maël Amari,
Didier Aoustin, Laurent Brocolini,
Jérôme Chambert, Christine Chapus,
Jacques Chatillon, Frédéric Clerc,
Jennifer Clerté, Catherine Coulais,
Arnaud Delamézière, Laure Dorin,
Thomas Dupont, Cédryc Fernandez,
Emmanuel Foltête,
Marc-André Gaudreau,
Jean-Luc Gennisson,
Emmanuelle Jacquet, Pascal Lamy,
Lucas Lenne, Éric Liehrmann,
Pauline Loison, Frédéric Maître,
Marc Malenfer, Pierre Marcotte,
Freeric Meier, Christophe Noël,
Thomas Padois, Aurélie Périssé,
Ha Hien Phuong Ngo,
Quentin Pierron,
Marjorie Poupet-Renaud,
Benoît Pouyat, Maha Reda,
Philipp Reusch, Jean-François Sauvé,
Barbara Savary, Nicla Settembre,
Xavier Simon, Luc Thomasset,
Claude Vadeboin,
Laurent Van Belleghem,
Simon Vauthier, Thomas Venet,
Maxime Vincent,
les relecteurs internes de la revue,
les pôles Information juridique
et Traductions de l'INRS,
ainsi que les photographes cités.

L'édito de...

ARNAUD DELAMÉZIÈRE, Professeur, directeur de l'Institut supérieur
d'ingénierie de la conception, LEM3 – UMR 7239



© GIP-INSC

Nous utilisons la force mécanique pour exécuter des opérations que notre force musculaire seule ne permet pas de réaliser.

Or, tout système mécanique comportant un moteur génère des vibrations.

Les machines portatives ou guidées à la main sont utilisées dans des secteurs d'activité très variés, par près de deux millions de travailleurs en France. Leurs vibrations sont essentiellement transmises aux membres supérieurs. Les pathologies associées à ce type de vibrations sont de trois ordres : neurologique (sensations d'engourdissement et de picotements des doigts et des mains), vasculaire (syndrome de Raynaud) ou ostéoarticulaire (troubles des articulations du poignet et du coude).

Les travaux de recherche menés sur cette thématique

portent sur l'amélioration de la mesure de vibrations transmises aux mains et aux bras, sur l'évaluation des taux d'exposition aux vibrations et sur la compréhension des effets sur la santé.

La réduction des risques nécessite des démarches de prévention adaptées.

Une piste est de réduire le niveau d'exposition des salariés, en utilisant les machines les moins vibrantes. La directive Machines¹ impose d'ailleurs aux fabricants de déclarer les valeurs d'émission de leurs machines.

Mais les protocoles actuels sont difficiles à mettre en œuvre. La simulation numérique est l'une des pistes employées pour estimer les émissions vibratoires.

Une autre piste est le développement de dispositifs sans intervention d'opérateurs. La variabilité de la mesure est réduite, mais une attention doit être portée pour favoriser la représentativité humaine du dispositif de substitution. Les risques pour la santé dépendent de l'exposition. La question de l'estimation de l'exposition des travailleurs

« Une meilleure compréhension des mécanismes de transmission des vibrations main-bras est nécessaire. »

est donc centrale. Généralement, des mesures sont effectuées lors d'une courte phase de travail et sur la base des déclarations du salarié interrogé, l'exposition quotidienne est donc obtenue par extrapolation. L'utilisation d'indicateurs de production améliorerait grandement les erreurs liées à l'autodéclaration. Enfin, les effets sur la santé dus à l'exposition aux vibrations peuvent être complexes à appréhender. Une meilleure compréhension des mécanismes de transmission des vibrations main-bras est nécessaire.

La conception et l'utilisation d'un modèle numérique offrent la compréhension de certains mécanismes ; par exemple, l'influence des efforts de poussée et de serrage exercés par le travailleur.

Ces travaux visent à permettre un choix éclairé lors de l'acquisition des équipements par les entreprises.

Le dossier présenté dans ce numéro, consacré aux vibrations main-bras, traite de l'ensemble de ces questions. Il propose une synthèse de la 15^e Conférence internationale consacrée aux vibrations du système main-bras, organisée par l'INRS en juin 2023.

1. Directive 2006/42/CE, remplacée par le règlement UE/2023/1230.

Voir : Hygiène & sécurité du travail, 2023, 273 (et notamment le dossier pp. 18-44).

SOMMAIRE



Savoirs & actualités

Décryptage

La simulation du travail :
un outil pour la prévention
P. 05

Actualité juridique

Reconnaissance de la faute
inexcusable de l'employeur
pour manquement aux règles
de circulation en entreprise
P. 12

Focus normalisation

Le nouveau règlement
sur la sécurité des produits
P. 16

Des organismes de santé
et sécurité au travail
de plusieurs pays adoptent
une position commune
sur la normalisation
P. 18

Dossier

Vibrations mains – bras :
de nouvelles connaissances
pour la prévention

- Vibrations mains – bras :
où en est-on ?
P. 22

- Émission vibratoire
de meuleuses :
expériences et modèle
P. 26

- Évaluation des valeurs
d'émission vibratoire
des cloueuses : un dispositif
de substitution peut-il remplacer
les opérateurs humains ?
P. 29

- Vibrations transmises
aux membres supérieurs :

estimation de l'exposition
des travailleurs
à des chocs répétés
P. 33

- Les caractéristiques
vibratoires d'outils
de redressement et de formage
activés par ultrasons
P. 37

- Étude préliminaire
sur l'activation et l'anisotropie
du muscle dans la modélisation
des vibrations main – bras
P. 41

- Modélisation de la sténose
artérielle induite par
les vibrations transmises
à la main : un moyen de prévenir
le risque vibratoire vasculaire ?
P. 45



L'exposition
aux vibrations
peut être à l'origine
d'affections
qu'il est nécessaire
de prévenir.
Lire Dossier p. 20.



Études & solutions

Notes techniques

- Optimisation de la méthode de mesure des endotoxines dans l'air des lieux de travail
P. 51

Étude de cas

- Agir en prévention par des approches coopératives métiers : retours d'expériences
P. 58

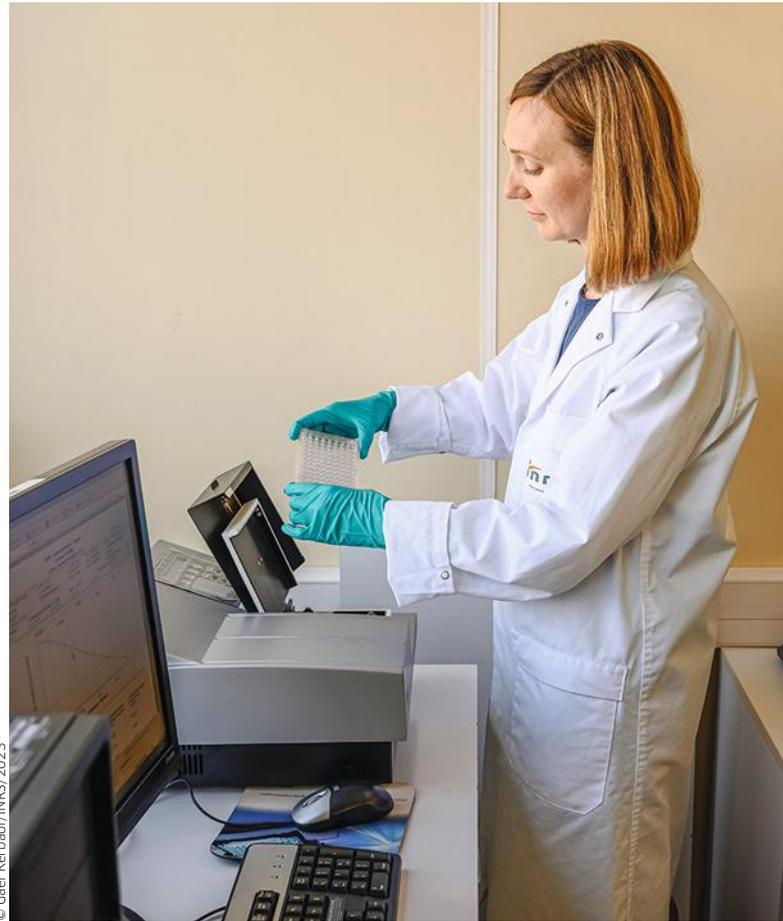
Bases de données

- Portrait rétrospectif des expositions professionnelles aux poussières de farine en France de 2014 à 2023
P. 66

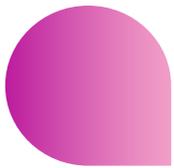
À ce jour, la base de données Colchic compte plus d'un million de résultats pour 745 agents chimiques et biologiques, et représente un outil d'aide pour l'identification des axes prioritaires de prévention du risque chimique.



© Gaël Kerbaol/INRS/2023



En vue d'améliorer la caractérisation des expositions aux endotoxines présentes dans des atmosphères de travail, une nouvelle méthode Métropol M-454 est mise à disposition. Lire Note technique p. 51.



Agenda & services

Congrès

Polyexpositions au travail
P. 73

Agenda/Événements
P. 80

Formation

Bruit au travail : se former à la prévention des nuisances sonores
P. 82

Agenda/Formations
P. 86

Sélection bibliographique

À lire, à voir
P. 88



Veille & prospective

Prospective

État de la veille 2023
P. 91



Savoirs & actualités

Décryptage

La simulation du travail :
un outil pour la prévention

P.05

Actualité juridique

Reconnaissance de la faute inexcusable
de l'employeur pour manquement aux règles
de circulation en entreprise

P. 12

Focus normalisation

Le nouveau règlement
sur la sécurité des produits

P. 16

Des organismes de SST de plusieurs pays
adoptent une position commune sur la normalisation

P. 18

Dossier

Vibrations mains – bras :
de nouvelles connaissances
pour la prévention

P. 20

Décryptage

LA SIMULATION DU TRAVAIL : UN OUTIL POUR LA PRÉVENTION

Cet article montre en quoi le cadre méthodologique de la simulation du travail, mobilisé de longue date pour accompagner des projets de conception de situations et de lieux de travail, présente des caractéristiques pertinentes pour être utilisé dans un cadre de prévention des risques professionnels, en répondant notamment aux principales préconisations institutionnelles et exigences réglementaires visant l'amélioration des conditions de travail.

WORK SIMULATION: A TOOL FOR PREVENTION – This article shows how the methodological framework of work simulation, used for many years now to design work situations and work places, is relevant for application in occupational risk prevention, by meeting, in particular, the main institutional recommendations and regulatory requirements aimed at improving work conditions.

ÉRIC
LIEHRMANN
INRS,
département
Expertise
et conseil
technique

LAURENT
VAN
BELLEGHEM
Realwork,
Université
Paris – Cité

Contexte

La simulation du travail est une méthodologie largement éprouvée, notamment en ergonomie, pour concevoir de nouvelles situations de travail. Elle vise, dans le cadre d'une démarche participative, à « faire jouer » leur propre activité à des professionnels dans un nouveau contexte de prescription. Cette mise en scène permet une projection dans l'activité future et favorise l'évaluation des choix du projet, permettant de les modifier le cas échéant. Cette méthodologie permet ainsi de valoriser l'expertise et l'expérience des salariés et contribue à l'intégration du travail réel dans les projets. La simulation du travail est à différencier d'autres méthodologies de simulation utilisées fréquemment en conception, déployées notamment par les disciplines de l'ingénierie, visant la reproduction expérimentale d'un phénomène physique, d'un fonctionnement ou d'un process par l'usage d'un modèle, volontiers numérique. De ce point de vue, la simulation du travail doit bien être comprise comme une simulation de l'activité [1].

Utilisée pour la conception des situations de travail (postes de travail, lieux de travail, organisation du travail...), cette démarche permet de faire valoir les logiques de l'activité portées par les professionnels face aux logiques techniques portées traditionnellement par les concepteurs (bureaux d'études, etc.). Cette approche de la conception, centrée sur

le travail réel, comporte une dimension préventive essentielle, dans la mesure où elle permet l'anticipation très en amont des risques qu'il s'agit d'éviter, en même temps qu'elle favorise un « travail bien fait » [2]. Elle s'inscrit ainsi pleinement dans une approche de prévention « primaire ». Pour autant, cette méthodologie peut également être déclinée dans des cadres de prévention qui ne s'inscrivent pas toujours dans un contexte de conception. Il s'agit, pour ce faire, de savoir replacer la méthodologie de simulation dans les perspectives de prévention telles qu'elles sont portées par les textes légaux et réglementaires (principes généraux de prévention), à travers les valeurs essentielles prônées par le réseau prévention (la personne, la transparence, le dialogue social) et dans les pratiques attendues des entreprises (approche pluridisciplinaire, participation de l'ensemble des acteurs, analyse du travail réel). Ces usages restent encore peu expérimentés ou formalisés. Cet article vise à en dessiner les contours et en dresser les perspectives.

La simulation du travail en général : enjeux, principes, exigences

La simulation du travail est née, historiquement, d'une difficulté rencontrée par les ergonomes : comment concevoir une situation parfaitement adaptée à l'activité que l'on souhaite déployer si celle-ci n'existe pas encore? Simuler celle-ci





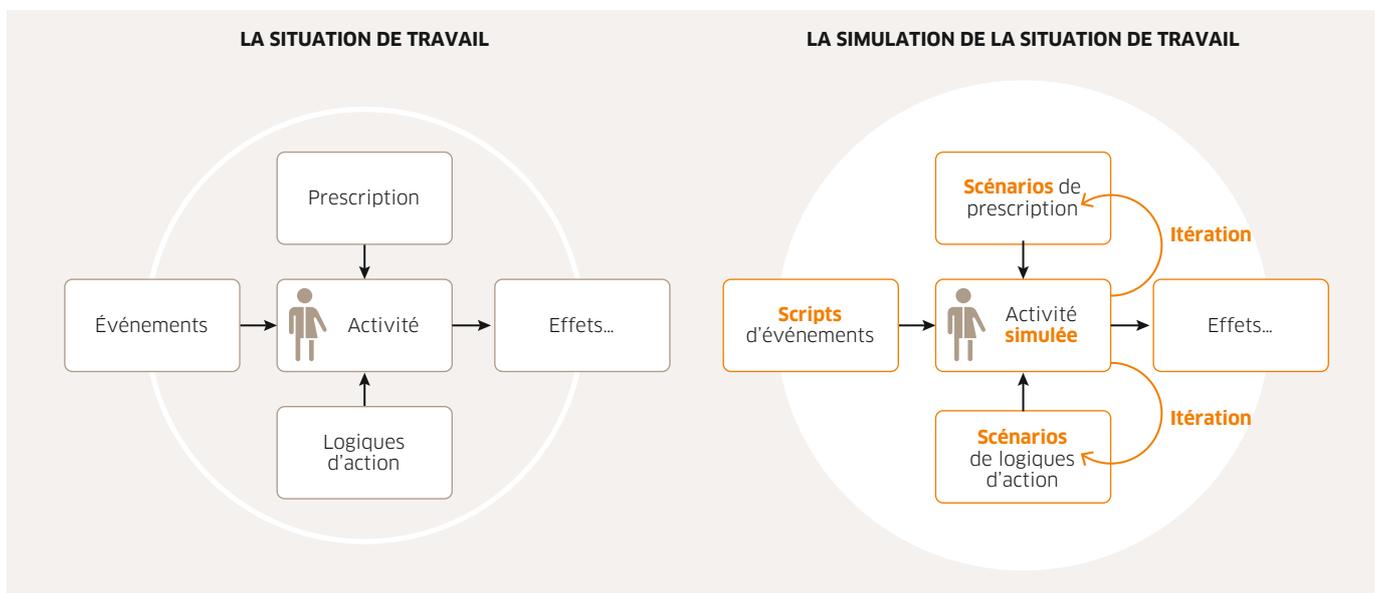
Illustration d'un dispositif de simulation en milieu industriel mettant en œuvre des avatars sur une maquette.

© Laurent Van Belleghem

peut être un moyen de contourner cette difficulté. L'enjeu consiste à réunir les éléments de la situation projetée et d'y inviter les professionnels à « jouer » l'activité qui serait la leur. Il s'agit donc de reproduire, de façon fictive mais réaliste, les éléments de la situation d'activité dans un dispositif qui permette d'en faire varier les différents paramètres. De façon schématique (Cf. Figure 1 – Partie gauche), toute situation de travail peut ainsi être envisagée comme le déploiement d'une activité à l'interface :

- du système de prescription qui s'impose à elle (l'organisation, l'espace, les outils, les procédures, les consignes, etc.) ;
- des logiques d'actions individuelles et collectives des professionnels de terrain, élaborées au cours de leur expérience (les savoir-faire, les règles informelles, l'entraide...)
- et des événements auxquels il s'agit de faire face dans le réel du travail (une production à réaliser, un client à accueillir, des urgences à traiter...) pour produire un résultat attendu.

↓ FIGURE 1
Les éléments structurants d'une situation de travail et de sa simulation en conception.



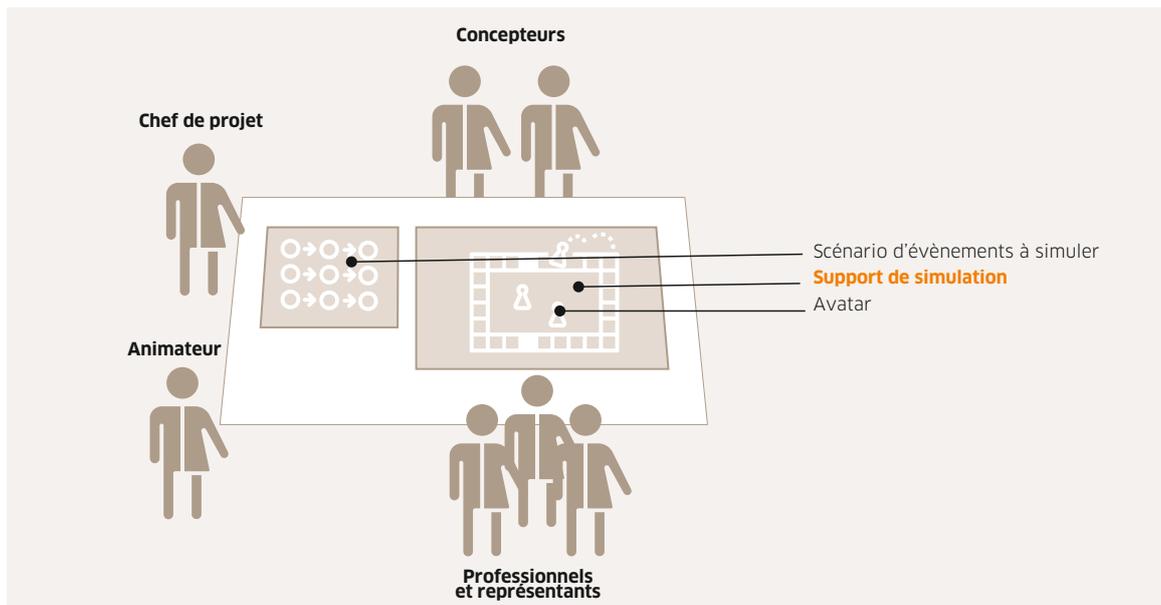


FIGURE 2
Le dispositif opérationnel de simulation.

Modifier certaines de ces composantes, par exemple à l'occasion d'un projet, a nécessairement un impact sur les autres dimensions de la situation. La conception de la situation future doit ainsi porter sur la modification des différents paramètres les uns avec les autres pour permettre à l'activité de se dérouler dans des conditions satisfaisantes. Le dispositif de simulation (Cf. Figure 1 – Partie droite) doit ainsi inviter à scénariser les évolutions du système de prescription en s'assurant, à travers les simulations, qu'elles s'accordent aux logiques d'action des professionnels. Si elles ne s'accordent pas suffisamment, on peut soit modifier les scénarios de prescription pour les adapter aux logiques d'action, soit faire évoluer les logiques d'action (en les scénarisant elles aussi au besoin) pour les accorder aux nouvelles logiques de prescription. On peut prendre pour exemple une entreprise logistique souhaitant remplacer les chariots élévateurs thermiques de ses caristes par des chariots électriques. La mise en place d'un dispositif de simulation permet de repérer que l'intégration de nouvelles logiques de recharge des chariots dans les stratégies des caristes (gestion du temps de recharge, absence de chariot de remplacement, etc.) s'avère trop coûteuse dans certaines situations (dans les périodes chargées de fin d'année notamment) et risque d'affecter la performance. Pour répondre à cette contrainte, les participants proposent une modification du scénario de prescription initial, en intégrant un principe de batteries interchangeables. Cette nouvelle situation est simulée et révèle des marges de manœuvre (en améliorant la disponibilité immédiate des chariots) que les caristes mettent au profit d'une plus grande efficacité. La solution est reconnue comme acceptable par l'ensemble des participants de la démarche et

est retenue. Le dispositif permet ainsi, par itérations successives entre scénarisation et simulation, d'accorder le contenu du projet aux nouvelles manières de faire des caristes et inversement. Concrètement, le dispositif doit être envisagé comme une situation de simulation [3]. Il s'agit de regrouper des acteurs de la conception (chef de projet, concepteurs...) et des professionnels de terrain (opérateurs et encadrement) autour d'un support de scénarisation et de simulation (une maquette le plus souvent) et de les engager dans une démarche de co-conception centrée sur la simulation du travail (Cf. Figure 2). Régulièrement, les professionnels y sont invités à « jouer » leur activité dans le scénario en cours de conception, permettant d'en valider les principes ou de les réorienter le cas échéant. Ce dialogue est placé sous l'arbitrage des décideurs, en lien avec les représentants du personnel, pour ouvrir ou fermer des pistes de solutions, au regard des moyens à engager dans le projet. Quel que soit le type de support utilisé, il doit répondre à trois exigences fondamentales [4], devant permettre chronologiquement aux participants de :

- 1. (se) représenter** le système de prescription associé à la situation de travail en cours de conception ;
- 2. modifier** ce système de prescription selon différents scénarios ;
- 3. simuler** l'activité qui serait la leur dans les différents scénarios proposés. Sur une maquette à échelle réduite, des avatars (sous forme de figurines par exemple, de type Playmobil ou autres), ou tout autre objet permettant d'incarner l'activité, seront volontiers utilisés. Dans d'autres cas, des mises en situation [5] pourront prendre différentes formes : usage en grandeur réelle



de prototypes, improvisations théâtralisées (permettant la mise à l'épreuve de nouvelles règles de coordination entre professionnels par exemple), usage de la réalité virtuelle permettant de voir et d'agir « à la première personne » dans un environnement.

Pour s'assurer de faire simuler aux participants une grande diversité de situations, on aura à cœur de formaliser les événements à jouer (une commande urgente, un client insatisfait, une file d'attente qui s'allonge, une météo dégradée, un changement de production, une période chargée, l'absence d'un collègue, etc.). Ils pourront être organisés sous la forme d'un « script d'événements » (par exemple, une journée particulière de travail) permettant de dérouler différents cas de figure.

Un certain nombre de conditions sont par ailleurs nécessaires pour que la démarche de simulation soit efficace. En particulier, le processus de co-construction à l'œuvre suppose une méthode qui :

- **engage la responsabilité** de la direction quant aux suites à donner au projet et à la bonne prise en compte des travaux issus de la participation ;
- **garantisse un cadre d'expression** dans lequel chacun peut mobiliser et valoriser son expérience du travail et ses représentations pour débattre des futurs souhaitables ;
- **offre les moyens d'évaluer** la pertinence et les gains des scénarios envisagés et livre les éléments qui permettront l'arbitrage éclairé des décideurs.

La simulation du travail en prévention : les conditions requises

Si le cadre méthodologique de la simulation s'est développé historiquement dans le champ de la conception, il est intéressant de se demander en quoi il peut être pertinent dans une perspective visant spécifiquement la prévention des risques professionnels. Cette réflexion peut être structurée

à travers l'exploration de trois dimensions incontournables en prévention des risques : l'anticipation, la participation de tous les acteurs et la prise en compte du travail réel.

La dimension anticipative

Le cadre méthodologique de la simulation porte une vision d'anticipation des conditions de réalisation du travail. Cette vision proactive, en conception, permet la suppression des risques à la source, ou tout au moins leur réduction et leur maîtrise au plus tôt lors de la définition des moyens matériels et organisationnels, comme le prescrivent les principes généraux de prévention qui demandent de combattre les risques à la source (...) et d'intégrer la prévention le plus en amont possible, notamment dès la conception des lieux de travail, des équipements ou des modes opératoires ¹.

De ce point de vue, ce cadre méthodologique s'avère adapté pour se projeter dans des situations à risques et en évaluer les conséquences potentielles sur les salariés exposés avant qu'elles ne puissent se manifester de façon tangible.

Faire de l'identification et de l'évaluation *a priori* des risques un élément majeur de la politique de santé et de sécurité au travail constitue (au-delà d'une obligation réglementaire) l'une des bonnes pratiques identifiées en matière de prévention des risques professionnels pour l'entreprise. La simulation apparaît donc comme un outil particulièrement pertinent pour toute démarche de prévention dite « primaire ».

La dimension participative

Toute démarche de prévention doit associer et mettre à contribution différents acteurs de l'entreprise dans son élaboration et dans sa mise en œuvre. C'est une des valeurs essentielles prônées par le réseau prévention et un gage de pertinence des actions proposées.

Cette dynamique participative doit se décliner à tous les niveaux de l'entreprise, en s'appuyant d'abord sur les professionnels concernés par le projet, et en y associant les instances de dialogue social (instances représentatives du personnel) et les différentes fonctions supports et gestionnaires (fonctions RH, fonctions managériales, services méthodes...).

Cette dimension permet :

- **de s'assurer que la solution de prévention retenue intègre bien les besoins** de chacun des acteurs et prend en compte, en particulier, l'expérience et l'expertise des professionnels² sur leur travail dans la gestion des risques en situation [6] ;
- **d'intégrer la diversité des points de vue** et des enjeux afin de construire une solution de prévention acceptable par l'ensemble des acteurs de

ENCADRÉ

RAPPEL DES FONDEMENTS D'UNE DÉMARCHÉ D'ÉVALUATION DES RISQUES PROFESSIONNELS

« La pertinence de l'évaluation des risques repose en grande partie sur la prise en compte des situations concrètes de travail – dit "travail réel" – qui se différencie des procédures prescrites par l'entreprise. Ainsi, l'activité exercée par le travailleur, pour réaliser les objectifs qui lui sont assignés, génère des prises de risques pour gérer les aléas ou les dysfonctionnements qui surviennent pendant le travail. De ce fait, l'analyse des risques a pour objet d'étudier les contraintes subies par les travailleurs et les marges de manœuvre dont ceux-ci disposent, dans l'exercice de leur activité. L'association des travailleurs et l'apport de leur connaissance des risques ainsi que de leur expérience s'avèrent à cet égard indispensables. »

(Source : circulaire DRT n°6 du 18 avril 2002 [6]).

l'entreprise, dont la mise en œuvre effective permettra une meilleure maîtrise des risques ;

- **de faciliter l'adhésion et l'appropriation des solutions** définies par tous les protagonistes (techniques, organisationnelles et humaines).

De par ses fondements et ses principes de mise en œuvre, le dispositif de simulation facilite la mise en place des conditions nécessaires à une dynamique participative. En plus de permettre une réflexion partagée sur le travail et ses risques, elle offre l'opportunité d'une « rencontre des mondes professionnels », c'est-à-dire l'organisation d'une controverse entre les points de vue portés par les différents acteurs de l'entreprise sur le travail futur, dans l'objectif de les faire converger en facilitant leurs ajustements mutuels [7-8].

La dimension du réel

Une exigence maintenant largement admise en matière de prévention des risques professionnels est de prendre en compte les situations réelles du travail. L'assurance de construire et d'élaborer une démarche de prévention pertinente et efficace s'appuie donc sur la capacité d'intégrer la réalité du travail (Cf. Encadré).

Ainsi, la réalité des situations de travail et leur extrême variabilité contribuent à l'émergence de risques, que l'application de principes de sécurité ne suffit pas toujours à contenir. Les travailleurs connaissent le plus souvent ces situations et développent face à elles des savoir-faire de prudence opérants spécifiques [9-10], c'est-à-dire des modes opératoires particuliers, qui permettent généralement de les maîtriser.

La simulation du travail réel offre, dans ce cadre, la possibilité de révéler les savoir-faire de prudence, d'en comprendre les mécanismes, d'en analyser l'utilité, de les reconnaître et les renforcer le cas échéant (au sein des collectifs et avec l'encadrement). Elle offre aussi la possibilité de les mettre en débat lorsqu'ils se confrontent à des règles prescrites, justifiant une instruction partagée avec les différents acteurs de la prescription et du management. Elle offre enfin la possibilité d'éprouver, de façon fictive mais réaliste, les formes que pourrait prendre l'activité dans des situations *a priori* non maîtrisées (en cas d'événements particuliers, par exemple) et dont on sait que les savoir-faire de prudence actuels n'y répondent pas ou y répondent mal. Ces situations possibles, voire probables, de débordement peuvent ainsi faire l'objet d'une instruction particulière (et sans risque car simulée) pour mieux les identifier et y trouver des réponses pertinentes. Enfin, cette instruction peut conduire à envisager une re-conception de la situation dans son ensemble, dans laquelle la simulation aura aussi tout son intérêt.



© Fabrice Dimier pour l'INRS/2019

Le cadre de la simulation peut ainsi proposer les conditions utiles et nécessaires pour une meilleure construction de règles de prévention collectives et individuelles partagées, articulant au mieux les approches en termes de « sécurité réglée » (c'est-à-dire la mise en place de règles et de moyens pour faire face aux risques) et de « sécurité gérée » (c'est-à-dire la compétence des femmes et des hommes présents, qui identifient la situation réelle et réagissent de façon appropriée) [11]. Cette construction permet d'aboutir à la structuration de plans d'action qui prennent en compte la réalité des conditions d'exposition aux risques et leur gestion dans le cadre d'une culture de sécurité intégrée.

La participation des salariés, une dimension essentielle à la mise en œuvre d'une simulation.

La simulation du travail en prévention : proposition de cadre méthodologique

Par définition, la prévention porte un enjeu d'anticipation en cherchant à empêcher l'avènement d'un risque considéré comme possible, voire probable en l'absence de mesures spécifiques. De fait, à l'instar de la conception, il s'agit bien de se projeter dans un avenir possible. Cependant, au futur souhaitable visé par la simulation en conception que l'on cherche à faire advenir, la simulation en prévention vise d'abord l'éclairage d'un futur non souhaitable (le risque) dont il s'agit précisément d'éviter la survenue (en le prévenant).

Ce constat invite à penser un positionnement et un déroulement des simulations spécifiques à cet enjeu de prévention. Il s'agit d'utiliser la simulation pour explorer le champ des risques potentiels et la façon dont les professionnels y font (ou y feraient) face. Cette approche nécessite la conception d'un dispositif dans lequel les scripts d'événements qu'il s'agit de faire jouer aux professionnels de terrain, sont particulièrement travaillés. Ces scripts doivent ainsi préciser les différents événements à jouer et leur enchaînement (en les horodatant par exemple),



mais aussi le contexte dans lequel ils apparaissent (jour de livraison, fin du mois, affluence, configuration particulière de production, etc.).

En soi, la construction et l'écriture des scripts sont des exercices qui méritent d'être menés collectivement, en prenant en compte la diversité des acteurs concernés :

- les professionnels apporteront leur expérience du terrain et de sa réalité ;
- les préventeurs pourront rappeler les situations faisant écho aux accidents passés et à leur niveau de gravité (ayant conduit ou non à un arrêt), ainsi qu'aux presque-accidents, ou aux hypothèses connues de basculement dans les situations de débordement ;
- les managers pourront objectiver les variations des situations : variations temporelles (horaire, hebdomadaire, annuelle...), variations quantitatives (nombre de commandes, pics de charge, longueur de file d'attente...), variations en nature (commandes spéciales, nouveaux services...), etc. ;
- les représentants de la direction pourront renseigner les évolutions à venir dans l'offre de production ou de service, susceptibles de générer de nouvelles situations de travail non encore connues ou maîtrisées par les professionnels (nouveau produit, nouvelle offre de service...) ;
- les représentants du personnel pourront faire valoir l'existence de situations à risques spécifiques, remontées par les salariés.

Cette étape constitue une première identification des risques potentiels et permet leur mise en débat. Elle ne rend cependant pas compte, à ce stade, des modalités concrètes de l'activité que les professionnels sont susceptibles de déployer dans la gestion de ces événements. C'est ce que la simulation doit permettre de révéler.

À ce stade, le dispositif de simulation ne diffère pas fondamentalement de celui mobilisé dans un cadre de conception. Il comprend la mise à disposition d'un support de simulation adapté (un plan, une maquette, une représentation de l'organisation fonctionnelle par exemple) avec l'usage d'un avatar *ad hoc* dans le cas d'une simulation à échelle réduite, ou d'une mise en situation théâtralisée (en face-à-face, en réalité virtuelle ou en « simulateur » par exemple) dans le cas de simulation « pleine échelle ».

Ce dispositif doit permettre aux professionnels de se représenter précisément le système de prescription dans lequel ils sont engagés, et de « convoquer » l'activité (c'est-à-dire la faire émerger en la simulant [12]) qui serait la leur pour faire face aux événements poussés par le script. Cette mise à l'épreuve de l'activité peut présenter deux configurations :

- l'événement est connu des professionnels (ou rattaché à une classe d'événements connue)

et des réponses préexistantes sont mobilisées pour y faire face (savoir-faire de prudence). Les logiques d'action sous-jacentes peuvent alors être discutées pour s'assurer qu'elles permettent de répondre efficacement aux enjeux de prévention ;

- l'événement (ou la classe d'événements) n'est pas connu des professionnels et ces derniers doivent alors imaginer une réponse adaptée. Cette réponse peut faire l'objet d'une élaboration collective, lors de la simulation, sous forme d'itérations. On s'assurera du caractère vraisemblable des simulations produites et de leur continuité spatio-temporelle [13].

Dans les deux cas, une évaluation des risques générés par la situation doit pouvoir être engagée par les participants à la démarche. Elle doit rendre compte notamment de la compatibilité (ou non) des logiques de prescription avec les logiques d'action mises en œuvre en simulation. Cette étape ne peut se faire sans un débat entre les participants sur l'acceptabilité ou non des écarts potentiels entre ces logiques, et sur ce qu'il convient de faire évoluer le cas échéant. Conformément aux conditions rappelées précédemment, on veillera à ne pas remettre systématiquement en cause les logiques des professionnels en les considérant comme des fautes ou des manquements à la règle, mais à comprendre les raisons qui les font s'écarter de la règle et à envisager l'évolution du système de prescription qui peut les mettre en difficulté.

Ce point d'attention est important pour éviter les formes de dissimulation du réel (silence organisationnel, par exemple [14]) et pour favoriser la prévention primaire, en privilégiant l'action sur le système plutôt que sur les individus.

Ainsi, la démarche de simulation doit conduire à réfléchir aux possibilités de transformation des situations de travail existantes, à la fois pour favoriser une meilleure adaptation aux besoins et contraintes de l'activité de travail, pour anticiper la survenue de situations à risques et pour mettre en place des actions permettant d'éviter leur survenue. Cela permet de réfléchir aux actions de prévention envisageables et de les évaluer en direct, en utilisant une nouvelle fois l'outil de simulation. À l'occasion des différentes étapes de mise en œuvre de la démarche de simulation, les logiques d'action des travailleurs peuvent évoluer. Cette double boucle d'itération, portant à la fois sur les prescriptions en matière de prévention et le développement de nouvelles logiques d'action des travailleurs, contribue à mieux articuler les mondes professionnels liés à la sécurité réglée (par les préventeurs notamment) et la sécurité gérée (par les professionnels de terrain). La démarche contribue ainsi à la consolidation du système de prévention dans son ensemble.

Conclusion

Dans le contexte actuel d'intérêt renouvelé pour la prévention des risques professionnels (loi santé travail de 2021, quatrième plan santé travail) où l'importance d'agir le plus en amont possible des situations à risques est mise en exergue pour garantir une certaine efficacité des démarches de prévention, la méthodologie de simulation du travail apparaît comme un outil particulièrement pertinent en termes de « prévention primaire ».

Plus précisément, dans le cadre d'une démarche d'évaluation des risques professionnels, la simulation pourrait s'inscrire dans une double perspective : proposer des actions de prévention qui intègrent au mieux les besoins et contraintes de l'activité et participer au développement de logiques d'action individuelles et collectives qui s'enrichissent et aboutissent à une meilleure maîtrise des situations à risques.

Ce potentiel de développement et les apports structurants envisagés doivent cependant s'accompagner d'une réflexion quant au cadre déontologique de la démarche, afin de garantir pleinement sa réussite. En particulier, la question de la confiance entre les acteurs pendant les séances de simulation est essentielle et doit faire l'objet d'une

attention particulière (pour faciliter la révélation des savoir-faire de prudence, mettre en débat les conflits potentiels entre le prescrit et la réalité des situations d'exposition, voire discuter des transgressions aux règles de sécurité, etc.).

Si l'usage de la simulation pour prévenir les risques industriels (dans le nucléaire ou l'aviation par exemple) a déjà fait l'objet de nombreux développements (simulateurs pleine échelle, formation, etc.) pour répondre à l'enjeu de sûreté des entreprises, son usage dans le champ de la prévention des risques professionnels, visant plus spécifiquement la sécurité et la santé des salariés, s'avère peu développé à ce jour. Engager des expérimentations dans ce sens, dans l'objectif d'en évaluer la pertinence et l'efficacité, constitue un enjeu actuel de développement du champ de la prévention des risques professionnels en particulier, de la promotion de la santé et de la sécurité au travail en général. ●

1. Cf. Code du travail, article L. 4121-2 et suivants.

2. La Circulaire DRT n°6 du 18 avril 2002 rappelle que, dans le cadre de toute démarche d'évaluation des risques professionnels : « les travailleurs eux-mêmes apportent une contribution indispensable, sachant qu'ils disposent des connaissances et de l'expérience de leur propre situation de travail et des risques qu'elle engendre ».

BIBLIOGRAPHIE

[1] VAN BELLEGHEM L. – *Simulation technique et organisationnelle*. In : BRANGIER E., VALLERY G. (dir.) – *Ergonomie : 150 notions clés*. Dunod, 2021, pp. 466-469.

[2] CLOT Y. ET AL. – *Le prix du travail bien fait : La coopération conflictuelle dans les organisations*. La Découverte, 2021. Accessible sur : <https://doi.org/10.3917/dec.clot.2021.01>

[3] BEGUIN P., WEILL-FASSINA A. – *De la simulation des situations de travail à la situation de simulation*. In : BEGUIN P., WEILL-FASSINA A. (dir.) – *La simulation en ergonomie : connaître, agir, interagir*. Octarès, 1997, pp. 5-28.

[4] VAN BELLEGHEM L. – *Simulation organisationnelle : innovation ergonomique pour innovation sociale*. In : DESSAIGNE M.-F., PUEYO V., BEGUIN P. (dir.) – *Innovation et travail : sens et valeurs du changement*. Actes du 42^e Congrès de la Self, Lyon, 5-7 septembre 2012.

[5] LÉON X., VAN BELLEGHEM L. – Quand la réflexivité s'invite dans un dispositif de simulation. *Éducation et socialisation*, 2023, 68 [En ligne]. Accessible sur : <http://journals.openedition.org/edso/24014> DOI : <https://doi.org/10.4000/edso.24014>

[6] CIRCULAIRE DRT (direction des relations du travail) n°6 du 18 avril 2002. Accessible sur : www.legifrance.gouv.fr

[7] BEGUIN P. – Innovation et cadre sociocognitif des interactions concepteurs-opérateurs : Une approche développementale. *Le travail humain*, 2007, 70 (4), pp. 369-390.

[8] PLANÇON G., CHOUIKHA E., VAN BELLEGHEM L. – « Chahuter le projet par le travail » : un dispositif de contribution au changement à la SNCF. In : *Vulnérabilités et risques émergents : penser et agir ensemble pour transformer durablement*. Actes du 56^e Congrès de la Self, Genève, 6-8 juillet 2022.

[9] CRU D. – *Les savoir-faire de prudence : un enjeu pour la prévention. Consignes formelles et pratiques informelles de sécurité*. In : THEBAUD-MONY A. (dir.) – *Les risques du travail : pour ne pas perdre sa vie à la gagner*. La Découverte, 2015, pp. 423-426. Accessible sur : <https://doi.org/10.3917/dec.theba.2015.01.0423>

[10] BOURGEOIS F., VAN BELLEGHEM L. – *Avec l'approche travail dans l'évaluation des risques professionnels (décret du 5/11/01), enfin du nouveau en prévention*. In : HUBAULT F. (dir.) – *Travailler, une expérience quotidienne du risque*. Octarès, 2004.

[11] BESNARD D. ET AL. – La culture de sécurité. Comprendre pour agir. *Les Cahiers de la sécurité industrielle (Institut pour une culture de sécurité industrielle)*, 2017, 01. Accessible sur : https://www.icsi-eu.org/sites/default/files/2020-07/lcsi_cahier_FR_culture-securite_2017.pdf

[12] VAN BELLEGHEM L. – La convocation de l'activité : une méthode d'analyse au service de la discussion. *Le travail humain*, 2016, 79 (3), pp. 285-306.

[13] GARRIGOU A. – *Les apports des confrontations d'orientations socio-cognitives au sein de processus de conception participatifs*. Paris, Cnam, 1992, Thèse de doctorat en ergonomie.

[14] PETIT J. – *Intervenir sur l'organisation. Concevoir des dispositifs de régulation pour un travail plus démocratique*. Université de Bordeaux, École doctorale Société, politique, santé publique, 2020, Habilitation à diriger des recherches en ergonomie.

Actualité juridique

RECONNAISSANCE DE LA FAUTE INEXCUSABLE DE L'EMPLOYEUR POUR MANQUEMENT AUX RÈGLES DE CIRCULATION EN ENTREPRISE

Cour de cassation, deuxième chambre civile, 1^{er} juin 2023, n°21-25861.

Accessible sur : <https://www.courdecassation.fr/decision/64783971bf7113d0f86f712b>

PÔLE
INFORMATION
JURIDIQUE
INRS,
département
Études, veille
et assistance
documentaires

Les faits

Dans l'affaire soumise aux magistrats de la Cour de cassation le 1^{er} juin 2023, le litige concernait un chef d'équipe logistique, blessé après avoir heurté un transpalette. S'agissant d'un accident survenu sur le lieu de travail, pendant les heures de travail, l'accident a été pris en charge, au titre de la législation professionnelle, par la caisse primaire d'assurance maladie (CPAM).

Suite à cet accident du travail, la victime a saisi une juridiction chargée du contentieux de la Sécurité sociale en reconnaissance de la faute inexcusable de son employeur, considérant que son employeur avait manqué à l'obligation légale de sécurité et de protection de la santé à laquelle il est tenu envers son salarié.

Décision des juges du fond (première instance et cour d'appel)

La cour d'appel a rejeté son recours et écarté la faute inexcusable de l'employeur, aux motifs que l'accident n'avait pas eu de témoins. De plus, aucune pièce n'établissait que le transpalette heurté se serait trouvé à un endroit où il n'aurait pas dû être ni, *a fortiori*, que cette situation serait due à l'absence de marquage au sol des zones de circulation, de stockage et de stationnement.

Le salarié victime de l'accident conteste cette décision en rappelant que « *l'employeur est tenu de mettre en œuvre, au regard des dispositions réglementaires applicables, des dispositifs de protection suffisants, la réglementation sur la sécurité des lieux de travail, les accès et voies de circulation, les quais et rampes de chargement* ».

Conformément aux dispositions réglementaires (articles R. 4224-3, R. 4214-11¹ et R. 4214-18 du Code du travail), l'employeur doit en effet mettre en évidence :

- un marquage au sol des voies de circulation, dès que l'importance de la circulation des véhicules ou le danger lié à l'utilisation et à l'équipement des locaux le justifie ;
- un plan de circulation ;
- une délimitation des zones de stockage et de stationnement.

Décision de la Cour de cassation

La Cour de cassation infirme la décision de la cour d'appel et rappelle que le manquement à l'obligation légale de sécurité et de protection de la santé, à laquelle l'employeur est tenu envers le travailleur, a le caractère d'une faute inexcusable lorsque l'employeur avait ou aurait dû avoir conscience du danger auquel était soumis le travailleur et qu'il n'a pas pris les mesures nécessaires pour l'en préserver.

Les juges d'appel auraient dû rechercher et vérifier si l'employeur avait bien mis en œuvre des mesures d'identification et de prévention des risques liés à l'exécution de travaux avec des machines, dans des zones de chargement et notamment un plan de circulation, avec une délimitation des zones de stockage et de stationnement, par marquage au sol. Cet arrêt est ainsi l'occasion de rappeler que la circulation au sein d'une entreprise, que ce soit en tant que piétons ou conducteurs d'engin, présente de nombreux risques d'accidents pour les salariés, liés au heurt d'une personne par un véhicule ou un engin (voiture, camion, chariot de manutention...)

ou bien à la collision de véhicules entre eux, ou contre un obstacle, au sein de l'entreprise. Ce sont des risques dont les conséquences peuvent être graves, en raison notamment de la vitesse impliquée. À ce titre, le Code du travail prévoit diverses règles de circulation destinées à prévenir les différents risques en résultant, en agissant soit sur la conception des locaux, soit sur l'organisation du travail en entreprise.

La réglementation applicable en matière de prévention des risques liés aux déplacements

De nombreux déplacements sont quotidiennement effectués par les travailleurs au sein d'une entreprise, en tant que piétons ou conducteurs d'engins, que ce soit pour entrer ou sortir de l'entreprise, transporter des marchandises, etc.

Les risques d'accident sont de ce fait nombreux (chute de plain-pied, accident entre un piéton et un véhicule ou une machine, entre véhicules) et peuvent ainsi être à l'origine notamment de blessures, tel que cela était le cas dans l'affaire commentée.

Au-delà des principes généraux de prévention et de la démarche de prévention qui doit être mise en place au sein de toute entreprise (évaluation des risques, identification et recensement des risques, transcription des résultats dans le document unique d'évaluation des risques), le Code du travail prévoit un certain nombre de dispositions spécifiques concernant la circulation en entreprise. La mise en place de ces dispositions ne pourra être opérationnelle que si les salariés sont correctement formés. Il convient donc en complément de :

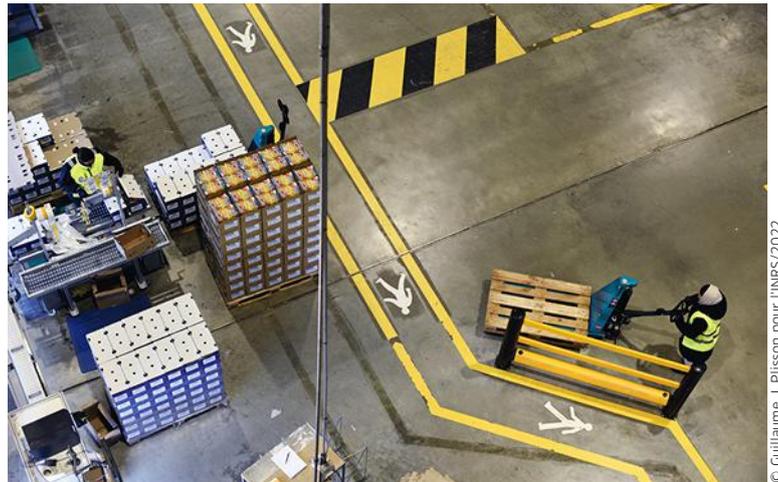
- mettre en œuvre des formations adaptées et recyclées périodiquement pour le personnel amené à conduire des engins de manutention ou de levage ;
- sensibiliser le personnel aux risques et aux règles de sécurité liés à la circulation sur le site.

L'aménagement des lieux de travail intérieurs et extérieurs

Ainsi, conformément aux dispositions des articles R. 4224-3 et R. 4224-4 du Code du travail, les lieux de travail intérieurs et extérieurs doivent être aménagés de telle façon que la circulation des piétons et des véhicules puisse se faire de manière sûre. L'employeur doit prendre toutes les dispositions pour que seuls les travailleurs autorisés à cet effet puissent accéder aux zones de danger, ainsi que toutes les mesures appropriées pour les protéger.

La conception des voies de circulation et des accès²

Les voies de circulation ainsi que les quais de déchargement doivent être conçus de telle sorte que :



© Guillaume J. Plisson pour l'INRS/2022

- les piétons ou les véhicules puissent les utiliser facilement, en toute sécurité, conformément à leur affectation ;
- les travailleurs employés à proximité des voies de circulation n'encourent aucun danger.

L'implantation et les dimensions de ces voies de circulation, y compris les escaliers et les échelles fixes, doivent être déterminées en tenant compte des dispositions prévues par le Code du travail relatives à la prévention des incendies et l'évacuation.

Les articles R. 4214-9 à R. 4214-12 s'appliquent également aux voies de circulation principales sur le terrain de l'entreprise, ainsi qu'aux voies de circulation utilisées pour la surveillance et l'entretien régulier des installations de l'entreprise³.

La situation des portes et dégagements⁴

Les portes et les dégagements destinés aux piétons sont situés, par rapport aux voies de circulation destinées aux véhicules, à une distance telle qu'elle garantisse aux piétons une circulation sans danger.

À proximité des portails destinés essentiellement à la circulation des véhicules, des portes pour les piétons sont aménagées, signalées de manière bien visible et dégagées en permanence.

Le marquage au sol des voies de circulation⁵

Dès que l'importance de la circulation des véhicules ou le danger lié à l'utilisation et à l'équipement des locaux le justifie, le marquage au sol des voies de circulation est mis en évidence.

Ce marquage obéit à la réglementation en vigueur relative à la signalisation dans les lieux de travail.

La mise en œuvre d'une signalisation de sécurité⁶

La mise en œuvre d'une signalisation de sécurité s'impose toutes les fois que, sur un lieu de travail, un risque ne peut pas être évité ou prévenu par l'existence d'une protection collective ou par l'organisation du travail.



Le nombre et l'emplacement des moyens ou des dispositifs de signalisation à mettre en place sont fonction de l'importance des risques ou dangers ou de la zone à couvrir, et sont déterminés après consultation du CSE.

Lorsque la nature des activités envisagées est susceptible d'entraîner sur les lieux de travail des zones de danger qui n'ont pu être évitées, ces zones doivent être signalées de manière visible et matérialisées par des dispositifs destinés à éviter que les travailleurs non autorisés y pénètrent.

À titre d'exemples, diverses mesures de prévention peuvent être mises en place :

- indiquer par des panneaux de signalisation les sens de circulation et notamment les sens uniques, priorités, etc. ;
- signaler les zones d'attente, les lieux d'accueil, les chemins d'accès pour les transporteurs d'entreprises extérieures ;
- mettre en place des panneaux et dispositifs de signalisation/limitation de vitesse des engins (limiteurs de vitesse, signalétique, ralentisseurs, etc.) ;
- aménager et signaler les zones de croisement ;
- établir des procédures et les moyens associés en cas de neige ou de verglas.

Les escaliers, ascenseurs et monte-charge⁷

Dans un bâtiment destiné à accueillir des travailleurs, lors de l'installation d'escaliers mécaniques, de trottoirs roulants, d'ascenseurs, de monte-charges, de parage de véhicules et d'élevateurs de personnes dont la vitesse n'excède pas 0,15 m/s, le maître d'ouvrage doit s'assurer que ces équipements sont :

- conçus et mis en place conformément aux règles en vigueur ;
- installés de manière à permettre les interventions de vérification, de maintenance, de contrôle technique, ainsi que les travaux de réparation et de transformation⁸ dans des conditions sûres, ergonomiques et préservant la santé des intervenants.

Les quais et rampes de chargement⁹

La conception des quais et rampes de chargement est également réglementée. Les quais de chargement extérieurs de l'entreprise doivent être conçus afin que les travailleurs employés à proximité n'encourent aucun danger. Ils doivent être disposés et adaptés aux dimensions des charges susceptibles d'y être transportées et être aménagés de manière à éviter les risques de chute pour les travailleurs.

Enfin, les quais de chargement doivent comporter au moins une issue. Lorsque leur longueur est supérieure à 20 mètres, ils doivent présenter une issue à chaque extrémité.

L'éclairage

Les articles R. 4223-1 et suivants prévoient des dispositions spécifiques relatives à l'éclairage et à l'éclaircissement, applicables notamment aux locaux de travail, passages et escaliers, ainsi qu'aux zones et voies de circulation extérieures empruntées de façon habituelle pendant les heures de travail.

L'employeur doit notamment veiller à un éclairage suffisamment puissant mais non éblouissant, pour que les salariés puissent voir les dangers lorsqu'ils circulent dans l'entreprise. Il doit veiller à la qualité des équipements en surveillant l'éclairage, l'état des sols, la visibilité des marquages au sol.

Les équipements de travail mobiles¹⁰

Des dispositions particulières sont également prévues lorsque des équipements de travail mobiles évoluent dans une zone de travail. L'employeur doit alors établir des règles de circulation adéquates et veiller à leur bonne application.

Les voies de circulation empruntées par de tels équipements doivent avoir un gabarit suffisant et présenter un profil permettant leur déplacement sans risque, à la vitesse prévue par la notice d'instructions, et doivent être maintenues libres de tout obstacle.

Des mesures d'organisation doivent être prises pour éviter que les travailleurs à pied ne se trouvent dans la zone d'évolution des équipements de travail mobiles. Lorsque leur présence est néanmoins requise pour la bonne exécution des travaux, des mesures doivent être prises pour éviter qu'ils ne soient blessés par ces équipements.

Les équipements de travail mobiles munis d'un moteur à combustion ne peuvent être introduits et employés dans les zones de travail, que si un air ne présentant pas de risques pour la santé et la sécurité des travailleurs est garanti dans ces zones, et en quantité suffisante.

La présence des travailleurs sur des équipements de travail mobiles mus mécaniquement n'est autorisée que sur des emplacements sûrs et aménagés à cet effet. Si des travaux doivent être accomplis pendant le déplacement, la vitesse doit être adaptée. ●

1. Cet article précise que dès que l'importance de la circulation des véhicules ou le danger lié à l'utilisation et à l'équipement des locaux le justifie, le marquage au sol des voies de circulation est mis en évidence. Ce marquage obéit à la réglementation en vigueur relative à la signalisation dans les lieux de travail.

2. Article R. 4214-9 du Code du travail.

3. Article R. 4214-13 du Code du travail.

4. Articles R. 4214-10 et R. 4214-12 du Code du travail.

5. Article R. 4214-11 du Code du travail.

6. Article R. 4214-14 du Code du travail.

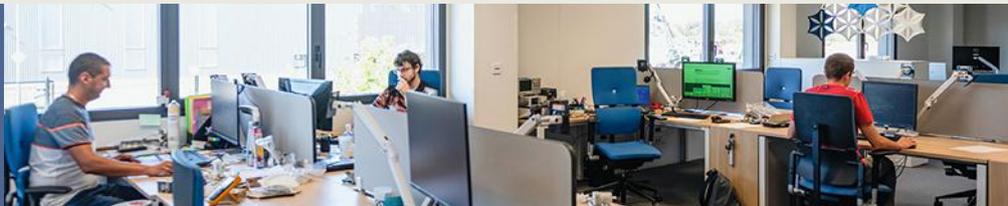
7. Articles R. 4214-15 et R. 4214-16 du Code du travail.

8. Travaux énumérés à l'article R. 4543-1 du Code du travail.

9. Articles R. 4214-18 à R. 4214-21 du Code du travail.

10. Articles R. 4323-51 à R. 4323-54 du Code du travail.

Participez à la recherche



Open space

→ Étude sur la conception et l'aménagement des bureaux ouverts

Votre entreprise...

- dispose d'un ou plusieurs espaces de bureaux ouverts ou *open spaces*, dans lesquels travaillent plus de cinq collaborateurs. Ces espaces sont utilisés en poste fixe ou en mode *flex office*. Ils accueillent des activités de tout type : centre d'appels, activité collaborative, administration, accueil du public, etc.

L'INRS a besoin de vous pour évaluer la perception qu'ont les salariés de leur environnement physique de travail (bruit, lumière, température, etc.). Cette caractérisation sera effectuée en réalisant des relevés des paramètres physiques de l'espace de travail et en interrogeant les salariés sur leur perception de cet environnement (gêne, fatigue).

> Quels sont les objectifs de cette étude ?

Cette étude vise à collecter des données de terrain pour établir des liens entre les paramètres physiques mesurés et le ressenti des salariés. À terme, l'exploitation de ces données doit permettre de faire des recommandations sur la conception et l'aménagement des *open spaces* en matière de prévention des risques professionnels et d'amélioration des conditions de travail.

> Comment se déroulera l'étude ?

Les personnes en charge de l'étude rencontreront les entreprises souhaitant participer, afin de présenter précisément le protocole d'intervention.

Puis, avec l'accord de l'entreprise et des salariés concernés, l'étude se déroulera en trois étapes :

- des mesures acoustiques du local à vide (en l'absence des salariés) sur une durée de 2 à 3 heures. Ces mesures peuvent être effectuées le matin ou le soir selon la préférence de l'entreprise;
- des mesures de l'ambiance physique (bruit ambiant, luminosité, température, hygrométrie) pendant une journée de travail normale;
- le déploiement d'un questionnaire à renseigner par les salariés (durée de 10 minutes environ) : format numérique ou papier en fonction du contexte.

L'intervention sera réalisée de façon à ne pas perturber l'activité de l'entreprise. Les données recueillies vont permettre de faire progresser les connaissances sur l'aménagement des bureaux ouverts dans le but de réduire les risques liés aux effets extra-auditifs du bruit : fatigue mentale, stress, perte de sommeil, etc. Ces données seront anonymisées et banalisées avant traitement.

Les résultats des mesures, le détail de leur analyse, ainsi que des conseils de prévention adaptés à chaque situation évaluée pourront être communiqués à l'entreprise *via* un rapport de synthèse.

Une réunion de restitution pourra également être organisée, si l'entreprise le souhaite.



Vous souhaitez participer ?

Contactez Laurent Brocolini ou Lucas Lenne,
département Ingénierie des équipements de travail
03 83 50 20 35 ou laurent.brocolini@inrs.fr
ou lucas.lenne@inrs.fr
INRS, rue du Morvan, CS 60027,
54519 Vandœuvre-lès-Nancy Cedex.

Focus normalisation

LE NOUVEAU RÈGLEMENT SUR LA SÉCURITÉ DES PRODUITS

Avec effet au 13 décembre 2024, le Règlement sur la sécurité des produits (UE) 2023/988 du 10 mai 2023 abrogera l'actuelle directive 2001/95/CE sur la sécurité des produits. En tant que règlement, il est directement applicable dans tous les États membres, sans devoir être transposé dans le droit national.

THE NEW REGULATION ON PRODUCT SAFETY – As of 13 December 2024, the Product Safety Regulation (EU) 2023/988 of 10 May 2023 will replace the existing Product Safety Directive 2001/95/EC. As a regulation, it applies directly in all Member States without having to be transposed into national law.

PHILIPP REUSCH
Avocat,
cabinet
Reuschlaw

Le Règlement sur la sécurité générale des produits (RSGP)¹ repose sur le « nouveau cadre juridique », qui se compose du Règlement (CE) 765/2008, de la Décision 768/2008 et du Règlement (UE) 2019/1020 et qui harmonise la surveillance du marché, l'accréditation, l'évaluation de conformité et le marquage CE pour les produits. Bien que le dispositif se soit notablement étoffé de définitions, de procédures et de catalogue d'obligations, le droit européen en matière de sécurité des produits est, dans son essence, resté inchangé.

Champ d'application, définitions et obligation générale de sécurité

Même si, à première vue, l'article 2 du RSGP peut sembler différent, le champ d'application n'a pas changé. L'objectif déclaré reste d'assurer un niveau élevé de protection des consommateurs et de réaliser un marché intérieur sans frontières. On voit toutefois apparaître pour la première fois la définition de notions telles que « *risque* », « *importateur* » et « *prestataire de services d'exécution des commandes* », notions qui sont ancrées depuis longtemps dans la législation européenne sur les produits. Les définitions de divers termes relatifs à la normalisation, tels que « *norme européenne* » et « *organisation européenne de normalisation* » ont été également ajoutées. Renvoyant aux définitions du Règlement européen sur la normalisation, elles apportent ainsi davantage de clarté dans l'application. Contrairement à ce qui était le cas jusqu'à présent, tous les opérateurs économiques sont désormais explicitement tenus de ne mettre sur

le marché, ou de ne mettre à disposition sur le marché, que des produits sûrs. Comme par le passé, est défini comme « produit » tout élément destiné aux consommateurs ou qui est susceptible, dans des conditions raisonnablement prévisibles, d'être utilisé par ces derniers.

Évaluation de la sécurité des produits

Bien que la procédure d'évaluation de la sécurité des produits n'ait pas essentiellement changé, les nouveaux articles 6 à 8 du RSGP la réglementent de manière beaucoup plus détaillée. Le premier élément déterminant est la présomption de conformité visée à l'article 7, paragraphe 1. Selon cette disposition, un produit est considéré comme sûr s'il est conforme aux normes européennes pertinentes, dont les références ont été publiées au *Journal officiel de l'UE*, ou, en l'absence de telles normes, s'il est conforme aux exigences légales nationales, pour autant que celles-ci ne soient pas contraires au droit européen. Pour des raisons d'harmonisation, la Commission européenne est habilitée à déterminer, au moyen d'actes d'exécution, quelles exigences spécifiques de sécurité doivent être couvertes par des normes européennes. L'article 6 énumère en outre une quantité d'aspects à prendre en compte dans la procédure d'évaluation, notamment les caractéristiques de cybersécurité dont doit être doté un produit pour être protégé contre les influences extérieures. S'ajoutent encore les fonctionnalités évolutives, d'apprentissage et prédictives du produit, par lesquelles on entend l'intelligence artificielle. Et enfin, si la présomption de conformité ne s'applique pas,

KAN Brief
COMMISSION ARBEITSSCHUTZ UND NORMUNG

Cet article est issu du bulletin d'information KAN Brief n° 4/23 (consultable sur : www.kan.de/fr) de la *Kommission Arbeitsschutz und Normung* (KAN). The English version of this article is accessible at www.kan.de/en

il est toujours possible, conformément à l'article 8, de prendre en compte des normes et standards subordonnés aux lois.

Obligations des opérateurs économiques

Ne serait-ce que par son volume, le chapitre III du RSGP témoigne du fait que le législateur européen tenait à une réglementation exhaustive. Comme par le passé, les obligations légales en matière de sécurité des produits sont définies en fonction de la proximité qu'a l'opérateur économique avec le produit. Logiquement, c'est d'abord au fabricant d'un produit que s'adressent les obligations. Mais quiconque commercialise un produit sous son propre nom ou sa propre marque est aussi considéré comme fabricant. Pour la première fois, il est expressément précisé que toute personne qui modifie un produit de manière substantielle est également considérée comme fabricant, une définition de ce qu'est une modification substantielle étant en même temps fournie.

La figure du mandataire, qui apparaît déjà dans le Règlement sur la surveillance du marché, est également réglementée ; son rôle est toutefois modifié par des obligations supplémentaires, notamment celle de vérifier la documentation technique.

Le fabricant doit notifier aux autorités compétentes tout accident provoqué par l'un de ses produits. Les importateurs et distributeurs doivent faire remonter au fabricant toute information de cette nature. Tous les opérateurs économiques doivent veiller à disposer de processus internes leur permettant de se conformer aux exigences pertinentes du Règlement (article 14). Pour certains produits et catégories de produits, la Commission peut mettre en place un système de traçabilité dans lequel doivent être collectées des données « permettant d'identifier le produit, ses composants ou les opérateurs économiques intervenant dans sa chaîne d'approvisionnement ». Ces obligations internes en matière d'évaluation de la conformité existaient déjà auparavant, mais elles n'étaient pas placées au premier plan de la surveillance du marché. Ceci renforce l'impression que le législateur européen s'intéresse de plus en plus non seulement à la conformité des produits, mais aussi à celle des systèmes.

Vente à distance, places de marché en ligne

Quiconque propose un produit à la vente à distance doit fournir les coordonnées du fabricant ou du responsable du produit, une image du produit et tout avertissement ou information concernant sa sécurité. À l'article 22 du RSGP, 12 paragraphes définissent de manière détaillée les nouvelles obligations des fournisseurs de places de marché en ligne. Il s'agit notamment de la désignation d'un point de contact unique pour les autorités de surveillance du marché et les consommateurs,

et de règles relatives aux injonctions des autorités publiques, aux rappels de produits et aux obligations de coopération.

Surveillance du marché

La surveillance du marché est régie par le Règlement (UE) 2019/1020, dont certaines parties sont déclarées applicables. Les États membres continuent de notifier les produits dangereux par le biais du système d'alerte rapide *Safety Gate* (ancien RAPEX). Parallèlement, le point d'accès *Safety Business Gateway* est mis en place. Il a été conçu pour permettre une communication simplifiée, d'un côté entre les opérateurs économiques et les exploitants des places de marché en ligne, et de l'autre, entre les autorités de surveillance du marché et les consommateurs.

Remarques finales

La coopération des autorités de surveillance entre elles au niveau européen et avec la Commission se trouvera renforcée par ces nouvelles dispositions. Un réseau dédié à la sécurité des consommateurs sera mis en place pour assurer la communication et la coordination avec les autorités. De plus, des actions de contrôle coordonnées sont prévues pour certains produits ou catégories de produits. En cas de risques pour la santé et la sécurité des consommateurs découlant d'un produit, la Commission peut aussi, de sa propre initiative ou à l'initiative d'un État membre, prendre des mesures pouvant aller jusqu'à l'interdiction de mise sur le marché, et ce sous forme d'actes d'exécution. ●

1. Voir : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX:32023R0988>

Dans un atelier de chaudronnerie, traitement anticorrosion d'une pièce, manipulée sous sorbonne pour assurer la sécurité de l'opérateur.



© Patrick Delapierre pour l'INRS/2023

Focus normalisation

DES ORGANISMES DE SANTÉ ET SÉCURITÉ AU TRAVAIL DE PLUSIEURS PAYS ADOPTENT UNE POSITION COMMUNE SUR LA NORMALISATION

En 2014, les organismes français Eurogip et INRS, ainsi que la KAN, adoptaient une « Déclaration commune sur la politique de normalisation dans le domaine de la sécurité et santé au travail ». Elle portait sur des sujets émergents à l'époque, comme le rôle des nouveaux documents de normalisation, ou encore la normalisation dans les domaines des services ou des systèmes de management. Cette déclaration vient d'être mise à jour et enrichie.

COMMON POSITION ON STANDARDISATION ADOPTED BY OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ORGANISATIONS FROM SEVERAL COUNTRIES – In 2014, the French organisations Eurogip and INRS, as well as the German body KAN, initiated and adopted a “common declaration on standardisation policy in the field of occupational safety and health”. It covered topics emerging at that time, such as the role of new standardisation documents, and standardisation in the area of services and management systems. This declaration has been brought up to date and enhanced.

FREERIC
MEIER
KAN



Cet article est issu du bulletin d'information KANBrief n° 4/23 (consultable sur : www.kan.de/fr) de la *Kommission Arbeitsschutz und Normung* (KAN). The English version of this article is accessible at www.kan.de/en

Adoptée conjointement il y a dix ans sous le nom de « Déclaration de Bonn », ce document de position traite de sujets d'actualité de la santé et de la sécurité au travail (SST) dans la normalisation européenne. En 2016, l'institut polonais de SST (CIOP-PIB) a, lui aussi, adhéré à la déclaration. Au fil des années qui ont suivi cette adoption, de nombreux sujets inédits sont apparus dans la normalisation. Les institutions signataires ont donc entamé un processus de révision, afin de mettre le document à jour et de le compléter par des aspects nouveaux qui ont aujourd'hui – et auront à l'avenir – un impact déterminant sur le travail de normalisation.

Un autre objectif était d'inciter d'autres institutions européennes de SST à adhérer également à la déclaration. Une invitation allant dans ce sens a été communiquée à d'autres organismes par le biais du réseau Euroshnet¹. Les premiers projets du nouveau document ont suscité un écho positif,

qui a conduit l'INSST (Espagne) et le FIOH (Finlande) à participer également à la mise à jour.

La déclaration actualisée et complétée

La position sur certains sujets qui figuraient déjà dans la première déclaration a été adaptée aux avancées de ces dernières années, concernant notamment la normalisation des produits, les documents assimilés à des normes et la normalisation relative à l'organisation de la prévention en entreprise. À propos de la normalisation des produits, les institutions signataires demandent que le niveau de protection européen soit maintenu lorsque des normes internationales ISO et CEI sont adoptées comme normes harmonisées. Elles approuvent sur le fond le système des « HAS Consultants », qui vérifient la conformité des normes harmonisées avec la législation de l'Union européenne ; elles estiment toutefois que, une fois vérifiées, les normes harmonisées devraient être listées plus rapidement au *Journal officiel de l'Union européenne (JOUE)*.



Les documents assimilés à des normes, tels que les CWA, les IWA et les PAS², ne se prêtent pas à la réglementation d'aspects relatifs à la SST. Pour les distinguer des normes à part entière, ces formes de documents devraient en outre être clairement identifiées. Les spécifications techniques (TS) peuvent être utilisées pour les projets devant être réalisés dans un délai très court, tandis que les rapports techniques (TR) se prêtent aux projets dont le contenu en matière de SST est de nature purement informative. La déclaration commune met l'accent sur la différence du rôle des normes, d'une part, pour la sécurité des produits et, d'autre part, pour l'organisation de la prévention en entreprise. Concernant cette dernière, il est demandé aux organismes de normalisation d'évaluer en amont les projets de normalisation et d'élaborer les normes dans ce domaine, uniquement si elles améliorent réellement la sécurité et la santé au travail et n'entrent pas en conflit avec les réglementations nationales.

Des aspects nouveaux : la numérisation, l'intelligence artificielle, la stratégie de normalisation

Certains aspects totalement nouveaux ont été ajoutés à la déclaration. L'un des effets de la numérisation dans le monde de la normalisation est le fait que de nombreuses réunions se tiennent désormais sous forme virtuelle, ce qui présente l'avantage d'une plus vaste participation et d'une diminution des déplacements. Il est toutefois précisé dans la déclaration que le contact personnel au sein des

comités de normalisation reste important pour la recherche d'un consensus, et qu'il ne faut donc pas renoncer totalement aux réunions en présentiel.

La normalisation dans le domaine de l'intelligence artificielle (IA) représente aussi un défi pour la SST. Pour que la standardisation des technologies de l'IA soit une réussite, la manière dont les questions relatives à la SST sont abordées dans les normes est essentielle. Il est ici important que les préventeurs soient fortement impliqués dans les processus de normalisation. De plus, les normes relatives à l'IA doivent être compatibles avec les méthodes d'évaluation des risques utilisées dans le domaine de la sécurité des produits et de la SST.

L'importance de la normalisation sur le plan politique est mise en évidence par des initiatives de la Commission européenne, telles que la Stratégie en matière de normalisation, publiée en 2022.

La Déclaration commune stipule que le travail de normalisation doit continuer à reposer sur le consensus et à suivre des principes démocratiques. Il est également important que toutes les parties prenantes en matière de SST soient suffisamment impliquées dans les processus de normalisation. Le texte de la Déclaration commune a été publié en décembre 2023 (en anglais)³. ●

1. Voir : <https://www.euroshnet.eu>

2. Sur les CWA et les PAS, voir notamment : <https://www.kan.de/fr/publications/kanbrief/la-qualite-des-normes/cwa-pas-co-pour-la-sst-un-consensus-de-seconde-classe-ne-suffit-pas>

3. Voir : <https://www.kan.de/fileadmin/Redaktion/Dokumente/Basisdokumente/en/EU/2023-Common-declaration-en.pdf>



Dossier

VIBRATIONS MAINS – BRAS : DE NOUVELLES CONNAISSANCES POUR LA PRÉVENTION

❶ Vibrations mains – bras : où en est-on ?
P. 22

❷ Émission vibratoire de meuleuses :
expériences et modèle
P. 26

❸ Évaluation des valeurs d'émission vibratoire
des cloeuses : un dispositif de substitution
peut-il remplacer les opérateurs humains ?
P. 29

❹ Vibrations transmises aux membres
supérieurs : estimation de l'exposition
des travailleurs à des chocs répétés
P. 33

❺ Les caractéristiques vibratoires
d'outils de redressement
et de formage activés par ultrasons
P. 37

❻ Étude préliminaire sur l'activation
et l'anisotropie du muscle dans la
modélisation des vibrations mains – bras
P. 41

❼ Modélisation de la sténose artérielle
induite par les vibrations transmises
à la main : un moyen de prévenir
le risque vibratoire vasculaire ?
P. 45

Les vibrations générées par certaines machines portatives ou guidées à la main peuvent être à l'origine d'affections au niveau des mains et des bras.

En France, près de deux millions de travailleurs seraient concernés, essentiellement dans les secteurs du bâtiment, de la construction mécanique, de la métallurgie, de la réparation automobile ou de l'entretien d'espaces verts.

L'exposition à ces vibrations n'est pas inévitable; des mesures de prévention adaptées permettent de réduire efficacement les risques.

Ce dossier propose d'évoquer les travaux les plus récents conduits pour enrichir ces démarches, à la faveur de la 15^e Conférence internationale consacrée aux vibrations du système main – bras, organisée par l'INRS en juin 2023.

Avec la mise en lumière de six communications, les articles abordent les questions liées aux niveaux d'émissions vibratoires, aux moyens de les évaluer concrètement et à la prévision de certains effets sur la santé, en cas d'exposition aiguë ou chronique.

HAND-ARM VIBRATION: NEW KNOWLEDGE FOR PREVENTION – *The vibration generated by certain portable hand-held or hand-guided machines can cause hand and arm disorders. In France, close to 2 million workers are concerned, mainly in the building, mechanical construction, metalworking, car repairs and green space maintenance sectors. Exposure to these types of vibration is not unavoidable; suitable prevention measures can effectively reduce the risks.*

This dossier describes the most recent work conducted to improve these measures, which was presented at the 15th international conference on hand-arm vibration, held by INRS in June 2023. Highlighting six presentations, these articles address the issues related to vibration levels, the means of assessing them in practical terms and the prevention of certain health effects in the event of acute or chronic exposure.

VIBRATIONS MAINS – BRAS : OÙ EN EST-ON ?

Les vibrations transmises aux membres supérieurs sont responsables de pathologies pouvant être invalidantes pour les salariés exposés. Ce sujet de santé au travail mobilise les équipes de l'INRS depuis plusieurs années; des outils ou méthodes ont vu le jour pour améliorer la prévention de ces nuisances physiques. Cet article propose une synthèse des échanges de la Conférence internationale sur les vibrations mains – bras organisée en juin 2023 et qui ont guidé l'élaboration de ce dossier.

**CHRISTOPHE NOËL,
JACQUES CHATILLON**
INRS,
département
Ingénierie des
équipements
de travail

L'exposition aux vibrations peut présenter des risques pour la santé des salariés. On distingue deux modes d'exposition : les vibrations transmises à l'ensemble du corps, notamment lors de la conduite d'engins, et les vibrations transmises aux membres supérieurs, lors de l'utilisation de machines portatives.

Dans de nombreux secteurs d'activité (bâtiment, construction mécanique, métallurgie ou entretien des espaces verts par exemple), les travailleurs utilisent quotidiennement des machines vibrantes, portatives (meuleuses, burineurs...) ou guidées à la main (pilonneuses à percussion, dameuses vibrantes...). Une utilisation régulière de ces machines vibrantes est susceptible de provoquer des pathologies d'ordre neurologique (sensations d'engourdissement et de picotements des doigts et des mains), vasculaire (syndrome de Raynaud) ou ostéoarticulaire (troubles des articulations du poignet et du coude)¹.

Afin de faire état des dernières connaissances dans le domaine des vibrations main – bras, une conférence scientifique est organisée tous les quatre ans, sous l'égide du Comité consultatif international sur les vibrations main – bras. L'INRS était chargé de l'organisation de la 15^e édition de la Conférence internationale sur les vibrations main – bras (Ichav), qui s'est tenue à Nancy du 6 au 9 juin 2023.

Près de cent participants, dont des universitaires, des chercheurs, des médecins du travail, des fabricants de machines, des métrologues, des chargés de prévention, ainsi que des membres de groupes de normalisation ou d'agences gouvernementales, ont assisté aux quatre journées d'échanges. Quinze pays étaient représentés (classés par ordre du nombre de leurs délégués) : France, Suède, Allemagne, Royaume-Uni, Italie, Canada, États-Unis d'Amérique, Belgique, Chine, Espagne, Nigéria, Norvège, Pays-Bas, Suisse, Taiwan. Quarante scientifiques de spécialités différentes ont pré-

senté les dernières avancées de leurs recherches dans les disciplines suivantes : physiologie, biologie, effets sur la santé, épidémiologie, réduction des vibrations sur la machine, modélisation numérique, biomécanique, métrologie, et évaluation de l'exposition aux vibrations.

Un atelier de travail était également consacré aux chocs mécaniques transmis à la main (en anglais, *hand transmitted mechanical shock* – HTS) qui peuvent être générés par de nombreuses machines courantes, telles que les pistolets à clous, les clés à chocs et les marteaux-piqueurs. Ces chocs produisent des vibrations à des fréquences plus élevées que celles actuellement prises en compte dans les normes internationales traitant de la mesure des vibrations ou abordant les effets des vibrations sur la santé. Peu de connaissances sont disponibles à ce jour pour expliquer et quantifier le risque sur la santé des travailleurs soumis à une exposition régulière à des chocs mécaniques ou des vibrations stationnaires hautes fréquences transmis à la main, ce qui justifiait en partie l'organisation de cette session dédiée.

À la faveur des échanges de la Conférence, dont une synthèse des points marquants est présentée dans le *Focus* (Cf. p. 24), trois questions essentielles ont guidé la construction de ce dossier et seront développées dans les pages qui suivent.

Comment connaître les niveaux d'exposition induits par les machines ?

La « quantité de vibrations » émise par une machine est appelée l'émission vibratoire. La connaissance de cette quantité, qui dépend à la fois de la machine et de son usage, devrait permettre de choisir, pour un usage donné, la machine la moins vibrante du marché, afin de réduire à la source l'exposition des salariés. De plus, cette valeur pourrait être utilisée pour évaluer approximativement l'exposition des travailleurs si, d'une part, le temps d'exposition aux vibrations est connu, et si,

d'autre part, le protocole expérimental de laboratoire suivi pour estimer l'exposition vibratoire associée à la machine n'est pas trop éloigné de sa situation réelle d'utilisation. Les fabricants sont tenus, de par la « directive Machines » (en cours de remplacement par le nouveau règlement européen²), de déclarer la valeur d'émission vibratoire de leur machine. Ils peuvent effectuer la mesure de cette valeur en utilisant un même code d'essai, s'il en existe un relatif à une même famille de machines, afin que toutes les valeurs des machines issues des différents fabricants, mesurées dans des conditions identiques, puissent être comparées équitablement. Ces codes d'essai sont souvent difficiles à mettre en œuvre, ce qui peut décourager les fabricants. Premier exemple : les meuleuses, dont la valeur d'émission vibratoire doit être mesurée *via* un dispositif expérimental un peu complexe, suspendant la meuleuse équipée d'un disque avec un balourd. Des méthodes alternatives, fondées sur la simulation numérique, peuvent être développées pour obtenir ces valeurs d'émission vibratoire (Cf. p. 26-28). Ces méthodes apportent beaucoup de souplesse et de puissance et méritent d'être encore développées. Deuxième exemple : la caractérisation des valeurs d'émissions de bruit et de vibrations des cloueuses. Des méthodes de caractérisation standardisées existent, mais nécessitent trois opérateurs humains formés, ce qui conduit à une dispersion des résultats et une mise en œuvre difficile. Un dispositif de substitution a été développé pour caractériser ces valeurs sans la participation d'opérateurs. Il est présenté dans un article de ce dossier (Cf. p. 29-32), avec la comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes.

Comment estimer précisément l'exposition des travailleurs quand on ne connaît pas leur activité exacte ? Comment l'estimer quand les doses sont consécutives à des chocs ?

L'estimation de l'exposition des travailleurs aux vibrations peut être effectuée par différentes méthodes, des plus simples (bases de données, outils simplifiés – tel l'outil OSEV développé par l'INRS et mis à disposition sur son site Internet³) aux plus compliquées (métrologie « normalisée »). Sur le terrain, des difficultés importantes peuvent se manifester. Premier exemple : la dose vibratoire reçue par un travailleur effectuant un ensemble discontinu de tâches l'exposant aux vibrations est souvent calculée sur la durée de la journée de travail (8 heures), en extrapolant à cette journée des observations effectuées pendant un temps de mesurage beaucoup plus court. Cette extrapolation s'effectue couramment en interrogeant le salarié et en se fiant à sa déclaration, ce qui peut conduire à des erreurs importantes. L'article sur l'estimation de l'exposition des travailleurs à

des chocs répétés (Cf. p. 33-36) montre qu'il est possible de réduire la source d'erreur liée à cette autodéclaration en se fiant à des indicateurs de production : combien de pièces ont été produites ? Quelle dose vibratoire induit la production d'une pièce ? L'étude réalisée sur le terrain, relatée dans l'article, met en évidence le fait que la réponse à ces deux questions amène à encadrer la valeur de l'exposition vibratoire quotidienne de manière beaucoup plus précise. Dans le cas de l'exposition des travailleurs à des chocs (et non pas à une excitation vibratoire « continue » comme celle générée par une machine portative rotative : perceuse, meuleuse...), son évaluation est délicate. Certains opérateurs, dans la construction navale par exemple, redressent des tôles avec des marteaux. Le cinquième article du dossier (Cf. p. 37-40) montre qu'en situation de travail, le fait de vouloir remplacer des outils vibrants par des outils moins vibrants nécessite d'évaluer précisément les gains vibratoires, et que cela repose sur une certaine expertise métrologique dans le cas de chocs.

Comment améliorer la connaissance des effets sur la santé des vibrations grâce à des outils numériques et de modélisation ?

Les effets sur la santé de l'exposition aux vibrations, même si certains sont décrits depuis de nombreuses années, peuvent être mieux connus à l'aide de différentes méthodes, notamment la simulation numérique couplée à des expérimentations en laboratoire validant les résultats des étapes de calcul. Par exemple, les efforts de serrage et de poussée ne sont pas pris en compte dans l'évaluation réglementaire de la dose vibratoire bien qu'ils soient susceptibles de contribuer au syndrome des vibrations main-bras. Pour mieux comprendre l'apparition des symptômes, le sixième article (Cf. p. 41-44) décrit l'utilisation d'un modèle de main basé sur la méthode des éléments finis, qui permettra à terme de simuler le comportement vibratoire de la main, en fonction du serrage et de la poussée. Par ailleurs, la dose vibratoire réglementaire protège insuffisamment les travailleurs au regard de pathologies vasculaires comme le syndrome de Raynaud d'origine vibratoire (maladie des doigts blancs). Ainsi, afin de mieux intégrer à terme ce risque vasculaire dans l'estimation de la dose vibratoire, l'INRS a construit une approche numérique en deux étapes (Cf. p. 45-48). Tout d'abord, une loi de régression a été établie entre l'amplitude de l'accélération de la vibration et la baisse induite des contraintes de cisaillement exercées par le sang sur les parois de l'artère. Ensuite, un modèle mécanobiologique a été développé pour simuler la sténose artérielle résultant de la réduction de ces contraintes de cisaillement. La sténose artérielle (rétrécissement du diamètre de



l'artère dû à une augmentation de l'épaisseur de ses parois) est une altération anatomique rencontrée à divers degrés chez les patients souffrant d'un syndrome de Raynaud d'origine vibratoire. ●

1. Les maladies professionnelles reconnues en lien avec ces troubles sont décrites aux tableaux n° 69 (du régime général) ou n° 29 (du régime agricole) de la Sécurité sociale. Voir : <https://www.inrs.fr/publications/bdd/mp.html>

2. Règlement (UE) 2023/1230 du Parlement européen et du Conseil du 14 juin 2023 sur les machines, abrogeant la directive 2006/42/CE du Parlement européen et du Conseil et la directive 73/361/CEE du Conseil; la Directive 2006/42/CE et le règlement vont « cohabiter » jusqu'à mi-2025.

Voir en particulier : Dossier – Machines : des acteurs au service de la prévention. Hygiène & sécurité du travail, 2023, 273, DO 42, pp. 18-44. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/publications/hst/dossier.html>

3. Voir : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=outil59>

POUR EN SAVOIR +

Les actes et le compte rendu de la Conférence sont accessibles sur : <https://www.inrs.fr/footer/actes-evenements/colloque-vibrations-mains-bras-2023.html>

FOCUS SUR...

Conférence internationale : synthèse des exposés présentés

Réponse physiologique

E. Ochsmann et al. (université de Lübeck, Allemagne) ont mené une étude pour savoir si une exposition à des chocs répétés de cadences variables (1, 4 ou 20 coups par seconde) pouvait induire des changements du seuil de perception vibratoire (VPT : *Vibration Perception Threshold*) et de la température cutanée des doigts. Les auteurs ont montré qu'une exposition à ces chocs produit des effets similaires à ceux provoqués par des vibrations stationnaires : une augmentation du VPT et une diminution de la température cutanée.

S. Gao et Y. Ye (université de Southampton, Royaume-Uni) ont analysé l'influence de la force de serrage sur le VPT. Ils ont montré que cette force de préhension influençait le VPT uniquement si l'intensité vibratoire était faible. Ainsi, pour les forts niveaux vibratoires, le serrage n'a pas d'influence sur la perception des vibrations.

La fréquence et l'amplitude des vibrations, ainsi que la pression exercée sur le bout des doigts lors de la préhension d'un outil, peuvent affecter les fonctions vasculaires et sensorielles. Or, de nombreuses interrogations demeurent sur la manière dont ces deux facteurs interagissent pour affecter le risque vibratoire. Ainsi, **K. Krajnak et al.** (Niosh, États-Unis) ont mené une étude sur des queues de rats pour examiner les effets des

vibrations et de la pression mécanique sur les fonctions vasculaires et neurologiques. Les auteurs ont prouvé que la pression mécanique provoque ses propres effets sur la physiologie vasculaire (augmentation du débit sanguin) et neurologique (sensibilité accrue des fibres nerveuses myélinisées aux stimulations électriques), en plus de ceux liés aux vibrations.

Réponse mécano-biologique

R. Dong et al. (Niosh, États-Unis) ont utilisé le même banc d'essai pour tester deux métriques supposées caractériser le risque vibratoire : une dose vibratoire basée sur la déformation mécanique et une autre basée sur la contrainte mécanique. Ces deux grandeurs sont issues de la théorie de la fatigue vibratoire.

C. Noël et al. (INRS, France) ont mis au point un modèle numérique couplant la mécanique des artères et la biologie vasculaire pour prédire la sténose artérielle induite par les vibrations.

Épidémiologie

Y. Sun et al. (IFA, Allemagne) ont exposé les résultats d'une étude cas-témoins pour identifier la relation exposition-réponse qui lie l'exposition aux vibrations main-bras et le risque de troubles musculosquelettiques (TMS) des extrémités supérieures (ostéoarthrose de la main, du coude, de l'épaule, maladie de Kienböck, ostéochondrose du coude, pseudarthrose du scaphoïde). Après ajustement des facteurs de confusion pertinents, des relations dose-réponse statistiquement significatives ont pu être établies entre les doses cumulées d'exposition aux vibrations main-bras et les TMS des membres supérieurs.

A. Turcot et al. (INSPQ, Canada) ont mis en évidence l'apparition de troubles vasculaires et neurologiques d'origine vibratoire chez les prothésistes dentaires et les dentistes, liés à l'utilisation de machines à très hautes fréquences (roulette et fraises, par exemple).



Conférence internationale INRS sur les vibrations mains – bras.

© Fabrice Dimier pour l'INRS/D23

Réduction des vibrations

O. Lundin et R. Hattel (Atlas Copco, Suède) ont démontré l'efficacité de certains matériaux élastomères pour réduire les vibrations émises par des clefs à chocs ou des burineurs, pour des fréquences supérieures à 1 000 Hz.

H. Lindell (Rise, Suède) a présenté un ensemble de solutions techniques pour réduire les vibrations émises par des marteaux-piqueurs pneumatiques, dans le secteur de la stabilisation des parois rocheuses (par exemple : pose de filets anti-éboulement). Trois systèmes de réduction des vibrations sont mis en œuvre : système ressort-amortisseur associé à un palan attaché au marteau-piqueur (le palan assure le contact entre la machine et la paroi à percer), poignées découplées par des ressorts spiralés, et dispositif spécial auto-ajusté d'absorption des vibrations (ATVA : *Auto-Tuning Vibration Absorber*) positionné sur le corps de la machine. Le niveau vibratoire de la machine équipée de ces trois systèmes est divisé environ par quatre par rapport à celui de la machine initiale.

Modélisation

P. Ottosson et al. (Rise, Suède) proposent un modèle des éléments finis 2D d'un doigt soumis à un choc. Le modèle prédit, en réaction à certains chocs, des pressions de l'ordre de 0,1 MPa, pouvant engendrer des phénomènes de cavitation fluide dans les tissus biologiques.

S. Vauthier et al. (INRS, France) ont simulé par éléments finis la propagation des vibrations dans une main serrant une poignée. La rigidité des muscles en fonction du serrage a été mesurée par une technique d'élastographie ultrasonore. Ce modèle prend en compte l'anisotropie des muscles de la main. L'activation musculaire a un effet prépondérant sur le transfert vibratoire entre la poignée vibrante et la main.

Q. Pierron (INRS, France) a établi des modèles numériques simplifiés des vibrations émises par les meuleuses électriques, dans le but de proposer à terme des alternatives aux tests normalisés d'émission vibratoire.

Réponse biomécanique

N. Raffler et T. Wilzopolski (IFA, Allemagne) ont étudié l'effet de la posture sur le niveau vibratoire et l'activité musculaire (mesurée par électromyographie). Les auteurs montrent que l'exposition aux vibrations reste inchangée quelle que soit la posture, mais que la charge musculaire est bien plus importante lorsque l'opérateur travaille vers le haut ou le bas, en comparaison avec une utilisation de la machine vers l'avant.

Effets sur la santé

T. Nilsson et al. (université d'Umeå, Suède) ont conduit une revue de littérature entre 1946 et 2020, qui a révélé une prévalence plus élevée de la maladie de Dupuytren chez les salariés exposés par rapport à ceux non exposés aux vibrations (le risque est doublé). Ces

auteurs ont également mené le même type d'analyse bibliographique pour l'arthrose de la main. Ils concluent qu'il n'est pas possible d'affirmer avec certitude que l'exposition à des machines vibrantes augmente de manière significative le risque d'arthrose de la main, quand celui-ci est évalué uniquement par radiographie.

H. Petterson et al. (université d'Umeå, Suède) ont comparé les données de la cohorte nationale suédoise sur le travail et la santé (*Swedish national cohort on work and health – Snow*) avec celles des infarctus. Les auteurs n'ont pas trouvé de lien entre l'exposition aux vibrations main-bras et l'infarctus du myocarde.

Mesure

M. Vincent et al. (École de technologie supérieure, Canada) ont présenté un banc d'essai automatique pour caractériser les valeurs d'émission vibratoire des cloueuses sans la participation des opérateurs humains prévus dans la méthode normalisée.

H. Lindell et al. (Rise, Suède) ont proposé des métriques mathématiques pour analyser les signaux de chocs comme ceux issus de clefs à chocs ou cloueuses, par exemple. Ces métriques servent de base aux comités de normalisation pour caractériser le choc d'un point de vue du traitement du signal.

F. Maître (Cramif, France) et **M. Amari** (INRS, France) ont décrit une méthode d'évaluation de la dose vibratoire quotidienne basée sur un comptage du nombre de chocs journaliers qui peuvent être estimés à partir des caractéristiques de production (nb de pièces fabriquées par exemple). Dans le domaine de la construction navale, **D. Aoustin** (Carsat Bretagne, France) a comparé la dose vibratoire reçue par un salarié utilisant des outils classiques dans ce secteur (marteau, burineur) à celle induite par des machines plus originales, conçues à partir d'une technologie ultrasonore.

Évaluation et contrôle de l'exposition

A. Delépine (INRS, France) a exposé le système de reconnaissance des maladies professionnelles en France, dans le cas particulier des vibrations main-bras.

R. Petitfour et al. (ACMS Île-de-France, France) ont décrit des exemples d'évaluation de la dose vibratoire dans les stations d'épuration des eaux usées et dans le service après-vente d'un vendeur de machines électroportatives, en utilisant l'outil Osev développé par l'INRS.

C. Petterson (Rise, Suède) a clôturé la conférence en présentant le projet « zéro blessure par vibration », qui vise à réduire le risque vibratoire en concevant des machines à faible émission vibratoire. L'originalité de ce projet est son approche holistique, pouvant conduire à la fabrication de machines moins vibrantes et impliquant la plupart des parties prenantes : les utilisateurs, les instances gouvernementales, les employeurs, les organisations patronales et syndicales, les fabricants de machines, les médecins du travail et les chercheurs en vibrations.

ÉMISSION VIBRATOIRE DE MEULEUSES : EXPÉRIENCES ET MODÈLE

Les fabricants de machines vibrantes doivent déclarer l'émission vibratoire de leur produit. Cette émission est évaluée *via* des codes d'essai qui sont parfois difficiles à mettre en œuvre. L'étude présentée ici montre, dans le cas des meuleuses, qu'un modèle numérique pourrait remplacer, dans certains cas, les essais expérimentaux et fournir une estimation assez réaliste de l'émission vibratoire.

QUENTIN
PIERRON
INRS,
département
Ingénierie des
équipements
de travail

Contexte

Les meuleuses électriques sont des outils vibrants susceptibles d'exposer les opérateurs à des doses de vibrations supérieures aux valeurs seuils réglementaires définies par le Code du travail (articles R. 4443-1 et R. 4443-2). Pour aider les entreprises à choisir des machines portatives moins vibrantes, les fabricants sont tenus de déclarer leur émission vibratoire. L'émission vibratoire est l'accélération efficace pondérée en fréquence a_{wv} , définie par la norme ISO 5349-1¹ (typiquement entre 3 et 8 m/s² pour les meuleuses [1-5]) et mesurée, pour les meuleuses, conformément au code d'essai EN 60745-2-3².

Une étude a été menée à l'INRS, avec l'objectif de développer et de valider un modèle simplifié qui calcule les accélérations d'une meuleuse lors d'un essai normalisé. À plus long terme, de tels modèles pourraient remplacer les codes d'essai. Ce modèle est fondé sur l'hypothèse que le maintien de la meuleuse n'a pas d'effet sur les vibrations de la machine [6-7]. Pour valider cette hypothèse, les résultats d'essais (les accélérations mesurées) ont été comparés avec ceux des calculs. En plus des essais normalisés durant lesquels un opérateur tient la meuleuse, des essais sans opérateur ont été effectués.

Expériences et mesures

Conformément au code d'essai EN 60745-2-3, les disques ont été fabriqués en aluminium et perforés de manière à créer le balourd (qui provoque des vibrations) préconisé par le texte normatif. Un câble fin en acier a été installé dans une poulie reliant la meuleuse à une masse, pour appliquer une force dirigée vers le haut et pour compenser le poids de la meuleuse. La meuleuse était tenue par un opérateur et lorsqu'elle était en marche,

le disque tournait librement, sans contact avec la matière à travailler. Trois opérateurs ont manipulé successivement la meuleuse et ont répété les essais trois fois. D'autres tests ont été effectués sans opérateur ; la meuleuse était simplement suspendue à un long ressort de 1930 N/m de raideur. La meuleuse testée était le modèle W12-125 Quick (de marque Metabo), pesant 2,4 kg et montée avec des disques de 125 mm de diamètre. Pour les essais, les accélérations ont été mesurées par au moins trois accéléromètres piézoélectriques triaxiaux PCB 356B21, collés sur la meuleuse à trois endroits suffisamment séparés. Les signaux de tension des accéléromètres ont été enregistrés numériquement par un frontal d'acquisition Dewesoft R2DB à une fréquence de 20000 Hz. Avant les essais, les positions respectives des accéléromètres ont été mesurées grâce à une cotation géométrique des meuleuses instrumentées, par le biais d'un scanner 3D (de marque Kréon).

Modèle numérique

Un modèle numérique a été développé en considérant le disque perforé et le corps de la meuleuse comme deux corps rigides reliés par une liaison pivot. Une vitesse de rotation constante ω a été supposée entre les deux corps rigides.

L'hypothèse principale de ce modèle était l'absence de force externe agissant sur la meuleuse : le poids comme les efforts de maintien. Les équations de la dynamique ont fourni un système de six équations et six degrés de liberté (position de la meuleuse dans l'espace et vecteur instantané de rotation noté \vec{Q}). Sa résolution et sa simplification ont donné le vecteur d'amplitude complexe de la première harmonique de l'accélération en régime permanent d'un point M sur la meule selon les égalités :



© Grégoire Maisonneuve pour l'INRS/2016

$$1 \quad \vec{a}_M = \frac{bal}{m_T} \omega^2 \vec{e}_r + i\omega \vec{\Omega} \wedge (\vec{CM} - \frac{m_G}{m_T} \vec{CG}_{woD})$$

$$2 \quad \vec{I}_T \vec{\Omega} = i\omega m_G \frac{bal}{m_T} \vec{CG}_{woD} \wedge \vec{e}_r$$

Dans ces équations :

bal : le balourd du disque perforé [homogène à une masse multipliée par une distance : kg.m],

m_T : la masse totale du système [kg],

\vec{e}_r : le vecteur tournant dans le plan du disque [sans unité],

$i = \sqrt{-1}$ [$i^2 = -1$],

C : le centre du disque [m],

m_G : la masse de la meuleuse sans le disque [kg],

G_{woD} : le centre de masse de la meuleuse sans le disque [m],

et \vec{I}_T : la somme du tenseur d'inertie des corps rigides écrit en leur centre de masse [composantes : kg.m²].

Tous les paramètres du modèle étaient connus et fournis par le fabricant à partir de la CAO détaillée.

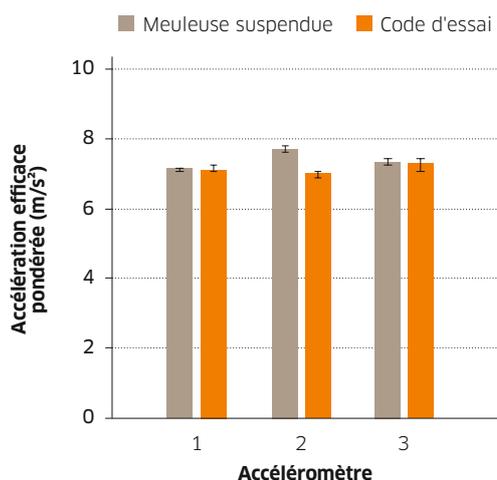
Résultats

Les accélérations ont été mesurées par trois accéléromètres. Tout d'abord, l'accélération efficace pondérée en fréquence a_{hv} , telle que définie dans la norme ISO 5349-1, a été calculée à partir des accélérations brutes mesurées à trois endroits différents et selon les deux tests :

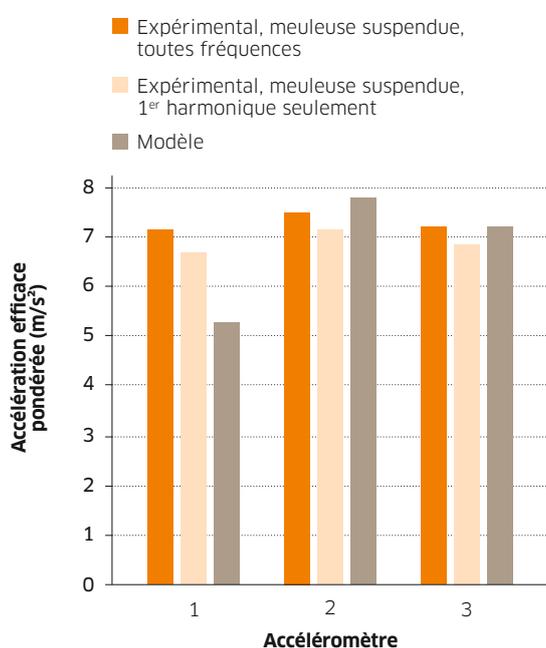
- selon le code d'essai normalisé (meuleuse tenue par un opérateur) ;
- lorsque la meuleuse est suspendue par un ressort (Cf. Figure 1).

Les accélérations a_{hv} étaient très proches, que la meuleuse soit suspendue ou tenue par un opérateur. Les très faibles valeurs de l'écart-type de l'accélération pondérée pour le code d'essai confirment que le maintien de la meuleuse par l'opérateur a peu d'effet sur le niveau vibratoire pondéré, dans ce cas. L'une des hypothèses du modèle (forces externes négligées) était donc valable pour cette meuleuse.

Ensuite, l'amplitude de l'accélération à la fréquence



← FIGURE 1 Accélérations expérimentales efficaces pondérées en fréquence a_{hv} , mesurées par les trois accéléromètres selon le code d'essai normalisé et pour la meuleuse suspendue par un ressort. Les lignes noires verticales au sommet des barres indiquent l'écart-type qui est très faible.



← FIGURE 2 Accélération efficace pondérée en fréquence a_{hv} , mesure avec trois accéléromètres, en tenant compte de l'ensemble du signal ou seulement de la première harmonique et résultats numériques du modèle (première harmonique) aux emplacements des accéléromètres.

de rotation (première harmonique) a été calculée via le modèle à l'emplacement des accéléromètres. Cette accélération calculée a été comparée sur la Figure 2 à l'accélération expérimentale obtenue avec la meuleuse suspendue. Le modèle montre des résultats relativement proches de ceux obtenus expérimentalement.

Tests avec une poignée antivibratile

Les tests décrits précédemment ont été effectués avec une meuleuse sans partie flexible. Des tests similaires ont été effectués sur une meuleuse (Bosch GWS 24-230 LVI) dont les deux poignées étaient flexibles (système de réduction des vibrations). Cette deuxième meuleuse était de grande taille, pesant 5,5 kg, avec des disques de 230 mm de diamètre. Cette fois, cinq accéléromètres ont été fixés (par collage) sur la meuleuse : quatre sur le corps de la machine et le cinquième sur la poignée antivibratile située à l'arrière de la machine.



FIGURE 3 → Accélération efficace pondérée en fréquence a_{hv} mesurée pendant les essais normalisés et les essais avec la meuleuse suspendue. Les lignes noires au sommet des barres indiquent l'écart-type.

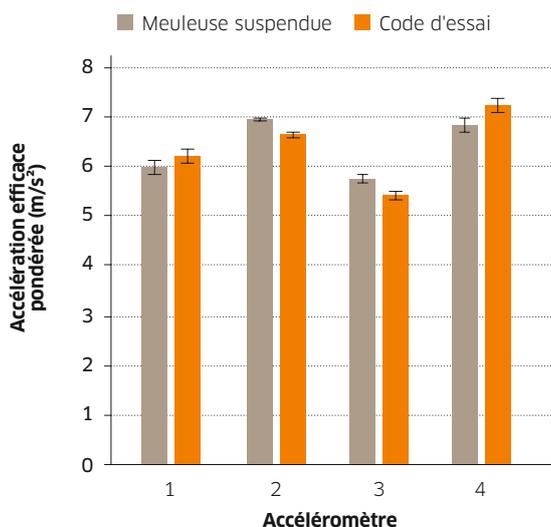
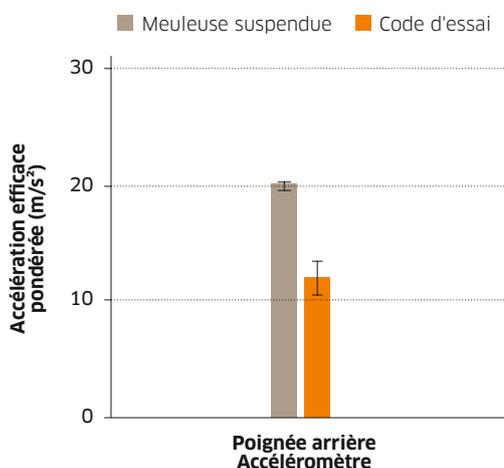


FIGURE 4 → Accélération efficace pondérée en fréquence a_{hv} mesurée pendant les essais normalisés et les essais avec la meuleuse suspendue. Les lignes noires au sommet des barres indiquent l'écart-type.



Les accélérations efficaces pondérées en fréquence a_{hv} ont été évaluées avec un opérateur (code d'essai normalisé) et sans opérateur (meuleuse suspendue). Les accélérations mesurées avec les accéléromètres nos 1 à 4, situés sur le corps de la machine, sont

présentées sur la Figure 3. Les accélérations étaient très proches pour les deux essais, c'est-à-dire qu'un opérateur tienne ou non la meuleuse (barres beiges comparées aux barres orange). Comme pour le premier essai, le maintien de la meuleuse n'affecte donc pas les vibrations du corps de la meuleuse. Les accélérations mesurées avec l'accéléromètre situé sur la poignée flexible arrière sont présentées sur la Figure 4. Elles sont plus faibles lorsqu'un opérateur tient la meuleuse (essai normalisé) que sans opérateur (meuleuse suspendue). Cette diminution des vibrations pourrait s'expliquer par la déformation de la poignée flexible qui joue son rôle amortissant. Le modèle, qui suppose que la meuleuse est rigide, ne peut donc pas être utilisé pour estimer l'émission vibratoire dans ce cas.

Conclusions

En comparant la vibration a_{hv} d'une meuleuse suspendue à celle obtenue selon le code d'essai EN 60745-2-3 avec un opérateur qui tient la meuleuse, aucune différence n'a été observée. Ainsi, pour la meuleuse testée, il n'est pas nécessaire de prendre en compte la main de l'opérateur pour estimer l'émission vibratoire. Un modèle simple de meuleuse constitué de deux corps rigides a aussi été développé et a montré sa capacité à estimer l'émission vibratoire déclarée par les fabricants. Cependant, ce modèle ne peut pas être utilisé pour estimer l'émission vibratoire des meuleuses à poignées flexibles. ●

1. 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, 2002. Accessible sur : <https://m.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/> (document payant).
2. Norme NF EN 60745-2-3 – Outils électroportatifs à moteur. Sécurité. Partie 2-3 : règles particulières pour les meuleuses, lustreuses et ponçouses du type à disque. Afnor, 2011. Accessible sur : <https://m.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/> (document payant).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] MIRBOD S.M., INABA R., IWATA H. – A study on the vibration-dose limit for Japanese workers exposed to hand-arm vibration. *Industrial health*, 1992, 30, pp. 1-22. Accessible sur : doi:10.2486/indhealth.30.1
- [2] BURSTRÖM L. ET AL. – Comparison of different measures for hand-arm vibration exposure. *Safety science*, 1998, 28, pp. 3-14. Accessible sur : doi:10.1016/S0925-7535(97)00059-3
- [3] JANG J.-Y. ET AL. – Quantitative exposure assessment for shipyard workers exposed to hand-transmitted vibration from a variety of vibration tools. *AIHA Journal*, 2002, 63, pp. 305-310. Accessible sur : doi:10.1080/15428110208984718
- [4] RIMELL A.N. ET AL. – Variation between manufacturers' declared vibration emission values and those measured under simulated workplace conditions for a range of hand-held power tools typically found in the construction industry. *International journal of industrial ergonomics*, 2008, 38, pp. 661-675. Accessible sur : doi:10.1016/j.ergon.2007.10.023
- [5] EDWARDS D.J. ET AL. – A field survey of hand-arm vibration exposure in the UK utilities sector. *Engineering, construction and architectural management*, 2020, 27, pp. 2179-2198. Accessible sur : doi:10.1108/ECAM-09-2019-0518
- [6] LEMERLE P., KLINGLER A., TROMPETTE N. ET AL. – Development and validation of an accurate testing procedure to measure coupling forces and characterize the man/machine interaction. In: *Proceedings of the 11th International Conference on hand-arm vibration*. Bologne, 2007, pp. 3-7.
- [7] LILJELIND I. ET AL. – Determinants explaining the variability of hand-transmitted vibration emissions from two different work tasks: grinding and cutting using angle grinders. *Annals of occupational hygiene*, 2013, 57, pp. 1065-1077.

ÉVALUATION DES VALEURS D'ÉMISSION VIBRATOIRE DES CLOUEUSES : UN DISPOSITIF DE SUBSTITUTION PEUT-IL REMPLACER LES OPÉRATEURS HUMAINS ?

MAXIME VINCENT,
THOMAS DUPONT

Département
Génie
mécanique,
École de
technologie
supérieure,
Montréal,
Québec,
Canada

PIERRE MARCOTTE,
THOMAS PADOIS

Institut de
recherche
Robert-Sauvé
en santé et
en sécurité
du travail
(IRSST),
Montréal

MARC-ANDRÉ GAUDREAU

Département
Génie
mécanique,
université
du Québec
à Trois-
Rivières,
Québec,
Canada

Les fabricants de machines vibrantes doivent déclarer l'émission vibratoire des équipements de travail qu'ils mettent sur le marché. Cette émission est évaluée *via* des codes d'essai qui sont parfois lourds à mettre en œuvre, comme dans le cas des cloueuses puisque plusieurs opérateurs sont sollicités.

L'étude présentée ici montre qu'un banc d'essai astucieux pourrait avantageusement se substituer aux essais normés utilisant des opérateurs humains.

Contexte

Les cloueuses portatives sont des outils largement utilisés dans l'industrie de la construction, car elles permettent un assemblage efficace et précis des structures en bois. Malheureusement, les cloueuses produisent également des niveaux élevés de bruit et de vibrations, qui peuvent représenter un risque significatif de développement de perte auditive ou de syndrome vibratoire. C'est pourquoi il est important de choisir et de concevoir des cloueuses qui produisent de faibles niveaux de bruit et de valeurs d'émission vibratoire pour prévenir les risques pour la santé. Une première étape présentée dans cet article serait de simplifier les méthodes d'évaluation des valeurs d'émission de bruit et d'émission vibratoire.

La norme ISO 28927-13:2022 décrit une méthode pour évaluer les valeurs d'émission vibratoire des outils de fixation tels que les cloueuses [1]. La procédure nécessite trois opérateurs formés pour fixer 50 clous chacun (cinq essais mesurés comportant chacun 10 clous à fixer) dans un morceau de bois de pin standardisé, ce qui est particulièrement long et coûteux (outre le temps de mesurage, l'expérimentateur doit aussi par exemple s'assurer de la posture de l'opérateur). Par conséquent, un dispositif de substitution de l'opérateur (noté DSO) a été développé pour simplifier et réduire le coût de la mesure des valeurs d'émission vibratoire [2-3], et aussi pour éviter d'exposer l'expérimentateur

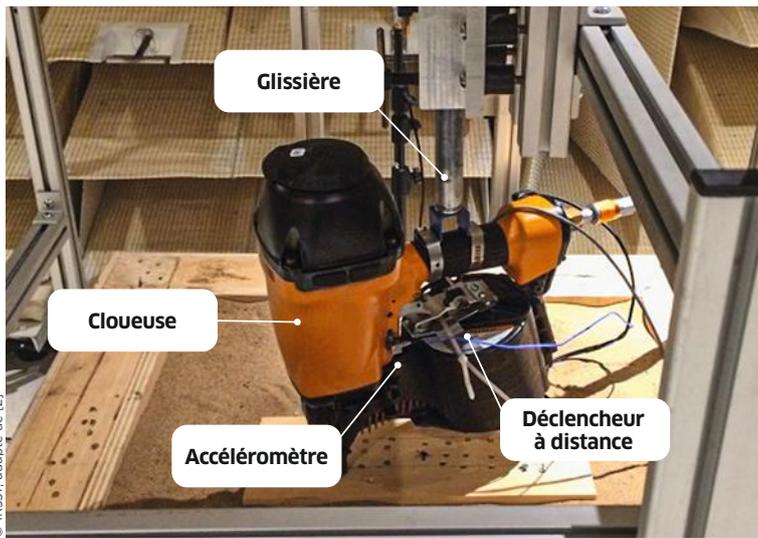
aux vibrations et aux bruits. En plus de la caractérisation des valeurs d'émission vibratoire, ce dispositif a également été utilisé pour déterminer les valeurs d'émission de bruit [2-4] et pour localiser les sources de bruit des cloueuses [2-5]. Les valeurs d'émission vibratoire du dispositif ont été comparées avec celles obtenues avec trois opérateurs pour sept cloueuses portatives différentes, en utilisant l'accélération efficace pondérée W_h (selon la norme ISO 5349-1 [6]). Cependant, une étude épidémiologique a suggéré que la pondération en fréquence W_{hf} [7], prenant en considération des fréquences plus élevées que celles du filtre W_h , est plus appropriée pour évaluer le risque de développer le syndrome de Raynaud induit par les vibrations [7].

L'étude présentée dans cet article visait à comparer, entre les trois opérateurs et le dispositif de substitution, les valeurs d'émission vibratoire des cloueuses mesurées, en utilisant les accélérations efficaces et les accélérations crêtes pondérées avec le filtre W_{hf} .

Matériel et méthode

Sept cloueuses différentes ont été utilisées pour l'étude : PR1, PR2, PB1, PB2, PB3 se réfèrent à des cloueuses pneumatiques; GB1 fait référence à une cloueuse à gaz (butane); et EB1 à une cloueuse électrique. Les conditions des mesures avec les opérateurs ont suivi la norme ISO 28927-13:2022 [1],





↑ FIGURE 1
Le dispositif de substitution au-dessus du banc de test décrit dans la norme ISO 28927-13:2022.

avec trois opérateurs fixant 10 clous sur 30 secondes pour 5 répétitions, soit un total de 50 clous par opérateur ou 150 clous pour chaque cloueuse testée.

Le dispositif de substitution est composé d'un cadre en aluminium au-dessus du banc de test proposé dans la norme ISO 28927-13:2022 [1], comme le montre la Figure 1. La poignée de la cloueuse est attachée à un support mobile, qui consiste en une glissière graissée restreignant le mouvement de la cloueuse uniquement dans la direction verticale. Un déclencheur à distance a été conçu pour actionner la gâchette de la cloueuse. Pour les mesures avec le DSO et celles avec les opérateurs, un accélé-

romètre triaxial (PCB 356B20) a été rigidement fixé au corps de la cloueuse, aussi près que possible de là où se trouve la main de l'opérateur en conditions d'utilisation normale. Le signal d'accélération a été enregistré avec une fréquence d'échantillonnage de 51,2 kHz.

Pour le dispositif de substitution, 10 clous ont été enfoncés avec chaque cloueuse [2]. Les signaux d'accélération ont été numériquement filtrés par la pondération en fréquence W_{hF} comme défini dans la spécification technique ISO/TS 15694 [8]. Il s'agit d'un filtre passe-bande avec un gain unitaire dans la plage de fréquences de 6,3 à 1250 Hz. Pour chaque cloueuse, l'accélération efficace 3 secondes pondérée par le filtre W_{hF} , $a_{hF,3s}$, l'accélération crête pondérée par le filtre W_{hF} , notée $a_{hF,Crête}$ et le facteur crête FC ont été calculés à partir des signaux d'accélération pour les trois opérateurs et le dispositif de substitution, selon les expressions ① à ③ :

$$\textcircled{1} \quad a_{hF,3s} = a_{hF} \sqrt{\frac{T}{3n}}$$

$$\textcircled{2} \quad a_{hF,Crête} = \max_{0 \leq t \leq T} |a_{hF}(t)|$$

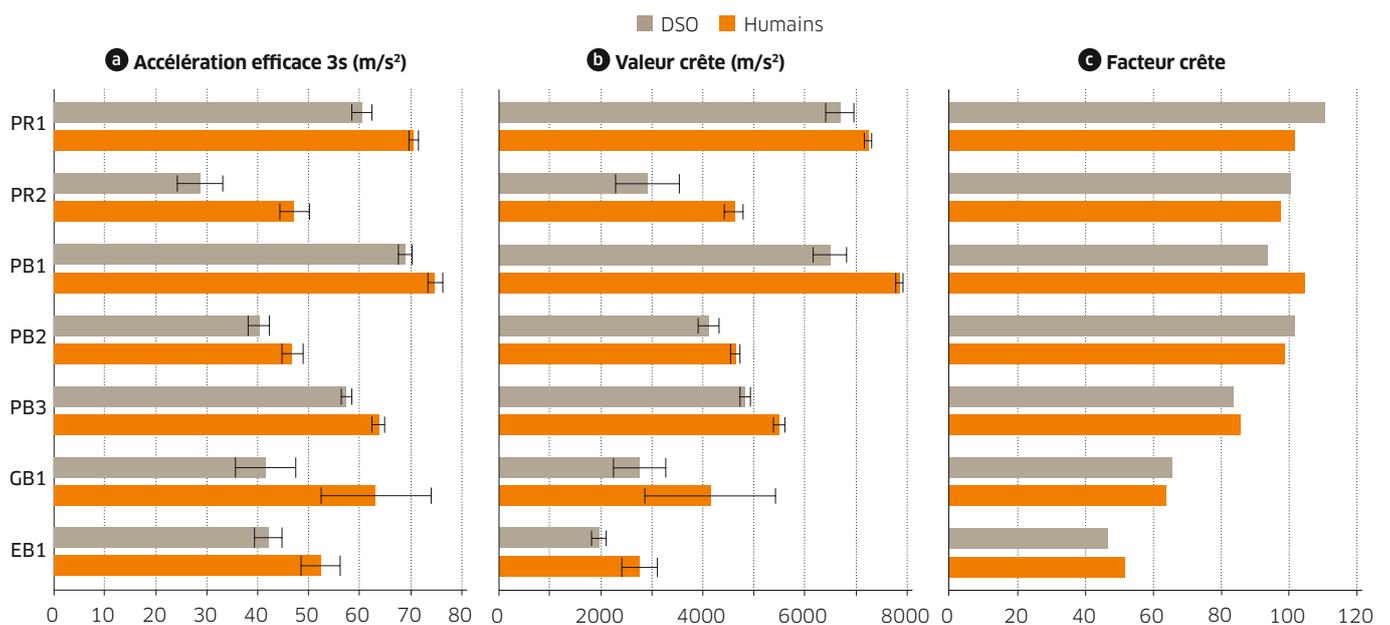
$$\textcircled{3} \quad FC = \frac{a_{hF,Crête}}{a_{hF,3s}}$$

Dans ces équations :

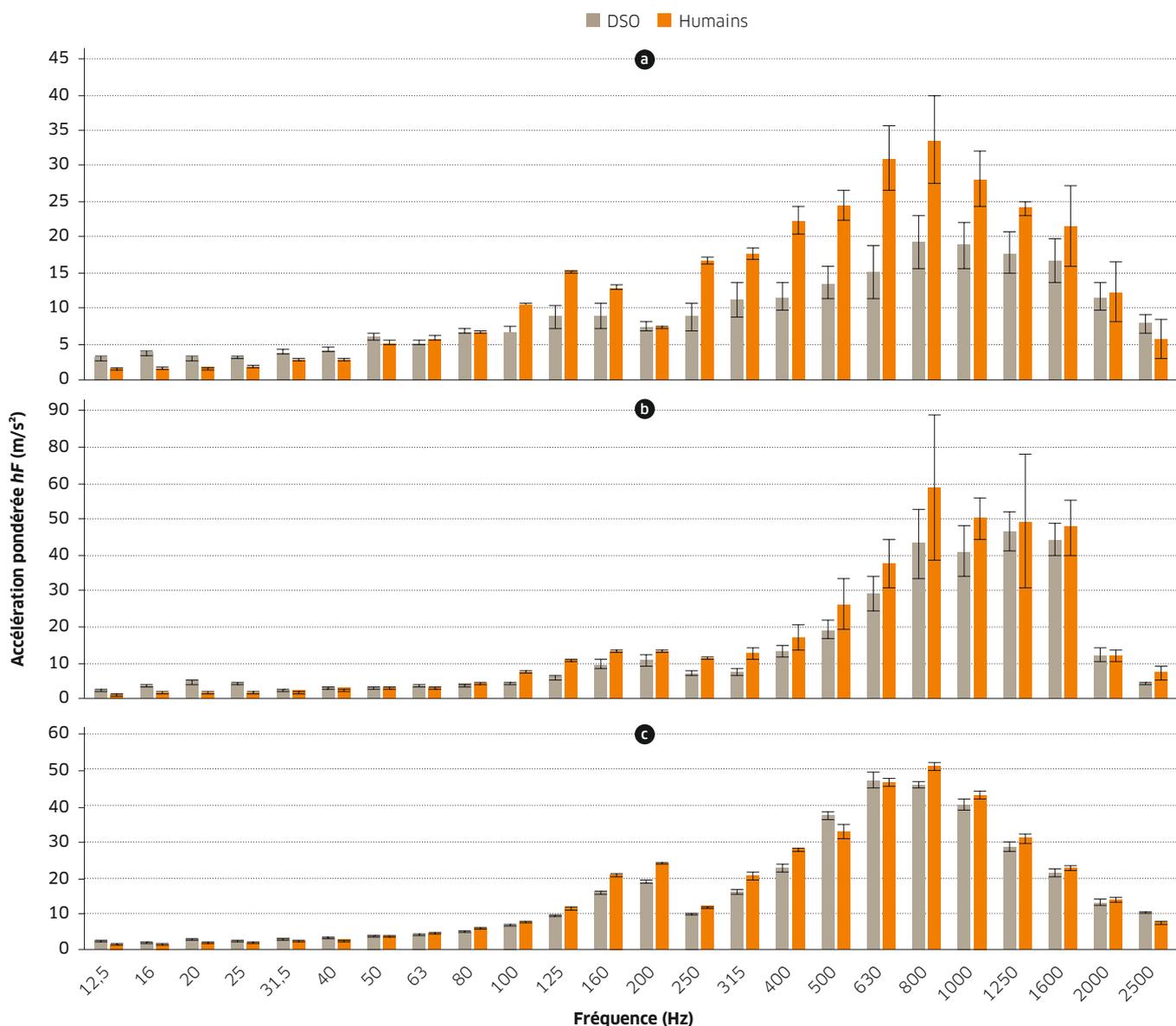
T [s] est le temps total de la mesure,

a_{hF} [m.s⁻²] est l'accélération efficace pondérée par le filtre W_{hF} ,

$a_{hF}(t)$ [m.s⁻²] est le signal temporel d'accélération pondérée par le filtre W_{hF} , et n est le nombre d'impacts (clous).



↑ FIGURE 2
Valeurs d'émission vibratoire obtenues pour les sept cloueuses testées en comparant les opérateurs et le dispositif de substitution (noté DSO sur cette figure) dans la direction du clou : (a) accélération efficace pondérée 3 secondes; (b) valeur crête; et (c) facteur crête. L'écart-type est affiché sous forme de barre d'erreur. La barre orange « Humains » correspond à la moyenne des trois opérateurs.



↑ FIGURE 3

Spectre en bandes de tiers d'octave de l'accélération moyenne pondérée hF pour (a) la cloueuse PR2, (b) la cloueuse GB1 et (c) la cloueuse PB3, avec la moyenne des trois opérateurs et le DSO. L'écart-type est affiché sous forme de barre d'erreur. La barre orange « Humains » correspond à la moyenne des trois opérateurs.

Les données obtenues avec les trois opérateurs ont été moyennées et l'écart type a été calculé (50 clous). Pour le dispositif de substitution, la moyenne et l'écart type ont été calculés sur les 10 clous. La différence relative a été calculée pour comparer les résultats entre les opérateurs et le dispositif de substitution (DSO).

Résultats

L'accélération efficace 3 secondes, la valeur crête et le facteur de crête de l'accélération pondérés par le filtre W_{hF} suivant la direction prédominante (direction du clou) sont présentés sur la Figure 2.

Les résultats montrent que l'accélération efficace pondérée 3 secondes et la valeur crête sont toujours sous-estimées avec le dispositif de substitution. Les différences relatives entre l'accélération efficace

pondérée 3 secondes obtenue avec les opérateurs et le dispositif de substitution varient de 8 % pour la cloueuse PB1 à 39 % pour la cloueuse PR2. Les différences pour toutes les autres cloueuses sont inférieures à 20 %, à l'exception des cloueuses GB1 et PR2, qui sont également associées à de plus grandes variabilités pour les accélérations efficaces pondérées 3 secondes et crêtes. La cloueuse présentant la différence relative la plus faible en matière d'accélération efficace pondérée 3 secondes et d'accélération crête est la cloueuse PB3, avec respectivement 10 % et 12 %.

Pour approfondir ces différences entre la moyenne des opérateurs et le dispositif de substitution, le spectre en bandes de tiers d'octave de l'accélération moyenne pondérée par le filtre W_{hF} a été calculé. Les valeurs d'émission vibratoire pour les cloueuses





© Gael Kerbaol/INRS/2023

Atelier de production d'emballages en bois : opérateur utilisant une cloueuse pneumatique.

PR2 et GB1 (dispositif de substitution et moyenne des trois opérateurs) sont comparées *Figure 3*. Les résultats pour la cloueuse PB3 sont également affichés à titre de référence.

Le spectre en bandes de tiers d'octave obtenu avec la cloueuse PR2 (*Cf. Figure 3a*) montre un bon accord entre les valeurs obtenues avec le dispositif de substitution et les opérateurs dans les basses fréquences jusqu'à 200 Hz. Pour les fréquences plus élevées, l'amplitude du spectre augmente à la fois pour le dispositif de substitution et les opérateurs, de même que la différence entre eux. Les valeurs les plus élevées se situent dans la plage de fréquences de 400 Hz à 1600 Hz. Des observations similaires peuvent être faites pour la cloueuse GB1 (*Cf. Figure 3b*). Pour les opérateurs, il est à noter que la barre d'erreur (c'est-à-dire l'écart-type) est très grande dans la plage de fréquences de 400 Hz à 1600 Hz, ce qui témoigne d'une grande variabilité entre les opérateurs. En comparaison, la cloueuse PB3 (*Cf. Figure 3c*) montre un bon accord entre le dispositif de substitution et les opérateurs pour l'ensemble du spectre de fréquences. Les valeurs d'émission vibratoire mesurées avec le dispositif de substitution sont toujours sous-estimées par rapport à celles mesurées avec les opérateurs. Cela pourrait être attribué à la conception même du dispositif de substitution, qui limite le mouvement à l'axe vertical uniquement.

Conclusions

Selon la comparaison des valeurs d'émission vibratoire entre le dispositif de substitution et les trois opérateurs (d'après la norme ISO 28927-13:2022), le dispositif de substitution pourrait offrir une bonne alternative, tout en simplifiant la procédure, en réduisant le nombre de clous nécessaires pour obtenir les valeurs d'émission vibratoire et en évitant d'exposer les opérateurs. Cependant, pour deux

des sept cloueuses testées, de grandes différences ont été observées entre les valeurs d'émission vibratoire mesurées avec les opérateurs et celles mesurées avec le dispositif de substitution, ainsi que de fortes variabilités intersujets. Ces grandes variabilités intersujets suggèrent que trois opérateurs sont insuffisants pour caractériser les valeurs d'émission vibratoire des cloueuses. De plus, la conception du dispositif de substitution, qui ne prend pas en compte la biodynamique de la main-bras dans l'impact des vibrations, pourrait générer des sous-estimations des valeurs d'émission vibratoire par rapport à celles mesurées en faisant appel aux opérateurs. Pour l'instant, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour comprendre les différences entre les valeurs d'émission vibratoire mesurées avec le dispositif de substitution et celles mesurées avec les opérateurs, et pour améliorer la représentativité humaine du dispositif de substitution. Ce dernier point est nécessaire pour améliorer la détermination des valeurs d'émission vibratoire, et pour aider les fabricants à construire des outils plus sûrs avec des vibrations plus faibles. ●

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **NORME ISO 28927-13** – *Machines à moteur portatives. Mesurage des vibrations au niveau des poignées. Partie 13 : Machines à enfoncer les fixations.* Genève, ISO, 2022. Accessible sur : <https://www.iso.org/fr/standard/75451.html> (document payant).
- [2] **GAUDREAU M.A. ET AL.** – *Cloueuses portatives : développement de méthodes de diagnostic vibratoire et acoustique.* Montréal, IRSST, 2018.
- [3] **MARCOTTE P. ET AL.** – *Characterization of nail guns impact vibration.* In: *Proceedings of the 26th international Congress on sound and vibration.* Montréal, 7-11 juillet 2019, 86, pp. 1132-1138.
- [4] **GAUDREAU M.A. ET AL.** – *Noise and vibration measurement of framing nailers: development and validation of a mechanized test bench.* In: *Proceedings of the 46th International Congress and Exposition on noise control engineering.* Hong Kong, 27-30 août 2017.
- [5] **PADOIS T. ET AL.** – Identification of noise sources using a time domain beamforming on pneumatic, gas and electric nail guns. *Noise Control. Eng. J.*, 2019, 67, pp. 11-22.
- [6] **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, 2002. Accessible sur : [https://m.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/\(document payant\)](https://m.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/(document payant)).
- [7] **BOVENZI M. ET AL.** – Frequency weightings of hand-transmitted vibration for predicting vibration-induced white finger. *Scand. J. Work Environ. Health*, 2011, 37, pp. 244-252.
- [8] **NORME ISO/TS 15694** – *Vibrations et chocs mécaniques. Mesurage et évaluation des chocs simples transmis par les machines portatives et guidées à la main au système main-bras.* Genève, ISO, 2001. Accessible sur : <https://www.iso.org/fr/standard/40386.html> (document payant).

VIBRATIONS TRANSMISES AUX MEMBRES SUPÉRIEURS : ESTIMATION DE L'EXPOSITION DES TRAVAILLEURS À DES CHOCS RÉPÉTÉS

Le Code du travail définit une méthode d'évaluation du risque créé par l'exposition aux vibrations transmises aux membres supérieurs. Il revient à l'employeur d'évaluer la dose vibratoire journalière $A(8)$ reçue par le salarié. L'évaluation la plus précise de $A(8)$ consisterait à mesurer les vibrations sur une journée de travail complète. En pratique, les interventions des préventeurs se limitent à une courte période pour ne pas perturber la production en entreprise. La dose $A(8)$ est alors estimée à partir d'informations recueillies sur la tâche de travail.

Pour les machines qui génèrent des vibrations contenant des chocs répétés, cette estimation est souvent biaisée. L'échantillon mesuré peut ne pas être représentatif de l'exposition quotidienne réelle. Cet article présente une méthode alternative d'estimation de $A(8)$ qui améliore l'évaluation du risque dans de telles situations. Sa formulation mathématique est présentée et illustrée par l'estimation de l'exposition d'un balisticien utilisant une arme à feu.

FRÉDÉRIC
MAÎTRE
Caisse
régionale
d'assurance
maladie
d'Île-de-
France
(Cramif)

MAËL AMARI
INRS,
département
Ingénierie
des
équipements
de travail

Contexte

Il revient à l'employeur d'évaluer la dose vibratoire journalière $A(8)$ reçue par le salarié. La méthode d'évaluation standardisée de l'exposition aux vibrations transmises aux membres supérieurs est définie par les normes ISO 5349-1 [1] et ISO 5349-2 [2]. L'exposition journalière aux vibrations $A(8)$ d'un opérateur doit être déterminée à partir de la valeur totale de vibration a_{hv} émise par la machine et de la durée d'exposition totale journalière T . Sur le terrain, l'évaluation de $A(8)$ est souvent effectuée sur une durée de travail limitée pour éviter de perturber la production. Certaines machines portatives génèrent des vibrations sous la forme de chocs répétés de fortes amplitudes (clé à choc, marteau à river, cloueur, etc.) [3]. Dans ce cas, la valeur totale de vibration a_{hv} et la durée d'exposition totale journalière T peuvent ne pas être représentatives de l'exposition réelle du travailleur. La variation de la production, le découpage des signaux par l'expérimentateur ou les informations limitées sur les activités quotidiennes influencent très significativement les résultats. L'estimation de l'exposition



© Gaël Kerbaol / INRS / 2023

quotidienne aux vibrations $A(8)$ est alors délicate et sa comparaison aux valeurs limites réglementaires peut s'avérer erronée (articles R.4441-1 à R.4447-1 du Code du travail).





© Gaël Kerbaol pour l'INRS/2020

L'objectif de cet article est de décrire une méthode d'estimation de l'exposition quotidienne aux vibrations A(8) adaptée à ces situations. Sa formulation mathématique est présentée et illustrée sur un cas réel d'intervention en entreprise.

Les trois grandeurs suivantes sont comparées :

- la dose vibratoire journalière A(8) réelle que l'on cherche à estimer, habituellement impossible à mesurer lors d'une intervention, mais connue dans le cadre de cette étude;
- l'estimation de la dose vibratoire journalière A(8) selon la méthode classique, calculée à partir de mesures sur un échantillon réduit de la tâche de travail et d'une estimation de la durée d'exposition effective aux vibrations;
- l'estimation de la dose vibratoire journalière A(8) selon la méthode alternative proposée dans cet article, calculée à partir du même échantillon et d'informations sur la répétition des chocs sur la journée de travail complète.

Méthode d'estimation alternative de l'exposition quotidienne aux vibrations Dose vibratoire journalière A(8)

L'exposition quotidienne aux vibrations A(8) transmises aux membres supérieurs d'un opérateur est définie suivant la méthode standardisée, par l'expression :

$$1 \quad A(8) = a_{hv} \cdot \sqrt{\frac{T}{T_0}} \quad (m.s^{-2})$$

a_{hv} ($m.s^{-2}$) est la valeur totale de vibration émise par la machine. T (s) est la durée d'exposition totale quotidienne de l'opérateur. $T_0 = 8 \times 3600$ (s) est la durée de référence pour une journée de travail. La valeur totale de vibration a_{hv} émise par la machine est définie par l'expression :

$$2 \quad a_{hv} = \sqrt{a_{hw_x}^2 + a_{hw_y}^2 + a_{hw_z}^2} \quad (m.s^{-2})$$

$a_{hw_{x,y,z}}$ ($m.s^{-2}$) est la valeur efficace de l'accélération pondérée par le filtre W_h [1], mesurée dans les directions x, y et z.

La valeur efficace de l'accélération pondérée $a_{hw_{x,y,z}}$ est définie par :

$$3 \quad a_{hw_{x,y,z}} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N |a_{hw_{x,y,z}}[n]|^2} \quad (m.s^{-2})$$

$a_{hw_{x,y,z}}[n]$ ($m.s^{-2}$) est la $n^{ième}$ valeur de l'échantillon de l'accélération pondérée par le filtre W_h . $N = T \times f_s$ est le nombre total d'échantillons. f_s (Hz) est la fréquence d'échantillonnage du signal.

Estimation de A(8) lors d'une intervention en entreprise

$a_{hv\text{échantillon}}$, $T_{\text{échantillon}}$ et $A(8)_{\text{échantillon}}$ sont les grandeurs relatives aux mesures effectuées sur une partie de la journée de travail. En particulier, $T_{\text{échantillon}}$ correspond à la durée sur laquelle la valeur totale de vibration de l'échantillon $a_{hv\text{échantillon}}$ est calculée.

$a_{hv\text{estimé}}$, $T_{\text{estimé}}$ et $A(8)_{\text{estimé}}$ sont les estimations des grandeurs inconnues a_{hv} , T et $A(8)$ relatives à la journée de travail complète.

- Estimation selon la méthode classique : $A(8)_{\text{estimé}}$ est habituellement calculée à partir de l'équation 1 comme suit :

$$4 \quad A(8)_{\text{estimé}} = a_{hv\text{échantillon}} \cdot \sqrt{\frac{T_{\text{estimé}}}{T_0}} \quad (m.s^{-2})$$

Installation de linteaux sur une toiture avec un cloueur pneumatique portatif.

↓ TABLEAU 1 Grandeurs caractéristiques de l'exposition quotidienne réelle du baliste, habituellement inconnues lors d'une intervention et que l'on cherche à estimer à partir d'un échantillon mesuré lors d'une intervention en entreprise.

TÂCHE DE TRAVAIL JOURNALIÈRE RÉELLE				
a_{hv}	T	A(8)	R	$A_r(8)$
($m.s^{-2}$)	(s)	($m.s^{-2}$)	(-)	($m.s^{-2}$)
2,1	3500	0,7	310	0,041

$a_{h\text{échantillon}}$	$T_{\text{échantillon}}$	$A(8)_{\text{échantillon}}$	$R_{\text{échantillon}}$	$A_r(8)_{\text{échantillon}}$
($m.s^{-2}$)	(s)	($m.s^{-2}$)	(tirs)	($m.s^{-2}$)
2,6	33,5	0,089	5	0,040

↑ **TABLEAU 2**
Grandeurs caractéristiques de l'échantillon mesurées lors de l'intervention en entreprise.

• Estimation selon la méthode alternative :

Selon la nature de la tâche de travail, il est parfois possible de connaître le nombre de répétitions (R) des chocs pendant la tâche de travail mesurée $R_{\text{échantillon}}$ et pendant la journée de travail complète $R_{\text{estimé}}$. $A(8)_{\text{estimé}}$ peut alors être calculée à partir de l'équation ⑤ comme suit :

$$\textcircled{5} \quad A(8)_{\text{estimé}} = \sqrt{R_{\text{estimé}}} \cdot A_r(8)_{\text{échantillon}} \quad (m.s^{-2})$$

$A_r(8)_{\text{échantillon}}$ ($m.s^{-2}$) représente l'exposition ou la dose vibratoire moyenne reçue par le salarié pour chaque choc r lors de l'échantillon. Elle est égale à la dose qui serait reçue pour chacun des $R_{\text{échantillon}}$ chocs de l'échantillon s'ils étaient tous identiques :

$$\textcircled{6} \quad A_r(8)_{\text{échantillon}} = \frac{A(8)_{\text{échantillon}}}{\sqrt{R_{\text{échantillon}}}} \quad (m.s^{-2})$$

Exemple d'intervention :
balisticien utilisant une arme à feu

Protocole expérimental

Dans un laboratoire de balistique, les vibrations générées par les tirs d'un fusil d'assaut automatique avec des munitions de calibre 7,62 mm ont été mesurées. Un accéléromètre piézoélectrique tri-axe a été fixé rigidement sur le corps du fusil. Les signaux d'accélération ont été enregistrés avec un frontal d'acquisition à une fréquence d'échantillonnage de 6 400 Hz.

Informations sur la tâche de travail

La tâche de travail habituelle du balisticien consiste à tirer « en mode semi-automatique (S-A) » ou « en rafale (R) ».

L'opérateur estime qu'il utilise le fusil d'assaut une heure et demie par jour (5 400 s). Il estime également tirer environ 300 balles par jour.

La réalité de l'exposition aux vibrations sur la journée complète, inconnue lors d'une intervention habituelle mais connue dans le cadre de cette étude, est présentée dans le *Tableau 1*.

Échantillon de la tâche de travail

Lors de l'intervention, des mesures ont été uniquement effectuées sur une période durant laquelle 5 balles ont été tirées en mode semi-automatique (S-A) en 33,5 s, pour ne pas trop interférer avec l'activité du balisticien.

La *Figure 1* présente la variation temporelle de l'accélération mesurée lors de l'intervention. Pour des raisons de lisibilité, seule l'accélération suivant l'axe y de l'accéléromètre est présentée (zone orange). Les vibrations de la tâche de travail complète, connues uniquement dans le cadre de cette étude, sont également représentées à titre indicatif (zone grise).

Le *Tableau 2* présente les valeurs associées à l'échantillon mesuré.

Estimations de la dose vibratoire journalière

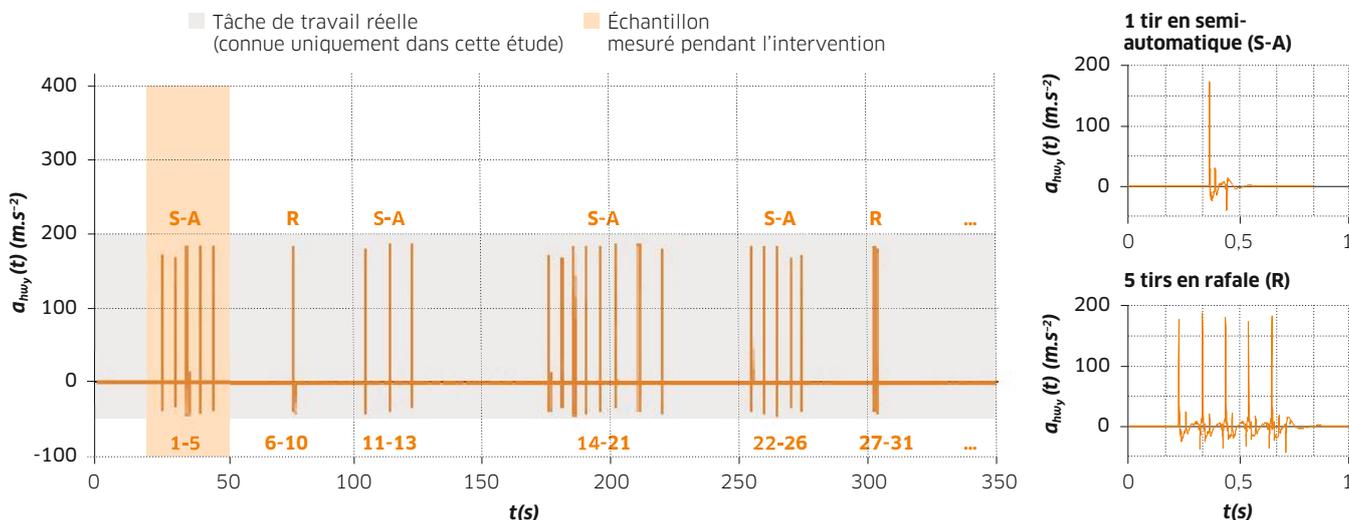
Le *Tableau 3* présente les estimations de la dose réelle à partir de l'échantillon selon la méthode classique et selon la méthode alternative.

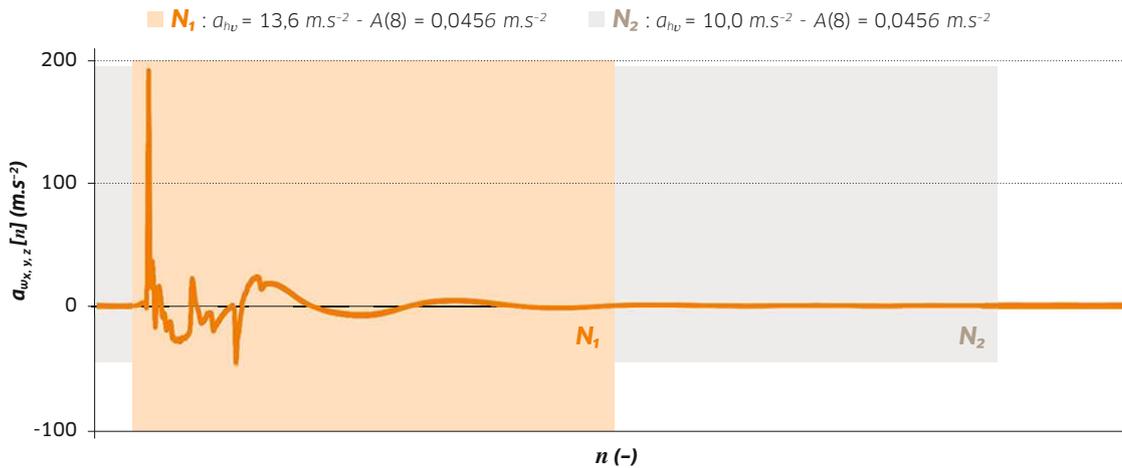
Discussion

Les équations ①, ② et ③ montrent que la valeur totale de vibration a_{hw} d'un signal impulsionnel varie avec son nombre de points d'échantillonnage N et donc avec la durée pendant laquelle il a été mesuré (Cf. *Figure 2*).

Ce n'est pas le cas de $A(8)$ dont la valeur ne varie pas avec le nombre de points du signal.

↓ **FIGURE 1**
Variations temporelles de l'accélération dans la direction sur le corps du fusil. À gauche : Portion du signal d'accélération mesuré durant une journée. À droite : Zoom du signal pour les deux types de tirs. Les pics visibles sur ces graphes correspondent chacun à un tir.





← FIGURE 2
Variation de a_{hv} en fonction du nombre de points d'échantillonnage N d'un signal impulsionnel. N est proportionnel à la durée du signal. La valeur de $A(8)$ ne varie pas.

Lorsque seule la durée d'exposition totale quotidienne $T_{estimé}$ peut être déterminée à partir des informations sur la tâche de travail, l'équation 4 montre que $A(8)_{estimé}$ dépend de $a_{hv\text{échantillon}}$. $A(8)_{estimé}$ est alors particulièrement sensible aux conditions de l'échantillonnage : émission de la machine, régularité de la cadence de travail tout au long de la journée. C'est le cas dans la méthode d'estimation classique de $A(8)$.

Lorsque les nombres de chocs de l'échantillon $R_{\text{échantillon}}$ et de la journée entière $R_{estimé}$ peuvent être déterminés à partir des informations sur la tâche de travail quotidienne, les équations 5 et 6 montrent que $A(8)_{estimé}$ dépend uniquement de la dose $A(8)_{\text{échantillon}}$. $A(8)_{estimé}$ est alors insensible à la régularité de la cadence de travail en dehors de l'échantillon. C'est le cas dans la méthode d'estimation alternative de $A(8)$.

En pratique, les conditions d'intervention ne sont pas toujours maîtrisées ; $a_{hv\text{échantillon}}$ varie au cours de la journée en fonction de la production (Cf. Figure 2). L'hypothèse de représentativité de l'échantillon n'est pas toujours satisfaite (Cf. Tableaux 1 et 3). $T_{estimé}$ est également difficile à déterminer, car elle représente la durée réelle d'exposition aux vibrations. Elle peut être très différente de la durée d'utilisation de la machine. L'estimation de l'exposition quotidienne aux vibrations $A(8)_{estimé}$ est alors fortement biaisée (Cf. Tableau 3).

Dans cet exemple, l'estimation de l'exposition vibratoire quotidienne $A(8)_{estimé}$ avec la méthode alternative conduit à des valeurs plus proches de celles de la tâche réelle que lorsque la méthode d'estimation classique est utilisée (Cf. Tableaux 1 à 3). Cela vient du fait que l'estimation du nombre de tirs quotidien $R_{estimé}$ par le balisticien est meilleure que celle de la durée d'exposition $T_{estimé}$. Plus généralement, lorsque cela est possible, l'estimation du nombre total de chocs $R_{estimé}$ est plus facile à réaliser et souvent bien plus précise que $T_{estimé}$. La dose vibratoire moyenne reçue par choc

MÉTHODE CLASSIQUE			MÉTHODE ALTERNATIVE			
$a_{hv\text{échantillon}}$	$T_{estimé}$	$A(8)_{estimé}$	$R_{estimé}$	$R_{\text{échantillon}}$	$A(8)_{\text{échantillon}}$	$A_r(8)_{estimé}$
(m.s ⁻²)	(s)	(m.s ⁻²)	(tirs)	(tirs)	(m.s ⁻²)	(m.s ⁻²)
2,6	5 400	1,1	300	5	0,090	0,7

lors de l'échantillon $A_r(8)_{\text{échantillon}}$ est aussi souvent représentative de l'ensemble des chocs. $A(8)_{estimé}$ est alors plus proche de l'exposition quotidienne réelle.

Conclusions

L'exemple proposé montre que la méthode d'estimation de l'exposition quotidienne aux vibrations $A(8)$ qui prend en compte le nombre de répétitions des chocs conduit à une exposition plus proche de l'exposition réelle que la méthode standardisée. Cela a également été le cas pour d'autres situations : clés à chocs, cloueurs, etc. Cette méthode facilite également la mise en place de solutions techniques de prévention, en reliant l'exposition de l'opérateur à la production plutôt qu'à sa cadence de travail. Elle est à privilégier pour évaluer le risque créé par des chocs répétés sur le lieu de travail, dès lors que les estimations du temps d'exposition sont sujettes à caution. Pour une journée type, la comparaison de la dose vibratoire journalière aux seuils réglementaires devient plus précise. ●

↑ TABLEAU 3
Estimations de la dose vibratoire journalière effectuées selon la méthode classique (équation n° 4) et selon la méthode alternative (équations n° 5-6) à partir de l'échantillon de la tâche de travail mesurée pendant l'intervention.

BIBLIOGRAPHIE

[1] NORME ISO 5349-1 – Vibrations mécaniques. Mesurage et évaluation de l'exposition des individus aux vibrations transmises par la main. Partie 1 : Exigences générales. Genève, ISO, 2001. Accessible sur : <https://www.iso.org/fr/standard/32355.html> (document payant).

[2] NORME ISO 5349-2 – Vibrations mécaniques. Mesurage et évaluation de l'exposition des individus aux vibrations transmises par la main. Partie 2 : Guide pratique pour le mesurage sur le lieu de travail. Genève, ISO, 2001. Accessible sur : <https://www.iso.org/fr/standard/27511.html>

[3] IFA REPORT – Hand-arm vibration: Exposure to isolated and repeated shock vibrations. Review of the international expert. Pékin, Workshop 2015.

LES CARACTÉRISTIQUES VIBRATOIRES D'OUTILS DE REDRESSEMENT ET DE FORMAGE ACTIVÉS PAR ULTRASONS

Le dressage et le formage de pièces métalliques sont des tâches typiques et habituelles dans les industries de la construction navale. Elles exposent les chaudronniers à des niveaux élevés de vibrations entraînant des risques pour la santé (troubles musculo-squelettiques et syndromes vasculaires). Cet article relate la démarche d'accompagnement d'une entreprise dans l'évaluation du martelage activé par ultrasons comme solution alternative aux outils classiques de frappe. Des mesures vibratoires ont été réalisées sur le terrain. Elles ont été post-traitées en pondérant les signaux par deux filtres différents : le filtre réglementaire et le filtre vasculaire.

DIDIER AUSTIN
Caisse d'assurance retraite et de la santé au travail (Carsat) de Bretagne

Contexte

Pour obtenir la forme finale d'un élément ou d'une pièce métallique, il est fréquent d'effectuer des opérations de dressage ou de formage. Ces activités sont courantes dans la construction aéronautique et navale. Elles sont classiquement réalisées par des procédés de martelage qui utilisent différents outils :

- une masse et une chasse à parer ;
- un marteau burineur pneumatique monté sur chariot ;
- un marteau à river pneumatique.

Ces opérations peuvent exposer les travailleurs à des niveaux sonores et vibratoires élevés. Une technologie émergente sur le marché est le marteau activé par ultrasons [1]. Un générateur haute fréquence alimente un émetteur piézoélectrique

générant des ondes mécaniques. Celles-ci sont amplifiées à la sonotrode et cette énergie est ensuite transmise à un média, qui est constitué d'impacteurs de type aiguille, pour les opérations de redressage-formage.

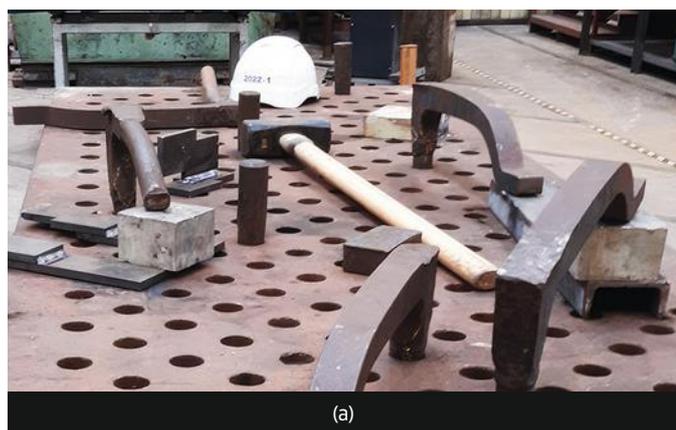
Pour accompagner une entreprise de construction navale dans sa démarche de prévention lors d'essais de qualification d'un procédé de martelage activé par ultrasons, des mesures pour caractériser les émissions vibratoires de cette technologie ont été réalisées et comparées à celles émises par des outils conventionnels.

Matériels et méthode

Outils testés et conditions d'essais

Dans un premier temps, la technique de martelage manuel avec masse et chasse à parer a été testée (Cf. Figure 1).

↓ FIGURE 1
Masse (a)
et chasse
à parer (b).



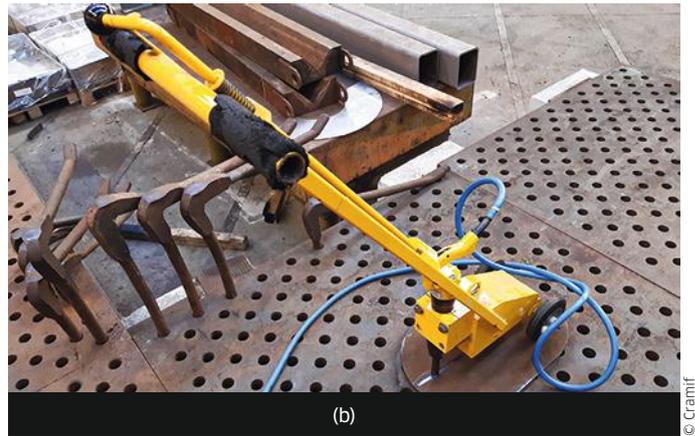
(a)



(b)



(a)



(b)

↑ FIGURE 2
Marteau à rivet
Atlas Copco
RRH 12 (a)
et marteau
burineur
Atlas Copco
RRC 75 B-01 (b).



(a)



(b)

FIGURE 3 →
Marteaux par
ultrasons :
Sonats Stress
Voyager PR10 avec
embout ER18-03
(a) et Sonats
Nomad (b).

Ensuite, les mesures ont porté sur l'émission vibratoire d'un marteau à rivet et d'un marteau burineur sur chariot (Cf. Figure 2).

Enfin, des mesures d'émission vibratoire de deux marteaux activés par ultrasons ont été effectuées (Cf. Figure 3).

Les pièces utilisées étaient constituées d'éléments métalliques en acier ou en aluminium, bridés sur un marbre d'essai dans l'atelier de chaudronnerie : (i) tôles d'acier et d'aluminium; et (ii) pièces en acier mécano-soudées.

Métrie

Les mesures des vibrations transmises à la main ont été réalisées conformément aux normes NF EN ISO 5349-1 et NF EN ISO 5349-2 [2-3], à l'aide d'un accéléromètre triaxial rigidement fixé à la poignée de la machine, au plus près de la paume de la main. Le conditionnement du signal de notre accéléromètre triaxial (modèle 356B20, PCB Piezotronics) et l'acquisition des données de vibration ont été réalisés à l'aide d'un frontal d'acquisition (Scadas XS, Siemens) avec une fréquence d'échantillonnage de 2560 Hz.

Traitement des données

→ Pondération fréquentielle des signaux vibratoires mesurés

Les signaux mesurés sur les trois axes sont pondérés en fréquence selon le facteur de pondération W_h tel que défini par la norme NF EN ISO 5349-1 [2]. Les accélérations pondérées correspondantes sont notées a_{hwx} , a_{hwy} et a_{hwz} .

Le fascicule de documentation FD ISO/TR 18570 [4] définit une méthode complémentaire de mesure des vibrations transmises aux mains. Celle-ci vise à améliorer l'évaluation des risques de troubles vasculaires (syndrome des doigts blancs nommé syndrome de Raynaud). Ce fascicule définit notamment une pondération fréquentielle W_p (Cf. Figure 4) pour filtrer les accélérations mesurées dans les trois axes x, y et z. Les accélérations pondérées correspondantes sont notées dans ce cas a_{px} , a_{py} et a_{pz} . Les pondérations W_h et W_p sont tracées en fonction de la fréquence, sur la Figure 4. Alors que l'atténuation induite par le filtre W_h décroît à partir de 20 Hz (elle décroît de 6 dB/octave), pour le filtre W_p , il n'y a pratiquement pas d'atténuation pour les fréquences se situant entre 50 Hz et 400 Hz (coefficient de pondération proche de l'unité). Ainsi, les accélérations filtrées avec le filtre W_h prennent majoritairement en compte l'énergie du signal en basses fréquences (inférieures à quelques dizaines de Hertz), alors que celles filtrées par le filtre W_p minimisent ces basses fréquences et favorisent la prise en compte des plus hautes fréquences.

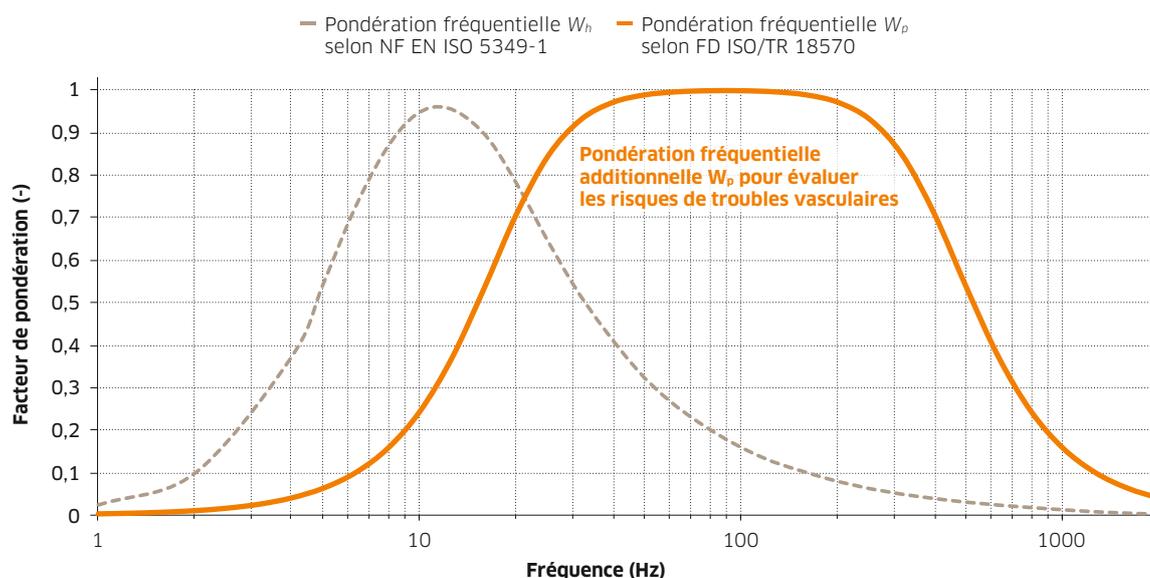
→ Détermination des niveaux d'émission vibratoire

Le niveau d'émission vibratoire a_{hv} calculé en fonction des accélérations pondérées par le filtre W_h s'écrit selon l'expression :

$$a_{hv} = \sqrt{a_{hwx}^2 + a_{hwy}^2 + a_{hwz}^2}$$

De même, le niveau d'émission vibratoire a_{pv} calculé en fonction des accélérations pondérées par le filtre W_p s'écrit selon l'expression suivante :

$$a_{pv} = \sqrt{a_{px}^2 + a_{py}^2 + a_{pz}^2}$$



← FIGURE 4
Courbes de pondérations W_h et W_p .

Résultats

Niveaux d'émission vibratoire des outils conventionnels

Les niveaux d'émission vibratoire des outils classiques utilisés par cette entreprise de construction navale pour le redressage et le formage des pièces ont été calculés (Cf. Tableau 1).

Remarque : seul le niveau pondéré avec le filtre W_h est disponible, car seul le niveau calculé selon la norme ISO-5349 [2] a été sauvegardé et pas les données brutes qui auraient pu permettre un calcul du niveau selon FD ISO/TR 18570 [4].

Niveaux d'émission vibratoire des marteaux à ultrasons

Les essais avec les machines de martelage par ultrasons ont été réalisés sur des tôles d'aluminium et d'acier, plusieurs mois après les essais sur machines conventionnelles. Les situations de travail évaluées ne sont donc pas *stricto sensu* identiques à celles rencontrées lors des mesures conventionnelles. La comparaison entre les niveaux d'émission vibratoire de ces machines ultrasons et des machines conventionnelles doit donc se faire avec prudence. Néanmoins, il est possible de comparer leurs ordres de grandeur. Par ailleurs, il est possible de comparer les différentes machines à ultrasons entre elles, et de connaître également l'influence sur le niveau d'émission vibratoire de telle ou telle option (tête à ultrasons). Les niveaux d'émissions vibratoires des outils de martelage activés par ultrasons testés pour le redressage et le formage des pièces sont présentés ci-contre (Cf. Tableau 2).

Discussion

Par rapport aux outils conventionnels, les résultats indiquent que les outils de martelage activés par ultrasons réduisent globalement les niveaux d'émission vibratoire (Cf. Tableaux 1 et 2). Cependant,

il existe de fortes variations selon le type de tête et d'embout utilisé pour une même pièce martelée avec des facteurs allant de 1 à 4 (Cf. Tableau 2). Pour les outils à ultrasons les plus vibrants, cela conduit à limiter les durées d'utilisation à un peu plus de 2 heures pour atteindre la valeur du seuil réglementaire d'action fixée à $2,5 \text{ m.s}^{-2}$. Des analyses complémentaires montrent un contenu

CONFIGURATION MESURÉE	NIVEAU VIBRATOIRE (m.s^{-2})
	a_{hv}
Marteau à river Atlas Copco RRH12	6,3
Marteau burineur Atlas Copco RRC 75B-01	3,3
Chasse à parer (7 coups – durée : 15 s)	12,9
Masse (5 shots – durée : 9 s)	21,9

↑ TABLEAU 1 Niveaux d'émission vibratoire des outils conventionnels.

CONFIGURATION MESURÉE	NIVEAU VIBRATOIRE (m.s^{-2})	
	a_{hv}	a_{pv}
Tête PR10, tôle d'aluminium	4,6	26,0
Tête PR10, pièce en acier	4,8	28,1
Tête PR17, pièce en acier, poignée principale	1,0	9,5
Tête PR17, tôle d'aluminium, poignée principale	1,2	13,1
Tête PR17, tôle d'aluminium, accéléromètre sur la tête	1,5	14,4
Tête PR17, pièce en acier, accéléromètre sur la tête	1,3	14,8
Tête PR13, tôle d'aluminium	2,4	10,4
Tête PR13, tôle d'acier	1,7	13,1
Nomad, tôle d'aluminium, poignée arrière	4,7	14,6
Nomad, tôle d'acier, poignée arrière	4,9	23,1
Nomad, tôle d'aluminium, accéléromètre sur la tête	3,7	10,2
Nomad, tôle d'acier, accéléromètre sur la tête	4,0	18,7

↑ TABLEAU 2 Niveaux d'émission vibratoire des outils de martelage activés par ultrasons.



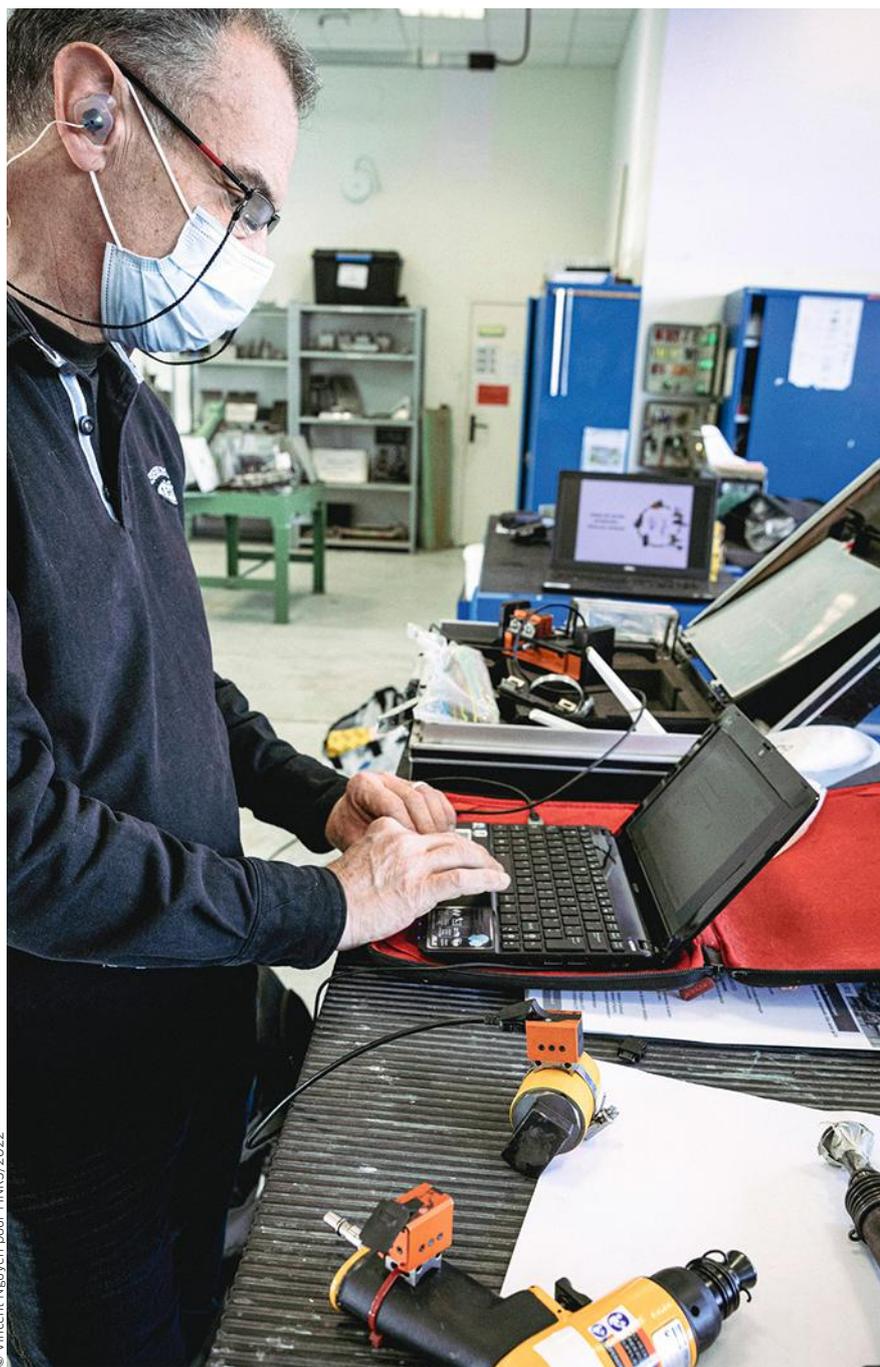
spectral important dans les hautes fréquences (50 à 500 Hz), ce qui explique les plus fortes valeurs de a_{pu} par rapport à a_{hv} .

De plus, des échanges avec l'entreprise ont montré que les tests de qualification des outils de martelage activés par ultrasons, face aux outils de dressage conventionnels, n'ont pas donné satisfaction en termes d'efficacité pour réaliser les tâches de formage ou martelage. Les opérateurs n'ont pas pu retrouver la même qualité de finition. Une plus longue adaptation et un meilleur entraînement à l'utilisation des machines à ultrasons seraient nécessaires, avant de conclure sur l'intérêt de telles machines pour ces opérations de formage ou de martelage.

Conclusions

La plupart des essais menés avec les marteaux activés par ultrasons indiquent des réductions des niveaux d'émission vibratoire lors du dressage et du formage des pièces métalliques. Malgré cela, cette technologie émergente de formage ne réduit pas dans tous les cas les vibrations en deçà des valeurs réglementaires. D'autre part, on observe que ces outils génèrent des vibrations haute fréquence significatives. De plus, les essais de ces nouvelles machines n'ayant pas donné satisfaction à l'entreprise de construction navale en termes de production, les procédés classiques ont pour le moment été conservés.

Des essais complémentaires ont été réalisés pour la tête PR10, montée sur le marteau par ultrasons Stress Voyager, chez le fabricant dans des conditions opérationnelles plus faciles à mettre en œuvre, plus reproductibles et mieux maîtrisées qu'en situation réelle. Néanmoins, les pièces travaillées étaient similaires à celles rencontrées dans les chantiers navals. Il a été constaté une réduction nette des niveaux d'émission vibratoire par rapport à ceux des machines conventionnelles. Ces derniers essais ouvrent donc des perspectives plutôt favorables pour l'adoption de ces nouvelles technologies dans les années à venir. ●



© Vincent Nguyen pour l'INRS/2022

BIBLIOGRAPHIE

[1] EUROPE TECHNOLOGIE GROUP – Procédé STRESSONIC® – Traitement de surface par impacts SONATS. Accessible sur : <https://sonats-et.com/stressonic-traitement-mecanique-par-impacts>

[2] 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, 2002. Accessible sur : <https://m.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/> (document payant).

[3] NORME NF EN ISO 5349-2 – Vibrations mécaniques. Mesurage et évaluation de l'exposition des individus aux vibrations transmises par la main.

Partie 2 : Guide pratique pour le mesurage sur le lieu de travail. Afnor, 2001. Accessible sur : <https://m.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/> (document payant).

[4] FASCICULE DE DOCUMENTATION FD ISO/TR 18570 – Vibrations mécaniques. Mesurage et évaluation de l'exposition des individus aux vibrations transmises par la main. Méthode supplémentaire pour l'évaluation du risque de troubles vasculaires. Afnor, 2018. Accessible sur : <https://m.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/> (document payant).

Capteurs de vibrations installés pour mesurer les vibrations de marteaux à riveter en classe de lycée professionnel.

ÉTUDE PRÉLIMINAIRE SUR L'ACTIVATION ET L'ANISOTROPIE DU MUSCLE DANS LA MODÉLISATION DES VIBRATIONS MAIN-BRAS

SIMON VAUTHIER, CHRISTOPHE NOËL
INRS,
département
Ingénierie des
équipements
de travail

JÉRÔME CHAMBERT, EMMANUELLE JACQUET
Université
de Franche-
Comté, CNRS,
institut
FEMTO-ST

NICLA SETTEMBRE
Département
de chirurgie
vasculaire,
CHRU Nancy,
Université de
Lorraine

HA HIEN PHUONG NGO, JEAN-LUC GENNISSON
BioMaps,
Université
Paris-Saclay,
CEA, CNRS,
Inserm

EMMANUEL FOLTÈTE
Supmicrotech,
CNRS, institut
FEMTO-ST

Les efforts de poussée et de serrage exercés par un opérateur pour tenir ou guider une machine ont une influence sur le niveau de vibrations transmises à la main. Une exposition prolongée à de forts niveaux présente un risque d'apparition du syndrome des vibrations main-bras. Ainsi, la compréhension des phénomènes impliqués dans la transmission des vibrations est un enjeu important dans la prévention des pathologies d'origine vibratoire. À cette fin, un modèle numérique de main est développé et cet article présente des premiers résultats issus de son exploitation.

Introduction

En France, environ 2,2 millions de salariés sont exposés à des vibrations transmises aux membres supérieurs. Or, une exposition prolongée à de forts niveaux vibratoires peut engendrer des troubles divers, regroupés sous la dénomination de syndrome des vibrations main-bras [1]. C'est pourquoi, la dose vibratoire journalière pouvant être reçue par les travailleurs est limitée par le Code du travail. L'évaluation réglementaire de cette dose [2] souffre néanmoins de lacunes : les efforts de serrage et de poussée exercés par l'opérateur ne sont pas pris en compte, alors même qu'ils influent sur la réponse dynamique du système main-bras.

Pour mieux comprendre l'influence de ces efforts de serrage ou de poussée sur la dose vibratoire, la propagation des vibrations dans des régions spécifiques de la main (muscles, tendons, chair, peau, par exemple) a été modélisée en laboratoire. À cette fin, un modèle de main basé sur la méthode des éléments finis a été développé. Ce modèle permet de simuler la réponse de la main au serrage et à la poussée pour différents niveaux d'effort, puis de calculer la réponse dynamique de la main aux vibrations.

L'une des premières étapes du développement fut de mesurer et d'inclure dans la modélisation la rigidification mécanique des muscles, liée à leur contraction associée à l'effort de serrage (plus on serre, plus le muscle devient raide en réponse au mécanisme d'activation musculaire par le système nerveux central). Pour caractériser l'augmentation de la raideur des muscles qui en découle,

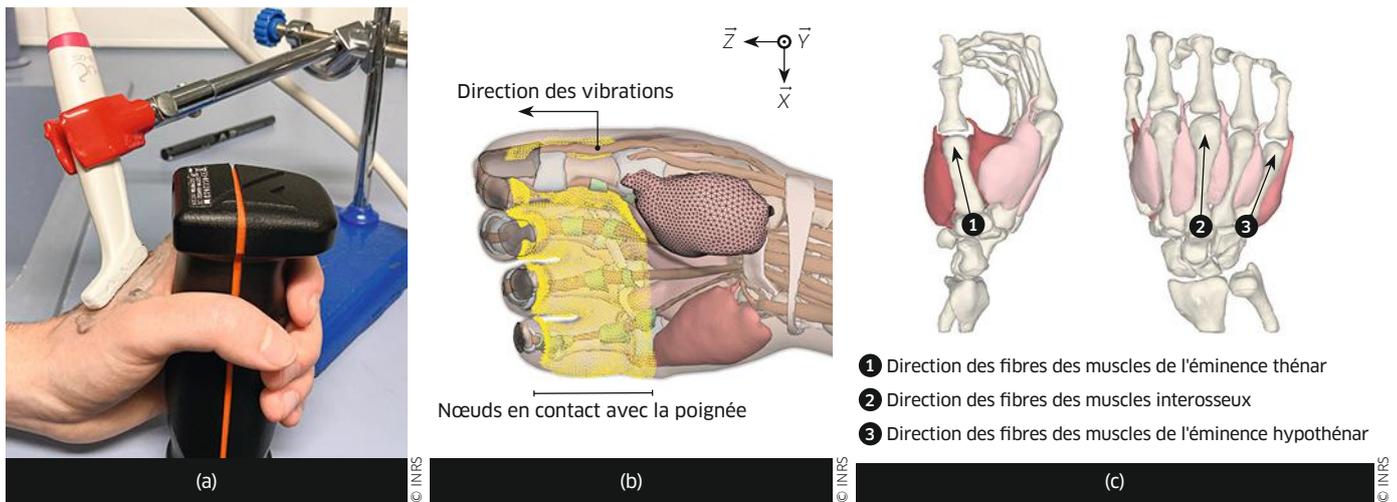
il existe une technique particulière d'imagerie médicale appelée élastographie ultrasonore (*Supersonic Shear Imaging, SSI*) [3]. Cette technique a été utilisée sur un des muscles de la main, le premier muscle interosseux dorsal (PMID) dans plusieurs conditions d'effort de serrage. Les muscles sont formés de fibres. La raideur du muscle dans la direction de ces fibres musculaires est différente de sa raideur dans la direction perpendiculaire aux fibres ; on parle d'anisotropie. L'élastographie SSI peut estimer les raideurs du muscle parallèlement et perpendiculairement à la direction des fibres musculaires. Les mesures ainsi faites ont été exploitées pour en déduire les lois de comportement mécanique du muscle, dans les directions parallèles et perpendiculaires aux fibres musculaires. Les paramètres de ces lois varient en fonction de l'activation musculaire. Les objectifs de la présente étude étaient, d'une part, de démontrer la faisabilité de la démarche qui combine l'élastographie et la modélisation par éléments finis et, d'autre part, de quantifier l'influence de l'activation musculaire sur la propagation des vibrations.

Matériel et méthode

Mesure de la raideur du muscle par la technique SSI

La raideur du muscle a été mesurée à l'aide d'un scanner ultrasonore Aixplorer® en mode SSI. Un dispositif expérimental a été mis en place pour mesurer la raideur du muscle choisi (PMID) d'un sujet volontaire, serrant une poignée instrumentée





↑ FIGURE 1
 (a) dispositif permettant de mesurer la raideur par élastographie (la sonde de l'échographe est en contact avec la main) et la force de serrage (poignée noire);
 (b) modèle éléments finis de la main;
 (c) directions des fibres musculaires.

avec des capteurs d'effort (Cf. Figure 1a). L'essai s'est déroulé de la façon suivante. La force de serrage maximale du sujet est mesurée à l'aide de la poignée instrumentée (sans mesure élastographique). Une série de sept niveaux allant de 0 à 30 % de cet effort maximal mesuré est alors définie (par pas de 5 %). Ensuite, l'expérimentateur oriente la sonde ultrasonore parallèlement ou perpendiculairement aux fibres musculaires, en s'aidant de l'image du muscle visible sur l'écran de l'échographe.

Le volontaire sur lequel on a fait la mesure est un homme de 23 ans, non-fumeur et en bonne santé. Il serre la poignée de façon à atteindre une consigne d'un niveau de serrage tiré aléatoirement dans la série de sept définie précédemment. Pour cela, il ajuste son niveau de serrage qui s'affiche sur un écran. Une fois la consigne atteinte et maintenue, l'expérimentateur mesure la raideur du muscle (la mesure est quasiment instantanée et les manipulations durent une dizaine de secondes). L'opération est répétée (après une phase de repos de quelques minutes) pour chacun des sept niveaux et les deux directions de mesure. Chaque mesure permet ainsi d'obtenir une cartographie de la raideur du muscle (la raideur du muscle n'est pas constante dans tout le muscle mais peut varier spatialement). Les travaux réalisés ont permis de déterminer une raideur moyenne calculée dans une surface de 5 x 5 mm² (Cf. Figure 2 a et b – carré blanc). Cette recherche a reçu l'autorisation du CPP n° 2022-A01616-37 en date du 7 novembre 2022.

Modélisation par éléments finis des vibrations main-bras

Le modèle des éléments finis consiste à effectuer des calculs dans un ensemble de petits éléments représentant la main; ces petits éléments forment le maillage de la main. Le maillage du modèle a été construit à partir d'images fournies par un laboratoire extérieur et acquises par imagerie par résonance magnétique (IRM) de la main d'un volontaire,

qui est un homme de 28 ans [4]. Il est constitué de tétraèdres dont les dimensions sont d'environ 1 mm. La plupart des éléments anatomiques de la main sont inclus : peau, tissus, os, ligaments, tendons, etc. (Cf. Figure 1b). Les muscles sont divisés en trois groupes : interosseux, thénar et hypothenar. À chaque groupe est associée une direction décrivant approximativement l'orientation des fibres des muscles qui composent ce groupe; elle correspond à la direction principale du métacarpe le plus proche (Cf. Figure 1c). Concernant les conditions aux limites du modèle mécanique, les nœuds du maillage en contact avec la poignée ont été encastres dans toutes les directions, à l'exception de la direction d'excitation (Cf. Figure 1b). La poignée n'est pas incluse dans le modèle. Le modèle inclut une très petite partie des os de l'avant-bras (radius et ulna) et les tissus mous environnants. Il y a donc une mobilité possible entre la zone des carpes du poignet et celle du radius et de l'ulna. Les nœuds de l'extrémité du modèle (extrémité de la petite partie de l'avant-bras prise en compte) sont libres (le bras et l'avant-bras complets sont exclus de notre modèle).

Les paramètres des lois de comportement mécanique des muscles sont déduits des mesures par élastographie. Pour les autres éléments anatomiques de la main, les propriétés mécaniques sont issues de la littérature [4]. Trois scénarios de calcul, correspondant à trois états différents des muscles, ont été considérés :

- muscles non activés (pas de serrage) et comportement mécanique supposé identique dans les directions parallèle et perpendiculaire aux fibres musculaires (le muscle est alors dit isotrope);
- activation musculaire maximale (serrage maximal) et muscles supposés isotropes;
- activation musculaire maximale (serrage maximal) et muscles supposés anisotropes, caractérisés par des propriétés mécaniques différentes dans le sens des fibres musculaires et perpendiculairement à ces fibres.

Les muscles ont une anisotropie particulière, car il y a une symétrie de rotation autour de l'axe des fibres ; ils sont dits isotropes transverses.

Pour chaque scénario de modélisation, une analyse harmonique a été menée à l'aide d'un calcul par superposition modale (base modale de 500 modes) sur la plage 10-400 Hz. Une accélération sinusoïdale dont la fréquence varie entre 10 et 400 Hz est appliquée aux nœuds du maillage en contact avec la poignée, simulant ainsi la vibration de l'outil. Les modes propres sont assimilables à la carte d'identité vibratoire d'un système mécanique. Lorsque l'on souhaite calculer la réponse à une excitation sinusoïdale d'un système dans une gamme de fréquences donnée, il est possible de calculer les modes propres dans cette gamme de fréquences (c'est la base modale), puis la réponse vibratoire se calcule à partir des modes propres précédents. De l'amortissement modal a été ajouté au système (c'est-à-dire que chaque mode s'amortit avec une constante de temps qui lui est propre. L'amortissement modal est un scalaire décroissant de 0,17 à 0,02 avec la fréquence jusqu'à 200 Hz et constant à la valeur 0,02 au-delà). C'est un outil mathématique pour tenir compte de la viscosité des tissus de la main, c'est-à-dire de leur capacité à dissiper les vibrations.

Les calculs ont été exécutés avec le logiciel de simulation par éléments finis LS-Dyna® (Ansys®).

À l'issue des simulations, l'impédance mécanique¹ du système main-bras qui a été calculée avec le modèle développé a été comparée à celle donnée dans la norme ISO 10068 [5]. Deux autres grandeurs ont été extraites des simulations : la transmissibilité des vibrations entre le point d'entrée de la poignée et un point à l'intérieur de l'index (une artère passe à cet endroit dans la réalité, bien qu'elle ne soit pas modélisée), et la moyenne des transmissibilités entre le point d'entrée et l'ensemble des nœuds du PMID. La transmissibilité vibratoire entre un point d'entrée et de sortie des vibrations est définie comme le ratio de l'accélération au point de sortie

sur l'accélération au point d'entrée. Si la transmissibilité vaut 1, alors toute la vibration à l'entrée se retrouve à la sortie; si elle est supérieure à 1, la vibration à la sortie est amplifiée.

Résultats

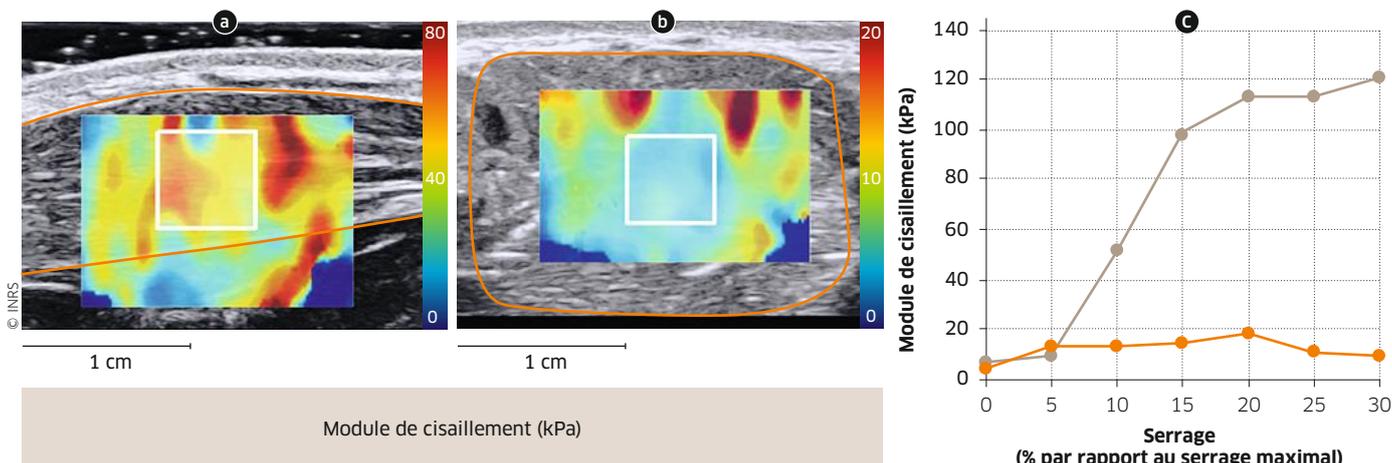
Effets de la force de serrage et de l'anisotropie du muscle sur la raideur

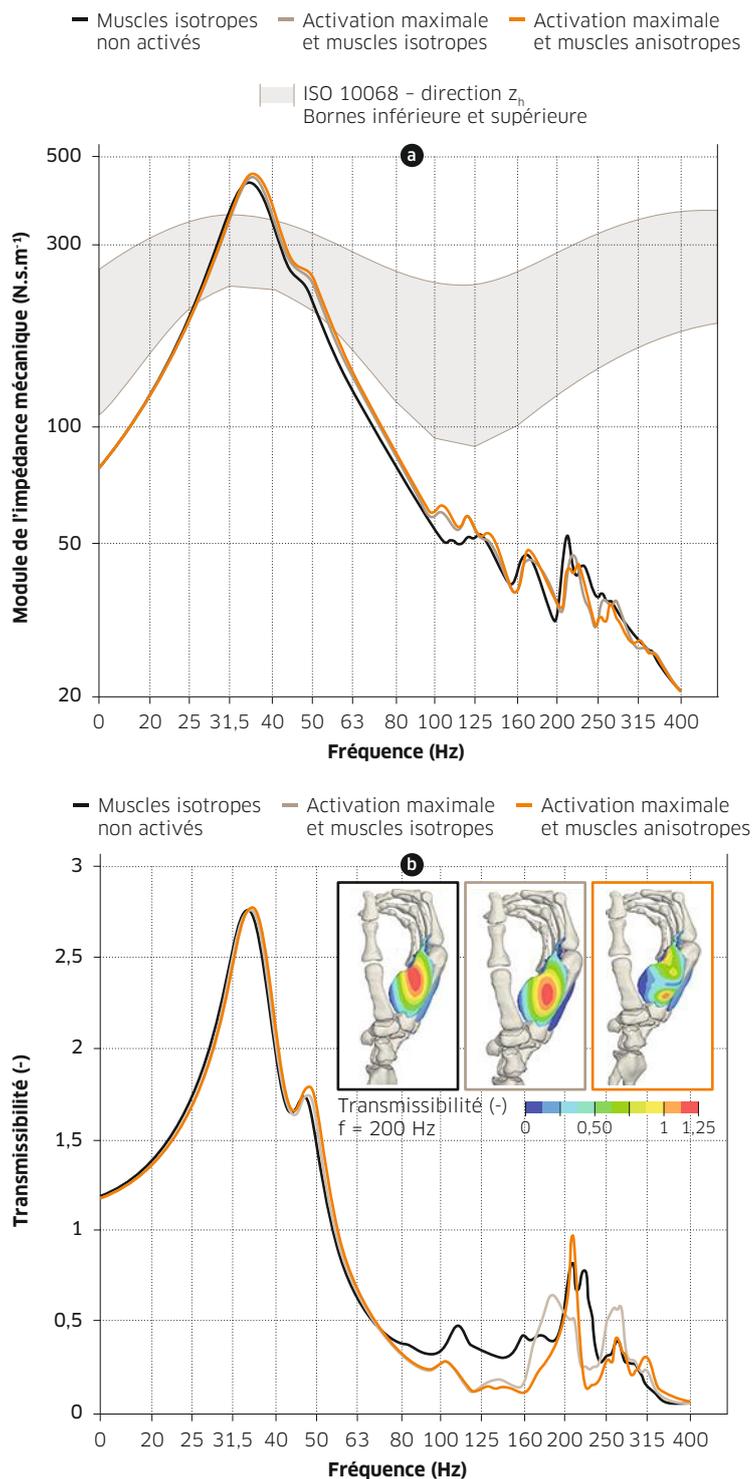
En physique des matériaux, le module de cisaillement est une grandeur utilisée pour caractériser la raideur d'un matériau. C'est le module de cisaillement qui est mesuré par élastographie ultrasonore. Les mesures par élastographie ont montré que le module de cisaillement du muscle évoluait différemment en fonction de la direction des fibres (Cf. Figure 2c). Parallèlement aux fibres, le module de cisaillement dépend fortement du serrage, et est multiplié par plus de 10 entre 0 et 30 % de force, avec une forte augmentation entre 5 et 15 %. Perpendiculairement aux fibres, le module reste approximativement constant sur toute la plage de serrage. Ces mesures ont permis d'identifier les paramètres du modèle par éléments finis.

Effets de l'activation musculaire sur l'impédance mécanique au point d'entrée du système main-bras et sur la transmissibilité locale

À partir des mesures des modules de cisaillement (Cf. Figure 2), il est possible de déduire les propriétés mécaniques du muscle et ainsi, de mettre en œuvre le modèle éléments finis. La résonance du poignet autour de 35 Hz est observable à la fois sur les simulations et sur l'impédance moyenne de la norme ISO 10068 [5] (Cf. Figure 3a). Cette impédance normalisée correspond à une impédance moyenne mesurée sur une cohorte de sujets. Aux fréquences plus élevées, les impédances simulées diffèrent de la norme. L'activation musculaire a un effet marqué au-delà de 100 Hz sur la transmissibilité à l'intérieur du muscle, changeant l'amplitude et la fréquence des pics (Cf. Figure 3b).

↓ FIGURE 2 Exemples de mesures de module de cisaillement par SSI dans le PMID : (a) parallèlement et (b) perpendiculairement aux fibres. Le fond représente l'image des tissus de la main fournie par l'échographe avec le muscle détourné en orange. Le carré blanc représente l'aire de moyennage du module; (c) moyenne des modules de cisaillement parallèlement et perpendiculairement aux muscles en fonction de la force de serrage.





↑ FIGURE 3
(a) impédances mécaniques calculées par le modèle éléments finis comparées à la norme ISO 10068; (b) transmissibilité vibratoire moyenne entre la poignée et le PMID.

Discussion – Conclusions

La technique d'élastographie SSI a permis de mesurer la raideur du premier muscle interosseux dorsal en fonction du serrage. Grâce à ces mesures, il a été démontré que la raideur dépendait fortement de l'activation musculaire et de l'orientation des fibres. Plusieurs sources d'incertitude sont apparues au cours des essais et pourraient être responsables de la potentielle dispersion entre les mesures qui seront réalisées dans le futur : l'hétérogénéité des

muscles et l'orientation de la sonde entre autres. Avant d'étendre les essais à une cohorte de sujets, une attention particulière devra donc être portée sur la nécessité de rendre le dispositif plus robuste et quantifier ces erreurs de mesure.

Les simulations ont montré que l'activation du muscle a un effet significatif sur la transmission des vibrations au-delà de 100 Hz à l'intérieur des muscles. L'écart entre les impédances calculées à l'aide du modèle et l'impédance moyenne de la norme ISO 10068 [5] est probablement dû aux nombreuses simplifications du modèle. Les prochaines étapes de la modélisation seront d'ajouter des conditions aux limites plus réalistes et des lois de comportement mécanique plus complexes prenant en compte par exemple la dissipation visqueuse des tissus mous de la main. En outre, la superposition modale présente de fortes limitations et la complexification du modèle nécessitera d'utiliser d'autres méthodes de résolution numérique.

En conclusion, il est tout à fait possible d'utiliser non seulement cette technique SSI pour mesurer la raideur des muscles en fonction du serrage, mais aussi et surtout, d'utiliser ces mesures pour alimenter un modèle par éléments finis complexe de main. Le modèle élaboré a permis de simuler la réponse dynamique de la main aux vibrations et d'estimer localement les effets de l'activation musculaire sur la propagation des vibrations à l'intérieur de la main. ●

1. L'impédance mécanique est une grandeur caractéristique d'un système mécanique (ici, la main) liée à sa résistance à transmettre la vibration.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BOVENZI M. – Medical aspects of the hand-arm vibration syndrome. *International journal of industrial ergonomics*, 1990, 6, pp. 61-73. Accessible sur : [doi.org/10.1016/0169-8141\(90\)90051-3](https://doi.org/10.1016/0169-8141(90)90051-3)
- [2] NORME NF EN ISO 5349-1 – Vibrations mécaniques. Mesure et évaluation de l'exposition des individus aux vibrations transmises par la main. Partie 1 : Exigences générales. Afnor, 2002. Accessible sur : <https://m.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/> (document payant).
- [3] BOUILLARD K., NORDEZ A, HUG F. – Estimation of individual muscle force using elastography. *PLoS One*, 2011, 6. Accessible sur : [doi:10.1371/journal.pone.0029261](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0029261)
- [4] NOËL C. ET AL. – A multiscale approach for predicting certain effects of hand-transmitted vibration on finger arteries. *Vibration*, 2022, 5, pp. 213-237. Accessible sur : [doi:10.3390/vibration5020014](https://doi.org/10.3390/vibration5020014)
- [5] NORME ISO 10068 – Vibrations et chocs mécaniques. Impédance mécanique du système main-bras au point d'entrée (indisponible en français). Titre anglais : *Mechanical vibration and shock-mechanical impedance of the human hand-arm system at the driving point*. Genève, ISO, 2012. Accessible sur : <https://www.iso.org/fr/standard/53714.html> (document payant).

MODÉLISATION DE LA STÉNOSE ARTÉRIELLE INDUITE PAR LES VIBRATIONS TRANSMISES À LA MAIN : UN MOYEN DE PRÉVENIR LE RISQUE VIBRATOIRE VASCULAIRE ?

Les effets sur la santé des vibrations transmises au système main – bras s’installent au long cours. Il est difficile de les connaître précisément, sans l’apport d’études épidémiologiques qui peuvent s’avérer complexes à mener. De ce fait, la modélisation est de plus en plus utilisée pour prédire l’évolution du vivant. Cet article présente une modélisation de la dégradation d’une artère de la main, qui a permis d’obtenir de précieuses indications sur les conséquences délétères des vibrations, et qui pourrait *in fine* contribuer à une meilleure prévention du risque vasculaire vibratoire.

CHRISTOPHE NOËL,
MAHA REDA
INRS,
département
Ingénierie des
équipements
de travail

EMMANUELLE JACQUET
Université
de Franche-
Comté, CNRS

NICLA SETTEMBRE
Département
de chirurgie
vasculaire,
CHRU Nancy,
Université de
Lorraine

Contexte

Une exposition prolongée à des vibrations de niveau élevé transmises à la main est susceptible d’engendrer des troubles vasculaires tels que le syndrome de Raynaud d’origine vibratoire, appelé également maladie des doigts blancs (*Vibration White Finger* – en anglais VWF). Un grand nombre d’études physiologiques, histologiques et épidémiologiques [1] ont mis en évidence que la dose réglementaire d’exposition aux vibrations main – bras, évaluée selon la norme ISO 5349 [2], tend à sous-estimer les lésions vasculaires induites par les vibrations.

Afin de définir, à terme, une dose d’exposition vibratoire qui refléterait mieux ces atteintes sur les artères, des travaux ont été conduits sur la base de deux éléments de réflexion [3]. Tout d’abord, une première hypothèse a été posée selon laquelle les vibrations peuvent diminuer la contrainte de cisaillement¹ (*Wall Shear Stress* – WSS) exercée par le sang sur la couche interne de l’artère, directement en contact avec le sang. Une seconde hypothèse, induite grâce à plusieurs études dans des domaines différents de celui des vibrations [4], est qu’une baisse répétée de ce WSS pourrait entraîner un rétrécissement du diamètre de la lumière des artères des doigts (sténose artérielle). Cette sténose artérielle a été observée chez les travailleurs souffrant d’un syndrome de Raynaud d’origine vibratoire. Elle est une caractéristique, parmi d’autres,

de ce trouble vasculaire. L’approche en deux étapes a dès lors consisté à :

- évaluer la relation entre les propriétés des vibrations (fréquence, amplitude) et la diminution du WSS;
- tenter de lier cette baisse de WSS induite par les vibrations et la sténose artérielle résultante, *via* un modèle de calcul qualifié de « mécano-biologique », car il implique à la fois des notions de mécanique et de biologie des artères.

Le présent article vise à établir comment cette stratégie pourrait *in fine* ouvrir la voie à une nouvelle façon de prévenir le risque vasculaire vibratoire.

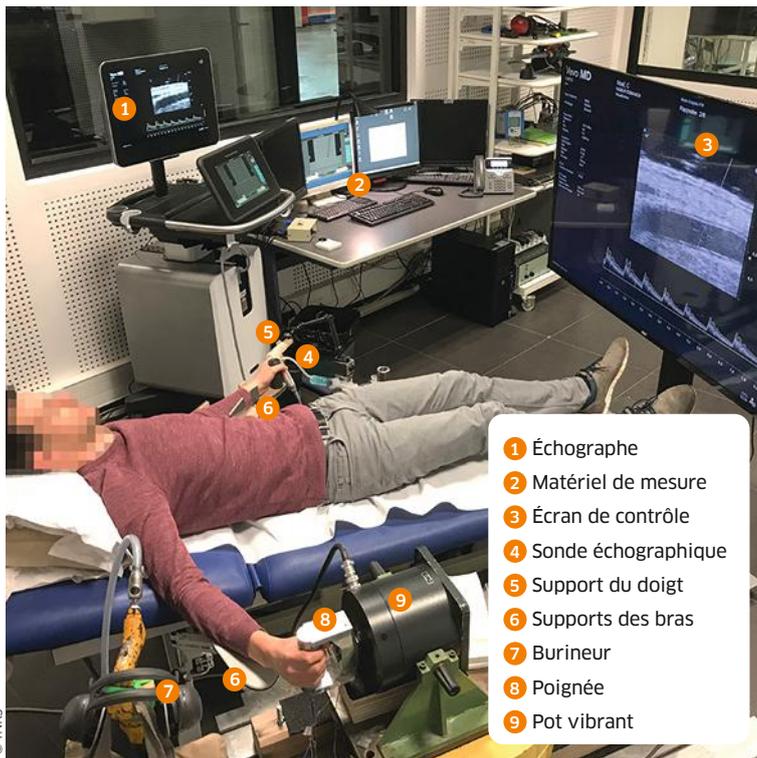
Matériel et méthode

Évaluation de la baisse du WSS induite par les vibrations

Dans la palme de la main et les doigts se trouvent des capteurs sensoriels qui permettent de ressentir les vibrations. Quand le cerveau reçoit, *via* ces capteurs biologiques, l’information qu’une vibration est entrée dans la main, il envoie un signal chimique qui cause la fermeture des très petites artères de l’ensemble des extrémités. Ainsi, quand la main gauche est vibrée, le flux sanguin de la main droite est aussi réduit. La réduction de ce débit sanguin entraîne une diminution du WSS dans l’artère de l’index, qui a été mesurée.

Un dispositif expérimental a été développé pour évaluer le WSS induit par les vibrations dans une





- 1 Échographe
- 2 Matériel de mesure
- 3 Écran de contrôle
- 4 Sonde échographique
- 5 Support du doigt
- 6 Supports des bras
- 7 Burineur
- 8 Poignée
- 9 Pot vibrant

↑ FIGURE 1
Banc d'essais pour mesurer le WSS.

artère de l'index gauche au niveau de l'articulation située entre la deuxième et la troisième phalange [5]. La main droite, elle, était soumise à des vibrations mécaniques. Cette recherche a reçu l'autorisation du CPP n° 2018-A00614-651 en date du 6 décembre 2018.

Le dispositif développé (Cf. Figure 1) était principalement constitué d'un échographe avec une grande résolution spatiale (30 micromètres) et d'un pot vibrant. Au total, 24 volontaires² en bonne santé et non-fumeurs, âgés de 19 à 39 ans (moyenne d'âge : 25,1 ans) ont participé à la campagne de mesures du WSS à température ambiante contrôlée (23 °C ± 0,5 °C). Le protocole consistait à estimer le WSS pendant trois phases consécutives de 10 secondes (s) chacune : repos, exposition aux vibrations, et retour au calme. La vibration était une accélération harmonique pure à 125 Hz pour six

amplitudes : 1, 2, 5, 10, 20 et 40 m.s⁻² en valeur efficace, non pondérée par le filtre de pondération de la norme ISO 5349 [2]. Les données brutes mesurées étaient le diamètre de l'artère obtenu avec l'échographe et la vitesse maximale du sang acquise par mesure Doppler. Diamètre et vitesse étaient ensuite introduits dans un modèle de mécanique d'écoulement de fluide pulsé pour en déduire le WSS. Les moyennes temporelles des WSS (*Time Averaged WSSs* – *TAWSSs*) sur chacune des trois phases de 10 s ont ensuite été calculées.

Modélisation de la sténose artérielle induite par les vibrations

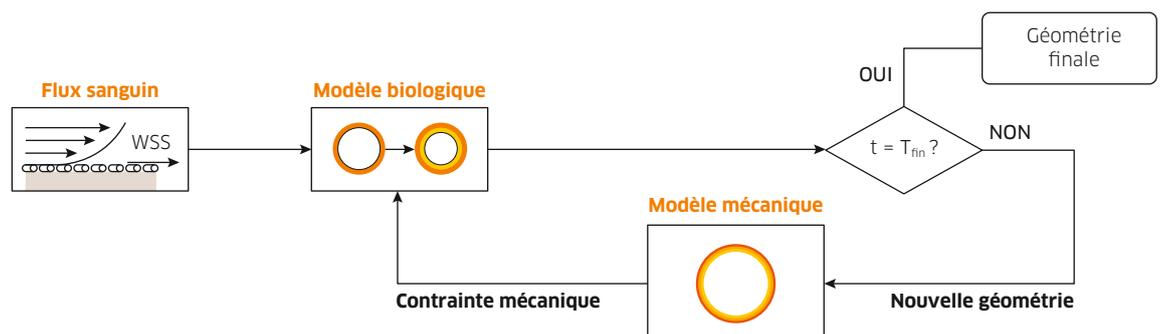
Les simulations mécano-biologiques de la sténose artérielle s'appuient sur le couplage d'un modèle d'agents (*agent-based model* – *ABM*) simulant, sur des temps longs (années d'exposition aux vibrations), certains mécanismes biologiques conduisant à la diminution du diamètre de l'artère et d'un modèle de biomécanique pour prédire les forces mécaniques à l'intérieur de l'artère (Cf. Figure 2). Chacun de ces modèles est adapté de la littérature. Pour construire le modèle biologique, nous avons formulé l'hypothèse selon laquelle la sténose artérielle résulte de la prolifération et de la migration de certaines cellules de la paroi de l'artère qui s'accumulent vers la partie la plus interne de l'artère (intima). Cette accumulation de cellules, associée à une génération excessive de collagène, tend à boucher l'artère. Le système multi-agents (ABM) décrit les phénomènes biologiques impliqués dans la sténose de l'artère au niveau cellulaire et moléculaire [6]. Ces phénomènes sont en partie influencés, d'une part par les valeurs du WSS, introduites comme données d'entrée, et d'autre part par les contraintes mécaniques dans l'artère qui sont simulées par le modèle mécanique.

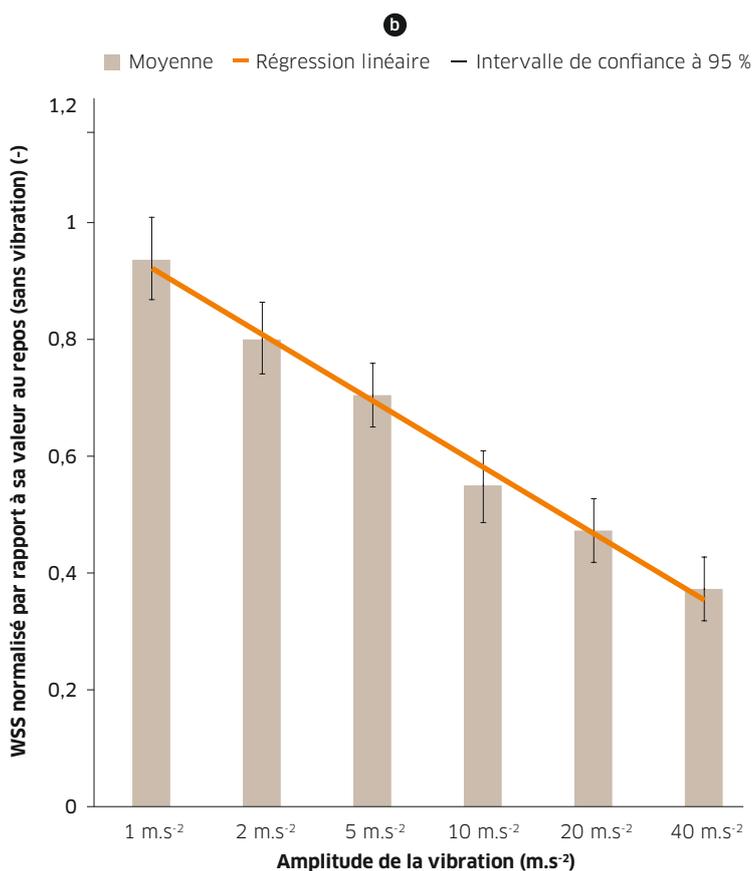
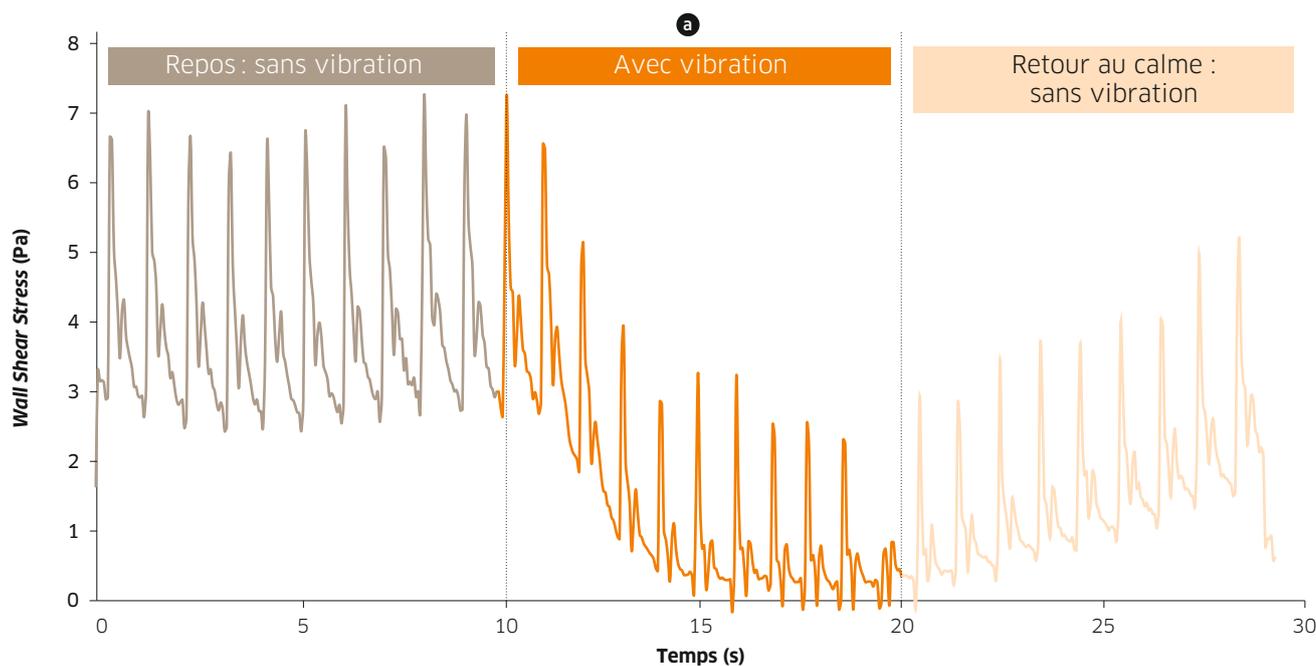
Résultats

Effet aigu des vibrations sur l'hémodynamique artérielle

La diminution du WSS relative à une exposition aux vibrations se produit quelques

FIGURE 2 →
Schéma synoptique de la modélisation mécano-biologique pour simuler la croissance artérielle chronique.





↑ FIGURE 3

Effets des vibrations sur le flux sanguin :

- (a) baisse du WSS consécutive à l'exposition à une vibration d'amplitude 40 m.s⁻² à 125 Hz;
- (b) influence de l'amplitude des vibrations sur la baisse relative de WSS.

secondes après le début de l'excitation vibratoire (Cf. Figure 3a). Les oscillations rapides (environ 1 s) observées dans ce signal correspondent au cycle systole-diastole (pouls) du sujet. La baisse du WSS peut être appréciée en regardant l'évolu-

tion temporelle de l'enveloppe de la courbe tracée (Cf. Figure 3a).

Les TAWSSs normalisés par rapport à l'état sans vibration (Cf. Figure 3b) dépendent de l'amplitude de la vibration de manière statistiquement significative. Ils suivent une loi de régression linéaire log₂ de l'amplitude de la vibration (Cf. droite orange sur la Figure 3b). Cette étude a également montré que la baisse du WSS n'est pas influencée par la fréquence des vibrations.

Réponse chronique de l'artère à l'échelle tissulaire et moléculaire due à la chute du WSS induite par les vibrations

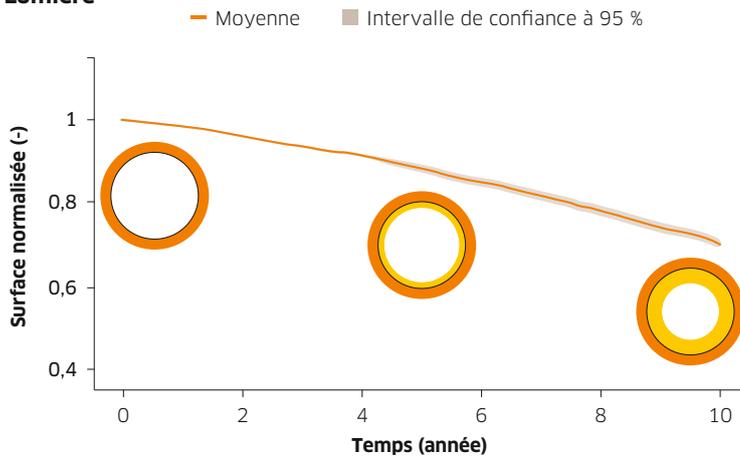
Selon le modèle mécano-biologique utilisé pour simuler le cas d'un travailleur exposé tout au long de sa carrière, la surface normalisée de la lumière artérielle (Cf. Figure 4) diminue continuellement avec le nombre d'années d'exposition aux vibrations. La réduction de cette surface est de 12 % à 5 ans et de 30 % après 10 ans d'exposition.

Abaques de prédictibilité de la sténose artérielle

Le degré de sténose artérielle (exprimé en pourcentage) est défini comme la surface de la lumière de l'artère rapportée à sa valeur initiale. L'abaque de prédiction de la sténose artérielle obtenu à l'aide des simulations mécano-biologiques (Cf. Figure 5) mentionne un degré de sténose artérielle de 20 % pour un travailleur exposé aux vibrations 2,5 heures par jour pendant 10 ans. D'après le modèle, ce même niveau de sténose est également atteint après 15 ans de travail pour une exposition quotidienne aux vibrations d'environ 1 h 10 minutes.

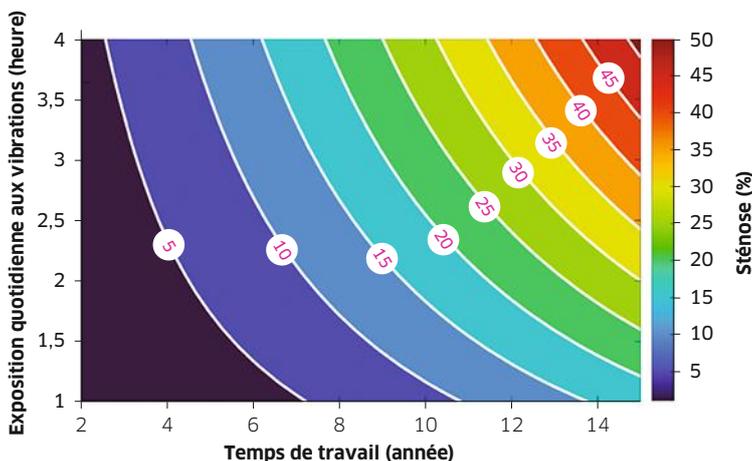


Lumière



↑ FIGURE 4

Simulation de l'évolution de la surface normalisée de la lumière artérielle au cours de la vie professionnelle lors d'une exposition aux vibrations pendant 4 heures par jour. La zone jaune correspond aux cellules de l'artère qui ont migré vers la partie interne de l'artère.



↑ FIGURE 5

Degré de sténose (%) calculé en fonction des années de vie professionnelle et de la durée d'exposition quotidienne à une vibration d'amplitude 40 m.s⁻² (valeur efficace non pondérée) à 125 Hz.

Discussion

Le stade de développement du syndrome de Raynaud d'origine vibratoire peut être classé en fonction du degré de sténose artérielle : type 0 : artère saine, type I : sténose < 50 %, type II : sténose > 50 %, type III : obstruction de l'artère, et type IV : obstruction d'artères en amont du doigt. Le modèle développé dans cette étude prévoit une sténose d'environ 30 % après 10 ans d'exposition à une vibration d'amplitude 40 m.s⁻² (non pondérée) pendant 4 heures par jour, conduisant ainsi à une sténose de type I.

Par ailleurs, la baisse de WSS est liée à l'amplitude de la vibration qui est prise en compte dans le modèle. Ainsi, en mesurant sur le terrain l'accélération émise par une machine vibrante, la chute de WSS générée par cette machine peut être calculée. Si, de plus, le cycle d'exposition quotidien aux vibrations est connu, notre modèle mécano-biolo-

gique permettra d'estimer le degré de sténose et, donc, le stade du syndrome de Raynaud lié à une exposition chronique aux vibrations.

Ce modèle prend en compte uniquement une partie des mécanismes physiopathologiques conduisant au syndrome de Raynaud d'origine vibratoire et devra être conforté par des tests complémentaires, sur artères *exo vivo* par exemple.

Conclusion

Il a été possible d'établir une relation entre l'amplitude des vibrations et la baisse du WSS. Le modèle mécano-biologique élaboré a ensuite été en mesure de prévoir la sténose artérielle chronique provoquée par ces modifications du débit sanguin. Le degré de sténose associé à l'état pathologique reste à définir. Le lien entre l'amplitude des vibrations, l'exposition quotidienne aux vibrations, la durée de vie professionnelle et la sténose qui en résulte pourra être utilisé pour élaborer une nouvelle définition de la dose vibratoire. ●

1. Il s'agit d'une contrainte liée à la viscosité d'un liquide, qui résulte ici des forces de frottement du sang sur les parois de l'artère.
2. Vingt hommes et quatre femmes ont participé aux essais. Pour les femmes, l'imagerie n'a pas bien fonctionné, car la résolution spatiale de l'échographe n'était pas assez importante au regard de la taille de leurs artères.

BIBLIOGRAPHIE

[1] FASCICULE DE DOCUMENTATION FD ISO/TR 18570 – Vibrations mécaniques. Mesurage et évaluation de l'exposition des individus aux vibrations transmises par la main. Méthode supplémentaire pour l'évaluation du risque de troubles vasculaires. Afnor, 2018. Accessible sur : <https://m.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/> (document payant).

[2] 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, 2002. Accessible sur : <https://m.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/> (document payant).

[3] NOËL C., SETTEMBRE N., REDA M., JACQUET E. – A multiscale approach for predicting certain effects of hand-transmitted vibration on finger arteries. *Vibration*, 2022, 5, pp. 213-237. Accessible sur : <https://doi.org/10.3390/vibration5020014>

[4] HUMPHREY J.D. – Vascular adaptation and mechanical homeostasis at tissue, cellular, and sub-cellular levels. *Cell Biochem. Biophys.*, 2008, 50, pp. 53-78. Accessible sur : <https://doi.org/10.1007/s12013-007-9002-3>

[5] NOËL C., SETTEMBRE N. – Assessing mechanical vibration-altered wall shear stress in digital arteries. *J. Biomech.*, 2022, 131, p. 110893. Accessible sur : <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2021.110893>

[6] REDA M., NOËL C., SETTEMBRE N. ET AL. – An agent-based model of the vibration-induced intimal hyperplasia. *Biomech. Model. Mechanobiol.*, 2022, 21, pp. 1457-1481. Accessible sur : <https://doi.org/10.1007/s10237-022-01601-5>

**STOP
AUX
TMS**
Troubles musculo-squelettiques
dans votre entreprise

LES TROUBLES MUSCULO-SQUELETTIQUES



LE ET SI C'ÉTAIT TRAVAIL ?



Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles - 65 bd Richard-Lenoir 75011 Paris - www.inrs.fr - Création graphique : Éva Minem - © INRS 2013 - AD 766

POUR EN SAVOIR PLUS:
www.inrs.fr/tms





Études & solutions

Notes techniques

Optimisation de la méthode
de mesure des endotoxines
dans l'air des lieux de travail

P. 51

Étude de cas

Agir en prévention par des approches
coopératives métiers : retours d'expériences

P. 58

Base de données

Portrait rétrospectif des expositions
professionnelles aux poussières
de farine en France de 2014 à 2023

P. 66

Notes techniques

OPTIMISATION DE LA MÉTHODE DE MESURE DES ENDOTOXINES DANS L'AIR DES LIEUX DE TRAVAIL

Cet article vise à présenter une nouvelle méthode mise au point dans le but d'améliorer la caractérisation des expositions aux endotoxines présentes dans des atmosphères de travail contenant certains micro-organismes (bactéries à Gram négatif). Ces travaux sont mis à disposition des personnes en charge de la surveillance des expositions professionnelles, *via* la publication de la méthode Métropol M-454, destinée à remplacer l'ancienne méthode M-154.

PAULINE LOISON,
LISE ALONSO,
CATHERINE COULAIS,
XAVIER SIMON
INRS,
département
Métrologie
des polluants

Contexte

Les endotoxines sont des lipopolysaccharides présents dans la membrane externe de la plupart des bactéries à Gram négatif. Ces bactéries possèdent une paroi de peptidoglycane fine et une membrane externe (contenant les lipopolysaccharides), au contraire des bactéries à Gram positif, qui possèdent uniquement une paroi de peptidoglycane épaisse. Ce sont des molécules complexes, constituées d'une partie polysaccharidique et d'une partie lipidique pouvant être libérées lors de la croissance ou de la lyse (destruction) des cellules. Le terme « endotoxines » caractérise des fragments de membrane, c'est-à-dire des molécules de lipopolysaccharides attachées à d'autres constituants des membranes bactériennes. En milieu professionnel, les endotoxines peuvent être mises en suspension dans l'air lors d'opérations qui vont générer des aérosols à partir de réservoirs solides ou liquides, contenant ces micro-organismes (eaux usées, déchets, compost, boues, etc.).

Elles peuvent ainsi être présentes dans les atmosphères de travail de secteurs aussi divers que la collecte et la valorisation des déchets, la transformation du bois, l'élevage, l'agroalimentaire ou encore, le traitement des eaux usées. Si le nombre de personnes exposées aux endotoxines pendant leur travail n'est pas précisément connu, la diversité des secteurs étudiés et les données de l'enquête Sumer de 2017 [1] permettent de supposer que plusieurs centaines de milliers de travailleurs sont concernés.

Les concentrations d'endotoxines mesurées dans les atmosphères professionnelles ne sont pas

précisément corrélées aux symptômes observés, si bien que la relation dose-effet entre l'exposition et les éventuelles affections qui pourraient en résulter n'est pas établie. Cependant, il semble que, pour la majorité des personnes exposées, plus les concentrations ou la fréquence d'exposition sont élevées, plus les risques d'altération de la santé sont importants [2]. L'inhalation des endotoxines par les travailleurs est associée à des effets délétères sur la santé, tels que des manifestations bronchiques aiguës, des altérations chroniques de la fonction respiratoire qui peuvent devenir irréversibles au fil du temps (en particulier, la bronchopneumopathie chronique obstructive : BPCO), mais aussi des symptômes plus généraux tels que fièvre et toux [3]. Une revue récente de la littérature évoque cependant les effets possibles d'une exposition aux endotoxines, même à faible concentration (< 100 unités endotoxines [UE].m⁻³), bien que des études supplémentaires apparaissent nécessaires pour renforcer ces conclusions [4]. La mesure des endotoxines aux postes de travail apparaît donc essentielle pour estimer les expositions des travailleurs et pour mettre en place des mesures de prévention adaptées, en vue de réduire les niveaux de concentration dans les atmosphères professionnelles. L'utilisation de l'ancienne méthode M-154, par les Carsat et l'INRS, a déjà permis de « démocratiser » le prélèvement des bioaérosols, d'évaluer les expositions aux endotoxines et d'établir, en 2015, des valeurs guides de 200 et 1 000 UE.m⁻³, à partir d'une analyse pragmatique des concentrations en endotoxines mesurées dans l'air des lieux de travail.

POUR EN SAVOIR +

• La nouvelle méthode Métropol M-454 est accessible sur le site de l'INRS : https://www.inrs.fr/publications/bdd/metropol/html?ref=INRS=METROPOL_454



RÉSUMÉ

Les endotoxines sont des constituants de la membrane externe de certaines bactéries qui peuvent être mises en suspension dans l'air, au cours de certaines tâches professionnelles exposant plusieurs centaines de milliers de salariés. L'ancienne méthode de mesure M-154 datant de 2005 nécessitait une mise à jour. Une approche complémentaire de laboratoire et de terrain a permis

de valider une nouvelle méthode optimisée et simplifiée. Elle prend en compte l'ensemble des endotoxines captées en réalisant une extraction efficace directement dans la cassette et rend les prélèvements représentatifs de la fraction inhalable. Les endotoxines peuvent désormais être analysées dans les huit jours après le prélèvement au lieu de 24 heures précédemment,

avec une conservation et un transport des cassettes à température ambiante non contraignants. Ces améliorations rendent plus robustes les mesures de concentration en endotoxines, et devraient participer à une appropriation plus aisée de la méthode Métropol M-454 (destinée à remplacer l'ancienne méthode M-154) par ses utilisateurs.

OPTIMISATION OF THE MEASUREMENT METHOD FOR AIRBORNE ENDOTOXINS IN WORKPLACE ATMOSPHERES

Endotoxins are components of the outer membrane of some bacteria that can become airborne during certain work activities, thus exposing hundreds of thousands of employees. The old M-154 measurement method dating back to 2005 needed an update. A complementary laboratory and field approach was used to

validate a new optimised and simplified method. It takes into account all of the endotoxins captured by efficient extraction directly inside the cassette and makes samples representative of the inhalable fraction. Endotoxins can now be analysed within eight days after sampling compared to 24 hours

previously, with more flexible room temperature storage and transport of cassettes. These improvements make endotoxin concentration measurements more robust, and provide for easier adoption of the Métropol M-454 (aimed at replacing the old M-154 method) by its users.

Ces valeurs ont permis d'harmoniser l'interprétation des concentrations mesurées en milieu professionnel, ainsi que la prise de décision concernant la mise en place de mesures de prévention adaptées [2]. L'évolution des connaissances depuis l'élaboration de la méthode M-154, en 2005, les constats d'utilisateurs quant à la gestion complexe des échantillons (analyses à réaliser dans les 24 heures) et les contradictions observées dans la littérature scientifique (modalités et durée de conservation, protocole d'extraction, etc.) ont conduit l'INRS à engager de nouveaux travaux de recherche, en vue de proposer une nouvelle méthode simplifiée, optimisée et pour laquelle des données de validation seront produites.

Rappel des caractéristiques de l'ancienne méthode M-154

Plusieurs méthodes de mesure des bioaérosols ont été développées par l'INRS, notamment pour mesurer les micro-organismes cultivables, les endotoxines et les mycotoxines [5].

L'ancienne méthode M-154 consistait à doser les endotoxines d'un échantillon prélevé à l'aide d'une pompe ayant un débit de 2 L.min⁻¹, reliée à une cassette 3 pièces fermée de 37 mm. Le prélèvement était réalisé exclusivement sur un filtre en fibres de verre (FV) apyrogène (c'est-à-dire exempt de substances pyrogènes, et notamment d'endotoxines) pendant un maximum de 8 heures. Les échantillons étaient

ensuite transportés le plus rapidement possible au laboratoire à température ambiante ou dans une enceinte réfrigérée à 4 °C, pour être analysés dans les 24 heures suivant la fin du prélèvement. Le filtre en fibres de verre était retiré de la cassette, placé dans un tube contenant de l'eau apyrogène et agité à forte vitesse afin d'extraire les endotoxines. L'extrait était ensuite centrifugé avant le dosage, effectué à l'aide d'une méthode spectrophotométrique cinétique avec le réactif LAL (lysate d'amœbocyte de limule).

Cette méthode comportait certaines limites. Premièrement, seul le filtre de collecte était extrait et analysé ; les endotoxines déposées sur les parois de la cassette lors du prélèvement, du transport ou de la manipulation des échantillons n'étaient donc pas prises en compte dans le processus analytique. Depuis 2005, l'existence de tels dépôts a été mise en évidence [6-8] et est désormais clairement mentionnée dans une annexe informative de la norme NF EN 14031 [9]. Cela conduisait donc à sous-estimer systématiquement, d'une manière aléatoire et potentiellement importante, les niveaux de concentrations mesurés dans l'air des lieux de travail.

Deuxièmement, l'analyse du filtre seul imposait des étapes supplémentaires d'ouverture de la cassette, de récupération du filtre et de centrifugation des extraits. Par ailleurs, seul le filtre en fibres de verre était préconisé, sans possibilité pour l'utilisateur d'employer une autre nature de filtre.

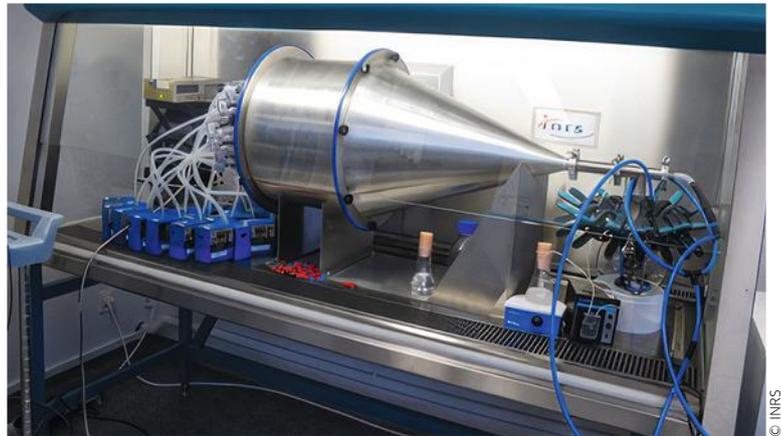
Troisièmement, en l'absence de données concernant les conditions acceptables de transport et de conservation des échantillons destinés à l'analyse des endotoxines, ils étaient habituellement transportés le plus rapidement possible au laboratoire à température ambiante ou dans une enceinte réfrigérée à 4 °C pour être analysés dans les 24 heures suivant la fin du prélèvement. Ce manque de latitude dans la conservation des échantillons impliquait de réaliser les dosages le jour même ou le lendemain du prélèvement et restreignait, de ce fait, le nombre de prélèvements qui pouvaient être réalisés sur le terrain, notamment ceux destinés à l'analyse des micro-organismes cultivables.

Description des travaux menés

L'étude conduite par l'INRS s'est appuyée sur la complémentarité entre des essais réalisés au laboratoire et en atmosphères professionnelles.

En laboratoire

Un bioaérosol a été produit de manière expérimentale (Cf. Figure 1) à partir de trois bactéries à Gram négatif modèles (*Escherichia coli*, *Serratia marcescens* et *Pseudomonas aeruginosa*). Des générations à différents niveaux de concentrations d'endotoxines (20 à > 1000 UE.m⁻³) ont permis d'échantillonner des cassettes fermées, en vue de comparer plusieurs natures de supports de collecte. Les concentrations d'endotoxines mesurées avec des membranes en polycarbonate (PC) et en Teflon (PTFE) étaient comparables à celles obtenues avec le filtre FV préconisé dans la méthode M-154. La possibilité de choisir entre plusieurs types de filtres procure ainsi plus de souplesse aux utilisateurs. Les membranes PC et PTFE sont naturellement apyrogènes ; cependant, elles nécessitent impérativement d'être supportées par un filtre en fibres de verre dépyrogénéisé (rendu apyrogène), pour éviter leur déformation lors du prélèvement et assurer l'étanchéité de la cassette. Trois paramètres de la phase de récupération des endotoxines prélevées ont été investigués avec les trois types de support de collecte : l'extraction directe dans la cassette, la durée d'agitation et le volume de l'eau apyrogène utilisée comme solution d'extraction. À l'instar de résultats précédemment obtenus dans des plateformes de compostage [7] ou en laboratoire [8], les essais d'extraction directe dans la cassette ont montré qu'une proportion, parfois importante, des endotoxines était déposée sur la paroi des cassettes. Il apparaît nécessaire de prendre en compte ces dépôts pour l'évaluation de la concentration en endotoxines représentative de la fraction inhalable dans l'atmosphère des lieux de travail [10-11]. Une durée d'agitation réduite à 20 minutes (au lieu de 60) n'a eu aucune influence sur l'efficacité d'extraction des endotoxines, quel que soit le support de prélèvement utilisé, ce qui permet un



↑ FIGURE 1
Banc d'essai
utilisé pour
valider
les paramètres
de la nouvelle
méthode M-454.

gain de temps conséquent. La diminution de moitié du volume de solution d'extraction (5 mL au lieu de 10 mL) est également sans effet avec les membranes en PC et en PTFE. En revanche, avec le filtre en fibres de verre présentant une structure fibreuse, cette diminution de volume a permis d'augmenter jusqu'à 10 fois le taux de récupération des endotoxines. Ce résultat s'explique probablement par l'énergie d'agitation plus forte engendrée par un volume d'éluant plus petit au sein du volume interne de la cassette de ≈15 cm³. Dans le cas de filtres fibreux comme le filtre FV, les forces d'agitation nécessaires à l'extraction des endotoxines collectées sont probablement plus élevées, comparées à celles devant être employées avec des membranes de surfaces uniformes (PTFE ou PC).

L'étude de la conservation des cassettes prélevées a été réalisée à trois températures différentes : ambiante (environ 20 °C), 4 °C et -20 °C. Quels que soient la température de conservation, la nature

Techniciens
en intervention
sur une station
d'épuration
d'eaux usées.



© Fabrice Dimer pour l'INRS/2023

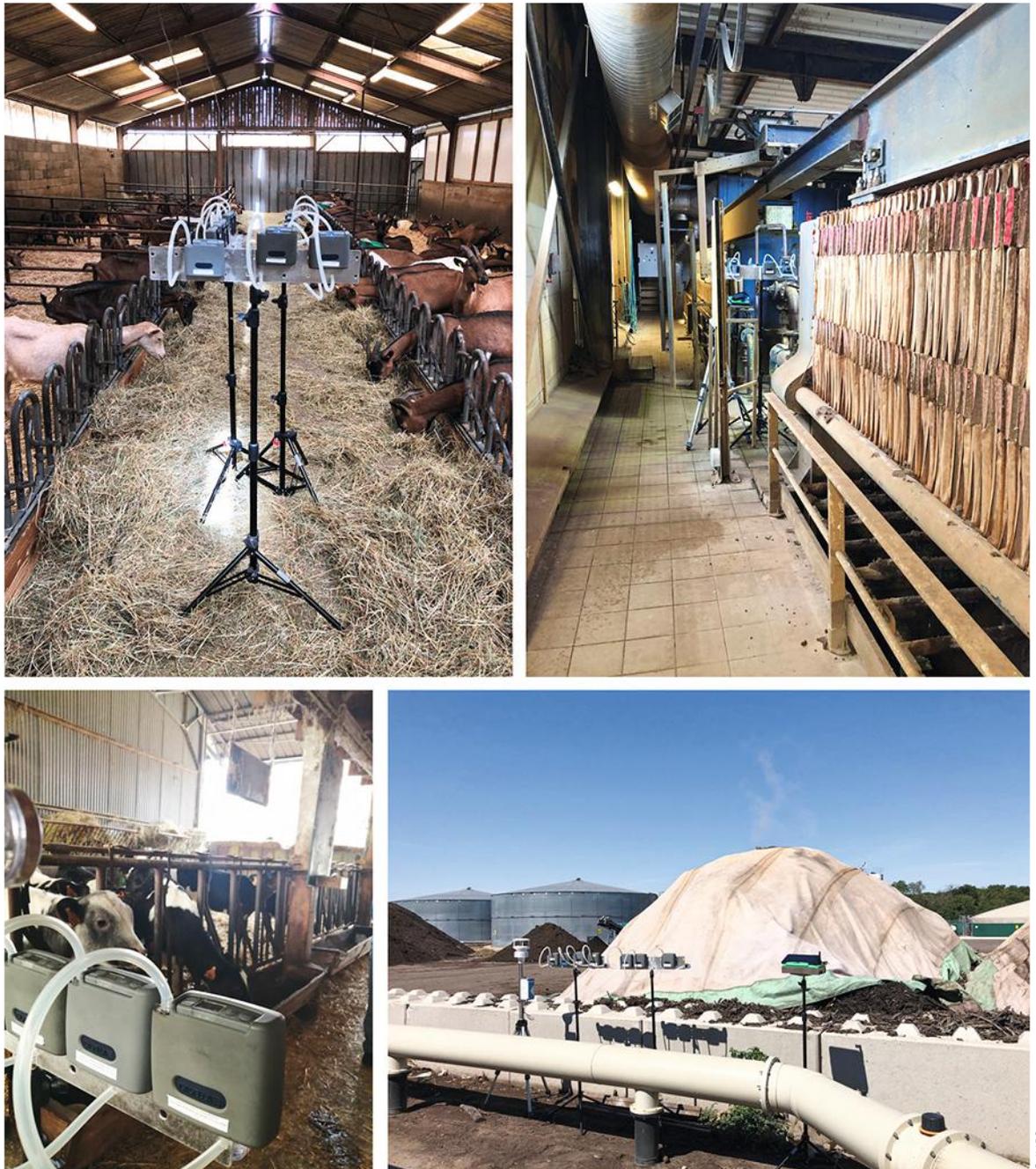


FIGURE 2 → Prélèvements d'endotoxines dans différentes atmosphères professionnelles (chèvrerie, station d'épuration, étable de vaches et plateforme de compostage) pour la validation des paramètres de la méthode M-454.

du filtre et le niveau de concentration ciblé, une conservation jusqu'à huit jours après le prélèvement ne modifiait pas les concentrations d'endotoxines mesurées.

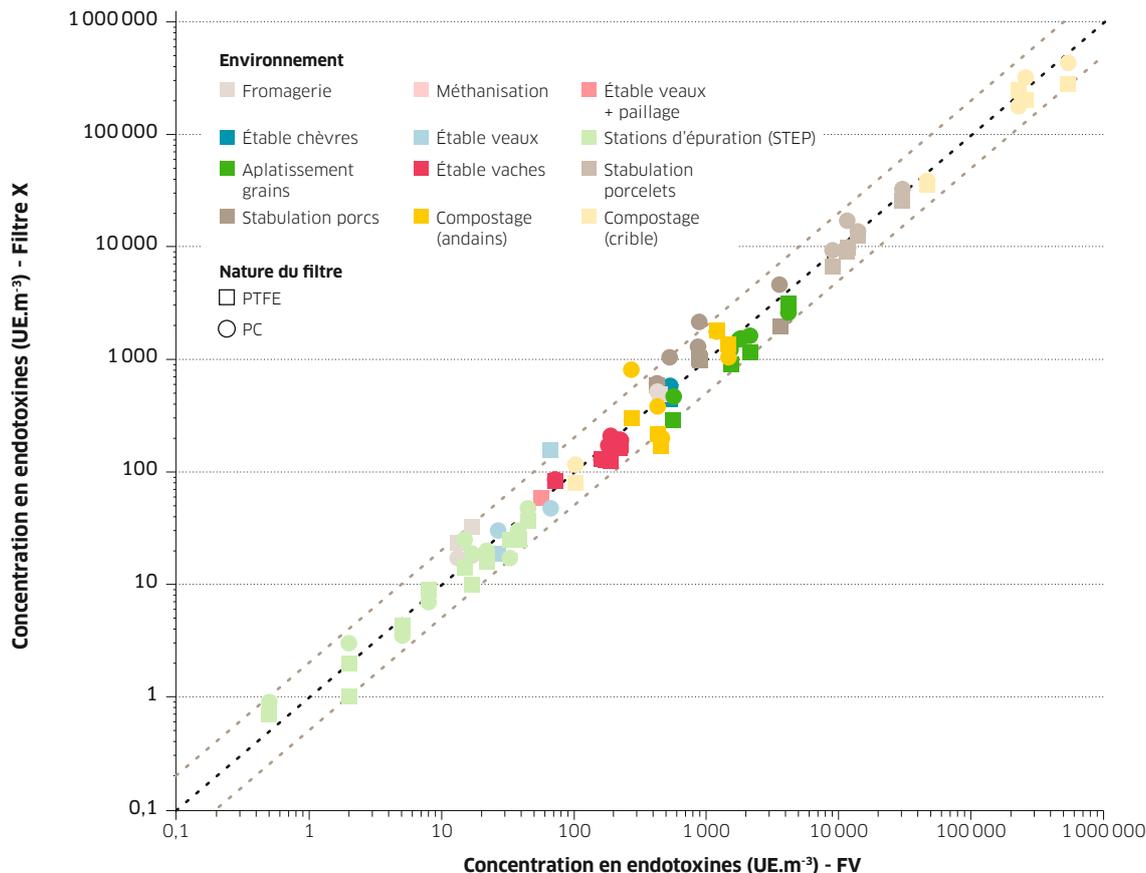
En milieu professionnel

Des essais de terrain ont ensuite été menés dans 11 environnements professionnels différents en concentration et en composition microbienne (stables de chèvres, porcs, vaches ; station d'épuration [STEP] ; plateforme de compostage, etc.), comme illustré sur la Figure 2.

Toutes les extractions d'endotoxines ont été réalisées directement dans la cassette avec un volume de

solution d'extraction de 5 mL et une durée d'agitation de 20 minutes. Comme pour les essais de laboratoire, les supports de prélèvement en FV, PC et PTFE se sont révélés équivalents pour les environnements investigués (Cf. Figure 3) et ont permis de mesurer des concentrations d'endotoxines sur une gamme très étendue, allant de 0,5 à 540 000 UE.m⁻³.

Les expérimentations en laboratoire n'ayant montré aucune différence de concentration liée à la température de conservation, les prélèvements de terrain ont été conservés à température ambiante. Cette température a l'avantage de faciliter le transport et la conservation des échantillons. Il est apparu qu'une conservation jusqu'à huit jours était sans influence



← FIGURE 3
Exemple de résultats de mesures pour la validation de la méthode M-454. Influence du type de filtre sur la concentration en endotoxines, en comparaison du filtre FV dans différents secteurs d'activités. Les droites en pointillés correspondent à $\pm 50\%$.

sur la concentration d'endotoxines mesurée, quel que soit le secteur d'activité étudié. Cette possibilité de conservation des échantillons au-delà de 24 heures avant dosage laisse davantage de latitude à l'analyste et autorise un plus grand nombre de prélèvements sur le terrain.

Données de validation

Trois paramètres ont été étudiés pour valider la méthode analytique : l'incertitude globale, la répétabilité du dosage et la limite de quantification.

- **L'incertitude globale** associée à l'ensemble de la méthode de mesure (prélèvement et analyse) a été évaluée pour chaque type de filtre (FV, PTFE et PC) à différentes concentrations en endotoxines obtenues à l'aide d'un bioaérosol expérimental similaire à celui utilisé pour les essais de laboratoire. Le coefficient de variation (CV) a été calculé à partir de l'analyse des résultats de dosage issus de 10 cassettes de prélèvements différentes. Pour l'ensemble des essais et quelle que soit la nature du filtre, les CV obtenus étaient tous compris entre 10 et 20 %.
- **La répétabilité de la méthode** a été évaluée en calculant le CV obtenu en dosant 10 fois le même éluat issu d'une cassette, prélevée également à partir d'un bioaérosol expérimental pour les trois types de filtres. Les valeurs du coefficient de variation sont

respectivement de 7 %, 13 % et 8 % pour les filtres FV, PTFE et PC.

- **La limite de quantification (LQ)** de l'ensemble de la méthode a été calculée à partir de la concentration minimale analytique de la méthode utilisant le réactif LAL, indiquée à $0,005 \text{ UE.mL}^{-1}$ par le fournisseur des réactifs. Ainsi, pour un prélèvement de 4 heures à 2 L.min^{-1} , la LQ est de $0,05 \text{ UE.m}^{-3}$.

Conclusions

Les résultats de ces travaux permettent de transférer une méthode optimisée, simplifiée et validée pour le dosage des endotoxines émises dans les atmosphères professionnelles. L'ancienne méthode Métropol M-154 est donc désormais remplacée par la méthode Métropol M-454, dont les principales étapes et modalités sont présentées sur la Figure 4. Cette méthode suit en grande partie les recommandations de la norme NF EN 14031 [9], révisée en 2021. Ses apports principaux portent sur les éléments suivants :

- L'utilisateur dispose d'une plus grande flexibilité concernant le filtre à employer : PC ou PTFE en plus du filtre FV, qui était le seul à être proposé précédemment. Pour les filtres de type membrane (PC et PTFE), un filtre en FV dépyrogénéisé doit être utilisé en tant que support. Il est également à noter que l'ensemble des expérimentations (en laboratoire



	<p>PRÉLÈVEMENT</p> <p>Dispositif : cassette 3 pièces 37 mm – filtre FV, PC ou PTFE</p> <p>Conditions : débit de 2 L.min⁻¹ max 8 h</p>
	<p>TRANSPORT ET CONSERVATION (dans la cassette)</p> <p>Durée : ≤ 8 jours</p> <p>Température : 20°C ± 5°C (éviter les T° extrêmes)</p>
	<p>ANALYSE</p> <p>EXTRACTION : dans la cassette.</p> <p>Modalités d'extraction : Eau apyrogène, 5 mL, 20 min</p> <p>Conservation des extraits : non précisée</p> <p>DOSAGE</p> <p>Méthode : cinétique et chromogénique LAL.</p>

↑ **FIGURE 4**
Méthode de mesure des endotoxines optimisée (Métropol M-454). Les principales modifications par rapport à la méthode M-154 sont indiquées en vert.

et sur le terrain) a permis de vérifier l'absence de contamination (< à la LQ de la méthode d'analyse) des filtres PC et PTFE.

- La cassette fermée à un débit de 2 L.min⁻¹, bien connue des préleveurs/hygiénistes partout en France, est maintenue et confortée comme dispositif de prélèvement. Des mesures, aussi bien en individuel qu'à poste fixe, sont donc réalisables et permettent ainsi de mettre en œuvre des stratégies de mesures variées permettant de répondre à de nombreux objectifs de prévention.
- La gestion des échantillons est simplifiée, car ils peuvent désormais être analysés jusqu'à huit jours après le prélèvement, avec un transport et une

conservation non contraignants des cassettes à température ambiante (environ 20 °C). Les préleveurs peuvent ainsi s'autoriser, quand cela est opportun pour le diagnostic, à collecter un plus grand nombre d'échantillons.

- Les étapes analytiques ont été simplifiées : l'extraction est désormais réalisée directement dans la cassette (avec un volume d'eau apyrogène de 5 mL et pendant seulement 20 minutes), ce qui permet de s'affranchir des étapes de retrait du filtre et de centrifugation des extraits. Le nouveau protocole d'extraction permet, de plus, de prendre en compte l'ensemble des particules captées dans la cassette fermée. Il répond ainsi aux préconisations de mise en œuvre de la cassette fermée [10-11] et permet d'assurer un prélèvement pleinement représentatif de la fraction inhalable.
- Les données de validation permettant d'estimer l'incertitude globale associée à l'ensemble de la méthode de mesure (prélèvement et analyse) et l'incertitude liée à la seule analyse, pour chaque type de filtre, ont été produites.

Ces évolutions renforcent la fiabilité des mesures de concentrations en endotoxines et participeront à une appropriation plus aisée de cette méthode de mesure par un grand nombre d'utilisateurs, en facilitant les modalités de transport et de conservation qui pouvaient précédemment être perçues comme des contraintes. Ces nouvelles modalités permettent également une meilleure gestion des échantillons de bioaérosols par l'analyste, qui pourra prendre en charge rapidement les analyses sensibles qui ne peuvent pas attendre (micro-organismes cultivables, par exemple) et analyser ultérieurement les échantillons d'endotoxines. ●

BIBLIOGRAPHIE

[1] MATINET B., ROSANKIS E. – Les expositions aux risques professionnels dans la fonction publique et le secteur privé en 2017. Enquête Sumer 2017. *Synthèse Stat'*, 2019, pp. 31-33.

[2] BALTU I., BERTRAND N. ET AL. – Valeurs guides endotoxines. Interprétation des résultats de métrologie des bioaérosols. *Hygiène & sécurité du travail*, 2015, 239, NT 25, pp. 46-50. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=NT%2025>

[3] INRS – *Endotoxines en milieu de travail*. ED 4412, 2018. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%204412>

[4] FAROKHI A., HEEDERIK D. ET AL. – Respiratory health effects of exposure to low levels of airborne endotoxin: a systematic review. *Environ Health*, 2018, 17 (1), p. 14.

[5] DUQUENNE P., BURZONI S., SIMON X. – Les méthodes disponibles pour la mesure des bioaérosols aux postes de travail. In : Dossier – Risques biologiques au travail. *Hygiène & sécurité du travail*, 2018, DO 22, pp. 38-42. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=DO%2022>

[6] SIMON X., DUQUENNE P. ET AL. – Aerosolisation of *Escherichia coli* and associated endotoxin using an improved bubbling bioaerosol generator. *Journal of aerosol science*, 2011, 42 (8), pp. 517-531.

[7] DUQUENNE P., SIMON X. ET AL. – Endotoxin deposits on the inner surfaces of closed-face cassettes during bioaerosol sampling: a field investigation at composting facilities. *Annals of occupational hygiene*, 2015, 59 (4), pp. 504-513.

[8] DUQUENNE P., COULAIS C., BAU S., SIMON X. – Performances of the BC-112 NIOSH cyclone for the measurement of endotoxins in bioaerosols: a study in laboratory conditions. *Journal of aerosol science*, 2018, 116, pp. 92-105.

[9] NORME NF EN 14031 – *Exposition sur les lieux de travail – Mesure quantitative des endotoxines aéroportées*. Afnor, 2021.

[10] SIMON X., WITSCHGER O. – Mesure de l'exposition aux aérosols en fraction inhalable : avantages et limites de la « cassette fermée ». *Hygiène & sécurité du travail*, 2019, 257, NT 78, pp. 58-64. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=NT%2078>

[11] NORME NF X 43-257 – *Air des lieux de travail. Qualité de l'air – Prélèvement d'aérosol à l'aide d'une cassette (orifice 4 mm)*. Afnor, 2016.

Participez à la recherche



Risque machine

→ Quels usages numériques avec les machines industrielles et quelles pratiques de cybersécurité ?

Votre entreprise...

- Utilise des machines industrielles : machines-outils, installations automatisées, lignes d'assemblage, presses, machines d'emballage... Ces machines peuvent être connectées, reliées à des réseaux informatiques internes ou externes. En cas d'acte malveillant, vous risquez un arrêt de production, des dommages matériels, voire un accident du travail.
L'INRS mène actuellement une étude pour aider les entreprises à prendre en compte le « risque cyber » en milieu industriel et son impact pour la santé et sécurité des travailleurs.

L'INRS a besoin de votre participation à cette étude

pour recueillir par questionnaire des informations sur les usages que vous faites du numérique avec vos machines, vos pratiques en matière de cybersécurité et votre perception sur le risque de cyberattaque et ses conséquences sur les machines et les travailleurs. Le recueil de ces informations aidera l'INRS à construire une méthode d'analyse de « risque cyber » pour les machines, à des fins de prévention des risques professionnels.

> Comment se déroulera l'étude ?

En fonction du profil professionnel du répondant (production et HSE, maintenance — travaux neufs ou informatique), un questionnaire au format électronique, adapté à chaque profil, sera à renseigner. Le questionnaire est prévu pour être spécifique à une machine. Si plusieurs machines sont disponibles dans l'entreprise, un questionnaire pourra être rempli pour chaque machine. Les questionnaires sont anonymes (entreprise et répondant non identifiés) et les réponses, confidentielles. Le temps de remplissage d'un questionnaire est estimé à 15 minutes environ.

Vous souhaitez participer ?



L'accès au questionnaire se fait en ligne sur un site sécurisé. Pour y accéder, scannez ce QR-code ou rendez-vous sur :

<https://manager-enquetes.inrs.fr/SurveyServer/s/cpi/CyberSecuriteMachines/Machines.htm>

Les retours des questionnaires sont attendus pour le
30 juin 2024 au plus tard.

Pour toute question, contacter Pascal Lamy,
département Ingénierie des équipements de travail,
03 83 50 98 25 • pascal.lamy@inrs.fr

Étude de cas

AGIR EN PRÉVENTION PAR DES APPROCHES COOPÉRATIVES MÉTIERS : RETOURS D'EXPÉRIENCES

CHRISTINE
CHAPUS,
CÉDRYC
FERNANDEZ,
MARJORIE
POUPET-
RENAUD,
LUC
THOMASSET,
CLAUDE
VADEBOIN
Carsat
Rhône-Alpes

→ LA PROBLÉMATIQUE : APPROCHES COOPÉRATIVES MÉTIERS : POURQUOI, COMMENT ?

Pour relever les très nombreux défis liés aux accidents du travail et maladies professionnelles en entreprise, la recherche d'efficacité est une nécessité pour les acteurs de la prévention des risques professionnels.

À ce titre, nombre d'approches sont mises en œuvre sur le territoire national par le réseau de l'Assurance maladie – Risques professionnels¹. Les approches coopératives métiers expérimentées par la Carsat Rhône-Alpes témoignent d'une démarche visant à répondre simultanément à différents enjeux : comment développer des actions de prévention adaptées aux spécificités et contraintes des entreprises ? Comment diffuser et pérenniser les bonnes pratiques et les solutions de prévention dans le fonctionnement des entreprises ? Comment démultiplier les actions de prévention ?

→ LA RÉPONSE DE LA CARSAT RHÔNE-ALPES : VERS UNE APPROCHE COOPÉRATIVE MÉTIERS

Une « approche coopérative métier » a pour principe d'associer les parties prenantes d'un secteur d'activité ou d'une filière professionnelle dans une action collective, selon une méthodologie structurée (Cf. Encadré). Cette démarche permet à ces parties prenantes de traiter elles-mêmes les problématiques de prévention les impactant. Des sujets « critiques » liés aux métiers sont identifiés puis analysés en commun, les solutions² de prévention sont coconstruites par une diversité d'acteurs, de compétences et fonctions différentes, issus de collectifs d'entreprises, de cabinets, d'organisations professionnelles, de la Carsat...

La dynamique ainsi générée facilite l'appropriation de la démarche par l'ensemble des contributeurs et favorise *de facto* la diffusion et le déploiement des « bonnes pratiques » techniques, organisationnelles, managériales, vers l'ensemble

des entreprises du secteur concerné et des acteurs qui les accompagnent (Cf. Figure 1).

Des actions collectives s'appuyant sur de telles « approches coopératives métiers » ont été réalisées par la Carsat Rhône-Alpes dans l'aide à domicile, l'agroalimentaire, la filière « produits frais » (production, transport, logistique, distribution), et la filière construction (BTP – bâtiment et travaux publics). Les actions collectives mises en place se sont déployées dans un périmètre élargi allant des entreprises associées vers l'ensemble du secteur d'activité ou de la filière professionnelle, puis vers l'écosystème concerné (intervenants, bénéficiaires et financeurs du secteur).

Les méthodologies et principes mis en œuvre dans ce cadre sont en cohérence avec les démarches « Prévention & performance (notées AP2) » [1], expérimentées récemment avec des entreprises par le réseau Assurance maladie – Risques professionnels, avec l'appui de l'INRS [2].

Les retours d'expériences décrits dans cet article présentent des solutions mises en place dans les entreprises ; sont précisés également les impacts des actions menées sur chaque secteur ou filière professionnelle.

Retours d'expériences sectoriels

Secteur de l'aide à domicile

L'action collective « Santé – Qualité du service » a été menée par la Carsat Rhône-Alpes avec la Direction régionale de l'économie, de l'emploi, du travail et des solidarités (Dreets) et l'Una (Union nationale de l'aide, des soins et des services aux domiciles) Auvergne – Rhône-Alpes [3]. Elle visait à améliorer à la fois la réalisation des services (agilité, efficacité...) et les conditions de travail des intervenants. Elle a regroupé neuf structures, majoritairement des TPE et PME.

L'organisation du travail dans le secteur de l'aide à domicile est traditionnellement de nature

ENCADRÉ

L'APPROCHE COOPÉRATIVE MÉTIERS : UNE MÉTHODOLOGIE ET DES RÉSULTATS POUR AGIR EN PRÉVENTION DES RISQUES PROFESSIONNELS

L'approche coopérative métiers est centrée sur les situations concrètes des métiers concernés, sur le travail réalisé par les acteurs, au service de bénéficiaires. Le moteur des réflexions est l'amélioration du travail : comment réaliser le produit ou le service qui satisfera son utilisateur ? Comment réaliser ce travail dans les meilleures conditions tout en préservant la santé et la sécurité des opérateurs ? Ces réflexions impliquent nécessairement une exigence de résultats : comment l'entreprise et les entreprises en coactivité vont-elles se transformer, s'organiser pour atteindre les progrès attendus ?

L'approche coopérative métiers s'appuie sur une action collective, regroupant les acteurs concernés par le périmètre considéré et fonctionnant selon un processus itératif et coopératif, indispensable pour permettre des transformations pérennes techniques, organisationnelles et managériales. Dans les expérimentations évoquées dans cet article, les actions collectives ont été accompagnées par des experts extérieurs. Les travaux se sont articulés en faisant alterner des interventions internes aux entreprises et des réunions interentreprises d'apports, de partage et de coconstruction. Les situations récurrentes à traiter

sont identifiées collectivement. Cela amène la recherche de solutions vers la source du problème. Ces solutions sont construites par les acteurs du terrain, garantissant ainsi leur adaptation à sa réalité. Les outils mis en œuvre dans le cadre des solutions sont testés, ajustés puis pérennisés dans le fonctionnement de l'entreprise. La mise en commun des analyses et le traitement des contraintes des différents acteurs favorisent l'émergence de solutions, construites collectivement, liées à l'organisation du travail, sans qu'elles servent l'intérêt d'un seul acteur au détriment d'un ou plusieurs autres. Concrètement, ces actions collectives ont permis aux entreprises impliquées de transformer leur organisation et leur fonctionnement. À titre d'illustrations : l'amélioration des processus de préparation et de réalisation de travaux ou de services, la diffusion d'outils de coordination, la création d'outils de planification collaborative, la mise en place de nouvelles organisations facilitant la réalisation de processus partagés dans les situations d'entreprises en coactivité. En matière de santé et de sécurité au travail, les transformations ont permis la diminution de la pénibilité (optimisation des gestes

et déplacements, réduction des efforts de manipulation de charges et des gestes répétitifs...), la diminution de la charge psychique (gains en marges de manœuvre, mise en place de repères visuels, clarification des attributions de tâches respectives, développement des collectifs...), la diminution des situations d'urgence (planification, concertation, construction commune de processus d'organisation du travail). Sont ainsi traités les risques majeurs que sont les TMS, les RPS, les coactivités et le risque routier. Sur la base des capitalisations et livrables, la diffusion de ces actions est réalisée par la communication sur les démarches et résultats (articles, journées d'échanges...). Elle est soutenue et amplifiée par les relais que sont les acteurs impliqués et leurs organisations d'appartenance. La démultiplication des solutions est facilitée par la mise à disposition d'exemples de référence, d'outils et de méthodes consolidés auprès des professions et entreprises concernées. L'association des acteurs professionnels, reconnus par leurs pairs, suscite leur appropriation par l'ensemble des acteurs « du métier » qui s'y reconnaissent et sont à même de déployer les méthodes et pratiques dans leurs organisations.

pyramidale ; le travail des intervenants est organisé par un encadrement focalisé principalement sur les plannings (dates et durées d'intervention). Sur le terrain, les intervenants rencontrent de nombreuses difficultés dans la réalisation de leur travail. Ce secteur est ainsi connu pour sa forte sinistralité (accidents, risques psychosociaux RPS, troubles musculosquelettiques TMS...) et des conditions de travail difficiles.

L'axe d'amélioration choisi par le groupe est de passer de l'individualisation du travail au travail organisé collectivement entre les intervenants au domicile. À cet effet sont mis en place dans l'organisation des espaces décloisonnés de dialogue entre intervenants de terrain : les équipes semi-autonomes (ESA). Elles favorisent le développement de collectifs, de l'autonomie, des pratiques



← FIGURE 1
Les intérêts
d'une approche
coopérative
métiers.

coopératives et une meilleure coordination du service rendu à domicile. Les collectifs d'intervenants se réunissent à un rythme régulier, sur un temps déterminé, planifié et valorisé, généralement d'une durée de une heure à deux heures toutes les deux à trois semaines, en fonction des structures.



Au sein de ces espaces, les professionnels débattent, décident et conduisent des actions d'amélioration concrètes en lien avec les interventions auprès des bénéficiaires.

Les problèmes rencontrés (les « irritants ») sont partagés et traités collectivement. Le fonctionnement est plus fluide et permet de s'adapter à la variabilité et aux aléas de l'activité. Un retour d'expérience est fait en continu : qu'est-ce qui pose problème dans le travail ? Qu'est-ce qui a marché dans les solutions ? Au-delà de la résolution de problèmes et de l'amélioration du fonctionnement, ces échanges permanents favorisent un processus d'apprentissage collectif et le développement des compétences.

Les résultats obtenus répondent aux attentes des structures : des plannings mieux adaptés aux besoins de la personne accompagnée, une amélioration de la relation entre les différents intervenants et les personnes accompagnées et

La qualité de la relation avec la personne aidée contribue à la santé de l'intervenante.

leurs aidants, une autorégulation des facteurs de pénibilité et de risque par les intervenants. L'encadrement lui-même apprécie les résultats : il se recentre sur son cœur de métier d'organisation, de management de proximité et de développement des partenariats sur son territoire.

Des effets sur la fidélisation et l'attractivité du métier, préoccupation majeure du secteur, sont observés. L'amélioration des conditions de travail s'illustre par une réelle diminution des facteurs de RPS ; par exemple, une autonomie partagée dans l'organisation des plannings, l'organisation de temps collectifs permettant entraide et résolution collective des difficultés. Les intervenants se sentent mieux reconnus et considérés au sein de leur structure et ont le sentiment de faire un travail de qualité au service des personnes aidées, porteur de sens pour eux-mêmes.

Cette action collective a eu des répercussions bien au-delà des structures participantes. Lancée par l'Una, elle a été présentée aux fédérations du secteur de l'aide à la personne, et ainsi d'autres fédérations ont déployé à leur tour des expérimentations d'équipes semi-autonomes avec leurs adhérents. Des organismes de formation professionnelle (initiale et continue) ont intégré cette démarche dans leur offre de formations. Des institutions en lien avec le secteur (Anact, Carsat) ont proposé des aides financières à l'expérimentation de telles organisations.

Secteur de l'agroalimentaire

L'initiative « *Lean et santé – Agroalimentaire* » est portée par la Carsat en partenariat avec Auvergne – Rhône-Alpes Gourmand (association soutenue par le conseil régional Auvergne – Rhône-Alpes, centrée sur le développement et l'innovation des entreprises de l'alimentaire de la région) [4]. Sept entreprises ont participé à l'action collective, centrée sur le système technique de production : il s'agit d'intégrer la santé et la sécurité dans les démarches « Lean »³.

Le principe est de s'appuyer sur les pratiques de prévention des risques professionnels pour construire l'amélioration continue : une approche par le terrain, à partir d'entretiens, associée à une analyse centrée sur la réalisation du travail, plutôt qu'à partir d'indicateurs de résultat (questionnement : qu'est-ce qui fait tension dans le travail ?). Les « temps considérés comme sans valeur ajoutée » (communication, déplacements, tâches non prescrites) sont discutés pour permettre les adaptations nécessaires à la réalité du travail.

Les résultats ont eu des effets au niveau de la santé des collaborateurs (baisse du stress), de l'optimisation des procédés (après échanges sur les « temps considérés comme sans valeurs ajoutées » : réduction concertée de 50% des déplacements,



© Rodolphe Escher pour l'INRS/2018



© Guillaume J. Plisson pour l'INRS/2016

possibilité d'avoir connaissance en continu des rendements de production) et de l'organisation du travail (gain d'autonomie, réduction de la complexité des exigences et contraintes dans l'exécution du travail). Le climat de travail et la confiance des salariés se sont trouvés améliorés.

Cette « action coopérative métiers » a permis, d'une part, d'obtenir des solutions adaptées au terrain et, d'autre part, d'enrichir la démarche « Lean » elle-même, en y intégrant les préoccupations et pratiques de la prévention des risques professionnels⁴. Cette démarche vertueuse s'est diffusée plus largement grâce aux experts Lean ayant participé à l'expérimentation, qui se sont appropriés les enseignements et les ont déployés dans d'autres entreprises du secteur agroalimentaire, mais aussi dans d'autres secteurs où ils interviennent.

« Supply chain » dans la filière alimentaire

Ce projet a été lancé à l'initiative de la Carsat Rhône-Alpes, de la Dreets et du Pôle d'intelligence logistique (réseau associatif rhônalpin d'entreprises de logistique), avec un collectif de plus de trente entreprises.

Intégrée aux métiers de la chaîne logistique (*supply chain*)⁵, la filière alimentaire regroupe différents secteurs d'activité allant de l'industrie agroalimentaire à la distribution, en passant par le transport et la logistique, chacun d'eux constituant un « maillon ». Face aux exigences et aux engagements de services attendus par le consommateur, la

(Photo de gauche)
Miser sur les opérateurs de production pour améliorer le travail.



© Guillaume J. Plisson pour l'INRS/2016

Décloisonner pour optimiser ensemble les flux.





Construire des relations de qualité entre les intervenants.

filière repose sur une organisation spécifique où les questions de temporalité des flux et de palettisation sont prépondérantes. Ce projet se présente ainsi comme une démarche collective transversale, qui associe l'ensemble des maillons de la chaîne dans la mise en place de nouvelles modalités de fonctionnement. Les participants, issus d'entreprises représentatives des différents métiers concernés, s'impliquent pleinement depuis la caractérisation des sujets travaillés jusqu'au déploiement des solutions. Le point d'entrée consiste à se partager les problématiques prioritaires rencontrées au sein d'un ou plusieurs

maillons : contraintes temporelles, retards de livraison, gestion des promotions, optimisation du transport, palettisation hétérogène, fragilité et adéquation des emballages, etc. Ces problématiques impactent directement la qualité d'exploitation et les conditions de travail, en lien notamment avec les TMS, les RPS et le risque routier.

Cette démarche coopérative a conduit à des résultats concrets par la mise en place de solutions bénéfiques pour l'ensemble de la chaîne, ou *a minima* neutres pour certains maillons. Les délais de livraison ont été détendus (allongement de vingt-quatre heures) de manière à mieux intégrer l'ensemble des contraintes opérationnelles et à tenir compte des distances de livraison, tout en respectant les dates limites de consommation des produits. La palettisation, désormais mise en place chez l'industriel, favorise aussi les opérations de réception et de préparation chez le logisticien. Le flux des marchandises en magasin s'appuie sur une gestion des commandes optimisée (réduction de l'éventail des produits, réajustement des prévisions de ventes et prise en compte des délais de livraison), ce qui permet de limiter les stocks excédentaires, de réduire les volumes de marchandises à traiter et de favoriser une mise en rayon en une seule opération.

Plus globalement, les résultats de ce projet avec la filière alimentaire se traduisent à ce jour par l'émergence d'une « communauté d'acteurs décloisonnés », animée par la recherche de synergie opérationnelle et de compromis. Les modèles de fonctionnement existants dans la filière évoluent vers : « détendre, anticiper et optimiser les flux physiques et les flux d'informations ». Les actions engagées ont des impacts favorables sur les manutentions manuelles et sur la prévention des TMS pour l'ensemble des maillons (agroalimentaire, distribution, transport et logistique). La démarche a pour effets, non seulement de diminuer les facteurs biomécaniques contraignants pour la santé des opérateurs (répétitivité, postures contraignantes), mais aussi d'agir sur certains facteurs psychosociaux. Par exemple, l'allongement des délais de livraison a permis de réduire les contraintes temporelles et d'augmenter les marges de manœuvre pour tous les acteurs de la chaîne logistique, dans leur rôle d'ajustement en continu des moyens à mettre en œuvre au regard des volumes à traiter.

Ce projet est devenu une action pérenne s'appuyant sur une démarche transversale et collaborative avec les acteurs de la filière alimentaire. Un site Internet « *Perspectiv'Supply* » [5] a été créé, ainsi qu'une plateforme collaborative pour animer les échanges entre les professionnels sur les différentes thématiques.

Si le périmètre considéré ici recouvre dès le départ les différents acteurs d'une filière, les résultats se sont étendus « verticalement » : très rapidement, chaque acteur industriel a fait remonter les pratiques au niveau national de son groupe. Les solutions se déploient ainsi *de facto* dans les entreprises du groupe. De nouvelles solutions transversales, de l'ordre de la prévention primaire et à la source, ont été mises en place par les acteurs eux-mêmes, en vue d'organiser la coordination au niveau de l'ensemble de la filière.

Filière de la construction et du BTP

Le travail sur l'articulation entre santé et performance dans le BTP a été orienté à partir des contraintes spécifiques de cette filière : la réalisation d'un ouvrage unique et spécifique, sur une temporalité contrainte échelonnée, associant une multitude d'acteurs, différents d'une opération à une autre, ainsi que des métiers différents.

Une première action collective « *Santé et Performance BTP* » a été réalisée en partenariat avec la fédération professionnelle Scop-BTP, la Dreets, l'OPPBTB, la Carsat et Elence (plateforme d'innovation organisationnelle et managériale en Auvergne – Rhône-Alpes). Elle a mobilisé plus d'une dizaine d'entreprises de tailles diverses [6]. Leur objectif était d'améliorer leur fonctionnement interne en conciliant les exigences de performance (recherche d'agilité, d'innovation, de compétitivité), de dialogue social, de santé et qualité de vie au travail – en particulier, la prévention des RPS et des TMS. Les travaux ont permis de consolider pour les entreprises une méthodologie d'amélioration basée sur la coopération et le traitement d'irritants rencontrés dans la réalisation du travail. À titre d'exemple, au sein d'une entreprise de maçonnerie, la préparation de chantier a pu être optimisée grâce à une étroite collaboration avec les acteurs en charge du parc de matériels, avec pour bénéfice la sécurisation des modes opératoires constructifs : anticipation des besoins, mécanisation des charges, prévention des risques de chute, sérénité de l'encadrement de chantier. Fort de cette dynamique partenariale, une seconde action collective « *Partageons la construction* » a été conduite en association avec la Fédération des promoteurs immobiliers de la région lyonnaise. Elle avait pour objectif d'étendre le périmètre de prévention au niveau de l'ensemble des acteurs impliqués dans l'acte de construire [7]. Le périmètre s'étend ici de la faisabilité à la mise en service d'un bâtiment, et prend en compte l'ensemble des entreprises concernées par les phases de conception, de préparation et réalisation des travaux.

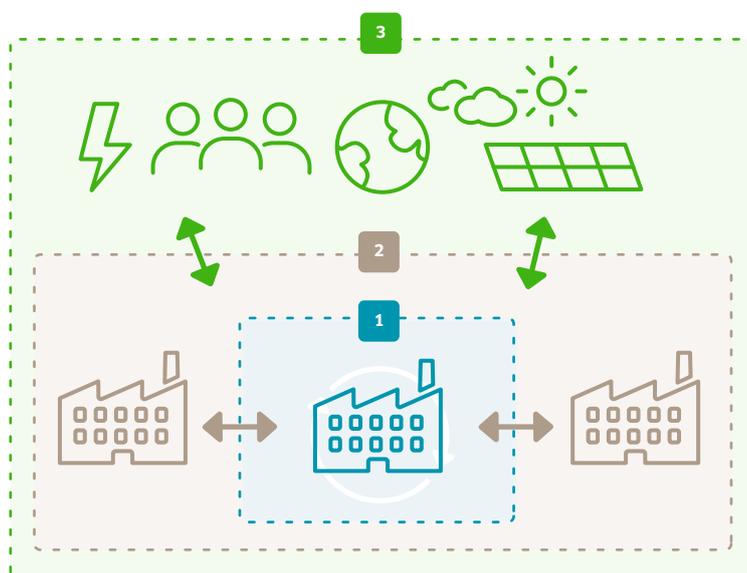
Une trentaine d'entreprises y ont participé. Leur diversité illustre l'étendue du périmètre traité : maîtres d'ouvrage, architectes, économistes,

maîtres d'œuvre d'exécution (MOEx), responsables de l'ordonnancement, pilotage et coordination, coordonnateurs de sécurité et de protection de la santé, entreprises générales et de travaux.

Les problématiques communes ont été recherchées pour chaque phase d'un projet de construction ; elles ont été traitées par des groupes de travail associant les différents acteurs concernés. Cette action a abouti à la mise au point de méthodes collaboratives pour piloter les projets et d'outils opérationnels, permettant d'améliorer à la fois la qualité des dossiers de consultation des entreprises, la phase de préparation de chantier, et de mieux coordonner les entreprises en phase de travaux⁶. À titre d'exemples, les processus constructifs sont davantage optimisés en matière de sécurité et de faisabilité, les moyens communs logistiques sont prévus et quantifiés, permettant aux entreprises de travaux d'œuvrer dans de meilleures conditions de travail, et les études de synthèse sont plus abouties. Les situations de travail « à risque » (chutes de hauteur, manutentions, coactivités...) sont mieux maîtrisées par le repérage en amont des aléas potentiels, l'anticipation de « modes de fonctionnement dégradés », la mise en place de moyens communs de mécanisation du transfert de charges vertical et horizontal, etc.

Le champ d'action s'est encore élargi avec la réalisation d'une troisième action collective, qui a démarré début 2023 et qui a pour périmètre « *le secteur aménagé* », prenant souvent la forme de zone d'aménagement concertée. La réflexion s'étend aux opérations de logistique mutualisées au niveau de l'espace commun, dans lequel vont être réalisés des travaux d'aménagement du territoire, de mise en place de réseaux et de construction de plusieurs bâtiments. Les acteurs politiques sont intégrés au processus⁷.

↓ FIGURE 2
Une approche coopérative métier permet d'élargir le périmètre des actions de l'entreprise (1) à la filière (2), puis à son écosystème (3).



La mise en œuvre de ces trois actions collectives de prévention montre l'intérêt de l'approche coopérative métiers et ses perspectives d'élargissement : le périmètre initial limité au fonctionnement interne des entreprises est étendu aux coactivités interentreprises, puis à leur environnement (Cf. Figure 2). Les solutions mises en œuvre s'orientent de plus en plus vers la prévention primaire des risques professionnels *via* les maîtrises d'ouvrages publics ou privés, depuis les actions sur le terrain jusqu'aux contrats reliant toutes les parties prenantes. À titre d'exemple, il est proposé dès la phase de conception qu'un processus coopératif soit mis en place associant des acteurs de la phase aval (MOEX, etc.) – ceci afin de fiabiliser l'organisation du chantier et les mesures de prévention organisationnelles et techniques associées : moyens logistiques basés sur des approvisionnements mécanisés, planning collaboratif avec les entreprises afin de réduire les situations de coactivité, etc.

L'approche coopérative métiers, une voie pour pérenniser les actions de prévention ?

Les différentes expériences menées par la Carsat Rhône-Alpes permettent de dessiner les contours de ce que peut être une action envers un secteur ou une filière professionnelle, de la manière de la mener (en privilégiant une approche collective basée sur la coopération) et des résultats que l'on peut en attendre. La faisabilité d'une telle approche a été validée dans des secteurs d'activité très différents. Les résultats ont montré que, grâce à l'approche coopérative métiers, il est possible de traiter des problèmes et situations complexes, difficilement appréhendables par un expert extérieur.

Les premiers signes d'une pérennisation des actions, au-delà de leur propre cadre, sont constatés. Les acteurs impliqués s'approprient les démarches et les solutions, et les diffusent dans leur secteur d'activité et leur environnement.

On relève la reconduction fréquente des actions, car les acteurs en ont constaté les bienfaits et appris les modalités de mise en œuvre opérationnelle. Les témoignages recueillis à l'occasion des journées de restitution l'illustrent clairement.

Il est possible de considérer, à ce stade, qu'une telle approche coopérative métiers semble porter les « germes » d'un progrès des entreprises vers une autonomisation de leur prise en compte de la prévention des risques professionnels : l'apprentissage progressif, la dynamique de partage qui l'accompagne, et l'intégration de la santé et la sécurité dans leurs propres pratiques métiers. ●

1. Le Réseau AM-RP (Prévention) comprend : la Cnam (Direction des risques professionnels), les Carsat/Cramif/CGSS, l'INRS et Eurogip (ndlr).

2. Les solutions mises en place pour résoudre les sujets critiques ne se limitent pas à des solutions de prévention (au sens habituel) ; elles portent aussi sur les questions d'efficacité, de qualité, d'organisation, de processus, de management..., qui intègrent/embarquent la prévention.

3. Si le déploiement des méthodes « lean » est un fait répandu dans un grand nombre d'entreprises, celui-ci ne peut pas s'effectuer en opposition avec les principes généraux de prévention, ni en dérogeant aux responsabilités de l'employeur en matière de santé et de sécurité au travail. Voir par exemple : <https://www.inrs.fr/risques/lean-management/ce-qu-il-faut-retenir.html> (ndlr).

4. Les « outils lean » utilisés dans la filière sont : Pilotage de la performance, Résolution de problème, VSM, 5S, SMED, Management visuel.

5. Voir notamment : SOULAY C., BRASSEUR G. – In : Dossier : « La chaîne logistique ». Travail & sécurité, février 2024, n°856, pp. 16-19 (ndlr).

6. Ces outils sont accessibles sur les sites Internet de la Carsat Rhône-Alpes (www.carsat-ra.fr) et d'Elence.

7. De nouveaux acteurs sont intégrés à ce processus autour de l'acte de construire et d'aménager : collectivité (métropole, communauté de communes), aménageur, urbaniste, concessionnaire, association de réseaux professionnels...

BIBLIOGRAPHIE

- [1] CANETTO P. ET AL. – Amélioration de la performance par la prévention : une démarche expérimentée dans différentes entreprises. *Hygiène & sécurité du travail*, 2023, 271, EC 36, pp. 74-81. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=EC%2036>
- [2] INRS – Amélioration de la performance par la prévention : retour d'expérience. Une démarche pour les entreprises. 2023, réf. PV 21. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=PV%2021>
- [3] CARSAT RHÔNE-ALPES – Guide méthodologique Aide et soins à domicile : organisation en équipes semi-autonomes. Accessible sur : https://www.carsat-ra.fr/files/live/sites/carsat-ra/files/pdf_illustrations/entreprise/Documentation/autres%20documents/Plaque-Aide_et_soins_a_domicile-s'organiser_en_ESA.pdf
- [4] CARSAT RHÔNE-ALPES – Premiers apprentissages d'une expérimentation lean & santé en agroalimentaire, janvier 2023. Accessible sur : https://www.carsat-ra.fr/files/live/sites/carsat-ra/files/pdf_illustrations/entreprise/Documentation/autres%20documents/Guide_Premiers-apprentissages-d-une-experimentation_Lean%26Sante-en-agroalimentaire%20.pdf
- [5] SITE INTERNET – www.perspectiv-supply.fr
- [6] CARSAT RHÔNE-ALPES – Comment les entreprises du BTP ont articulé santé et performance ? Brochure, réf. Part003_0920. Accessible sur : https://www.carsat-ra.fr/files/live/sites/carsat-ra/files/pdf_illustrations/entreprise/Documentation/BTP/Brochure_BTP_PART003.pdf
- [7] CARSAT RHÔNE-ALPES – Partageons la construction. Brochure, janvier 2023. Accessible sur : https://www.carsat-ra.fr/files/live/sites/carsat-ra/files/pdf_illustrations/entreprise/Documentation/autres%20documents/Partageons-construction_Bilan-Janv2023.pdf



ACTUALITÉS

INFOS À RETENIR

- Facteurs de risque de cancer professionnel en Europe - premiers constats de l'enquête sur l'exposition des travailleurs
- Modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants

NOUVEAUTÉS DE L'INRS

- Animations, brochures, dépliants, documents et outils en ligne...

PARTICIPEZ À LA RECHERCHE

- Étude sur la conception et l'aménagement des bureaux ouverts (*open-space*)
- Étude de la vitesse de récupération de la fatigue auditive à la suite d'une exposition professionnelle au bruit
- Usages numériques avec les machines industrielles et pratiques de cybersécurité

CONNAISSANCES ET RÉFÉRENCES

GRAND ANGLE

- Tabagisme, vapotage et travail

VU DU TERRAIN

- Fatigue auditive et risques pour l'audition chez les professionnels du secteur de la musique amplifiée
- Diisocyanates: nouveautés pour l'évaluation atmosphérique
- Utilisation de l'aspiration haut débit en dentisterie: bénéfices et contraintes perçus chez les chirurgiens-dentistes et les assistants dentaires

PRATIQUES ET MÉTIERS

- Portraits d'entreprises de 2040: illustrations prospectivistes des modalités de pilotage de demain

SUIVI POUR VOUS

- Actualités en santé au travail. 36^e congrès de la SHMTAIA. Saint-Malo, 12-13 octobre 2023
- 8^e Journée de l'Institut Santé Travail Paris Est: fin de carrière, santé et travail. Créteil, 23 novembre 2023
- 16^e journée nationale de l'AFISST: comment concilier les attentes de nos gouvernances, de nos adhérents et des intervenants en lien avec la certification? Paris, 28 novembre 2023

OUTILS REPÈRES

VOS QUESTIONS/NOS RÉPONSES

- Rayonnements ionisants: quel suivi individuel des travailleurs non classés?
- Hépatite A: quels risques de transmission à partir d'une salariée atteinte?

RADIOPROTECTION: SECTEUR MÉDICAL

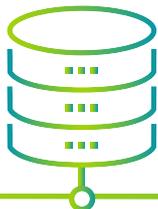
- Scanographie ou tomographie

À VOTRE SERVICE

AGENDA 2024

Retrouvez la revue et abonnez-vous gratuitement sur:

www.rst-sante-travail.fr



Base Colchic

La base de données d'exposition professionnelle aux agents chimiques et biologiques Colchic regroupe l'ensemble des mesures d'exposition effectuées sur les lieux de travail par les huit laboratoires interrégionaux de chimie (LIC) des Carsat/Cramif et les laboratoires de l'INRS. Elle est gérée par l'INRS et a été créée en 1987 à l'initiative de la Caisse nationale de l'assurance maladie (Cnam).

À ce jour, Colchic compte plus d'un million de résultats pour 745 substances chimiques et agents biologiques.

PORTRAIT RÉTROSPECTIF DES EXPOSITIONS PROFESSIONNELLES AUX POUSSIÈRES DE FARINE EN FRANCE DE 2014 À 2023

Les asthmes et rhinites professionnels sont une problématique de santé au travail fréquemment rencontrée dans le secteur de la boulangerie-pâtisserie artisanale ou industrielle et dans les meuneries. Cet article dresse un portrait des expositions professionnelles aux poussières de farine et de leur évolution en France ces 10 dernières années ; il est issu des données enregistrées dans la base Colchic sur la période 2014-2023.

BARBARA
SAVARY,
JEAN-
FRANÇOIS
SAUVÉ
INRS,
département
Métrologie
des polluants

Contexte

Les rhinites et asthmes professionnels sont parmi les maladies professionnelles (MP) associées à des expositions aux substances chimiques et aux agents biologiques les plus fréquentes en France, avec 5 157 cas reconnus entre 2000 et 2021 au titre du tableau de maladies professionnelles du régime général de la Sécurité sociale (TMP-RG) n°66A – Asthmes et rhinites professionnels [1]. Les résultats d'un projet de surveillance des asthmes professionnels entre 2008 et 2014 ont montré que les expositions aux poussières de farine représentaient le facteur étiologique le plus fréquemment rapporté, avec 19,4 % des cas [2]. Parmi les secteurs d'activité concernés, les secteurs de la meunerie et

de la boulangerie-pâtisserie artisanale ou industrielle, employant 240 519 salariés (Cf. Tableau 1), sont particulièrement touchés par des cas de MP. Parmi les 143 cas de MP reconnues en 2021 au titre du TMP-RG n°66A, 101 l'ont été pour de l'asthme, dont 42 MP reconnues dans le secteur de la boulangerie et de la boulangerie-pâtisserie (NAF 1071C), cinq dans le secteur de la fabrication industrielle de pain et de pâtisserie fraîche (NAF 1071A), une dans le secteur de la meunerie (NAF 1061A), une dans le secteur de la cuisson de produits de boulangerie (NAF 1071B) et une dans la fabrication de biscuits, biscottes et pâtisseries de conservation (NAF 1072Z) [3]. Parmi ces 143 reconnaissances, 80 concernaient le Comité technique national

Un biais d'interprétation est susceptible d'être introduit lors de l'exploitation des bases de données nationales d'exposition professionnelle telles que Colchic. En effet, ces bases n'ont pas été conçues dans le but d'être représentatives de l'ensemble des travailleurs ou d'un secteur professionnel donné.



© Gaël Kerbaol/INRS/2023

des services, commerces et industries de l'alimentation (CTN D), dont 47 ont été reconnues pour des boulangers, pâtisseries et confiseurs, et 10 pour des vendeurs en magasin. D'autres MP associées à des expositions à des poussières de farine peuvent être également reconnues par l'Assurance maladie : les lésions eczématiformes de mécanisme allergique (TMP-RG n°65) et les pneumopathies d'hypersensibilité (TMP-RG n°66B).

Selon les estimations de la matrice emplois-expositions française Matgéné, les expositions moyennes des salariés de ces secteurs aux poussières de farine sont comprises entre 5 et 10 mg/m³ pour la période comprise entre 2010 et 2018 [4]. Une revue de la littérature publiée en 2015 a mis

en évidence un constat généralisé dans plusieurs pays – à savoir que les niveaux d'exposition aux poussières de farine les plus élevés provenaient des boulangeries et des meuneries [4]. Des études menées dans des boulangeries ont montré que les expositions les plus importantes concernaient les tâches de préparation de la pâte et du façonnage, avec des concentrations en poussières inhalables comprises entre 0,4 et 37,7 mg/m³.

Malgré le nombre de maladies professionnelles reliées aux poussières de farine et le nombre important de salariés exposés, il n'existe pas de valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP) spécifique en France, contrairement à d'autres types de poussières (bois, silice cristalline..).

↓ **TABLEAU 1**
Nombre d'établissements, de salariés et de maladies professionnelles au titre du tableau 66A dans le secteur de la meunerie et de la boulangerie-pâtisserie en 2021.

SECTEUR NAF	NOMBRE D'ÉTABLISSEMENTS		NOMBRE DE SALARIÉS		NOMBRE DE MALADIES PROFESSIONNELLES AU TITRE DU TABLEAU 66A EN 2021	
	TOUS LES CTN	CTN D'	TOUS LES CTN	CTN D'	TOUS LES CTN	CTN D'
1061A – Meunerie	335	98,21 %	5841	97,62 %	1	1
1071A – Fabrication industrielle de pain et de pâtisserie fraîche	703	98,29 %	31 775	98,49 %	5	5
1071B – Cuisson de produits de boulangerie	1 748	99,77 %	7 977	99,85 %	1	1
1071C – Boulangerie et boulangerie-pâtisserie	30 312	99,83 %	165 491	99,86 %	42	42
1071D – Pâtisserie	3 343	99,64 %	15 689	99,73 %	0	0
1072Z – Fabrication de biscuits, biscottes et pâtisseries de conservation	707	98,30 %	13 746	98,53 %	1	1

* Pourcentage du nombre d'établissements ou de salariés rattachés au CTN D par rapport au nombre d'établissements ou de salariés totaux pour le secteur NAF considéré.



	TOTAL		FABRICATION DE PRODUITS DE BOULANGERIE-PÂTISSERIE ET DE PÂTES ALIMENTAIRES		TRAVAIL DES GRAINS : FABRICATION DE PRODUITS AMYLACÉS	
	ALVÉOLAIRE	INHALABLE	ALVÉOLAIRE	INHALABLE	ALVÉOLAIRE	INHALABLE
Nombre de mesures	116	339	22	153	90	143
Nombre de mesures < LQ	22 (19 %)	0 (0 %)	3 (14 %)	0 (0 %)	15 (17 %)	0 (0 %)
Médiane (mg/m ³)	0,09	2,70	0,10	1,90	0,08	3,57
95 ^e centile (mg/m ³)	0,80	15,18	0,26	10,71	0,96	18,87
Nombre de mesures > CMNPD poussières (%) ⁽¹⁾	6 (5 %)	117 (35 %)	0 (0 %)	36 (24 %)	6 (7 %)	65 (45 %)
Nombre de mesures > document Scoel (%) ⁽²⁾		268 (79 %)		112 (73 %)		123 (86 %)
Nombre de mesures > TLV ACGIH (%) ⁽³⁾		309 (91 %)		131 (86 %)		138 (97 %)

(1) Concentration réglementaire moyenne à ne pas dépasser sur 8 h dans les locaux à pollution spécifique, soit 4 mg/m³ (fraction inhalable) et 0,9 mg/m³ (fraction alvéolaire).

(2) Valeur mentionnée par le Scoel de 1 mg/m³, fraction inhalable.

(3) Threshold limit value de 0,5 mg/m³, fraction inhalable.

↑ **TABLEAU 2**
Nombre de mesures et distributions des concentrations globales et stratifiées par secteur d'activité.

Il existe toutefois des valeurs réglementaires de concentrations moyennes de poussières à ne pas dépasser sur 8 h dans les locaux à pollution spécifique, reprises dans l'article R. 4222-10 du Code du travail s'appliquant aux expositions aux poussières de farine. Ces valeurs, en vigueur depuis le 1^{er} juillet 2023, sont de 4 mg/m³ pour les poussières totales inhalables et de 0,9 mg/m³ pour les poussières alvéolaires. Certains pays et organismes ont toutefois fixé des valeurs spécifiques pour les poussières de farine. Par exemple, l'organisme américain ACGIH (*American conference of governmental industrial hygienists*) a, depuis 2000, établi une valeur guide (TLV, *Threshold limit value*) de 0,5 mg/m³ en fraction inhalable basée sur des effets respiratoires (asthme, irritation des voies respiratoires supérieures et bronchite) [5]. Bien que n'ayant pas de portée réglementaire et représentant plutôt une recommandation d'un groupe d'experts, cette valeur est notamment reprise par la Belgique dans son Code du bien-être au travail (Annexe VI-1.1). Une étude canadienne publiée en 2003 concluait que 97 % des mesures faites dans des meuneries dépassaient la TLV de l'ACGIH, conduisant les autorités compétentes à choisir une valeur plus élevée, fixée à 3 mg/m³ en raison des difficultés techniques pour atteindre la TLV de l'ACGIH qui aurait contraint les salariés au port systématique d'un équipement de protection respiratoire [6]. En Europe, une évaluation du comité scientifique sur les VLEP (Scoel), publiée en 2008, conclut que des concentrations de poussières inhalables inférieures à 1 mg/m³ permettraient de protéger la majorité des travailleurs. Mais il a aussi précisé que de telles concentrations pourraient, compte tenu du caractère sensibilisant des poussières de farine, affecter les salariés ayant préalablement développé une allergie [7].

Mesures concernées

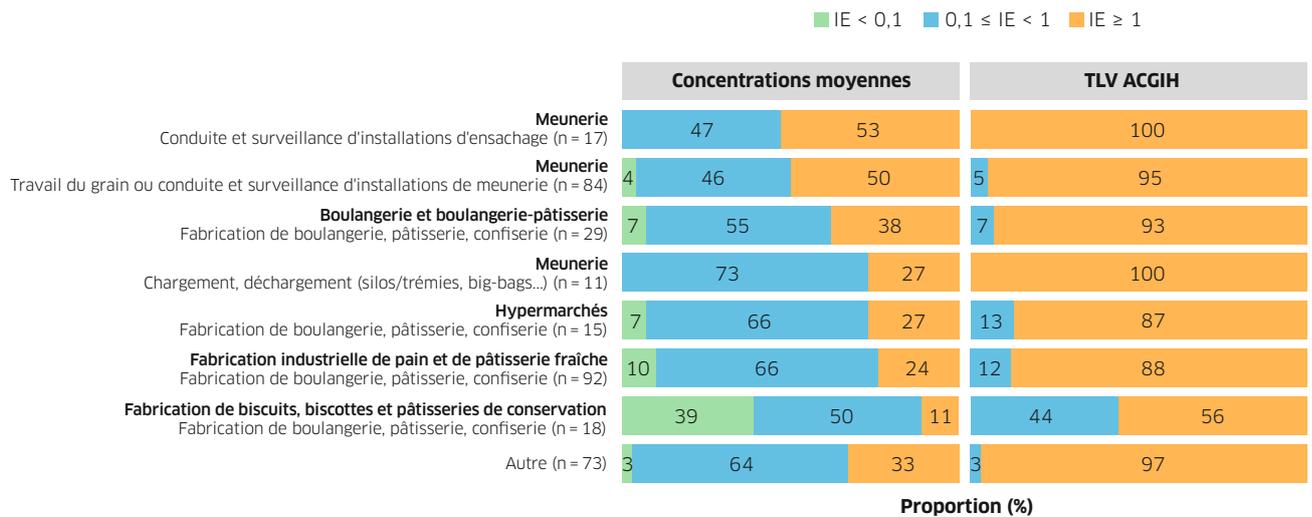
Cet article dresse un portrait des expositions professionnelles aux poussières de farine enregistrées

dans la base Colchic, depuis janvier 2014 jusqu'en juillet 2023. Les mesures prises en compte pour l'exploitation des données ont été réalisées à l'aide de prélèvements individuels dans la zone respiratoire des travailleurs ou dans l'environnement ambiant du poste de travail sur une durée comprise entre 60 et 600 minutes. Les mesures de poussières en fraction inhalable et celles en fraction alvéolaire ont été retenues.

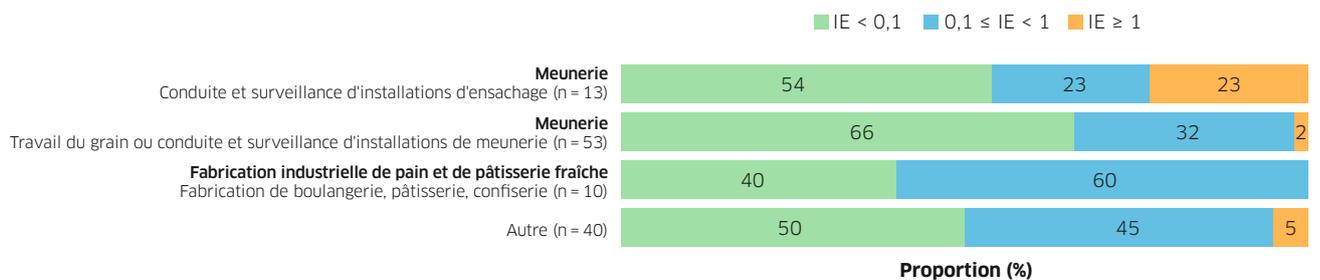
Le *Tableau 2* présente le nombre total de mesures issues des prélèvements individuels, les statistiques descriptives des concentrations et le nombre de mesures dépassant les valeurs de référence (concentrations réglementaires moyennes à ne pas dépasser sur 8 h, ou TLV de l'ACGIH), rapportés à l'ensemble des mesures et pour chacun des deux secteurs d'activité les plus étudiés. Les valeurs dont la concentration était inférieure à la limite de quantification (LQ) ont été remplacées par LQ/2. Les *Figures 1 et 2* présentent la distribution des indices d'exposition (IE = rapport concentration/valeur prise comme référence) par combinaison de secteur d'activité et de tâche pour les concentrations en poussières inhalables ou alvéolaires rapportés à la concentration moyenne à ne pas dépasser (4 mg/m³ ou 0,9 mg/m³, en fonction de la fraction) et à la TLV de l'ACGIH pour les poussières de farine en fraction inhalable (0,5 mg/m³). Les IE sont classés en trois catégories : inférieur à 0,1 (correspondant à 10 % de la valeur prise comme référence) en vert, compris entre 0,1 et 1 en bleu, et supérieur à 1 (indiquant un dépassement de la valeur prise comme référence) en orange.

État des lieux des données dans Colchic

Au total, 603 mesures de poussières de farine ont été identifiées, principalement prélevées en zone respiratoire (n = 455), comparativement à 148 mesures de l'ambiance générale du travail mesurée à un point fixe. Une campagne nationale, pilotée par la Direction des risques professionnels



↑ FIGURE 1 Distribution des indices d'exposition par combinaison du secteur d'activité et de la tâche pour les poussières de farine en fraction inhalable.



↑ FIGURE 2 Distribution des indices d'exposition par combinaison du secteur d'activité et de la tâche pour les poussières de farine en fraction alvéolaire.

(DRP) de la Caisse nationale de l'Assurance maladie (Cnam) menée en 2023 par les laboratoires interrégionaux de chimie (LIC) des Carsat/Cramif¹, a contribué à près de la moitié des mesures (n = 295). Cette campagne fait suite à une sollicitation de la commission instituée par le décret n°2021-1763 du 23 décembre 2021, portant modification des concentrations moyennes en poussières totales et alvéolaires dans les locaux à pollution spécifique. Pour les prélèvements individuels, 339 mesures (75 % du total) concernaient la fraction inhalable et 116 mesures (25 %) concernaient la fraction alvéolaire. Les indicateurs statistiques sont regroupés dans le *Tableau 2* pour l'ensemble des mesures et pour les deux secteurs d'activité les plus étudiés. Pour le secteur de la fabrication de produits amylacés, la quasi-totalité des mesures a été effectuée dans des meuneries. Selon la *Figure 1*, la meunerie est le secteur enregistrant la plus grande proportion de mesures d'exposition supérieures à la concentration moyenne à ne pas dépasser, en particulier lors des tâches d'ensachage et, dans une moindre mesure, lors des opérations de chargement et déchargement.

Pour la fabrication de produits de boulangerie, de pâtisserie et de confiserie, la proportion de dépassement de la concentration moyenne à ne pas dépasser est plus élevée dans les boulangeries et les boulangeries-pâtisseries que dans les hypermarchés et les installations industrielles. Lorsque les niveaux de concentration sont comparés à la TLV de l'ACGIH, toutes les mesures d'exposition sont supérieures à 10 % de la TLV et la quasi-totalité des mesures provenant du secteur de la meunerie la dépasse. Au total, 44 % des mesures individuelles de poussières inhalables ont été prélevées en l'absence de moyens de protection collective (ni ventilation, ni captage), comparativement à 12 % lorsque les deux types d'équipements étaient présents. Bien que supérieurs, les pourcentages de dépassement observés de la concentration moyenne à ne pas dépasser sans protection collective (23 % pour les boulangeries-pâtisseries et 42 % pour les meuneries) ne sont pas significativement différents de ceux en présence de protection collective (16 % et 34 %, respectivement).





© Gaël Kerbaol/INRS/2016

Selon la *Figure 2*, en dépit du nombre plus faible de données disponibles pour la fraction alvéolaire, une tendance similaire à celle constatée pour les poussières inhalables est observée, avec des concentrations plus élevées dans les meuneries, comparativement au secteur de la boulangerie (principalement dans des installations industrielles). Pour 90 prélèvements individuels, provenant principalement de meuneries, des analyses visant à quantifier des concentrations d'agents biologiques ont également été menées. Les concentrations mesurées pour les bactéries et moisissures cultivables à 25°C étaient toutes inférieures à la plus faible valeur guide proposée par l'INRS de 105 UFC/m³ [8]², tandis que pour les endotoxines, la majorité des concentrations se trouvaient sous la plus faible valeur guide de 200 UE/m³, à l'exception de trois mesures dans le secteur des meuneries qui se trouvaient dans le seuil intermédiaire entre 200 et 1000 UE/m³ [9]. D'autres agents biologiques (Ochratoxine A, Zéaralénone, 4-Désoxynivalénol et Aflatoxines) ont aussi été analysés dans certains prélèvements, sans toutefois

atteindre des concentrations supérieures à la limite de quantification.

Discussion – Conclusion

Les résultats montrent un niveau élevé d'exposition des salariés aux poussières inhalables, dont les concentrations sont régulièrement supérieures à la concentration réglementaire moyenne à ne pas dépasser de 4 mg/m³ et, de manière quasi systématique, à la TLV de l'ACGIH de 0,5 mg/m³. L'observation de niveaux d'empoussièrement élevés, en particulier pour les poussières en fraction inhalable, est confirmée par les résultats d'études publiées en Europe et ailleurs [4, 7]. Une analyse des données enregistrées depuis 1987 dans la base Colchic indique que les concentrations en poussières de farine en fraction inhalable mesurées pour la fabrication de produits amylicés tendent à diminuer de 3 % annuellement, alors que celles mesurées dans le secteur de la fabrication de produits de boulangerie-pâtisserie et de pâtes alimentaires demeurent stables. Une analyse de tendances temporelles au Royaume-Uni rend des conclusions similaires, en ne montrant pas de baisse significative des niveaux d'exposition sur une période de près de 20 ans [10]. Les résultats issus de la base Colchic sur la période 2014-2023 concordent également avec ceux d'une étude canadienne publiée en 2003, qui concluait que 97 % des mesures faites dans des meuneries dépassaient la TLV de l'ACGIH [6].

L'analyse des données enregistrées dans Colchic montre que près de la moitié des mesures ont été effectuées sur des postes de travail sans ventilation mécanique ni autre équipement de protection collective. Toutefois, la proportion de mesures supérieures à la concentration réglementaire moyenne à ne pas dépasser était légèrement plus faible pour celles réalisées en présence d'équipements de protection collective par rapport à celles faites en l'absence de captage. Ces résultats doivent néanmoins être interprétés avec prudence, la nature des tâches et des métiers représentés peut être différente et les mesures ont pu être faites à partir d'un ciblage des situations susceptibles de générer des niveaux d'exposition élevés, source de biais de sélection. Le nombre de mesures disponibles était également insuffisant pour comparer les niveaux d'exposition entre les différents types d'équipement de protection collective. Il demeure que l'installation de moyens techniques de réduction des expositions doit être adaptée au poste de travail et faire l'objet d'entretiens réguliers pour assurer une efficacité optimale [11]. Comme le précise l'arrêté du 8 octobre 1987 relatif au contrôle périodique des installations d'aération et d'assainissement des locaux de travail, le contrôle doit avoir lieu au moins une fois par an. Par ailleurs, l'utilisation de la métrologie en temps réel pourrait permettre de

caractériser plus finement les pics d'exposition qui ne peuvent pas être identifiés par des mesures pondérales pour faciliter la mise en place de mesures de prévention adaptées.

Afin de réduire les niveaux d'exposition aux poussières de farine, différentes stratégies peuvent être employées. Dans les meuneries, les expositions les plus élevées observées aux postes d'ensachage ont toutes été mesurées en l'absence de ventilation générale. L'automatisation, associée à un capotage des installations équipées de systèmes d'aspiration efficace et de ventilation mécanique, pourrait diminuer les expositions des salariés. La maintenance des systèmes d'aspiration doit être rigoureuse pour éviter le colmatage des installations diminuant l'efficacité du captage des poussières et pour limiter le risque de création d'une atmosphère explosive due à l'accumulation de poussières de farine dans les installations de ventilation.

Dans le secteur de la fabrication de produits de boulangerie, un travail d'identification des moyens de prévention avait été mené dans les années 1990-2000 portant sur les produits utilisés, les équipements et les processus [12]. Ses conclusions demeurent toujours d'actualité.

Deux Conventions nationales d'objectifs (CNO) ont été signées entre la Cnam et les syndicats et confédérations des professions concernées, afin que les professionnels puissent être subventionnés pour l'achat d'équipements permettant de réduire les expositions des salariés des boulangeries-pâtisseries artisanales (très petites entreprises) et des établissements de fabrication industrielle de produits de boulangerie, pâtisseries et pizzas [13-14]. Finalement, la problématique de l'exposition aux poussières de farine doit s'intégrer dans une approche qui prend également en compte d'autres risques professionnels pouvant être présents au poste de travail – notamment les risques explosifs, électriques, liés aux machines et au bruit, sans compter ceux liés à la manutention de charges et aux gestes répétitifs [15]. De plus, l'évaluation des risques au poste de travail doit considérer le travail en horaires atypiques pour les travailleurs concernés. ●

1. Carsat : Caisse d'assurance retraite et de la santé au travail. Cramif : Caisse régionale d'assurance maladie d'Ile-de-France.

2. UFC : unités formant colonies. UE : unités d'endotoxines.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **CAISSE NATIONALE DE L'ASSURANCE MALADIE (CNAM) / DIRECTION DES RISQUES PROFESSIONNELS (DRP)** – *Évolution du nombre de maladies d'origine professionnelle par maladie et par syndrome : 2000 à 2021*. 2023. Accessible sur : <https://assurance-maladie.ameli.fr/etudes-et-donnees/mp-denombrement-historique-2000-2021>
- [2] **IWATSUBO Y. ET AL.** – *Observatoire National des Asthmes Professionnels II Bilan de la phase pilote et perspectives pour la surveillance des asthmes en lien avec le travail*. Santé Publique France, 2016. Accessible sur : https://www.santepubliquefrance.fr/content/download/182912/document_file/40301_13135-ps.pdf
- [3] **CNAM/DRP** – *Livret statistique de la sinistralité AT-MP 2021 du CTN D*. 2022. Accessible sur : https://assurance-maladie.ameli.fr/sites/default/files/2021_livret-sinistralite%3%A9-ctn-d.pdf
- [4] **STOBNICKA A., GÓRNY R.L.** – Exposure to flour dust in the occupational environment. *International journal of occupational safety and ergonomics*, 2015, 21 (3), pp. 241-249. Accessible sur : <https://doi.org/10.1080/10803548.2015.1081764>
- [5] **ACGIH** – *TLVs and BEIs: threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices*. 2021.
- [6] **EMPLOI ET DÉVELOPPEMENT SOCIAL CANADA** – *Limite d'exposition en milieu de travail (LEMT) à la poussière de farine*. 2018. Accessible sur : <https://www.canada.ca/fr/emploi-developpement-social/services/sante-securite/rapports/limite-exposition-poussiere-farine.html>
- [7] **SCOEL** – *Recommendation from the Scientific committee on occupational exposure limits for flour dust*. 2008. Accessible sur : <https://ec.europa.eu/social/BlobServlet?docId=3869&langId=en>
- [8] **DAVID C., EMILI A., LOISON P., MATER G. ET AL.** – Valeurs-guides bactéries et moisissures cultivables: interprétation des résultats de métrologie des bioaérosols. *Hygiène & sécurité du travail*, 2023, 271, NT 109, pp. 55-63. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=NT%20109>
- [9] **BALTY I., BERTRAND N., DAVID C., BURZONI S. ET AL.** – Valeurs guides endotoxines. Interprétation des résultats de métrologie des bioaérosols. *Hygiène & sécurité du travail*, 2015, 239, NT 25, pp. 46-50. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=NT%2025>
- [10] **VAN TONGEREN M. ET AL.** – Temporal trends of flour dust exposure in the United Kingdom, 1985-2003. *J Environ Monit*, 2009, 11 (8), pp. 1492-1497.
- [11] **INRS** – *Principes généraux de ventilation*. 2022, coll. Guides pratiques de ventilation, ED 695. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%20695>
- [12] **BRETON C.** – Prévention des allergies respiratoires professionnelles en boulangerie-pâtisserie. *Documents pour le médecin du travail*, 2002, 90, pp. 111-139.
- [13] **CAISSE NATIONALE D'ASSURANCE MALADIE (CNAM)** – *CNO n°052 – Convention nationale d'objectifs fixant un programme d'actions de prévention spécifiques aux activités de fabrication industrielle de produits de la boulangerie, pâtisserie et pizza, ainsi que de transformation et conservation de légumes et de fruits*. Accessible sur : https://www.ameli.fr/sites/default/files/Documents/707440/document/cno_d052_boulangerie_industrielle_aout2020.pdf
- [14] **CNAM** – *CNO n° 051 – Convention nationale d'objectifs fixant un programme d'actions de prévention spécifique aux activités de boulangerie, pâtisserie, confiserie, chocolaterie et glaces artisanales*. Accessible sur : https://www.ameli.fr/sites/default/files/Documents/692320/document/cno_dd051_boulangerie_juin2020.pdf
- [15] **INRS** – *Boulangerie, pâtisserie, chocolaterie, glacierie. Prévenir les risques professionnels*. Page éditoriale Web – Métiers, 2023. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/metiers/commerce-service/boulangerie-patisserie.html>



Agenda & services

Congrès

Polyexpositions au travail

P. 73

Agenda/Événements

P. 80

Formation

Bruit au travail :
se former à la prévention
des nuisances sonores

P. 82

Agenda/Formations

P. 86

Sélection bibliographique

À lire, à voir

P. 88

Congrès

POLYEXPOSITIONS AU TRAVAIL

Compte rendu de la journée technique « Polyexpositions au travail », organisée par l'INRS le 12 octobre 2023.

Rares sont les situations de travail où les salariés ne sont exposés qu'à un seul risque. Dans la majorité des activités, ils sont confrontés à une polyexposition professionnelle dont les effets ne sont pas toujours connus, et dont l'évaluation est un défi majeur. Ceux-ci peuvent être indépendants les uns des autres, ou bien interagir entre eux. Bien que l'approche « mononuissance » permette d'améliorer les conditions de travail et de réduire les accidents de travail et les maladies professionnelles, l'approche « polyexposition » apparaît incontournable pour une évaluation des risques plus complète et la mise en place d'actions de prévention plus efficaces. Cette journée technique avait pour objectifs d'illustrer certaines combinaisons d'expositions en milieu professionnel et de discuter de leurs effets et des démarches de prévention adaptées. Plus de 1 500 acteurs de la santé et sécurité au travail se sont connectés lors de cette journée (organisée et diffusée uniquement sur Internet) : chargés de prévention, personnel des services de prévention et de santé au travail, chefs d'entreprise, représentants du personnel... L'ensemble des présentations et des sessions d'échanges est disponible en rediffusion sur le site de l'INRS¹.

MULTIPLE EXPOSURE AT WORK – Report on the technical workshop “Multiple exposure at work”, held by INRS on 12 October 2023 – It is rare for employees to be exposed to a single risk in work situations. In most activities, they are faced with several types of exposure at work, the effects of which are sometimes unknown and are hard to assess. On the one hand, these can be independent from one another and on the other hand, they might interact with each other. While the “mono-exposure” approach can improve work conditions and reduce occupational accidents and diseases, the “multiple exposure” approach appears to be essential for a more comprehensive risk assessment and the implementation of more effective prevention actions. The goal of this workshop was to illustrate certain exposure combinations in the work environment and discuss their effects and the suitable prevention measures. More than 1,500 OSH stakeholders logged in (workshop held and broadcast online only): OSH practitioners, business leaders, staff representatives, etc. All of the presentations and talk sessions are available for replay on the INRS website.

FRÉDÉRIC
CLERC
INRS,
département
Métrologie
des polluants

Contexte et état des lieux

Renaud Buronfosse (CA de l'INRS) introduit cette journée, dont l'objectif est de discuter des enjeux, des méthodes et des perspectives de prévention de la polyexposition au travail. La polyexposition est une situation où les travailleurs sont exposés simultanément ou successivement à diverses nuisances – chimiques, biologiques, physiques, ou liées à des facteurs organisationnels, relationnels ou éthiques. Il est souligné que l'approche traditionnelle

de prévention des risques professionnels basée sur une seule nuisance peut être insuffisante pour gérer les risques liés à la polyexposition, car les effets combinés peuvent être plus graves que ceux induits par des expositions individuelles. De plus, certains effets combinés ne sont pas connus et la prudence s'impose. **Frédéric Clerc (INRS)** indique que de nombreuses pathologies peuvent être engendrées par des combinaisons de nuisances, et que les connaissances disponibles aujourd'hui concernent certaines



Atelier d'usinage, équipé de systèmes d'aspiration à la source des brouillards d'huile.



© Gael Kerbaol/INRS/2022

interactions précises. Les interactions entre substances chimiques sont les plus documentées. D'autres liens sont démontrés, mais les connaissances restent à étayer sur les combinaisons entre substances chimiques et nuisances physiques (bruit) ; facteurs biomécaniques (mouvements répétitifs, charge physique) ; facteurs organisationnels (par exemple, horaires atypiques), relationnels (soutien professionnel des collègues ou de la hiérarchie par exemple) et éthiques (devoir réaliser des tâches contraires à ses valeurs par exemple) ; et agents biologiques. Dans ce contexte, les nuisances peuvent interagir selon quatre modalités : l'additivité lorsque les effets s'additionnent, la synergie lorsque les effets sont amplifiés, l'antagonisme lorsque les effets combinés sont réduits, et la potentialisation lorsqu'une nuisance qui, seule, engendre un effet faible ou inexistant, génère un effet important en présence d'une autre nuisance [1]. Il est remarqué que la terminologie est variable : une nuisance ou une contrainte font référence à un élément subi, imposé par le travail, auquel est exposé le travailleur. Le terme « facteur de risque » est employé dans un contexte épidémiologique et il inclut la notion de causalité entre la nuisance et l'effet sur la santé. Le déroulement temporel est également abordé, car l'organisme n'est pas toujours en capacité d'éliminer une nuisance rapidement ; ainsi, des expositions séquentielles à des nuisances différentes peuvent engendrer des effets combinés. La communauté scientifique confirme son

intérêt pour ce sujet, qui a suscité sept à huit fois plus de publications en 2022 qu'en 1999. Les connaissances acquises et celles à améliorer portent sur les effets sur la santé, le repérage des secteurs d'activité, des tâches et des métiers plus particulièrement concernés et les recommandations de prévention.

Margaux Sanchez (Anses) rappelle que, tout au long de leur carrière professionnelle, les travailleurs sont susceptibles d'être exposés simultanément à de multiples facteurs de risques sanitaires. Dans le cadre du Plan santé au travail n°3 (2016-2020), une action spécifique visait l'amélioration de la prise en compte de la polyexposition. Suite à un premier état des lieux sur la polyexposition en France et à l'étranger², une étude pour identifier des groupes homogènes de salariés polyexposés a été réalisée par l'Anses, Santé publique France et la Dares. Elle repose sur les données de l'enquête Sumer 2016-2017³, permettant de décrire les expositions de 25 millions de salariés ou agents des secteurs privé et public en France. Cette enquête a permis d'identifier 12 profils homogènes de salariés exposés à des nuisances ou contraintes multiples similaires (chimiques, physiques, biologiques, organisationnelles et/ou relationnelles). Ces profils objectivent des situations de polyexposition transversales qui concernent la quasi-totalité des salariés français, et permettent d'identifier les secteurs et/ou familles professionnelles concernés par des situations plus spécifiques. Les professions de santé, exposées à toutes les familles de contraintes

étudiées, sont particulièrement touchées. Ces profils impliquent en particulier de ne pas se limiter à la prise en compte de contraintes bien connues (chimiques, physiques, biologiques) et facilement identifiables par la nature de l'activité, et d'y associer d'autres contraintes, organisationnelles ou relationnelles, qui peuvent accentuer les premières. Cette approche globale des expositions professionnelles constitue une base de réflexion utile pour orienter les actions de prévention et de recherche.

Clémence Fillol (Santé publique France) décrit l'« exposome », concept introduit par Christopher Wild en 2005 [2] et inscrit dans le Code de la santé publique. Il englobe l'ensemble des expositions environnementales, y compris les expositions professionnelles auxquelles une personne est soumise et qui peuvent avoir des conséquences sur la santé. Il comprend les facteurs physiques, chimiques, biologiques, relationnels et comportementaux. L'exposome peut fournir des informations précieuses sur les risques auxquels les travailleurs sont soumis. En identifiant et en quantifiant les différentes expositions professionnelles, il est possible de mieux comprendre les effets potentiels sur leur santé. Toutefois, seule une partie est mesurée ; il s'agit le plus souvent de l'exposome chimique, c'est-à-dire l'exposition à une substance ou une famille de substances chimiques. Deux outils sont évoqués comme particulièrement intéressants pour évaluer les expositions. Premièrement, la surveillance biologique (« *biomonitoring* ») qui permet une évaluation précise de l'exposition et une détection précoce des risques pour la santé des travailleurs. Deuxièmement, les matrices emploi – exposition, qui permettent d'estimer des proportions d'expositions professionnelles et des prévalences d'expositions dans la population générale (à différentes dates, ou sur la vie professionnelle entière) et, dans certains cas, de quantifier l'impact de l'exposition professionnelle à un facteur de risque et, ainsi, aider au repérage individuel des expositions ou à la prise en charge médico-sociale. En conclusion, l'évaluation de l'exposition au niveau populationnel permet d'identifier des secteurs particulièrement exposés à des nuisances d'intérêt, afin de mettre en place des systèmes de surveillance spécifique ou des programmes de prévention. Il est parfois difficile de faire la distinction entre expositions environnementale et professionnelle et d'accéder à certaines données météorologiques. Toutefois, s'il est difficile d'appréhender l'exposome dans son ensemble, il est essentiel aujourd'hui d'étudier la polyexposition pour tenir compte de la réalité des expositions.

Jérémy de Saint-Jores (Direction générale du travail) intervient pour rappeler que, même si le terme de polyexposition a été récemment introduit dans le Code du travail par la loi n°2021-1018 du 2 août 2021 pour renforcer la prévention en santé au travail⁴, la notion est ancienne. Le Code du travail,

comme énoncé dans son article L. 4121-1, impose à l'employeur de prendre les mesures nécessaires pour assurer la sécurité et protéger la santé physique et mentale des travailleurs, sans séparation des différentes sources de nuisances. Des dispositions complètent ce principe de base, sur certains risques spécifiques. Elles intègrent des notions plus ou moins étendues de polyexpositions. Ainsi, l'article R. 4412-6 impose à l'employeur, lors de l'évaluation des risques chimiques, de prendre en compte les cas d'exposition simultanée ou successive à plusieurs agents chimiques et les effets combinés de l'ensemble de ces agents. Certaines dispositions vont au-delà de l'approche qualitative, en imposant une évaluation quantitative (par exemple, lors de l'exposition du salarié à un mélange de silice cristalline et de poussières). Les approches réglementaires les plus avancées en termes d'exposition combinée sont certainement celles mises en place pour l'évaluation des risques liés aux produits biocides, lors de la délivrance des autorisations de mise sur le marché, encadrées par le règlement européen (UE) 528/2012⁵.

Le risque chimique représente un sujet très complexe pour les entreprises, et plus encore pour les TPE et PME. De nombreuses études, ainsi que la conférence sur la prévention des risques liés aux cancers professionnels⁶, ont mis en évidence et présenté les besoins qu'ont ces entreprises de disposer d'outils clés en main. Ainsi, le Plan santé au travail n°4 (2021-2025) vise à renforcer la réglementation sur la prévention du risque chimique et la traçabilité des expositions et à en faciliter l'application pour les petites entreprises, *via* des outils et guides adaptés. La polyexposition doit être prise en compte dans le développement de ces aides à l'évaluation des risques et dans la mise en œuvre de mesures de prévention, en s'appuyant sur les acteurs comme les Caisses d'assurance retraite et de la santé au travail (Carsat/Cramif/CGSS), l'INRS, les services de prévention et de santé au travail (SPST) ou les organisations syndicales ou patronales⁷.

Modèles, outils et cas d'application aux mélanges de substances chimiques

David Vernez (Unisanté) introduit le concept de l'exposition agrégée, définie comme l'exposition à un même polluant selon différentes sources ou voies d'exposition, qui reste un enjeu majeur en termes d'évaluation et de priorisation des actions de prévention. Les « silos » réglementaires et administratifs existants, les espaces de vie professionnels et domestiques ainsi que l'environnement extérieur, ont conduit au développement d'outils et de logiques disjoints, qui ne permettent pas de vision globale. Il devient urgent de décloisonner ces silos, qui n'ont pas de sens sur les plans sanitaire et scientifique. La multiplicité des sources et situations d'exposition et l'effacement des frontières spatiales et temporelles du travail rendent en effet ces distinctions



de plus en plus artificielles et inadéquates. En pratique, un tel découplage n'est pas si simple. Les données de terrain existantes (par exemple, concernant la contamination des sols, de la chaîne alimentaire, de l'air intérieur et des situations de travail) ont souvent été collectées pour répondre à des besoins spécifiques, et les bases de données sont structurellement différentes, ou n'ont pas de lien entre elles. La situation est similaire pour la modélisation de l'exposition. Pas moins de 217 modèles (dont 22 en milieu professionnel) permettant de prédire l'exposition par inhalation ont été recensés dans la littérature scientifique. Faire communiquer ces modèles, basés sur des logiques de construction et alimentés par des déterminants d'exposition différents, représente un vrai défi. Une telle démarche est néanmoins en cours dans le cadre du projet Parc⁸, piloté par l'Anses et qui regroupe environ 200 partenaires institutionnels à travers l'Europe.

Laureline Coates (INRS) rappelle que les situations de polyexpositions chimiques sont fréquentes en milieu professionnel ; c'est pourquoi des initiatives, notamment le Plan santé au travail n° 4 (2021-2025) et la loi « Santé – Travail » du 2 août 2021⁴, enjoignent aujourd'hui de mieux prendre en compte ces situations. Mais les difficultés liées à l'évaluation des effets sur la santé d'un mélange de substances limitent souvent l'action des préventeurs. Dans ce contexte, Mixie France peut constituer une aide concrète. Il s'agit d'un outil en ligne qui aide à repérer les effets additifs potentiels d'un mélange de substances [3]. Pour une situation de travail donnée, le premier niveau d'utilisation de l'outil permet une analyse qualitative, en repérant les classes d'effets communes des substances du mélange. Lorsque l'on dispose de mesures de concentrations atmosphériques pour les substances du mélange, un deuxième niveau d'utilisation permet une analyse plus précise (quantitative) : Mixie repère les situations à risques en calculant l'indice d'exposition à effet additionnel (IAE). L'approche « polyexposition chimique » de cet outil permet ainsi de repérer des situations à risques susceptibles de passer inaperçues avec une approche classique (substance par substance), ce qui permet de prioriser les actions de prévention.

Delphine Bouvet et Marie Chevallier (Airbus) indiquent que le secteur de la construction aéronautique comprend des activités d'assemblage des tronçons et pièces des avions, d'installation des équipements des différents systèmes, d'application de peintures et d'aménagement commercial. L'ensemble de ces activités expose à plusieurs produits chimiques, de manière séquentielle ou simultanée. Chez Airbus, l'évaluation *a priori* du risque chimique est complétée par la réalisation de campagnes de mesures atmosphériques. Elle conduit à un plan d'actions continu, impliquant par exemple la substitution des produits classés cancérigènes,

mutagènes ou reprotoxiques. Les salariés exposés bénéficient d'un suivi clinique et biologique en fonction des expositions, dont la traçabilité est assurée par le dossier médical de suivi en santé au travail. Dans le contexte réglementaire de la loi du 2 août 2021, des plans santé travail n° 3 et 4, mais aussi des résultats de l'enquête Sumer 2017, une meilleure connaissance de la polyexposition aux mélanges de substances sur la santé permet de favoriser la prévention. Grâce à l'expertise de INRS sur l'outil Mixie France, une première approche qualitative d'évaluation de la polyexposition chimique a pu être réalisée à l'échelle de l'entreprise, puis par secteur, et par poste de travail. Près de 35 000 situations de travail ont été relevées et 581 substances différentes ont été identifiées, dont 131 figurent dans l'outil Mixie. La polyexposition a pu être évaluée pour 46 % des situations de travail. Les cinq classes d'effets toxicologiques majoritaires sont : les atteintes des voies respiratoires supérieures, oculaires, cutanées, du système nerveux central et des voies respiratoires inférieures. Les perspectives sont de poursuivre l'évaluation de la polyexposition sur l'ensemble des secteurs, de tenter de réaliser une démarche d'évaluation quantitative en prenant en compte l'exposition réelle, et d'utiliser le produit de cette évaluation comme un véritable outil de prévention.

Exemples de cas d'application d'études sur la polyexposition

Alain Garrigou (université de Bordeaux) considère que l'exposition d'une part, et les polyexpositions d'autre part, constituent des formes d'énigmes qui peuvent être formalisées et résolues par des approches pluridisciplinaires et participatives, en vue de développer la prévention. Ce parti pris est construit à partir de recherches menées en ergotoxicologie, un domaine de spécialisation de l'ergonomie mobilisant une approche transdisciplinaire (ergonomie, toxicologie, psychologie du travail, sociologie, anthropologie, droit, etc.). Cette approche analyse le travail réel, tel qu'il est réalisé par les hommes et les femmes à leur poste de travail. Dans cette perspective, l'exposition est associée aux situations et conditions dans lesquelles les travailleurs, au cours de leur activité, sont exposés ou s'exposent, voire exposent d'autres personnes (collègues, famille, etc.) à des dangers. Ceux-ci peuvent être d'origines différentes (chimique, physique, biologique, mécanique, mise en difficulté du processus de construction de l'identité professionnelle, etc.), ce qui constitue des polyexpositions. Une des spécificités de la démarche est de considérer que le travailleur est lui aussi en capacité d'agir sur son exposition, et donc sa polyexposition. Pour ce faire, l'ergotoxicologie a développé des approches hybrides d'objectivation des expositions et polyexpositions, qui combinent des mesures de concentration des substances

chimiques en temps réel, ou bien en différé par des techniques de piégeage sur filtre ou frottis, des mesures de fréquences cardiaque ou respiratoire, par enregistrement vidéo, mais aussi d'analyse de la perception et de la représentation des risques par entretien ou autoconfrontation. De nombreuses recherches ont été menées dans l'agriculture sur les pesticides, ou bien dans l'industrie (exposition à des composés organiques volatils ou à des particules micro- ou nanométriques), ou encore dans le secteur du bâtiment [4-6]. Ces études montrent que, si on peut avoir l'impression que les travailleurs ne se protègent pas, la plupart d'entre eux perçoivent les risques et leurs effets, et développent des stratégies pour se protéger dans leur travail, et pour protéger leurs proches quand ils pensent ramener des produits à la maison *via* les vêtements de travail. Ces études mettent aussi en évidence qu'ils réalisent des compromis entre des stratégies de protection, qui constituent une activité à part entière, et des logiques de production. La compréhension de l'énigme se situe au niveau de ces compromis.

Dieynaba Ndiaye (INRS) souligne que les perturbateurs endocriniens (PE) sont retrouvés dans de nombreuses classes de produits chimiques (pesticides, plastifiants, retardateurs de flammes...) et dans des secteurs d'activité très variés (agriculture, traitements des déchets, coiffure...) [7]. Un grand nombre de salariés sont de ce fait en situation de polyexposition à des PE. Des études épidémiologiques établissent un lien entre l'exposition à certains PE et l'apparition de pathologies de l'appareil reproducteur chez l'être humain [8-11]. Au niveau expérimental, sur des cultures cellulaires, la mise en évidence de substances perturbant le système endocrinien repose sur l'analyse des effets par traitement avec une substance unique. En effet, les tests réglementaires ont été développés et validés dans cet objectif, et non pour l'étude des effets des mélanges. Il existe donc peu de données expérimentales sur l'effet des mélanges de PE. Le principe qui régit la prise en compte d'une polyexposition est de présumer de l'additivité des effets des différents constituants d'un mélange. Toutefois, la communauté scientifique s'accorde sur l'existence d'autres modèles d'interactions (supra-additivité et infra-additivité) [12]. Des tests réglementaires *in vitro*, validés pour l'étude des effets sur la fonction de reproduction, ont été adaptés pour évaluer les effets de mélanges de PE connus pour présenter les mêmes effets (diminution de la production de testostérone). Une étude a porté sur deux composés diminuant le niveau de testostérone dans les cellules : le bisphénol A et le climbazole. Les résultats montrent que le mélange des deux composés a une toxicité supérieure à celle de chaque molécule prise séparément. Cependant, dans les conditions expérimentales de cette étude, l'effet du mélange demeure inférieur à celui de la somme



© Grégoire Maisonneuve pour l'INRS/2021

des effets des deux molécules : c'est une interaction d'infra-additivité. C'est pourquoi il est important de disposer de données expérimentales rapidement accessibles pour l'évaluation du risque cumulé d'une exposition à un mélange, et de considérer leurs proportions relatives.

Adrian Fuente (université de Montréal) mentionne que les études menées sur des animaux de laboratoire ont mis en lumière que l'exposition à des solvants organiques (toluène, styrène, xylène et éthylbenzène), de manière isolée ou en combinaison avec une exposition au bruit, peut provoquer des dommages aux cellules ciliées externes de la cochlée. De même, plusieurs études menées auprès de populations professionnellement exposées aux solvants organiques et au bruit ont relevé une prévalence plus élevée de pertes auditives, par rapport aux salariés uniquement exposés au bruit. En effet, il a été observé que la co-exposition aux solvants et au bruit engendrait un effet synergique sur la fonction des cellules ciliées externes chez les animaux de laboratoire. Ceci suggère que l'effet combiné des deux agents est plus sévère que l'effet de chaque agent pris individuellement. De plus, la temporalité

Local dédié à la préparation de mélanges de produits dans un salon de coiffure, équipé d'une enceinte ventilée.



du bruit joue un rôle crucial dans cette interaction : le bruit impulsif, lorsqu'il est associé aux solvants, entraîne un effet plus préjudiciable sur les cellules ciliées externes que le bruit continu associé aux solvants. Ces constatations soulignent l'importance cruciale, pour les programmes de préservation de l'audition, de considérer à la fois la présence des solvants et les niveaux de bruit, ainsi que les caractéristiques de ce bruit. En résumé, le bruit n'est pas le seul agent ototoxique sur le lieu de travail, car les solvants organiques peuvent également induire une perte auditive, de manière indépendante ou en potentialisant l'impact du bruit sur le système auditif des travailleurs.

Laurence Weibel (INRS/Carsat) indique que les effets combinés d'une exposition professionnelle aux horaires atypiques et aux substances chimiques sont peu documentés, et qu'un état des lieux des connaissances existantes sur le sujet a été dressé. Selon l'enquête Sumer de 2010, les travailleurs en horaires atypiques sont plus fréquemment exposés à au moins un produit chimique. Or, la question de l'influence des altérations circadiennes dans les effets des produits chimiques est très peu posée au travail. Est-ce que la toxicité des substances varie selon le moment de l'exposition ? Quelles sont ces « fenêtres horaires de susceptibilité », et pour quelles substances ? Est-ce que l'exposition au travail posté, notamment au travail de nuit, modifie les effets des substances chimiques ? Les connaissances disponibles sur le sujet restent très parcellaires, mais suggèrent que les effets néfastes des agents chimiques et les niveaux de certains biomarqueurs pourraient différer de façon non négligeable en fonction du moment de l'exposition, ou de l'heure du prélèvement [13-14]. Ces résultats questionnent notamment la méthodologie actuelle d'obtention des VLEP (valeurs limites d'exposition professionnelle) obtenues en conditions diurnes : protègent-elles suffisamment les travailleurs soumis à des horaires de travail atypiques ? Considérer le facteur temps lors de l'évaluation du risque chimique – en complément des fréquence, intensité, durée et des conditions d'exposition aux produits chimiques – constitue un premier pas vers une meilleure prévention des risques chez les travailleurs en horaires atypiques.

Catherine Brugnot (Carsat Bourgogne-Franche Comté), avec les co-auteurs de l'étude menée en

lien avec l'INRS⁹, présente un retour d'expérience sur une campagne de mesures réalisée dans une fromagerie industrielle, pour caractériser l'exposition des salariés aux agents microbiens et chimiques présents dans l'air. Les mesures indiquent que certains opérateurs sont exposés à la fois à des champignons allergisants et au dioxyde de carbone, à des niveaux nécessitant des mesures de prévention. Une émission massive de particules fongiques dans l'air a été constatée, en particulier pour les tâches de brossage manuel d'un fromage, avec des niveaux d'exposition individuelle pouvant expliquer certains symptômes respiratoires constatés. Les caves d'affinage peuvent présenter de fortes concentrations de dioxyde de carbone, liées au processus d'affinage et entraînant des niveaux d'exposition élevés. La détermination de mesures de prévention s'avère toutefois compliquée, au regard des expositions chimiques et biologiques mises en évidence, compte tenu des contraintes très fortes liées au procédé de fabrication et aux installations existantes, et des autres risques professionnels identifiés (travail en milieu froid et humide, manutentions, gestes répétés, déplacements, etc.). Il semble nécessaire de progresser sur les connaissances relatives à ces polyexpositions. L'étude initiée par l'INRS sur le thème de la « prévention des polyexpositions dans les fromageries » doit permettre d'alimenter ces réflexions.

Henri Bastos (Anses) revient sur le concept d'exposome [2] et rappelle qu'il englobe les expositions environnementales au cours de la vie, y compris les facteurs liés au mode de vie, depuis la période prénatale jusqu'à la fin de vie. L'exposome a fait son entrée dans le Code de la santé publique en 2016. Il ne figure pas dans le Code du travail, où on utilise le terme de polyexposition, qui n'intègre pas la notion de « cumul » dans le temps de toutes les expositions. La loi du 2 août 2021 précise que les règles de prévention des risques pour la santé et la sécurité des travailleurs soumis à des risques chimiques doivent désormais tenir compte des situations de polyexposition. L'harmonisation des terminologies permettrait de construire une approche partagée avec la santé publique, la santé environnementale et la santé au travail. Cependant, le concept d'exposome est encore perçu par beaucoup comme spécifique de la santé publique. En outre, d'aucuns estiment que, s'il était introduit dans le droit de la Sécurité sociale, cela pourrait induire un risque de dilution des responsabilités, problématique dans le cadre de la reconnaissance des maladies professionnelles, notamment celle des pathologies multifactorielles comme les cancers. Qu'importent les définitions à ce stade, car ces concepts d'exposome et de poly-exposition ont aujourd'hui pour effet de (re)mobiliser les acteurs de la santé au travail à penser globalement l'ensemble des expositions et donc des risques professionnels – ce qui correspond à une réalité, puisque la quasi-

POUR EN SAVOIR +

- Rediffusion de la Journée technique accessible sur : <https://www.inrs.fr/footer/actes-evenements/journee-technique-polyexpositions.html>
- Dossier Web INRS : <https://www.inrs.fr/risques/polyexpositions/ce-qu-il-faut-retenir.html>

totalité des travailleurs français sont polyexposés. En outre, est à nouveau mise en évidence l'impérative nécessité d'assurer une traçabilité collective et individuelle des expositions professionnelles tout au long de la carrière des travailleurs.

Jérôme Triolet (INRS) conclut cette journée en soulignant qu'à l'évidence, il n'est plus question aujourd'hui d'aborder la prévention des risques professionnels en évaluant les différents risques « en silos », comme cela a parfois pu être le cas. Cela était essentiellement dû aux compétences professionnelles souvent spécialisées qui sont requises : les experts en risque chimique ne le sont pas forcément en risque biologique, par exemple. L'INRS et les préventeurs ont, heureusement et depuis longtemps, conscience que l'évaluation des risques professionnels constitue un tout, qu'elle doit être réalisée de façon pluridisciplinaire sur la base de l'observation du travail réel, et en associant les instances représentatives du personnel. Les préventeurs et les entreprises ont besoin de nouvelles connaissances, de nouveaux concepts et d'outils pour mieux embrasser la problématique de la polyexposition dans toute sa complexité et subtilité, afin de mieux prévenir les risques professionnels. Même si de nombreuses inconnues subsistent et nécessitent encore d'importants travaux

de recherche, cette journée technique a apporté des éléments concrets sur les connaissances actuelles et sur les travaux complémentaires à mener. ●

1. *Contenus accessibles sur* : <https://www.inrs.fr/footer/actes-evenements/journee-technique-polyexpositions.html>

2. *Voir* : https://www.anses.fr/fr/system/files/PST3_Etatdeslieux_Polyexposition_2.pdf

3. *Voir* : *Surveillance médicale des expositions des salariés aux risques professionnels*. Accessible sur : <https://dares.travail-emploi.gouv.fr/enquete-source/la-surveillance-medicales-des-expositions-des-salaries-aux-risques-professionnels-2>

4. Accessible sur : <https://www.legifrance.gouv.fr/>

5. *Règlement (UE) n° 528/2012 du 22 mai 2012 concernant la mise à disposition sur le marché et l'utilisation des produits biocides*.

Accessible sur : <https://eur-lex.europa.eu/FR>

6. *Conférence des 7 et 8 mars 2022, sous la présidence française de l'Union européenne*. *Voir* : <https://osha.europa.eu/fr/themes/dangerous-substances/roadmap-to-carcinogens>

7. *La polyexposition est un argument majeur pour la bonne application des mesures de prévention de base qui sont, pour le risque chimique, de supprimer ou réduire les risques au minimum (article R. 4412-11 du Code du travail)*.

8. *Partnership for the assessment of risks from chemicals*. *Voir* : <https://www.eu-parc.eu>

9. *Pour l'INRS* : Philippe Duquenne, Xavier Simon, Patricia Battais, Pauline Loison, Lise Alonso ; *pour la Carsat Bourgogne – Franche Comté* : Aura Garcia, Pascal Thomas.

BIBLIOGRAPHIE

[1] OCDE/ OECD (ENVIRONMENT, HEALTH AND SAFETY DIVISION, ENVIRONMENT DIRECTORATE) – *Considerations for assessing the risks of combined exposure to multiple chemicals – Series on testing and assessment [Internet]*. 2018, Report No. 296. Accessible sur : <http://www.oecd.org/chemicalsafety/risk-assessment/considerations-for-assessing-the-risks-of-combined-exposure-to-multiple-chemicals.pdf>

[2] WILD C.P. – *Complementing the genome with an "exposome": the outstanding challenge of environmental exposure measurement in molecular epidemiology*. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev*, 2005, 14 (8), pp. 1847-50. Accessible sur : doi: 10.1158/1055-9965.EPI-05-0456. PMID: 16103423

[3] INRS – *Outil Mixie France*. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/publications/outils/mixie.html>

[4] GALEY L., JUDON N. ET AL. – *Proposition méthodologique en ergotoxicologie pour révéler les expositions à des produits chimiques*. *Activités*, 2019.

[5] MOHAMMED-BRAHIM B., GARRIGOU A. – *Une approche critique du modèle dominant de prévention du risque chimique : l'apport de l'ergotoxicologie*. *Activités*, 2009, 06. Accessible sur : <https://doi.org/10.4000/activites.2086>

[6] MARIKO E.S., GALEY L. ET AL. – *Proposition d'une méthodologie en ergotoxicologie pour évaluer et prévenir les expositions aux poussières dans le secteur du BTP*. *Archives des maladies professionnelles et de l'environnement*, 2023, 84 (6), pp. 101855. Accessible sur : <https://doi.org/10.1016/j.admp.2023.101855>

[7] HENROTIN J.B. – *Besoins d'études épidémiologiques sur les effets de l'exposition à de(s) perturbateur(s) endocrinien(s) en entreprise*. INRS, Note scientifique et technique, NS 323, 2013. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/inrs/recherche/etudes-publications-communications/doc/publication.html?refINRS=NOETUDE%2FP2014-055%2FNS323>

[8] PANT N. ET AL. – *Correlation of phthalate exposures with semen quality*. *Toxicol Appl Pharmacol*, 2008, 231 (1), pp. 112-116.

[9] MEEKER J.D., STAPLETON H.M. – *House dust concentrations of organophosphate flame retardants in relation to hormone levels and semen quality parameters*. *Environmental health perspectives*, 2010, 118 (3), pp. 318-323.

[10] HATCH E. ET AL. – *Age at natural menopause in women exposed to diethylstilbestrol in utero*. *Epidemiology*, 2006, 17 (6), pp. 192-193.

[11] JEFFERIES J.A. ET AL. – *Structural anomalies of the cervix and vagina in women enrolled in the Diethylstilbestrol Adenosis (DESAD) Project*. *Am J Obstet Gynecol*, 1984, 148 (1), pp. 59-66.

[12] CHRISTIANSEN S. ET AL. – *Synergistic disruption of external male sex organ development by a mixture of four antiandrogens*. *Environmental health perspectives*, 2009, 117 (12), pp. 1839-1846.

[13] SMOLENSKY M.H., REINBERG A.E., SACKETT-LUNDEEN L. – *Perspectives on the relevance of the circadian time structure to workplace threshold limit values and employee biological monitoring*. *Chronobiol Int.*, 2017, 34 (10), pp. 1439-1464. Accessible sur : doi: 10.1080/07420528.2017.1384740

[14] SMOLENSKY M.H., REINBERG A.E., FISCHER F.M. – *Working time society consensus statements: circadian time structure impacts vulnerability to xenobiotics-relevance to industrial toxicology and nonstandard work schedules*. *Ind Health*, 2019, 57 (2), pp. 158-174. Accessible sur : doi: 10.2486/indhealth.SW-2

AGENDA/ÉVÉNEMENTS



DU 4 AU 7 JUIN 2024, MONTPELLIER 37^e Congrès national de médecine et santé au travail

Ce congrès, qui se tient tous les deux ans, constitue l'occasion de réunir en un seul lieu les acteurs des services de prévention et de santé au travail. Pour cette nouvelle édition, huit thèmes ont déjà été retenus :

- expositions agricoles : de l'évaluation des risques à la prévention ;
- santé au travail dans les métiers de services à la personne ;
- travailleurs saisonniers ;
- pathologies psychiatriques et maintien dans l'emploi ;
- médecine du travail et parcours de soins ;
- pluridisciplinarité en santé au travail en 2024 ;
- risque cardiovasculaire et travail ;
- apports de la santé au travail à la santé publique.

Renseignements - Inscriptions :

[+ https://www.medecine-sante-travail.com/](https://www.medecine-sante-travail.com/)



LES 12 ET 13 JUIN 2024, TAMPERE (FINLANDE)

Conférence SIAS 2024 – Sécurité des systèmes industriels automatisés

La Conférence internationale sur la sécurité des systèmes industriels automatisés se tiendra les 12 et 13 juin 2024 à Tampere (Finlande). Elle portera notamment sur les interactions hommes – machines et sur la prévention des accidents liés aux opérations de maintenance.

Renseignements - Inscriptions :

[+ https://www.automaatioseura.fi/sias2024/](https://www.automaatioseura.fi/sias2024/)



LES 13 ET 14 JUIN 2024, CRACOVIE (POLOGNE)

8^e conférence Euroshnet

La 8^e conférence européenne Euroshnet sur la normalisation, les essais et la certification dans le domaine de la sécurité et de la santé au travail aura lieu à Cracovie.

Elle aura pour thème : *World in transition – Europe in adaptation – OSH under pressure.*

Les politiques et les législations européennes sont en constante évolution. Les experts réunis lors de cette conférence européenne répondront à la question brûlante de l'impact de ces changements sur la sécurité et la santé au travail et, en particulier, sur leurs instruments de prévention : normalisation, essais et certification.

Renseignements - Inscriptions :

[+ https://www.euroshnet.eu/conference-2024](https://www.euroshnet.eu/conference-2024)

LES 18 ET 19 JUIN 2024, PARIS

Base de données Scola : formation INRS à destination des organismes accrédités

Les organismes accrédités pour le contrôle des valeurs d'exposition aux substances chimiques sont tenus de transmettre les résultats de leurs mesures dans la base de données Scola gérée par l'INRS. Pour accompagner les utilisateurs, l'INRS organise le 18 juin 2024 une formation à la prise en main de Scola, pour le décret n° 2012-639 du 4 mai 2012 relatif aux risques d'exposition à l'amiante (META) ; et le 19 juin 2024, pour le décret n° 2009-1570 du 15 décembre 2009 relatif au contrôle du risque chimique sur les lieux de travail (STD).

Inscriptions :

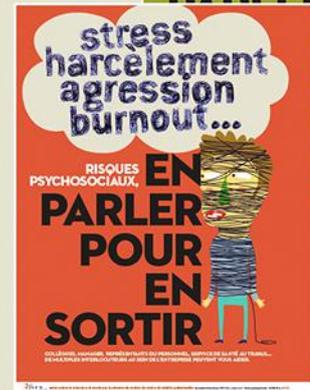
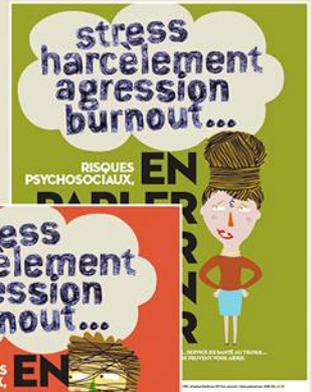
[+ https://manager-enquetes.inrs.fr/SurveyServer/s/ere/Inscription_formation_Scola_2024/questionnaire.htm](https://manager-enquetes.inrs.fr/SurveyServer/s/ere/Inscription_formation_Scola_2024/questionnaire.htm)

POUR EN SAVOIR +

- L'agenda complet des rencontres recensées par l'INRS est accessible sur : www.inrs.fr/footer/agenda.html

stress
harcèlement
agression
burnout...

RISQUES PSYCHOSOCIAUX, EN
PARLER POUR EN
SORTIR



Affiches génériques :
Réf. A 785 et A 786



Affiches sur les idées reçues : Réf. A 787 à A 793



Guide : Réf. ED 6250



Dépliant : Réf. ED 6251

» Découvrez nos publications sur les risques psychosociaux sur www.inrs.fr/RPS

Formation

BRUIT AU TRAVAIL : SE FORMER À LA PRÉVENTION DES NUISANCES SONORES

Le bruit constitue une nuisance majeure en milieu professionnel. Il peut provoquer des surdités, mais aussi des gênes, de la fatigue cognitive, voire du stress qui, à long terme, présentent des risques pour la santé du salarié. Pour contribuer à la réduction des risques liés au bruit, l'INRS propose deux formations traitant des nuisances sonores en milieu industriel et en milieu tertiaire. Elles sont destinées aux personnels de « sécurité et santé au travail », aux intervenants en prévention des risques professionnels, aux acteurs des services de prévention et de santé au travail et aux agents des services prévention des Carsat, Cramif et CGSS. Ces formations visent à apporter des clés pour mettre en œuvre une démarche de prévention des nuisances sonores adaptée à chaque entreprise.

OCCUPATIONAL NOISE: TRAINING IN THE PREVENTION OF NOISE HAZARDS –
Noise is a major hazard in the work environment. It can cause deafness, but also difficulties, cognitive fatigue and stress, which, in the long term, can effect employees' health. To contribute to reducing noise-related hazards, INRS offers two training courses dealing with noise in the industrial and the service sectors. They are aimed at OSH personnel and prevention experts and stakeholders, and agents from the regional occupational health funds. These courses seek to provide solutions for the implementation of a noise prevention approach suited to each company.

AURÉLIE
PÉRISSE
INRS,
département
Formation

Un actif français sur deux déclare souffrir du bruit sur son lieu de travail, selon le sondage Ifop¹ réalisé en préparation de la Journée nationale de l'audition (JNA) de 2023. Si les salariés des secteurs de l'industrie et de la construction sont le plus souvent concernés, notamment par un risque de lésion auditive, le travail en secteur tertiaire et en bureaux ouverts (*open space*) présente également des risques pour la santé des salariés, notamment en matière de stress, de fatigue ou de troubles du sommeil.

La thématique des nuisances sonores est une préoccupation majeure de santé au travail et le département Formation de l'INRS l'intègre depuis de nombreuses années dans son programme, afin d'évaluer et de prévenir les nuisances sonores au travail.

« Le stage consacré au bruit en milieu industriel est organisé depuis plus de 20 ans, alors que le développement, plus récent, des bureaux ouverts dans le secteur tertiaire nous a conduits à proposer, à partir de 2020, un stage consacré aux ambiances sonores en open space », précise Amine Fatmi, chargé de projet formation à l'INRS.

L'exposition professionnelle au bruit : industrie et tertiaire en ligne de mire

Les risques liés au bruit diffèrent selon les secteurs :

- en milieu industriel, les niveaux lésionnels peuvent conduire à des pertes auditives irréversibles ;
- en bureaux ouverts dans le tertiaire, bien que les niveaux de bruit ne génèrent pas de risque d'apparition de pertes auditives, d'autres problèmes peuvent apparaître : gêne, fatigue cognitive ou stress.

Ainsi, ces formations, proposées dans un format mixte distanciel et présentiel (ou *blended learning*), sont axées sur ces situations de travail. La première formation, d'une durée de 28 heures (dont 10 heures pour la partie en formation à distance), est consacrée aux nuisances sonores en milieu industriel, tandis que la seconde, d'une durée de 24 heures, traite de l'environnement sonore dans les *open space*.

Toutes deux ont la particularité de démarrer avec un socle commun en distanciel, afin de présenter les notions essentielles en acoustique (définitions, grandeurs physiques et unités de mesure du son). Comme l'explique Amine Fatmi, « *chacun de ces environnements de travail nécessite d'acquérir des connaissances de base en acoustique afin de pouvoir les exploiter en présentiel* ».

Les nuisances sonores en milieu industriel : évaluer et prévenir

« Dans les milieux industriels bruyants, le risque majeur encouru par les salariés est l'apparition de pertes auditives pouvant aller jusqu'à la surdité irréversible », insiste Jean-Pierre Arz, responsable d'études au département Ingénierie des équipements de travail à l'INRS et intervenant dans la formation « *Évaluer et prévenir les nuisances sonores en milieu industriel* » (réf. INRS J@0508). Afin de former aux solutions de prévention collectives et individuelles des nuisances sonores dans de tels milieux, ce stage poursuit trois principaux objectifs :

- intégrer les connaissances de base permettant d'évaluer les risques encourus par les salariés exposés au bruit ;
- conseiller sur le choix des moyens de prévention adaptés ;
- participer à leur mise en œuvre et au suivi de leur utilisation.

Une large part de la formation est consacrée à des apports de connaissances, puis à des travaux pratiques permettant d'ancrer les notions. Différents moyens de mesure (appareils et techniques) sont également présentés aux apprenants afin de compléter leurs connaissances ou leur approche en situations de travail. Les retours des participants sont positifs vis-à-vis des apports théoriques et pratiques ; ils déclarent « *envisager de mettre rapidement en application les apports de la formation dans le cadre de leurs fonctions* ».

Le cas des *open space* : évaluer et améliorer l'environnement sonore

Si la prévention des nuisances sonores au travail est un sujet traité depuis de nombreuses années, « *la préoccupation est plus récente pour les bureaux ouverts* », signale Laurent Brocolini, responsable d'études au département Ingénierie des équipements de travail à l'INRS et intervenant sur le



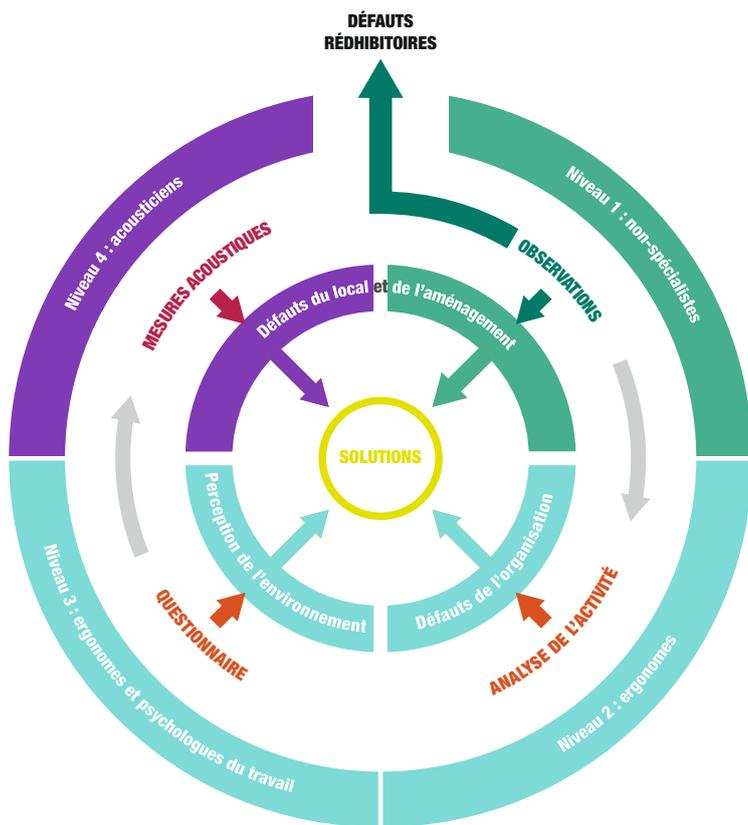
© Claude Almodovar pour l'INRS/2022

stage « *Évaluer et améliorer l'environnement sonore dans les open space* » (réf. J@0540). « Dans ces espaces, l'environnement sonore n'entraîne pas de lésions auditives mais constitue une gêne importante ayant un retentissement au long cours sur la santé (stress, concentration, troubles de sommeil, troubles cardiovasculaires, perte de performance) », ajoute ce dernier. La particularité de ces environnements de travail, dont la mise en place s'est considérablement accélérée au cours des dernières décennies avec la tertiarisation de l'activité, est abordée lors de ce stage, à travers trois objectifs :

- identifier les spécificités des *open space* ;
- évaluer la gêne sonore dans ces espaces ouverts ;
- proposer des solutions d'amélioration de l'environnement sonore.

Les participants découvrent, au fur et à mesure des modules de formation, une alternance d'apports





© INRS

Environnement sonore en bureaux ouverts : évaluation de la gêne et démarche d'amélioration (source : Brochure INRS ED 6402).

théoriques et de cas pratiques issus d'exemples d'entreprises permettant d'aborder la méthodologie d'évaluation de la gêne sonore (analyse de l'activité, évaluation subjective de l'environnement de travail, caractérisation objective de la qualité sonore) et les mesures d'amélioration les plus adaptées. La formation propose différents outils préconisés par l'INRS, ainsi qu'un focus sur le questionnaire « Gabo » (pour : Gêne acoustique

dans les bureaux ouverts). Ce dernier, particulièrement apprécié des participants, « représente un outil qualitatif de mesure et de perception de la gêne, que je vais pouvoir introduire dans ma démarche de prévention », précise un préventeur en entreprise.

Une démarche articulée autour des mesures de prévention collectives et individuelles

Face aux nuisances sonores, la démarche de prévention repose sur des actions à trois niveaux (émission, propagation et réception). De plus, chacune des formations (industrie et tertiaire) prévoit un focus sur la réglementation française, qui recommande d'agir autour de trois axes principaux :

- prévenir les risques d'exposition en agissant le plus en amont possible sur l'environnement de travail ;
- évaluer les risques d'exposition au bruit ;
- protéger les travailleurs exposés.

Ces formations abordent ainsi les spécificités des secteurs d'activité concernés et donnent des clés pour réduire le bruit selon chaque situation :

- en milieu industriel : actions à la source (machine/procédé moins bruyant), actions collectives (encoffrement, traitement acoustique du local) et, en dernier recours, protections individuelles contre le bruit (PICB) et leurs caractéristiques ;
- en bureaux ouverts : appropriation de la norme NF ISO 22955 (spécifique à l'acoustique dans les bureaux ouverts)², analyse de l'activité, évaluation de la perception de l'environnement sonore de travail, caractérisation acoustique du local, solutions d'amélioration collectives (matériaux absorbants dans le local, éléments de séparation, réaménagement de l'environnement de travail).

Lors des dernières sessions organisées, la mixité des publics, les échanges de pratiques et les retours d'expérience ont été riches d'enseignements pour les apprenants. L'un des participants, chargé de prévention dans une fonderie, a surtout apprécié « l'articulation entre les différents thèmes, ainsi que les mises en situation concrètes, applicables sur le terrain ». Pour un autre, préventeur dans une entreprise du secteur tertiaire, « les apports sont nombreux et le rythme de la formation permet une appropriation au fur et à mesure grâce aux cas pratiques qui matérialisent bien les enjeux de la démarche ».

La thématique des nuisances sonores en milieu professionnel s'inscrit durablement dans l'offre de formation de l'INRS et sera reconduite, ces deux formations étant planifiées au quatrième trimestre 2024, pour répondre aux besoins et préoccupations des préventeurs. ●

1. Voir : <https://www.ifop.com/publication/bruit-sante-auditive-et-qualite-de-vie-au-travail-vague-7/>

2. Voir : norme NF ISO 22955 – Acoustique – Qualité acoustique des espaces de bureaux ouverts. Afnor, 2021. Accessible sur : <https://www.boutique.afnor.org/> (document payant).

EN SAVOIR PLUS

Pour tout renseignement sur les dates, le contenu et le programme de ces formations en mixte distanciel et présentiel à l'INRS (Centre de Lorraine, Vandœuvre-lès-Nancy), consulter le site Internet de l'INRS et saisir le code du stage :

- J@0508 – Évaluer et prévenir les nuisances sonores en milieu industriel

Le stage se déroule en deux séquences distinctes : une partie à distance accompagnée (estimée à 10 heures réparties sur 7 semaines) et une autre en face-à-face (2,5 jours).

- J@0540 – Évaluer et améliorer l'environnement sonore dans les open space

Le stage se déroule en deux séquences distinctes : une partie à distance accompagnée (estimée à 10 heures réparties sur 7 semaines) et une autre en face-à-face (2 jours).

Le programme complet et les modalités d'inscription sont détaillés sur la page dédiée aux formations : <https://www.inrs.fr/services/formation.html>

Participez à la recherche



Nuisances sonores

→ Étude de la vitesse de récupération de la fatigue auditive à la suite d'une exposition professionnelle au bruit

Votre entreprise...

- A une activité susceptible d'exposer les salariés à des niveaux de bruits supérieurs à 80dB(A) pendant au moins deux heures par jour.

L'INRS a besoin de vous pour évaluer la vitesse de récupération de la fatigue auditive après une exposition sonore au poste de travail. Cette caractérisation sera menée en réalisant des mesures d'exposition sonore et des mesures auditives chez des travailleurs volontaires.

> Quels sont les objectifs de cette étude ?

L'INRS a récemment mis en évidence qu'une exposition sonore professionnelle comprise entre 80 et 87dB(A) engendrait de la fatigue auditive, c'est-à-dire une diminution temporaire des performances auditives. Jugée bénigne car en apparence réversible, cette fatigue auditive répétée tout au long d'une carrière peut provoquer à terme des troubles auditifs graves, comme une surdité ou des acouphènes.

L'objectif de cette étude est de caractériser la vitesse de récupération de la fatigue auditive en situation réelle, afin d'élaborer des recommandations permettant de lutter contre son accumulation et prévenir le risque auditif à plus long terme.

> Comment se déroulera l'étude ?

Cette étude s'inscrit dans un protocole de recherche validé par le Comité de protection des personnes Ouest III. La contribution des salariés sera basée sur le volontariat. Les volontaires participeront, après information sur le déroulement de l'étude, à une phase d'inclusion (15 à 20 minutes), au cours de laquelle ils donneront par écrit leur consentement libre et éclairé puis rempliront un questionnaire, avec l'assistance d'un représentant de l'INRS.

Des mesures auditives seront ensuite réalisées : une première avant la prise de poste (20 minutes), puis quatre mesures pendant les deux heures suivant la fin de l'exposition sonore (10 minutes par mesure).

Pendant la période de récupération, les volontaires ne devront pas être exposés à du bruit. L'exposition sonore individuelle sera précisément mesurée grâce à un exposimètre.

Chaque volontaire recevra ses propres résultats. Les résultats anonymisés, leur analyse et, le cas échéant, des conseils de prévention adaptés à la situation feront l'objet d'un rapport qui sera remis à l'entreprise. À sa demande, une réunion de restitution des éléments du rapport pourra être organisée.



Vous souhaitez participer ?

Contactez Thomas Venet, 03 83 50 85 08
ou Benoit Pouyatos, 03 83 50 21 02
thomas.venet@inrs.fr ou benoit.pouyatos@inrs.fr
INRS, Rue du Morvan, CS 60027,
54519 Vandœuvre-lès-Nancy Cedex



Scannez ce QR-code pour obtenir la lettre d'information complète du protocole de l'étude.

AGENDA / FORMATIONS

Évaluer l'efficacité des systèmes de ventilation et participer à leur conception (CC1502)

Une session : du 03/06/2024 début d'après-midi au 07/06/2024 à midi

→ PUBLIC

Ingénieurs, techniciens, fonctionnels de sécurité et santé au travail, intervenants en prévention des risques professionnels.

→ OBJECTIFS

Participer à la mise en place d'une installation de ventilation et au maintien de son efficacité.

Objectifs pédagogiques :

- évaluer l'efficacité d'installations de ventilation ;
- participer à la conception et à la mise en œuvre de systèmes de captage adaptés ;
- participer à l'amélioration d'installations existantes.

→ CONTENU

- généralités sur les techniques de ventilation ;
- dispositifs de captage et réseaux de transport des polluants ;
- aperçu sur les techniques d'assainissement et sur les ventilateurs ;
- contrôle et entretien des installations ;
- prise en compte du bruit et des risques incendie et explosion ;
- réglementation applicable ;
- démarche d'analyse des postes de travail ;
- démarche de prévention : exemples de réalisations, rédaction de cahier des charges, démarche d'intervention ;
- les cas concrets illustratifs sont tirés de l'expérience des intervenants (en priorité le secteur industriel).

→ RENSEIGNEMENTS PRATIQUES

Durée : 4 jours

Lieu : Vandœuvre-lès-Nancy

Responsable pédagogique : Danièle Blasiard

Secrétariat, renseignements, inscriptions :

E-mail : secretariat.forp@inrs.fr

Coût : 1 232 € nets (exonération de TVA).

Identifier les étapes clés d'une démarche de prévention des risques liés aux machines (JJ1606)

Deux sessions :

• du 12/06/2024 début d'après-midi au 14/06/2024 à midi

• du 5/11/2024 début d'après-midi au 11/11/2024 à midi

→ PUBLIC

Intervenants en prévention des risques professionnels, acteurs des services de prévention et de santé au travail (médecins, infirmiers et intervenants en prévention des risques professionnels) et fonctionnels sécurité et santé au travail en entreprise.

→ OBJECTIFS

Contribuer à la mise en œuvre d'une démarche de prévention des risques liés aux machines.

Objectifs pédagogiques :

- identifier les différentes étapes du cycle de vie d'une machine ;
- décrire l'approche réglementaire ;
- identifier les étapes clés de la démarche de prévention des risques liés aux machines.

→ CONTENU

- définitions ;
- cycle de vie d'une machine ;
- contexte réglementaire ;
- démarche de prévention.

→ RENSEIGNEMENTS PRATIQUES

Durée : 2 jours

Lieu : Vandœuvre-lès-Nancy ou Paris

Responsable pédagogique : Danièle Blasiard

Secrétariat, renseignements, inscriptions :

E-mail : secretariat.forp@inrs.fr

Coût : 616 € nets (exonération de TVA).

Évaluer et prévenir les risques liés aux vibrations (JJ0505)

Une session : du 17/06/2024 début d'après-midi au 21/06/2024 à midi

→ PUBLIC

Acteurs des services de prévention et de santé au travail (médecins, infirmiers et intervenants en prévention des risques professionnels), fonctionnels de sécurité et santé au travail.

POUR EN SAVOIR +

- Retrouvez toute l'offre de formation de l'INRS sur : www.inrs.fr/services/formation.html

→ OBJECTIFS

Conseiller les entreprises sur les mesures de prévention des risques liés aux vibrations.

Objectifs pédagogiques :

- citer les problématiques de vibrations et de contraintes (postures, efforts) rencontrées par les conducteurs d'engins mobiles et opérateurs de machines portatives ou guidées manuellement ;
- décrire les approches et la méthodologie d'évaluation des vibrations au poste de travail utilisables pour une démarche de prévention des risques ;
- proposer des solutions de prévention.

→ CONTENU

- généralités : grandeurs, unités et sources d'exposition en milieu professionnel ;
- effets sur la santé : physiopathologie de la colonne lombaire et du membre supérieur (lombalgie, syndrome de Raynaud) ;
- contexte réglementaire ;
- démarche de prévention : méthodologie d'évaluation du risque ;
- préconisations en prévention des vibrations aux postes de conduite des engins mobiles ;
- préconisations en prévention des vibrations transmises au système main-bras.

RENSEIGNEMENTS PRATIQUES

Durée : 4 jours

Lieu : Vandœuvre-lès-Nancy

Responsable pédagogique : Amine Fatmi

Secrétariat, renseignements, inscriptions :

E-mail : secretariat.forp@inrs.fr

Coût : 1 232 € nets (exonération de TVA).

Maîtriser les bases théoriques de la métrologie d'atmosphère (CA1503)

Une session : du 30/09/2024 début d'après-midi au 04/10/2024 à midi

→ PUBLIC

Ingénieurs, techniciens, fonctionnels de sécurité et santé au travail, hygiénistes industriels, agents des services prévention des Carsat, Cramif et CGSS ayant une pratique des prélèvements d'atmosphère.

Prérequis :

Pour s'inscrire à cette formation, il est nécessaire de valider l'un des deux parcours suivants :

- **Choix 1** - avoir suivi les deux formations en ligne :
 - C@1501 « Acquérir les notions de base sur les produits chimiques » ;
 - C@1502 « Évaluer les risques liés aux agents chimiques ».

Les attestations seront jointes à la demande d'inscription.

- **Choix 2** - pour les personnes possédant des connaissances sur l'évaluation des risques chimiques, réaliser les tests pour valider les deux formations citées précédemment :

- C@1501 : s'inscrire sur eformation-inrs.fr, répondre au quiz et télécharger l'attestation qui sera jointe à la demande d'inscription ;
- C@1502 : répondre au questionnaire : https://manager-enquetes.inrs.fr/SurveyServer/s/for/CA1503_Prerequis/questionnaire.htm

→ OBJECTIFS

Intégrer les concepts théoriques de la métrologie d'atmosphère dans le choix des dispositifs de prélèvements.

Objectifs pédagogiques :

- identifier les étapes incontournables d'une campagne de prélèvements d'atmosphère ;
- déterminer les types de prélèvements en lien avec le(s) polluant(s) et la réglementation en vigueur ;
- repérer les contraintes d'échantillonnage et d'analyse déterminant le choix du dispositif de prélèvement.

→ CONTENU

- évaluation de l'exposition professionnelle aux agents chimiques : rappels et méthodologie de l'évaluation quantitative ;
- prélèvement et analyse des aérosols : généralités, types d'échantillonneurs et principes de fonctionnement, cas spécifique des bioaérosols et des aérosols minéraux ;
- prélèvement et analyse des gaz et des vapeurs : généralités, dispositifs de prélèvement actif et passif, prélèvement mixte ;
- prélèvement et analyse des fibres d'amiante et de la silice ;
- contraintes liées à la préparation des échantillons et aux techniques analytiques déterminant le choix du dispositif ;
- intérêt et place des prélèvements surfaciques et de la détection en temps réel pour l'évaluation des risques chimiques ;
- recherche d'information sur la base de données MétroPol et lecture de rapports d'analyse.

→ RENSEIGNEMENTS PRATIQUES

Durée : 4 jours

Lieu : Vandœuvre-lès-Nancy

Responsable pédagogique : Danièle Blasiard

Secrétariat, renseignements, inscriptions :

E-mail : secretariat.forp@inrs.fr

Coût : 1 232 € nets (exonération de TVA).

Sélection bibliographique

À LIRE, À VOIR

Les publications de l'INRS sont consultables et téléchargeables sur : www.inrs.fr/Rubriques « Publications et outils/Brochures et dépliant » ou « Affiches et autocollants » (papier/Web) et « Vidéos ».



Le travail en 2040. Modalités de pilotage, enjeux de santé et sécurité au travail

INRS, 2023, coll. *Prospectives en santé et sécurité au travail*, brochure PV 24 (nouveau).

L'objectif de cet exercice de prospective a été d'imaginer quelles modalités de pilotage du travail pourraient émerger d'ici à 2040, et d'en identifier les conséquences possibles en matière de santé et sécurité.

Il s'articule en trois composantes : une analyse prospective des transformations du travail, un cahier de *design fiction* présentant des situations de travail de 2040 et un recensement des enjeux de santé et sécurité au travail.



Travail de nuit - Comprendre les effets sur la santé

INRS, 2023, vidéo Anim-387, format court (durée : 3 min 22 s ; nouveau).

Le travail de nuit entre 21 heures et 6 heures concerne près de 20 % de salariés et il est présent dans de nombreux secteurs d'activité.

Cette organisation du travail a des impacts sur la santé et la sécurité.

En effet, les expositions irrégulières à la lumière désynchronisent l'horloge biologique principale et perturbent les rythmes biologiques, notamment le rythme dit circadien.

En plus de provoquer un dérèglement du rythme biologique, le travail de nuit entraîne une dette de sommeil.

Cette vidéo permet d'en comprendre les effets sur la santé et indique des mesures de prévention.



Postures sédentaires

INRS, 2023, dossier Web (Web uniquement ; nouveau).

Dans de nombreux secteurs d'activité (tertiaire...), la posture assise est couramment rencontrée. Toutefois, dès lors qu'elle est maintenue dans le temps et associée à une très faible dépense énergétique, elle peut avoir des conséquences délétères sur la santé. L'exposition des salariés aux postures sédentaires doit être évaluée et des mesures de prévention adaptées mises en place.



Outil d'évaluation du confort des bouchons d'oreilles

INRS, 2023, outil n° 124 (Web uniquement ; nouveauté).

L'implication des salariés dans la sélection de leurs protections auditives permet une sélection de dispositifs plus adaptés, ainsi qu'une meilleure acceptation de ceux-ci.

Cet outil de sensibilisation aux risques liés au bruit a pour objectifs de sensibiliser les salariés à l'importance du choix d'une protection adaptée et d'aider les acteurs en prévention (ergonomes, responsables HSE, médecins du travail, etc.) dans ce choix. Il repose sur le recueil du ressenti des salariés vis-à-vis du confort (physique, acoustique, fonctionnel et psychologique) des protections auditives de type bouchons d'oreilles.



Prothésiste dentaire. Prévenir les risques professionnels

INRS, 2023, dossier Web (Web uniquement ; nouveauté).

Les activités de fabrication de prothèses dentaires exposent les salariés à des risques professionnels de diverses natures : expositions à des produits dangereux, douleurs au dos et aux articulations, blessures lors de l'utilisation des outils et des machines... Ce dossier propose des ressources pour mieux appréhender ces risques, mieux les prévenir et réaliser le document unique d'évaluation des risques.



Prothésiste dentaire. Santé au travail : passez à l'action!

INRS, 2023, coll. TPE-PME, dépliant ED 6521 (nouveauté).

Ce dépliant, destiné aux TPE-PME, présente les principaux risques professionnels rencontrés dans les laboratoires de prothèses dentaires, ainsi que les mesures de prévention à mettre en œuvre.



Prothésiste dentaire. Outil d'évaluation des risques professionnels

INRS, 2023, outil n° 125 (Web uniquement ; nouveauté).

Élaboré par l'INRS et l'Assurance maladie – Risques professionnels, cet outil permet aux entreprises du secteur de la fabrication de prothèses dentaires de réaliser leur évaluation des risques et d'éditer un plan d'action. Pour chaque risque identifié, une liste de mesures de prévention est proposée. Il est également possible d'ajouter des risques ou des mesures en fonction de la situation de chaque entreprise.



Conduite à tenir en laboratoire, en cas de déversement accidentel d'un produit contenant des agents biologiques pathogènes

INRS, 2023, affiche A 899 (nouveauté).

Cette nouvelle affiche détaille les étapes à respecter en cas de déversement d'un produit contenant des agents biologiques pathogènes.



Veille & prospective

Prospective
État de la veille 2023
P.91

ÉTAT DE LA VEILLE 2023

Les sujets présentés dans cette sixième édition de l'état de la veille sont liés à l'actualité qui a marqué le monde du travail en 2023. Y sont abordées les réflexions de différents instituts de recherche ou organismes publics autour du rapport au travail des Français. Une place importante est également consacrée aux travaux portant sur l'impact du réchauffement climatique sur la santé et la sécurité au travail, ainsi qu'aux actions de prospective conduites par d'autres organismes publics. Enfin, trois ans après la crise sanitaire de la Covid-19 et l'exercice mené par l'INRS sur les transformations du travail après cette pandémie, cet article propose une synthèse sur l'évaluation des impacts du télétravail, au travers de différentes études parues sur ce thème pendant cette année.

HORIZON SCANNING IN 2023 – The topics presented in this sixth edition of the state of horizon scanning relate to current events that marked the world of work in 2023. It contains reflections by different research institutions and public organisations about French people's relationship to work. It also focuses heavily on work pertaining to the impact of climate warming on occupational safety and health, as well as the foresight exercises led by other public bodies. Lastly, three years after the Covid-19 health crisis and the exercise led by INRS on work transformations in the wake of this pandemic, this article summarises the evaluation of the impact of teleworking, through different studies published on this topic during this year.

JENNIFER
CLERTÉ,
MARC
MALENFER
INRS, mission
Veille et
prospective

Le sens du travail au centre de nombreuses études

Le conflit social autour de la réforme des retraites a donné lieu à de nombreux débats et commentaires sur le rapport des Français au travail. Cette actualité s'inscrit dans le prolongement d'une série de secousses, venue mettre à l'épreuve les entreprises comme les travailleurs (loi travail, « gilets jaunes » en 2018, Covid-19 en 2020-2021, conflit ukrainien, crise énergétique et du pouvoir d'achat en 2022). Ces événements s'ajoutent à des transformations du travail plus ou moins anciennes, moins visibles mais également profondes : procédurisation, numérisation¹, individualisation des objectifs et des évaluations. Fortes de ces constats, de nombreuses institutions – instituts de recherche, *think tanks* et organismes publics – se sont emparées de ce sujet afin de questionner la place du travail dans la société française.

Outre l'Institut Montaigne², la Fondation Jean-Jaurès³ et le Cese⁴, le laboratoire interdisciplinaire d'évaluation des politiques publiques (Liepp) de l'Institut d'études politiques (IEP, Sciences Po) a mobilisé depuis avril 2023 les principaux laboratoires de recherche sur le travail, dans l'objectif de répondre aux grandes interrogations

portant sur le travail aujourd'hui, au travers d'une série de 40 articles, publiés en octobre dans un ouvrage intitulé « *Que sait-on du travail*⁵ ? ». Le premier des quatre chapitres porte sur les conditions du travail, la santé au travail et le sens du travail. À ce sujet, les chercheurs montrent au travers de diverses enquêtes que les indicateurs de la qualité de l'emploi, du travail et de la santé témoignent d'une situation dégradée. Maëlezig Bigi et Dominique Meda⁶ s'appuient notamment sur l'enquête européenne sur les conditions de travail de l'institut Eurofound, parue en 2021, pour comparer les situations de la France, de l'Allemagne, du Danemark, des Pays-Bas et de la moyenne de l'UE 27. Il en ressort que les Français déclarent un niveau de contraintes physiques et psychiques plus élevé qu'ailleurs (Cf. *Tableaux 1 et 2*). Ils affirment également davantage souffrir de pathologies liées à leur activité professionnelle.

Si l'article de Christine Erhel, Mathilde Guergoat-Larivière et Malo Mofakhami⁷ établit le même constat, il va plus loin et affirme que cette position défavorable de la France pourrait se détériorer encore par l'intensification du travail liée aux usages du numérique, ou par les mutations liées à la transition écologique.



TABLEAU 1 →
Résultats
d'une enquête
européenne :
ressenti exprimé
par les salariés
sur certains
facteurs de risques
professionnels.

À QUELLE FRÉQUENCE VOTRE EMPLOI RÉMUNÉRÉ IMPLIQUE-T-IL : ... ?					
TOUJOURS / SOUVENT	FRANCE	ALLEMAGNE	DANEMARK	PAYS-BAS	UE27
Des postures douloureuses	33,9 %	22,2 %	17,4 %	15,4 %	26,8 %
Le port de charges lourdes	25,4 %	19,3 %	20,4 %	13,3 %	19,9 %
Des mouvements répétitifs de la main ou du bras	66 %	48,6 %	51,8 %	53,9 %	59,9 %
L'exposition à des produits toxiques	17,7 %	16,6 %	13 %	8,1 %	16,7 %
De vivre des situations perturbantes pour vous sur le plan émotionnel	23,8 %	20,1 %	14,7 %	8,4 %	18,5 %

Source : Eurofound, vague 2021.

TABLEAU 2 →
Résultats
d'une enquête
européenne :
ressenti exprimé
par les salariés sur
leur santé.

AVEZ-VOUS SOUFFERT, DURANT LES DOUZE DERNIERS MOIS, D'UN OU PLUSIEURS PROBLÈMES DE SANTÉ PARMIS LES SUIVANTS : ... ?					
OUI	FRANCE	ALLEMAGNE	DANEMARK	PAYS-BAS	UE27
Anxiété	49 %	11,9 %	7,6 %	32,6 %	30,4 %
Mal de dos	57,9 %	48,6 %	40,9 %	39 %	54,3 %
Douleurs musculaires dans les membres inférieurs	39,1 %	24,8 %	28,6 %	27,1 %	35,3 %
Douleurs musculaires dans les épaules, le cou et/ou dans les membres supérieurs	62,8 %	50,1 %	59,5 %	51,1 %	56,8 %

Source : Eurofound, vague 2021.

Sur le thème du sens du travail, l'ouvrage revient sur les travaux de Coralie Perez et Thomas Coutrot⁸. À l'appui de l'enquête Conditions de travail de la Direction de l'animation de la recherche, des études et des statistiques auprès du ministère chargé du Travail (Dares), les chercheurs soulignent le lien entre perte de sens et risques dépressifs et mettent en cause le « management par les chiffres » qui s'impose, avec la financiarisation de l'économie à partir des années 1990 et l'exigence de rentabilité constante qui l'accompagne. La participation des salariés s'en trouve réduite et les obligations de rendre des comptes (*via* les tâches de *reporting*) se multiplient, tandis que les outils de contrôle numérique viennent de plus en plus encadrer le travail. Les Assises du travail, lancées le 2 décembre 2022 par le ministère chargé du Travail dans le cadre du Conseil national de la refondation, se sont en partie appuyées sur les travaux de certains de ces experts, mais également sur les analyses de la Dares, du Cese, de l'Institut Montaigne ou de la Fondation Jean-Jaurès pour élaborer un rapport sur le sujet⁹. L'objet principal de ce chantier était de réfléchir et de faire des propositions autour du sens et du rapport au travail, suite aux divers événements et crises qui l'ont remis au centre de

l'actualité. Dans une première partie, le rapport revient sur les constats partagés par l'ensemble des contributeurs : les rythmes des transformations du travail se sont accélérés sous l'effet des changements environnementaux et technologiques et font émerger de nouveaux risques pour la santé des travailleurs. Parallèlement – et en partie en réaction – à ces évolutions, les travailleurs aspirent à plus de sens, d'autonomie et de reconnaissance dans leur travail. En réponse à l'intensification du travail liée aux évolutions technologiques et organisationnelles, ils aspirent également à un meilleur équilibre entre vie professionnelle et vie personnelle. Ces revendications viennent par ailleurs complexifier la fonction d'encadrement, avec l'instauration du travail hybride à grande échelle. Cette nouvelle organisation du travail fragilise les collectifs et engendre de nouveaux facteurs de risque pour la santé mentale, dont les managers doivent s'emparer. Parallèlement, la diversification des statuts d'emploi participe également au changement de nature du « pacte employeurs-travailleurs ». Face à ces mutations, la nécessité de redéfinir un cadre adapté à ce pacte s'est imposée. Dans ce but, les garants du rapport ont formulé 17 propositions, structurées autour de quatre axes :



© Laure Dorin pour l'INRS/2024

- **gagner la bataille de la confiance**, par une révolution des pratiques managériales et en associant davantage les travailleurs ;
- **adapter les organisations du travail**, favoriser les équilibres des temps de vie et accompagner les transitions technologiques par la formation des travailleurs ;
- **assurer aux travailleurs** des droits effectifs et portables tout au long de leur parcours professionnel ;
- **préserver la santé physique et mentale** des travailleurs, enjeu de performance et de responsabilité pour les organisations.

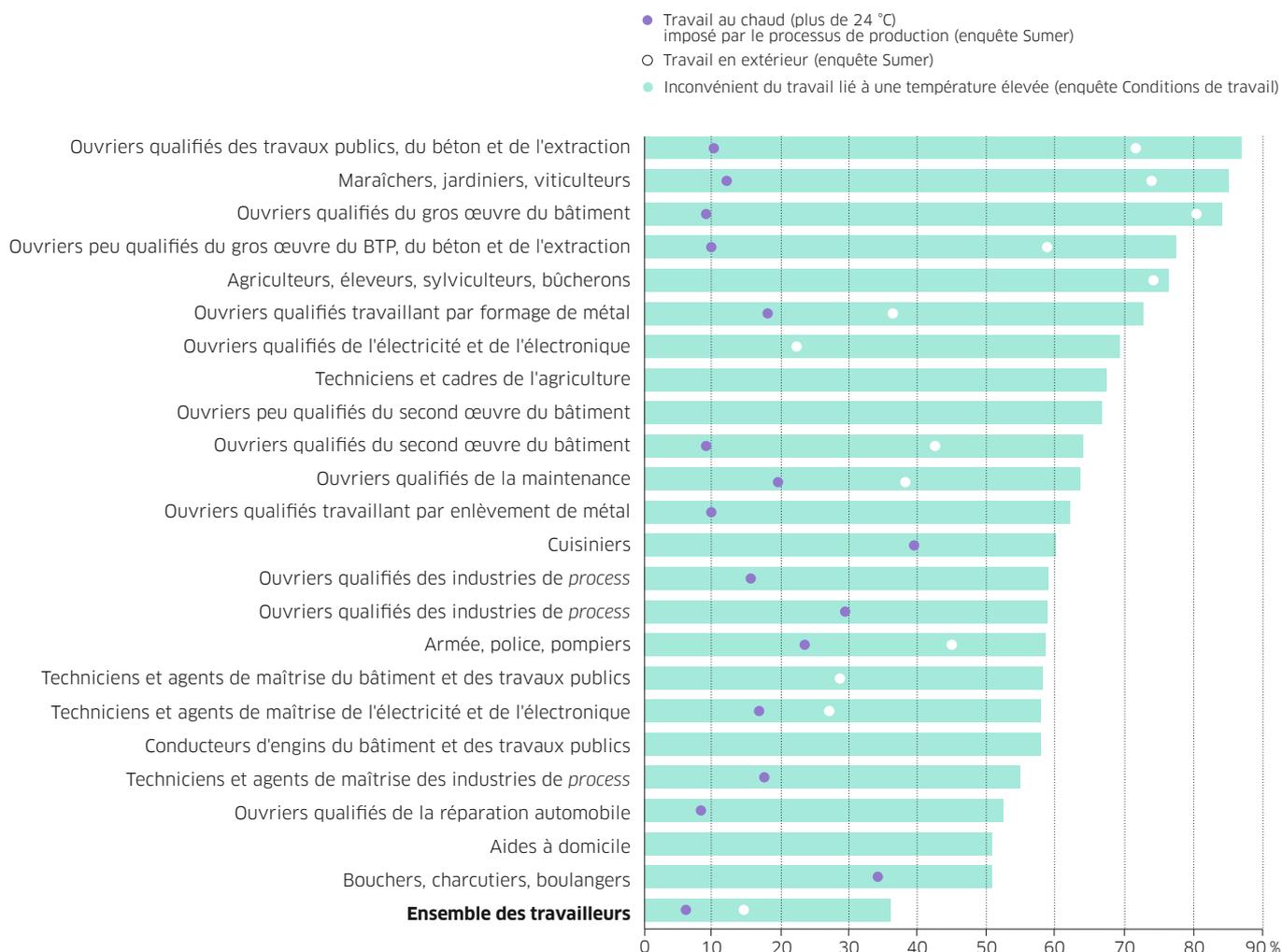
Concernant ce dernier point, qui intéresse plus directement les préventeurs, trois propositions sont formulées :

- **Favoriser une culture de la prévention primaire partagée** : la première recommandation est de reconnaître une place centrale au dialogue professionnel dans le cadre de la prévention. Pour ce faire, elle préconise l'instauration d'un « dixième principe général de prévention¹⁰ » visant à « écouter les travailleurs sur la technique, l'organisation du travail, les conditions de travail et les relations sociales ». La seconde recommandation concerne la formation, en visant à intégrer la prévention des risques aux

formations initiales, managériales ou professionnelles, ainsi qu'à celles des nouveaux embauchés.

- **Faire progresser l'identification des risques et les démarches de prévention** : sur ce point, il s'agit d'accompagner les chefs d'entreprise, notamment ceux des TPE, dans l'identification des risques et la mise en place de mesures de prévention au sein de leur entreprise par le biais du déploiement d'outils existants (OIRA en particulier¹¹) et d'une campagne de sensibilisation à l'importance de réaliser son document unique d'évaluation des risques professionnels (DUERP), dans laquelle l'Agence nationale pour l'amélioration des conditions de travail (Anact) et l'INRS pourraient être impliqués.
- **Renforcer l'action des services de prévention et de santé au travail (SPST)** : il est recommandé de renforcer la médecine du travail, afin de permettre aux SPST d'assurer leur rôle d'acteurs majeurs de la prévention. Pour cela, il est nécessaire de rendre plus attractive la médecine du travail, de dégager du temps aux médecins en s'appuyant davantage sur les infirmiers et infirmières. Enfin, un accent est mis sur le suivi à long terme de la santé des travailleurs *via* la généralisation du dossier médical en santé au travail, en portant une attention particulière aux intérimaires.





Champ : France (hors Mayotte), personnes en emploi.

Lecture : en 2019, 84 % des maraîchers, jardiniers et viticulteurs déclarent que leur travail (ou lieu de travail) présente un inconvénient lié à une température élevée. Dans l'enquête Sumer de 2017, les salariés de ces métiers sont 73 % à déclarer « travailler en extérieur » et 12 % à déclarer « travailler au chaud, plus de 24 °C, de façon imposée par le processus de production ».

Sources : France Stratégie à partir des enquêtes Conditions de travail 2019 et Sumer 2017 (Dares).

↑ FIGURE 1
Les 23 métiers
les plus exposés
à une température
élevée.

Enfin, en octobre, le Haut-Commissariat au plan¹² a également fait paraître un rapport intitulé « *La grande transformation du travail : crise de la reconnaissance et du sens au travail* », qui vise principalement à comprendre les causes de cette crise. Il identifie trois dimensions de la satisfaction au travail :

- **la dimension « rémunératrice »** tout d'abord, pour laquelle la satisfaction s'avère inférieure en France par rapport au reste des pays européens (46 % des Français s'estiment suffisamment payés, contre 59 % des Européens¹³). Plus que par le niveau de salaire, les rapporteurs expliquent cette faible satisfaction par la difficulté à se loger et l'augmentation de la précarité ;
- **la dimension « épanouissante »** du travail est pour sa part affectée par l'intensification des tâches. La proportion de tâches à réaliser immédiatement ou en moins d'une heure est passée de 33 % en 1984 à 77 % en 2017¹⁴ – tâches qui sont aussi devenues plus répétitives ;

- **la dimension « sociale »**, qui est notamment altérée par une perte d'autonomie accrue (baisse de 10 % à 15 % des marges de manœuvres de 1991 à 2016)¹⁵.

Le rapport estime que la cause de ces évolutions est principalement liée à des phénomènes économiques connus (mondialisation ; transformation des emplois ; désintermédiation des modes de financement des entreprises ; métropolisation) qu'il est nécessaire de prendre en considération dans la mise en œuvre d'une politique efficace.

L'impact du changement climatique sur la santé des travailleurs : un sujet mieux documenté

Les effets du changement climatique étant de plus en plus visibles, le sujet de leurs conséquences sur la santé humaine et sur la biodiversité s'est progressivement imposé comme une préoccupation majeure. Jusqu'à cette année, à l'exception de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimen-

tation, de l'environnement et du travail (Anses) en 2018¹⁶, peu d'instituts en France s'étaient emparés du sujet de son impact sur les conditions de travail. Il a fallu attendre le sixième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec¹⁷, paru en 2022), pour voir la question des risques professionnels abordée. Ensuite, en 2023, plusieurs instituts ont consacré des études au sujet, témoignant ainsi d'une prise de conscience nouvelle et d'une volonté politique d'adapter le travail à l'évolution des conditions climatiques, afin de prévenir une possible dégradation de la santé des travailleurs.

Des risques déjà connus qui pourraient augmenter

La première et principale conséquence du changement climatique, en matière de risques professionnels, est liée aux effets de la chaleur sur la santé.

Les travaux scientifiques recensés dans un rapport de France Stratégie, paru en juin 2023 sur le sujet¹⁸, indiquent que la contrainte thermique induite par la chaleur entraîne une augmentation de la fatigue qui peut aller jusqu'à l'épuisement. Elle peut également causer des coups de chaleur, des malaises ou des déshydratations. L'état de fatigue peut être associé à une baisse de la vigilance et de la concentration, à une augmentation des temps de réaction, ou encore à des troubles de la vision ou de l'humeur. Toutes ces altérations de la santé peuvent donc augmenter les risques d'accidents, lorsqu'elles sont ressenties durant des activités professionnelles potentiellement dangereuses (conduite, manutention, intervention sur des machines...).

À plus long terme, une exposition régulière à des températures excessives est mise en cause dans la survenue d'atteintes rénales ou, lorsque le travailleur est exposé aux rayons UV, de lésions cutanées, dont certaines cancéreuses. Ces risques sont naturellement plus élevés si d'autres facteurs s'ajoutent (difficulté de la tâche, état de santé fragile ou âge avancé, précarité économique, environnement de travail toxique...).

La chaleur peut enfin avoir des conséquences plus indirectes sur la sécurité et la santé des travailleurs, du fait de possibles effets sur les environnements et équipements de travail. Les avaries de matériel liées à la chaleur (pannes, dysfonctionnements) peuvent par exemple être à l'origine d'accidents de travail.

La multiplication des phénomènes climatiques extrêmes constitue un deuxième type de risques lié au changement climatique. Incendies, tempêtes, orages, précipitations de grêlons : tous ces événements deviennent à la fois plus fréquents et interviennent dans des zones géographiques nouvelles. Leur caractère inhabituel peut surprendre les travailleurs et occasionner des accidents.

Une troisième conséquence relève des modifications biologiques ou chimiques de l'environnement qui peuvent aussi avoir une incidence sur la sécurité et la santé des travailleurs. Apparition ou prolifération d'espèces animales, résurgence de bactéries ou virus, modification de la chimie de l'atmosphère : tous ces phénomènes induits par le dérèglement climatique peuvent constituer une source de nouveaux risques pour de nombreux travailleurs.

Pour finir, le rapport de France Stratégie souligne qu'au-delà des préoccupations sanitaires, ces risques recouvrent également un risque économique pour les entreprises qui voient leur productivité impactée. Une étude, conduite entre 2001 et 2020, estime ainsi que 650 milliards d'heures de travail seraient perdues par an à l'échelle mondiale du fait de l'évolution du climat¹⁹.

Des risques auxquels s'ajouteront de potentiels nouveaux dangers

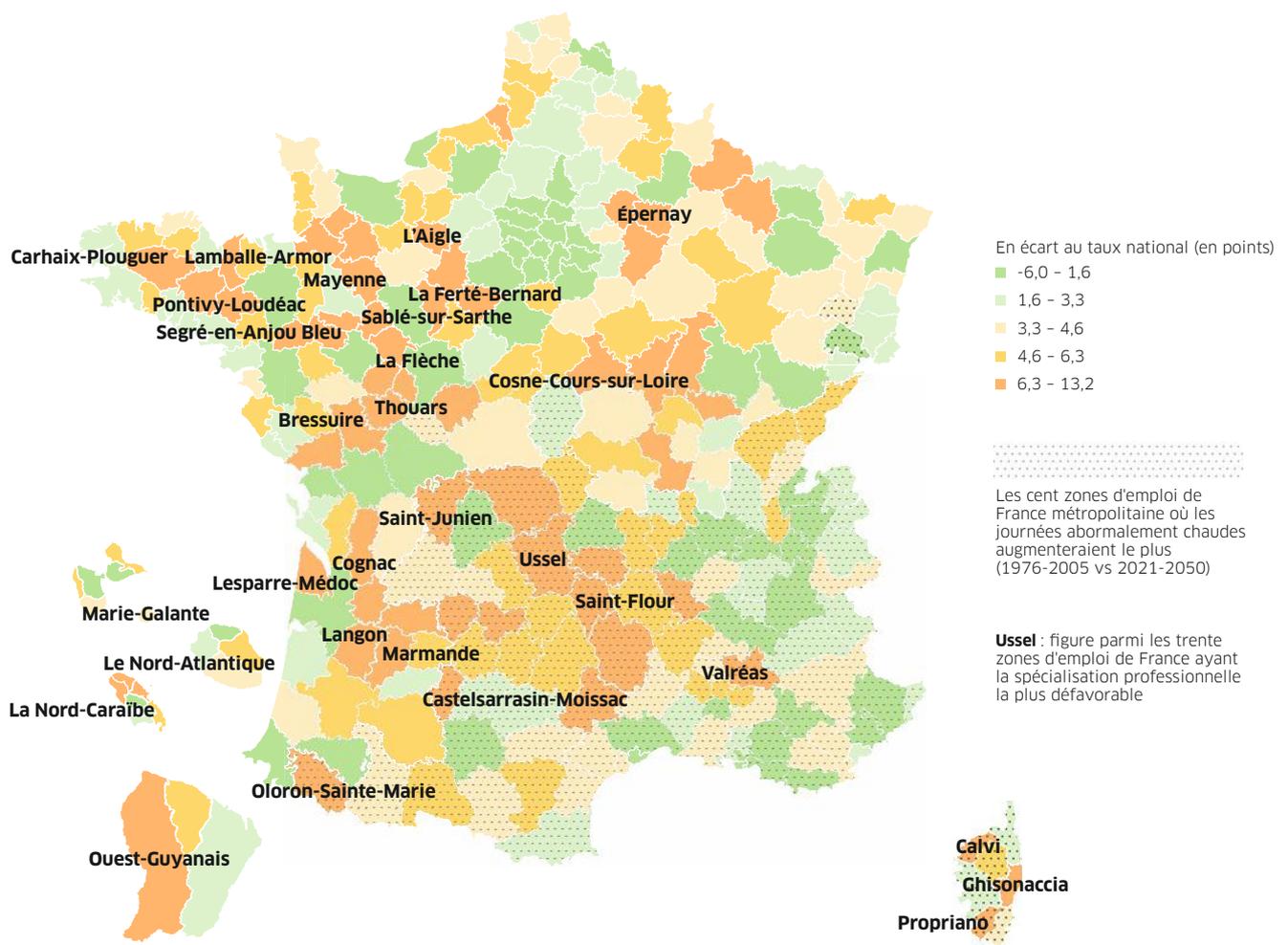
Dans un article paru en juin 2023 dans *Hygiène & sécurité du travail*²⁰, Louis Laurent ajoute un élément substantiel qui concerne les choix technologiques ou organisationnels effectués afin de lutter contre le réchauffement climatique, qui doivent aussi être pris en considération dans l'analyse des risques professionnels. Pour illustrer ce point, il cite deux exemples – ceux de l'énergie et du bâtiment :

- dans l'objectif de réduction des émissions de CO₂, la production, le transport et la consommation d'énergie vont devoir évoluer, entraînant ainsi d'importantes mutations des activités et l'émergence de risques potentiels liés au développement de nouvelles technologies (éolien, batteries lithium, méthaniseurs...);
- le bâtiment, deuxième secteur émetteur de gaz à effets de serre, va également devoir innover en matière de techniques de construction et de rénovation. Le recours à de nouveaux matériaux et au recyclage ou le changement d'organisations et de procédés vont nécessairement porter avec eux de nouveaux risques, qui vont devoir être analysés afin de mettre en place des mesures de prévention adaptées.

Quelles seront les populations les plus impactées ?

Dans son étude, France Stratégie a tenté d'établir une cartographie des travailleurs qui seront les plus exposés d'ici à 2050, en croisant l'évolution attendue d'épisodes de chaleur excessive estimés par département avec la répartition territoriale de l'emploi. Dans un premier temps, l'étude a établi une hiérarchisation des métiers actuellement les plus exposés aux fortes températures sur la base des enquêtes Conditions de travail 2019 et Sumer 2017 (Cf. Figure 1). Sans surprise, les ouvriers du BTP et les agriculteurs arrivent en tête de liste.





Champ : France (hors Mayotte), personnes en emploi au lieu de travail.
 Lecture : dans la zone d'emploi de Saint-Junien en Nouvelle-Aquitaine, la composition professionnelle de l'emploi conduit - toutes choses égales par ailleurs - à une exposition des travailleurs à des températures élevées supérieures de 8 points à celle observée au niveau national. Elle fait partie des 100 zones d'emploi de France métropolitaine où les journées anormalement chaudes augmenteraient le plus dans les trois prochaines décennies (2021-2050).
 Sources : France Stratégie, à partir du recensement de population 2019 - exploitation complémentaire (Insee), de l'enquête Conditions de travail 2019 (Dares) et de Drias 2020 (Insee et Météo-France)

↑ FIGURE 2
 Impact de la spécialisation professionnelle des zones d'emploi sur l'exposition des travailleurs à des températures élevées (sources : Dares, Météo-France).

Les auteurs ont ensuite croisé ces données, ainsi que celles de l'Insee relatives à la concentration des métiers par zone d'emploi²¹, avec la carte des territoires qui seront les plus concernés par l'augmentation des anomalies de chaleur d'ici 2050²² ; ils ont ainsi obtenu une carte représentant les niveaux d'exposition des travailleurs à la chaleur, selon la spécialisation professionnelle des zones d'emploi (Cf. Figure 2).

Il se dégage plusieurs constats :

- parmi les trente zones d'emploi les plus exposées, neuf sont situées en Nouvelle-Aquitaine et Occitanie ;
- les 20 zones d'emploi les moins exposées sont aussi celles qui concentrent le plus grand nombre de travailleurs (39 % des travailleurs français).

Ceci s'explique par l'importance du secteur tertiaire dans ces zones.

Ces résultats sont néanmoins à relativiser, du fait de l'assimilation par l'Insee du siège de l'entreprise au lieu de travail de tous ses salariés.

Quelles politiques et mesures de prévention envisager ?

À ce jour, le dispositif réglementaire visant à protéger les travailleurs de ces conséquences se limite à des plans d'actions nationaux, qui s'inscrivent dans une logique de gestion des événements exceptionnels. Or, les événements climatiques dits exceptionnels étant amenés à devenir de plus en plus fréquents, la nécessité de proposer une réglementation plus structurelle s'impose. Les travaux du Cese publiés en mars dernier ont par ailleurs

ENCADRÉ 1

LES SCÉNARIOS D'ÉVOLUTIONS POSSIBLES DE LA SANTÉ ET SÉCURITÉ AU TRAVAIL (NIOSH)²⁵

• **Un scénario tendanciel** où les frontières entre les différents statuts d'emploi, de même qu'entre vie professionnelle et vie personnelle continuent de s'estomper. Parallèlement, l'automatisation et la virtualisation continuent de modifier la manière dont le travail est effectué. Les progrès technologiques introduisent de nouveaux risques dans l'environnement de travail traditionnel, tout en exacerbant les risques existants. La collecte de données et les outils d'apprentissage automatique rendent les processus plus efficaces, mais ils sont également de plus en plus utilisés pour surveiller, mesurer et évaluer les travailleurs. Les modalités de travail atypiques sont de plus en plus courantes, ce qui complique la gestion de la sécurité et de la santé. Les tendances économiques allongent la durée de la vie professionnelle, et les travailleurs éprouvent des difficultés à suivre le rythme des avancées technologiques par le biais de l'amélioration de leurs compétences, voire de leur reconversion.

• **Un scénario de rupture dystopique** (« la tempête fatale ») où la polarisation de la société complexifie considérablement les missions des services publics, y compris la recherche en matière de SST. Les professionnels de la SST se trouvent confrontés à une multiplication des environnements de travail, à la fois virtuels et physiques, de même

qu'à la complexité croissante de modalités de travail déstructurées et précaires. Par ailleurs, le manque de confiance envers le gouvernement dû à la désinformation, la peur d'être contrôlé et la faible transparence des données brutes recueillies complexifient la conduite des recherches et le suivi des travailleurs.

• **Un troisième scénario plus nuancé**, intitulé « contrôle à distance », décrit un nouvel équilibre, principalement influencé par le développement du travail à distance : après la pandémie, de nombreuses organisations adoptent un modèle opérationnel hybride. Le renforcement de la sécurité des données facilite le travail à distance pour la plupart des tâches informatiques. Bien que les employeurs se sentent obligés de faire preuve de responsabilité sociale pour attirer et retenir les meilleurs talents, la mise en œuvre d'initiatives de SST est rendue plus difficile, du fait de l'éloignement et de la diversification des statuts de la main-d'œuvre. Par conséquent, les travailleurs deviennent les principaux responsables de la gestion de leurs expositions aux risques professionnels.

• **Un quatrième scénario plus utopique**, avec le développement d'un modèle « *One health* » mondialisé. Dans un monde de technologies avancées, la santé mentale et la protection des données deviennent des éléments

centraux d'un paradigme élargi de la SST. La recherche est guidée par les besoins de la population et les industries parviennent à une santé mondiale unique, pour soutenir le bien-être de la main-d'œuvre mondiale. La plupart des travaux sont effectués à distance. La main-d'œuvre est davantage répartie géographiquement et les modalités d'emploi plus flexibles, avec des employeurs multiples et mondiaux. L'intelligence artificielle (IA) et la robotique se combinent pour créer des capacités inégalées, et la main-d'œuvre humaine n'est plus nécessaire que pour les tâches sociales et artisanales, ou pour gérer les systèmes d'IA. Grâce à l'assistance de technologies, les travailleurs gagnent en compétences et voient la pénibilité de leur travail, ainsi que le risque de maladies chroniques, diminuer. Les travailleurs qui ne sont pas en mesure de s'adapter à ces changements dépendent d'un revenu de base universel. Les scores de crédit social constituent une nouvelle structure d'incitation pour la SST, et des entités indépendantes créent des scores de qualité de la SST des entreprises consultables et vérifiables. La santé globale des travailleurs et de l'environnement est prise en considération dans un système de santé mondiale unique, où la main-d'œuvre et la planète prospèrent.

montré que l'évaluation des risques, que les employeurs ont l'obligation de consigner dans le DUERP, ne prend en compte les risques liés aux conditions climatiques que dans 20 % des cas²³. Des velléités de s'emparer de la question se manifestent depuis quelques années, notamment dans le cadre du quatrième Plan santé au travail (PST 4) paru en 2021, ou du Plan de prévention des accidents du travail graves et mortels de 2022. Malheureusement, comme l'a pointé l'avis du Cese, la question nécessite une analyse multifactorielle des risques qui devrait impliquer les acteurs de la prévention en santé publique, santé au travail et santé environnementale. Or actuellement, ces différentes sphères sont trop cloisonnées pour permettre un travail commun. C'est la raison pour laquelle le Cese préconise, entre autres, une meil-

leure articulation des plans nationaux sous l'égide d'un délégué interministériel²⁴.

Autres travaux de prospective

Dans le cadre d'un numéro spécial de la revue *International journal of environmental research and public health*, consacré au futur du travail et de la santé et sécurité au travail (SST), le Niosh²⁵ a fait paraître un article²⁶ qui présente le projet inaugural de prospective stratégique de l'institut. Ce projet vise, d'une part, à impulser la réflexion de l'institution en matière de prospective appliquée et, d'autre part, à explorer l'avenir des activités de recherche et de pratique dans le domaine de la SST. Avec l'aide d'équipes pluridisciplinaires de chercheurs de l'institut, le Niosh a entrepris une exploration approfondie et une synthèse d'informations, avec



ENCADRÉ 2

RETOUR SUR L'EXERCICE DE PROSPECTIVE DE L'INRS « LE TRAVAIL EN 2040 : MODALITÉS DE PILOTAGE DE L'ACTIVITÉ, ENJEUX DE SANTÉ ET SÉCURITÉ AU TRAVAIL »

L'INRS a conduit en 2023 un nouvel exercice de prospective portant sur les évolutions des modes de pilotage de l'activité d'ici à 2040 et sur leurs conséquences possibles en matière de santé et de sécurité au travail. Pour ce faire, un groupe de travail pluridisciplinaire a exploré les principaux facteurs de changement sur la base d'une revue de la littérature, d'interviews d'experts en management et de visites d'entreprises. Douze dynamiques ont ainsi pu être instruites (temps de travail, statuts d'emploi, travail à distance, outils de communication, lieux de travail, dialogue social et professionnel, modèle coopératif, informatisation des processus, économie collaborative, sous-traitance, pilotage industriel, plateformes). Ce travail a permis d'établir une liste de quatorze points clés, définissant les principales transformations et perspectives d'évolution des modalités de pilotage du travail d'ici à 2040.

Sur la base de ces éléments de contexte, le groupe de travail s'est ensuite appuyé sur la méthode du *design fiction* pour imaginer plusieurs organisations du travail en 2040, en concevant des *personae* (personnages fictifs incarnant des travailleurs) et des profils d'entreprises fictives. Cette approche avait plusieurs ambitions : incarner concrètement les tendances du travail de demain et les mettre à l'épreuve pour envisager la manière dont elles pourraient se manifester effectivement dans les organisations ; ouvrir le débat afin d'approfondir la réflexion sur les enjeux de SST.

Ces éléments fictifs ont ensuite été analysés par des experts en santé et sécurité au travail, afin d'identifier les principaux défis et les opportunités potentielles qui pourraient émerger dans le domaine de la prévention des risques professionnels. Des évolutions organisationnelles préoccupantes ont été identifiées :

- une flexibilisation qui isole les travailleurs ;
- des organisations techno-centrées dans lesquelles l'écart entre le travail prescrit et le travail réel se creuse ;
- une « raison d'être » qui ne place pas toujours la santé des travailleurs au centre des préoccupations ;
- le développement des situations de coactivité ;
- une évolution des attentes en matière de ressources humaines qui se fait en faveur du « savoir-être » et au détriment des savoirs de sécurité acquis par le biais de connaissances techniques.

Au vu de ces éléments, un certain nombre d'évolutions des pratiques de prévention sont à anticiper pour parvenir à continuer d'agir efficacement, tel le fait de se saisir des mutations organisationnelles (technologique, écologique...) des modes de production, comme autant d'opportunités pour intégrer la prévention dans le pilotage de l'activité.

POUR EN SAVOIR PLUS :

- L'ensemble des pistes d'action envisagées est à retrouver dans le rapport de l'exercice : <https://www.inrs.fr/inrs/prospective-quel-travail-demain.html>
- La restitution de cet exercice peut être visionnée en rediffusion : <https://www.inrs.fr/footer/actes-evenements/prospective-travail-2040.html>

l'appui desquelles il a ensuite conduit une démarche de prospective basée sur la méthode des scénarios. Quatre futurs possibles de la SST ont ainsi pu être décrits (Cf. Encadré 1).

Sur la base de ces scénarios, le groupe de travail a défini cinq domaines d'action stratégiques pour l'avenir de la SST, de façon à peser en faveur des scénarios les plus souhaitables : sécurité des données, santé mentale, partenariats, recherche, virtualisation du travail. Pour chacun, des problématiques à traiter sont fixées selon un calendrier en trois volets : 2021-2026 (H1), 2027-2036 (H2), et au-delà de 2036 (H3).

Les axes prioritaires identifiés pour la période actuelle (H1) concernent :

- la réorganisation de la recherche en SST pour répondre au besoin de développer de nouveaux sujets d'études sur l'exposition à des risques émergents et sur la santé mentale. Il s'agit aussi de travailler à mieux intégrer l'expertise dans les nouvelles technologies au développement de la recherche ;
- une augmentation significative des ressources consacrées aux politiques de santé psychosociale et de bien-être sur le lieu de travail ;
- l'alignement des règles des agences gouvernementales américaines en matière de télétravail sur celles du secteur privé, afin de rendre l'emploi public plus attractif.

Les résultats détaillés de ces travaux feront l'objet d'une communication lors de la prochaine conférence internationale « *Foresight for OSH* », organisée par l'INRS le 14 novembre 2024.

De son côté, l'*European Trade Union Institute for Research* (EtuI) a également publié un rapport sur l'usage de la prospective pour être en mesure de mieux faire face aux crises²⁷. Les deux variables considérées dans cet article sont, d'une part, les évolutions des inégalités économiques, avec une première hypothèse de répartition équitable des richesses et une seconde où pouvoir et richesses sont détenus majoritairement par 1 % de la population. Le réchauffement climatique est pris en compte d'autre part : une première hypothèse d'augmentation moyenne des températures restant inférieure à 2 °C, et une seconde hypothèse de réchauffement moyen supérieur à 2 °C. Le croisement de ces quatre hypothèses a permis à l'institut de construire quatre scénarios :

- **Ruches High-Tech** : dans ce scénario, le réchauffement supérieur à 2 °C conduit à des catastrophes naturelles qui amènent les populations à conduire une transformation radicale des institutions en faveur d'une politique sociale et environnementale d'envergure, en s'appuyant sur les innovations technologiques pour lutter contre le dérèglement climatique.

- **Ghettos (dé-)connectés** : l'avenir se présente sous la forme d'un monde polarisé. Une minorité de pays riches (au nord de l'Europe) cherche à se protéger des migrations dues au réchauffement. Ces pays conçoivent des nouvelles technologies propres au bénéfice de la santé et de la sécurité de leurs citoyens ; tandis que les populations les plus pauvres n'ont pas d'autres choix que de recourir aux sources d'énergie les plus polluantes.
- **Châteaux verts** : les solutions technologiques ont permis de maintenir le réchauffement climatique en dessous des 2 °C. Cependant les inégalités s'aggravent entre les pays ayant davantage souffert du réchauffement climatique et les autres. La polarisation de la société se lit tout particulièrement dans le monde du travail, entre les travailleurs qualifiés des secteurs de la « *tech* » et de l'environnement et ceux moins qualifiés de la « *gig economy* ».
- **Éco-villages** : suite à une canicule meurtrière en 2028, un mouvement écologiste internationaliste devient majoritaire dans l'ensemble du monde. Des accords permettent de conduire une action globale pour endiguer le réchauffement climatique et procéder à une redistribution des richesses, plus équitables à l'échelle de la planète. L'instauration d'un revenu universel permet aux individus de consacrer davantage de temps à leur éducation, aux activités culturelles et sociales. La technologie est au service de la transition écologique.

Les récits associés à ces scénarios ont permis d'identifier les principales caractéristiques, priorités et incertitudes des développements futurs. Sur cette base, une stratégie interne de l'Etui a été élaborée afin d'œuvrer en faveur des scénarios les plus souhaitables, avec douze feuilles de route stratégiques à mettre en œuvre. Ces documents à usage interne ne font pas partie du rapport.

Télétravail : effets sur la productivité et sur la santé des travailleurs

Trois ans après la crise de la Covid-19 et l'explosion du recours au télétravail, l'année 2023 a été l'occasion de dresser un bilan concernant cette pratique. Dans ce contexte, un certain nombre d'entreprises américaines, dont les employés bénéficiaient de la possibilité de télétravailler à leur convenance, ont commencé à faire marche arrière et à demander à leurs salariés de revenir travailler sur site. C'est le cas notamment d'Amazon, Disney, Google et Zoom²⁸. Cette tendance concerne principalement le télétravail à 100 % (*full remote*) qui est très peu pratiqué en France.

Dans la plupart des cas, cette décision a été motivée par le constat d'une baisse de la productivité, objectivée par quelques études dont l'une publiée dans la revue *Économie et statistiques* de l'Insee²⁹. Il



©Gael Kerbaol/INRS/2021

s'agit d'une étude du Forum mondial sur la productivité de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), qui a conduit une enquête afin de mesurer l'impact du télétravail sur la productivité et sa corrélation avec le bien-être des travailleurs. Elle s'est déroulée auprès d'entreprises et de travailleurs de 25 pays membres de l'OCDE sur une période couvrant le début de la pandémie et les deux premières vagues d'infection (au printemps et à l'automne 2020 dans les pays d'Europe occidentale). L'enquête compare la productivité des entreprises au début et à l'issue de la pandémie, suivant le niveau d'adoption du télétravail, et conclut qu'une relation positive existe entre productivité et télétravail, les entreprises les plus productives tendant davantage à accorder du télétravail régulier à leurs salariés. Cependant, les entreprises dont les salariés télétravaillent plus de deux jours par semaine ont une productivité plus faible que les autres.

L'étude conclut que, pour s'avérer bénéfique pour la productivité, l'organisation du télétravail doit

Bureau flexible équipé d'absorbants acoustiques.



permettre de trouver un équilibre entre les facteurs positifs et négatifs qui entrent en jeu. Parmi les facteurs positifs, l'étude recense la satisfaction des travailleurs à trouver un meilleur équilibre entre vie professionnelle et vie personnelle et à bénéficier de plus d'autonomie. Parmi les facteurs positifs du télétravail sur la productivité, l'étude prend également en compte la réduction d'utilisation du capital (coûts immobilier et mobilier) ainsi que la réduction du coût du travail, grâce notamment à la baisse du turnover des salariés. Ces atouts sont cependant contrebalancés par des facteurs négatifs, lorsque la durée du télétravail est trop élevée. Il induit alors un risque d'isolement, de limitation des possibilités d'évolution professionnelle ou le fait de devoir travailler dans un environnement inapproprié, qui peut nuire à l'engagement du travailleur. Le manque de communication et de proximité entre collaborateurs peut aussi conduire à une réduction du taux d'innovation et de créativité.

Ces résultats rejoignent ceux d'une étude de Stanford, publiée en juillet 2023³⁰ et qui atteste que la productivité d'un télétravailleur à temps plein est inférieure de 10 % à celle d'un travailleur à 100 % en présentiel. Les difficultés de communication à distance, les obstacles au mentorat et les problèmes de motivation en seraient les principales causes.

Au-delà des questions de productivité, d'autres études établissent également le caractère délétère du télétravail à 100 % pour la santé des travailleurs. C'est le cas de l'étude de Santé publique France³¹, conduite à partir de deux vagues de l'enquête CoviPrev menées en juin et juillet 2021 auprès de 1500 travailleurs, indemnes de lombalgie au début du « troisième confinement » (du 3 avril au 2 mai 2021). Elle démontre que la prévalence de la survenue de lombalgies est de 9,2 % pour les salariés pratiquant le télétravail à temps plein, contre 5,3 % pour le travail hybride et 4,8 % sans télétravail.

Dans un rapport paru fin décembre 2022, Eurofound rapportait pour sa part une propension à l'anxiété plus importante des télétravailleurs à temps plein (36 %) par rapport aux télétravailleurs partiels hybrides (33 %) et aux télétravailleurs occasionnels (31 %)³².

Une instauration du travail hybride, voire du télétravail occasionnel (c'est-à-dire rarement ou de temps en temps) selon Eurofound, apparaît en définitive plus favorable à la fois à la productivité de l'entreprise et à la santé des travailleurs. ●

1. Voir notamment : <https://www.inrs.fr/publications/hst/veille-et-prospective.html>
2. Voir : <https://www.institutmontaigne.org/publications/les-francais-au-travail-depasser-les-idees-recues>
3. Voir : <https://www.jean-jaures.org/publication/grosse-fatigue-et-epidemie-de-flemme-quand-une-partie-des-francais-a-mis-les-pouces/>
4. Conseil économique, social et environnemental. Voir : <https://www.lecese.fr/actualites/le-travail-en-questions-le->

[cese-adopte-la-resolution](#)

5. Voir : <https://www.sciencespo.fr/liepp/fr/content/que-sait-du-travail-un-projet-de-mediation-scientifique.html>

6. Voir : <https://www.sciencespo.fr/liepp/fr/content/maezig-bigi-dominique-meda-prendre-la-mesure-de-la-crise-du-travail-en-france.html>

7. Voir : <https://www.sciencespo.fr/liepp/fr/content/christine-erhel-mathilde-guergoat-lariviere-malo-mofakhami-la-qualite-de-l-emploi-et-du-trav.html>

8. Voir : <https://www.sciencespo.fr/liepp/fr/content/coralie-perez-thomas-coutrot-le-sens-du-travail-enjeu-majeur-de-sante-publique.html>

9. Voir : https://travail-emploi.gouv.fr/IMG/pdf/assises_du_travail_-_rapport_des_garants.pdf

10. Les principes généraux tels que décrits dans le Code du travail sont actuellement au nombre de neuf ; cf. Article L. 4121-2 du Code du travail. Accessible sur : www.legifrance.gouv.fr

11. Voir : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=outil64>

12. Voir : <https://www.gouvernement.fr/la-grande-transformation-du-travail-crise-de-la-reconnaissance-et-du-sens-du-travail>

13. Voir l'enquête Eurofound 2022 : <https://www.eurofound.europa.eu/fr/publications/2023/vivre-et-travailler-en-europe-en-2022>

14. Voir : <https://dares.travail-emploi.gouv.fr/publications/comment-ont-evolu-les-expositions-des-salaries>

15. Voir : <https://dares.travail-emploi.gouv.fr/publications/contraintes-physiques-et-intensite>

16. Voir : <https://www.anses.fr/fr/content/effets-du-changement-climatique-en-milieu-de-travail-des-risques-professionnels-augmentent>

17. Voir : <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>

18. Voir : <https://www.strategie.gouv.fr/publications/travail-lepreuve-changement-climatique>

19. Voir : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac3dae>

20. Voir : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=VP%2038>

21. Voir : https://www.insee.fr/fr/statistiques/1372994?som_maire=1373022

22. Voir : <https://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf>

23. Voir : https://www.lecese.fr/sites/default/files/articles/fichiers/dereglement_climatique_sante_travail_def.pdf

24. Voir : https://www.lecese.fr/sites/default/files/pdf/Avis/2023/2023_10_sante_environnement.pdf

25. Niosh : National Institute for Occupational Safety and Health (États-Unis).

26. Voir : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36901347/>

27. Voir : https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4483871

28. Voir : https://www.francetvinfo.fr/replay-radio/c-est-mon-boulot/l-heure-du-retour-au-bureau-a-t-elle-sonne_6039821.html

29. Voir : INSEE – Économie et Statistique. Economics and Statistics n° 539 – 2023. Accessible sur : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/7647248>

30. Voir : <https://drive.google.com/file/d/1kqbnGD8pemaqAKZmWCOQ32Yk6PXK9eVA/view?pli=1>

31. Voir : <https://www.santepubliquefrance.fr/les-actualites/2023/conditions-de-teletravail-quel-impact-sur-la-sante-physique-et-psychique-des-travailleurs>

32. Voir : <https://www.eurofound.europa.eu/en/publications/2021/rise-telework-impact-working-conditions-and-regulations>



HYGIÈNE ET SÉCURITÉ DU TRAVAIL (HST)

publication éditée par
l'INRS, Institut national de
recherche et de sécurité pour
la prévention des accidents
du travail et des maladies
professionnelles

65, boulevard Richard-Lenoir
75011 Paris – France
Tél.: 01 40 44 30 00
Dépôt légal :
1^{er} trimestre 2024
n°2401.0058
ISSN 0007-9952
[www.inrs.fr/publications/
hst/dans-ce-numero.html](http://www.inrs.fr/publications/hst/dans-ce-numero.html)

INRS service abonnements

Abonnements payants :
Abonn'escient – TBS Group
Service abonnements
Hygiène & sécurité du travail
20 rue Rouget-de-Lisle
92130 Issy-les-Moulineaux
Tél.: 01 40 94 22 22 /
01 30 80 44 40
inrs@cometcom.fr

Prix au numéro: 22,00 €
Tarifs abonnement pour
1 an/4 numéros:
France: 76,00 €
DOM-TOM: 83,00 €
Autres zones: 89,00 €

Photogravure

Keygraphic

Impression

Corlet Imprimeur
14110 Condé-sur-Noireau
France

L'autorisation de reproduire
totalement ou partiellement
des articles parus dans
Hygiène et sécurité du travail
(HST) doit être sollicitée
à l'avance et par écrit.
Toute reproduction, quel
qu'en soit le support
(à l'exception des copies
à usage interne), qui n'aurait
pas été précédée d'un accord
préalable, serait effectuée
en violation des droits
de l'éditeur.



**Retrouvez
tous les articles sur
www.hst.fr**