

# HYGIÈNE & SÉCURITÉ DU TRAVAIL

La revue technique de l'INRS  
avril • mai • juin 2024

N° 275

## / Notes techniques /

Exosquelettes d'assistance  
du dos : apports de la  
technologie robotisée

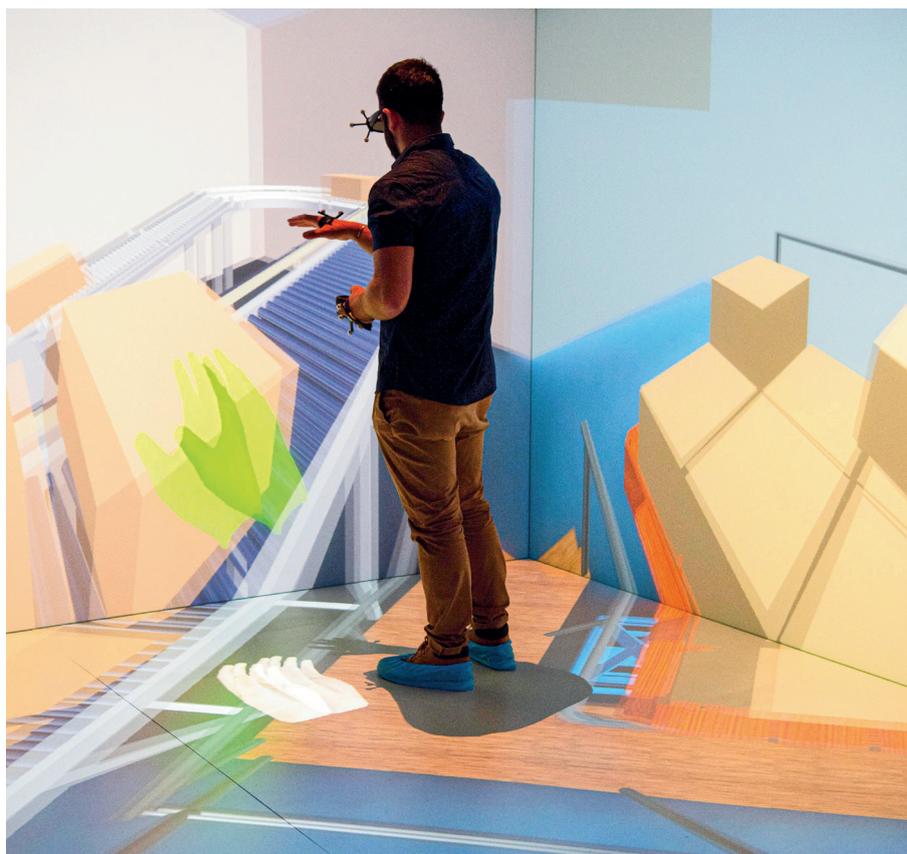
Risque biologique dans  
le secteur du compostage :  
élaboration d'une méthode  
d'aide à son évaluation

## / Étude de cas /

Exposition à l'amiante  
dans le secteur  
de la collecte  
et de l'assainissement  
des eaux usées

## / Base de données /

Portrait des expositions  
professionnelles à l'ozone  
en France 2002 – 2022



**Dossier**

**Conception des lieux  
et situations de travail :  
rôle et apports  
de la simulation**

# 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

REVUE HYGIÈNE & SÉCURITÉ DU TRAVAIL

SOMMAIRE

- Dans ce numéro
- Étude de cas
- Vieilles et prospective
- Bases de données
- Congrès
- Formation

Dans ce numéro

Hygiène et sécurité du travail est la revue technique de l'INRS. Son objectif est de proposer des informations opérationnelles et diversifiées aux professionnels de la prévention.

À la une du numéro 274 (4<sup>er</sup> trimestre 2024)

**DOSSIER**  
Vibrations  
mains – bras:  
état des  
connaissances

VOIR AUSSI

CONFÉRENCE INTERNATIONALE

Conférence Internationale Vibrations mains bras

du 6 au 9 juin 2023 à Nancy, la quinzième conférence internationale consacrée aux vibrations du système main-bras, organisée par l'INRS avec le soutien du Comité Consultatif International, a rassemblé près de 100 participants de pays européens mais aussi d'Asie et d'Amérique du Nord.

NUMÉRO EN COURS

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 :**

Émilie Aunis, Catherine Bougie,  
Sarah Burzoni, Frank Cartel,  
Marc Charoy, Aziz Cherifi,  
Christian Darne,  
Kévin Desbrosses, Céline Dubois,  
Laëtitia Élie, Andrea Emili,  
Remiel Feno, Laurent Fina,  
Laurent Gaté, Stéphane Gille,  
Virginie Govaere, Romain Guichard,  
Nadia Heddad, Valérie Jusseaume,  
François-Xavier Keller,  
Jennifer Klingler, Céline Kutek,  
Pascal Lamy, Éric Liehrmann,  
Gautier Mater, Séverin Millet,  
Aurélien Périsset, Gabin Personeni,  
Benoît Pouyat, Laurence Robert,  
Anita Romero-Hariot,  
Jean-Claude Sagot, Frédéric Saltron,  
Jean-François Sauvè, Barbara Savary,  
Jonathan Savin, Mathilde Schwartz,  
Carole Seidel, Jérôme Triolet,  
Laurent Van Belleghem,  
Thomas Venet,  
les relecteurs internes de la revue,  
les pôles Information juridique  
et Traductions de l'INRS,  
ainsi que les photographes cités.

Photo de couverture :

© Gaël Kerbaol / INRS / 2018

# L'édito de...

**JEAN-CLAUDE SAGOT**, professeur émérite en ergonomie et conception, UTBM,  
Université de Bourgogne – Franche-Comté



© Gaël Kerbaol pour l'INRS / 2018

La transformation industrielle n'a jamais autant progressé. L'usine d'aujourd'hui, dite connectée ou usine du futur, vise une meilleure productivité, qualité, flexibilité, traçabilité, sécurité des opérations de fabrication, en s'appuyant sur les nouvelles technologies : l'intelligence artificielle, la robotique, les robots collaboratifs, les objets connectés, les exosquelettes de travail, la réalité virtuelle... La littérature spécialisée s'accorde pour définir l'industrie du futur comme devant être « plus agile, flexible, moins coûteuse et plus respectueuse de ses opérateurs et de l'environnement, grâce à un fort niveau d'automatisation et une intégration numérique de l'ensemble de la chaîne de production »\*. La réalité vécue par les opérateurs peut s'avérer hélas différente, car la conception des systèmes de production est souvent centrée sur la technique, les technologies, et beaucoup moins sur les métiers ou savoir-faire,

la sécurité et la sauvegarde de la santé de ceux qui devront y travailler. La conception des nouvelles chaînes de production et des nouveaux postes de travail devient dès lors un acte stratégique, comportant des dimensions économiques et technologiques, mais aussi politiques, voire éthiques et sociales. Compte tenu des enjeux, l'activité de conception est, depuis plusieurs années, au cœur des problématiques de recherche et développement, dans les laboratoires et dans les entreprises, fédérant ainsi des spécialistes de la conception issus de communautés différentes : les sciences de l'ingénieur mais aussi, plus récemment, les sciences humaines et sociales. Seule une approche interdisciplinaire permet

d'apporter des réponses adaptées au défi posé : celui d'une meilleure prise en compte du facteur humain dans la conception des nouveaux systèmes de production, prenant en compte la sécurité, la santé, le bien-être et l'efficacité.

Les entreprises mettent

## « La simulation permet d'identifier certaines situations (...) et d'envisager des solutions de prévention »

ainsi en place des structures de conduite de projet, véritables centres de décisions où interviennent un grand nombre d'acteurs. La qualité de leur collaboration dépend de leur capacité à mobiliser leurs connaissances et savoir-faire, à se comprendre et à se coordonner. La coopération implique des phases de travail conjointes. La coordination, qui rassemble les règles structurant cette coopération, est assurée efficacement par des objets intermédiaires de conception : plans, maquettes, esquisses... Enfin, la communication reste indispensable à la dimension collective du travail.

La structure de conduite de projets s'avère particulièrement efficace pour faire en sorte que la spécificité du facteur humain soit intégrée tout au long de la démarche de conception. Pour renforcer la qualité de la collaboration, du médecin du travail à l'ergonome en passant par l'ingénieur, sans oublier l'opérateur, le groupe projet doit pouvoir s'appuyer sur des outils performants. Ainsi, la simulation est reconnue comme un outil précieux d'aide à la décision. Pouvoir modéliser locaux, espaces, implantations, postes de travail..., et simuler ou reconstituer des situations d'usage, des formes possibles d'activité future, représente un moyen efficace pour faire évoluer et converger les représentations de chacun.

Ainsi, comme décrit dans le dossier présenté dans ce numéro, sur la base de plans, de maquettes numériques, de mannequins 3D ou d'outils relevant de la réalité virtuelle, la simulation permet d'identifier certaines situations types dans lesquelles les opérateurs risquent de se trouver et d'envisager des solutions en termes de prévention des risques professionnels et de sauvegarde de leur santé.

Ses auteurs décrivent les bénéfices de la simulation et des outils associés, tout en restant attentifs à leurs limites.

\* Source : [www.abilways-digital.com](http://www.abilways-digital.com)

# SOMMAIRE



## Savoirs & actualités

### Décryptage

Nouvelles formes d'emploi et d'organisation du travail : des risques aux enjeux de prévention

P. 05

### Actualité juridique

- Faute inexcusable: l'employeur ne peut s'affranchir de son obligation de sécurité en prévoyant qu'un tiers assurera cette responsabilité P. 14

- Faute inexcusable de droit et accident de la route provoqué par la fatigue d'un chauffeur P. 17

### Dossier

Conception des lieux et situations de travail : rôle et apports de la simulation

- S'appuyer sur la simulation pour concevoir des systèmes de travail P. 20

- Usage de la simulation en prévention primaire : accompagnement de la conception d'un atelier de fabrication de produits à risques P. 29

- Prévenir les risques professionnels par l'usage de la modélisation et de la simulation numérique P. 37

- Les mannequins numériques : des outils de simulation pour la prévention des risques en conception d'équipements de travail P. 43

- La réalité virtuelle : rôle et apports pour la conception sûre des postes et équipements de travail P. 49



Rôle et apports de la simulation dans la conception des lieux et des situations de travail  
Lire Dossier p. 18.



# Études & solutions

## Notes techniques

- Exosquelettes d'assistance du dos : apports de la technologie robotisée  
P. 55
- Risque biologique dans le secteur du compostage : élaboration d'une méthode d'aide à son évaluation  
P. 64
- Exposition à l'amiante dans la filière de la collecte et du traitement des eaux usées : état des lieux  
P. 72

## Étude de cas

- Caractérisation des expositions à l'amiante dans les activités d'hydrocurage : retour d'expérience et préconisations de prévention  
P. 78

## Bases de données

- Portrait rétrospectif des expositions professionnelles à l'ozone en France de 2002 à 2022  
P. 82

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.



# Agenda & services

## Congrès

Du conteneur au commerce :  
quel risque chimique pour les salariés ?  
P. 91

## Formation

Devenir formateur certifié  
en échafaudages fixes (R 408)  
et/ou roulants (R 457)  
P. 96

Agenda/Formations  
P. 100

## Sélection bibliographique

À lire, à voir  
P. 102



# Veille & prospective

## Prospective

Les modifications épigénétiques :  
potentiels biomarqueurs d'effet  
d'une exposition professionnelle ?  
P. 105



# Savoirs & actualités

## Décryptage

Nouvelles formes d'emploi  
et d'organisation du travail :  
des risques aux enjeux  
de prévention

P.05

## Actualité juridique

Faute inexcusable : l'employeur  
ne peut s'affranchir de son obligation  
de sécurité en prévoyant qu'un tiers  
assurera cette responsabilité

P. 14

Faute inexcusable de droit et accident  
de la route provoqué par la fatigue  
d'un chauffeur

P. 17

## Dossier

Conception des lieux et situations  
de travail : rôle et apports  
de la simulation

P. 18

## Décryptage

# NOUVELLES FORMES D'EMPLOI ET D'ORGANISATION DU TRAVAIL : DES RISQUES AUX ENJEUX DE PRÉVENTION

Les quarante dernières années ont donné lieu à des transformations profondes de l'emploi et du travail avec, d'une part, l'apparition de nouveaux statuts d'emploi s'éloignant de la forme typique du salariat en CDI et, d'autre part, l'émergence de nouveaux modèles organisationnels et managériaux. Cet article propose de faire le point sur les caractéristiques de ces transformations et les risques professionnels associés, afin de mieux saisir les enjeux de prévention qu'elles impliquent.

**NEW FORMS OF EMPLOYMENT AND WORK ORGANISATION: RISKS AND PREVENTION CHALLENGES** – *The last forty years have seen profound changes in employment and work, with, on the one hand, the emergence of new job statuses departing from the typical permanent work contract, and on the other hand, the advent of new organisational and managerial models. This article reviews the characteristics of these transformations and the related occupational risks, in order to better apprehend the prevention challenges that come with them.*

ÉMILIE AUNIS  
INRS,  
département  
Homme  
au travail

### Quelles sont les caractéristiques de ces nouvelles formes d'emploi et d'organisation ?

Le développement des formes atypiques d'emploi est le produit de plusieurs tendances de fond (Cf. Tableau 1) :

- une première évolution, centrale, correspond à l'introduction croissante d'un ou plusieurs tiers dans la relation d'emploi traditionnellement binaire

« salarié/employeur » : intérim, portage salarial<sup>1</sup>, sous-traitance, groupements d'employeurs, entrepreneuriat salarié au sein de coopératives d'activité et d'emploi<sup>2</sup> ;

- une deuxième évolution se manifeste dans la transformation des temporalités du travail avec, d'une part, un raccourcissement de la relation d'emploi (multiplication des contrats courts,

FORMES D'EMPLOI	EFFECTIFS (date initiale) <sup>*</sup>	EFFECTIFS (date finale)	TAUX DE VARIATION
Population active	23 804 000	30 093 000	+ 26 %
CDI (1982-2021)	17 509 000	20 443 000	+ 16 %
CDD (1982-2021)	939 000	2 147 100	+ 128 %
Intérim (1982-2021)	102 000	561 500	+ 450 %
Portage salarial (2008-2018)	22 000	86 000	+ 290 %
Sociétés coopératives ouvrières de production (SCOP) (2000-2022)	32 045	72 842	+ 127 %
Coopératives d'activité et d'emploi (CAE) (2000-2021)	146	7 923	+ 5 326 %
CDI intérimaire (2014-2020)	883	48 825	+ 5 439 %

Sources : Insee – Enquête emploi, 1982-2021, Dares, DGEFP (Délégation générale à l'emploi et à la formation professionnelle), FEPS (Fédération des entreprises de portage salarial), SCOP.

\* L'absence de source unique de données implique des repères temporels différents selon les formes d'emploi ; les dates « initiale » et « finale » sont à retrouver dans la colonne de gauche pour chacune des formes considérées.

↑ TABLEAU 1 Évolutions des effectifs salariés selon les formes d'emploi.



↓ **TABLEAU 2**  
Formes atypiques  
d'emploi et risques  
professionnels<sup>A</sup>.

CDD, CDIC – CDI de chantier, CDDU – contrat à durée déterminée d'usage<sup>3</sup>) et, d'autre part, des changements en matière de temps de travail (temps partiel, horaires atypiques, travail de nuit, forfaits jour) ;

• enfin, un troisième changement, profond, se

dessine dans l'émergence de formes d'emploi hybrides situées entre le salariat et l'indépendance (portage salarial, entrepreneur salarié au sein de coopératives d'activité et d'emploi<sup>4</sup>) et le renouveau récent du travail indépendant (microentreprise, travailleurs de plateformes numériques).

	FORMES D'EMPLOI	CARACTÉRISTIQUES INHÉRENTES AUX FORMES D'EMPLOI SUSCEPTIBLES D'INFLUENCER LA SURVENUE DE RISQUES PROFESSIONNELS <sup>B</sup>	RISQUES PROFESSIONNELS	
			IDENTIFIÉS	HYPOTHÉTIQUES <sup>C</sup>
	<b>Intérim</b>	Relation d'emploi multipartite, variation des lieux et des activités de travail, assignation aux tâches pénibles (exemples : positions de travail douloureuses, exposition à des bruits intenses ou des gestes répétitifs) et dangereuses, moindre insertion dans les collectifs de travail, moindre autonomie, moindre formation (à l'activité, à la santé et sécurité), horaires variables, insécurité de l'emploi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risques physiques, troubles musculosquelettiques (TMS)</li> <li>• Risques d'accidents accrus</li> <li>• Risques psychosociaux (RPS) accrus</li> <li>• Risques inhérents aux secteurs d'activité mobilisant cette forme d'emploi (BTP, industrie)</li> </ul>	–
	<b>CDI intérimaire<sup>D</sup></b>	Relation d'emploi multipartite, variation des lieux et activités de travail, sécurité de l'emploi	Absence de données	Risques similaires à l'intérim du fait de facteurs de risques similaires et/ou risques mieux prévenus du fait de la sécurité de l'emploi et de politiques de prévention durables ?
	<b>Contrats courts</b>	Imprévisibilité de l'emploi et/ou cumul d'emplois, moindre formation, imprévisibilité des horaires, intensification du travail	Stress, pression au travail Risques physiques	Risques d'accidents accrus ?
	<b>Sociétés coopératives ouvrières de production (SCOP)<sup>E</sup></b>	Responsabilisation des travailleurs (salarié-associé), brouillage des frontières vie privée et vie professionnelle, collectifs de travail, culture de prévention, gouvernance partagée, conflits éthiques	RPS : surinvestissement au travail, stress, surengagement et épuisement professionnel	–
	<b>Coopératives d'activité et d'emploi (CAE)</b>	Autonomie, dépendance économique, insécurité de l'emploi, fragilité des collectifs, individualisation du travail, insécurité de l'emploi, prévention dévolue aux travailleurs, isolement, projet émancipateur, collectif et gouvernance partagée, accompagnement collectif	RPS : surinvestissement au travail, stress, surengagement et épuisement professionnel	Sinistralité accrue liée à la pluralité des métiers et des lieux d'exercice de l'activité ? TMS et/ou risques d'accidents accrus en lien avec le surinvestissement favorable aux conduites à risques ?
	<b>Portage salarial</b>	Relation d'emploi multipartite, multiplication des lieux de travail, dépendance économique, isolement, autonomie	Absence de données	Dilution des frontières vie privée – vie professionnelle ? Intensification du travail ? Surengagement et burn-out ?
	<b>Groupements d'employeurs</b>	Isolement et fractionnement des collectifs de travail, alternance entre entreprises, diversité des lieux de travail, intensification du travail, moindre maîtrise des activités de travail, stabilité de l'emploi	Absence de données	Risques similaires à l'intérim du fait de la relation multipartite (variation des lieux et des activités de travail) ? • RPS, TMS, accidents du travail accrus ? • Facteurs protecteurs liés à la stabilité de l'emploi ?

A. Les tableaux 2 et 3 font un état des lieux des facteurs de risques et/ou protecteurs ainsi que des risques auxquels sont exposés les travailleurs selon les formes d'emploi et d'organisation à partir d'une revue de littérature recensant des travaux empiriques ayant porté sur ces questions.

B. Ces différentes caractéristiques sont inhérentes à la forme d'emploi (Cf. Tableau 2) ou organisationnelle (Cf. Tableau 3) considérée, elles vont influencer la survenue de risques professionnels. Certaines dimensions organisationnelles peuvent, selon leurs modalités de mise en œuvre, se traduire comme facteurs protecteurs ou facteurs de risques, c'est tout particulièrement le cas de l'autonomie qui, si elle est imposée aux travailleurs ou fictive, peut produire des situations d'intensification du travail, de stress chez les travailleurs, tandis que les situations d'autonomie « réelle » (latitude décisionnelle, autonomie procédurale) sont susceptibles d'être des facteurs protecteurs et de diminuer les situations de stress.

C. Plusieurs formes d'emploi et d'organisation n'ont pas ou peu fait l'objet d'analyses portant spécifiquement sur les risques professionnels. Les risques « hypothétiques » désignent ceux dont on peut faire l'hypothèse à partir des travaux déjà existants portant, de façon plus générale, sur les conditions de travail.

D. Les cellules du tableau en jaune renvoient à des hypothèses élaborées par l'auteur et/ou la littérature mais qui doivent encore être testées par le biais d'enquêtes empiriques.

E. Le cas singulier des coopératives combine à la fois des statuts d'emploi spécifiques (salarié associé, entrepreneur salarié) et des modes d'organisation particuliers (gouvernance partagée, association des travailleurs au capital de l'entreprise). Ces formes d'entreprises particulières ont été placées ici pour mettre en exergue leurs spécificités sur le plan de l'emploi, particulièrement le cas de l'entrepreneur salarié et de la relation tripartite, qui prévaut au sein des coopératives d'activité et d'emploi.

Les évolutions des formes d'emploi en termes d'effectifs salariés mettent en exergue un recours croissant aux formes atypiques d'emploi. Entre 1982 et 2021, les effectifs de salariés en CDD ont été multipliés par 2,3 et ceux des intérimaires par plus de 5. En parallèle, les effectifs d'entrepreneurs salariés au sein des coopératives d'activité et d'emploi ainsi que ceux des salariés en CDI intérimaire ont connu de très forts taux de croissance, même si cette augmentation s'explique aussi par le caractère très récent de ces statuts, qui implique des effectifs restreints. Si la croissance des formes atypiques d'emploi ne doit pas masquer le fait que le CDI reste la forme d'emploi majoritaire (et concerne 75 % de la population active et 87 % de la population salariée), l'observation des flux de main-d'œuvre montre que le passage du CDD vers le CDI, et plus largement des contrats précaires vers l'emploi stable, est de moins en moins assuré.

Les transformations de l'organisation du travail sont quant à elles caractérisées par le développement de plusieurs dimensions structurelles : flexibilité, polyvalence, autonomie, participation et implication subjective des travailleurs. Depuis la rationalisation de la production, introduite par le taylorisme (hyperspécialisation des tâches, division horizontale et verticale du travail, contrôle des temps) à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et poursuivie dans les modèles « fordiste » (déclinaison du taylorisme, augmentation des salaires ouvriers pour accroître la consommation) et « toyotiste » (processus standardisés, amélioration continue, chasse aux gaspillages, implication des travailleurs), les modes d'organisation du travail ont largement évolué, donnant aujourd'hui naissance à des formes organisationnelles émergentes.

De nouvelles modalités organisationnelles et managériales se sont développées, afin de satisfaire les exigences du marché en matière de compétitivité, supposant des entreprises réactives et des travailleurs adaptables, mais aussi en réponse aux critiques de déshumanisation du travail formulées à l'égard du taylorisme. Horizontalité des rapports sociaux, développement de l'autonomie des travailleurs, gouvernance partagée sont autant de dimensions revendiquées au sein de différents types d'organisation qui tendent à émerger depuis (*lean management*<sup>5</sup>, holocratie, sociocratie, entreprise libérée, organisation opale<sup>6</sup>, etc.) et visent à s'éloigner des modèles mécanistes antérieurs<sup>7</sup>.

### Quels sont les risques professionnels ?

Du fait de la diversité de leurs caractéristiques, les nouvelles formes d'emploi et d'organisation du travail présentent des effets différenciés sur la survenue de risques professionnels<sup>8</sup> (Cf. Tableaux 2 et 3). Selon les cas de figure, elles peuvent générer :

- des risques accrus : notamment l'accroissement sensible des risques psychosociaux (liés entre autres à l'isolement, au surengagement...), mais aussi des accidents du travail en lien avec l'insécurité d'emploi croissante, la déresponsabilisation des donneurs d'ordre, le défaut de sensibilisation et de formation des travailleurs en situation d'emploi atypique... ;
- des risques en baisse : l'hypothèse, qui reste à prouver, est formulée à l'égard des organisations qui octroient une certaine autonomie et des marges de manœuvre à leurs salariés dans la manière de réaliser leur travail, ou qui promeuvent des prises de décisions partagées, dimensions qui peuvent permettre de développer

↓ **TABLEAU 3**  
Formes d'organisation et risques professionnels.

		CARACTÉRISTIQUES INHÉRENTES AUX FORMES D'EMPLOI SUSCEPTIBLES D'INFLUENCER LA SURVENUE DE RISQUES PROFESSIONNELS	RISQUES PROFESSIONNELS	
			IDENTIFIÉS	HYPOTHÉTIQUES
FORMES D'ORGANISATION	<b>Taylorisme Fordisme</b>	Travail à la chaîne, parcellisation des tâches, contrôle du travail, fortes cadences, travail répétitif	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risques physiques, troubles musculosquelettiques (TMS).</li> <li>• Risques psychosociaux (RPS) : stress, intensification, perte de sens et de savoir-faire.</li> </ul>	–
	<b>Toyotisme Lean management</b>	Intensification, contraintes de rythme, rotation des tâches, gestion de la qualité (autocontrôle et normes précises), polyvalence et flux tendus, moindres marges d'autonomie ou autonomie accrue selon les modalités de mise en œuvre, multiples contraintes de rythme, responsabilisation, travail en équipe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risques physiques, troubles musculo-squelettiques (TMS).</li> <li>• Risques psychosociaux (RPS) : stress, intensification.</li> </ul>	–
	<b>Agilité Entreprise libérée Holocratie Sociocratie Organisation opale</b>	Gouvernance partagée, autonomie, importance des collectifs, sens et satisfaction au travail, enrôlement des subjectivités, accroissement des responsabilités dévolues aux travailleurs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• RPS : intensification, stress, surcharge de travail, surinvestissement, surengagement (pour les entreprises libérées).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• RPS liés à la surresponsabilisation des travailleurs (pour les organisations encore peu étudiées type holocratie, sociocratie, opales organisations)</li> </ul>



Société coopérative de production spécialisée dans l'usinage de précision. L'ergonomie des postes de travail est prise en compte; ici, un bureau à hauteur variable.

- des savoir-faire de prudence et favorables au bien-être au travail ;
- des risques nouveaux et émergents : un rapport de l'OIT<sup>9</sup> fait l'hypothèse de « risques nouveaux et émergents », dont il conviendrait de délimiter plus clairement les contours par des travaux empiriques. Si des risques nouveaux peuvent survenir dans certains secteurs, par exemple du fait de l'utilisation de nouveaux produits chimiques, sur le plan des organisations, il est plus souvent question d'intensification de risques déjà existants (stress, surengagement). De ce fait, les transformations organisationnelles semblent davantage soulever de nouveaux enjeux en matière d'organisation et de pratiques de prévention que de nouveaux risques à proprement parler.

### Quels sont les enjeux de prévention ?

Les nouvelles formes d'emploi et d'organisation sont susceptibles de produire des risques professionnels accrus selon leurs caractéristiques et leurs

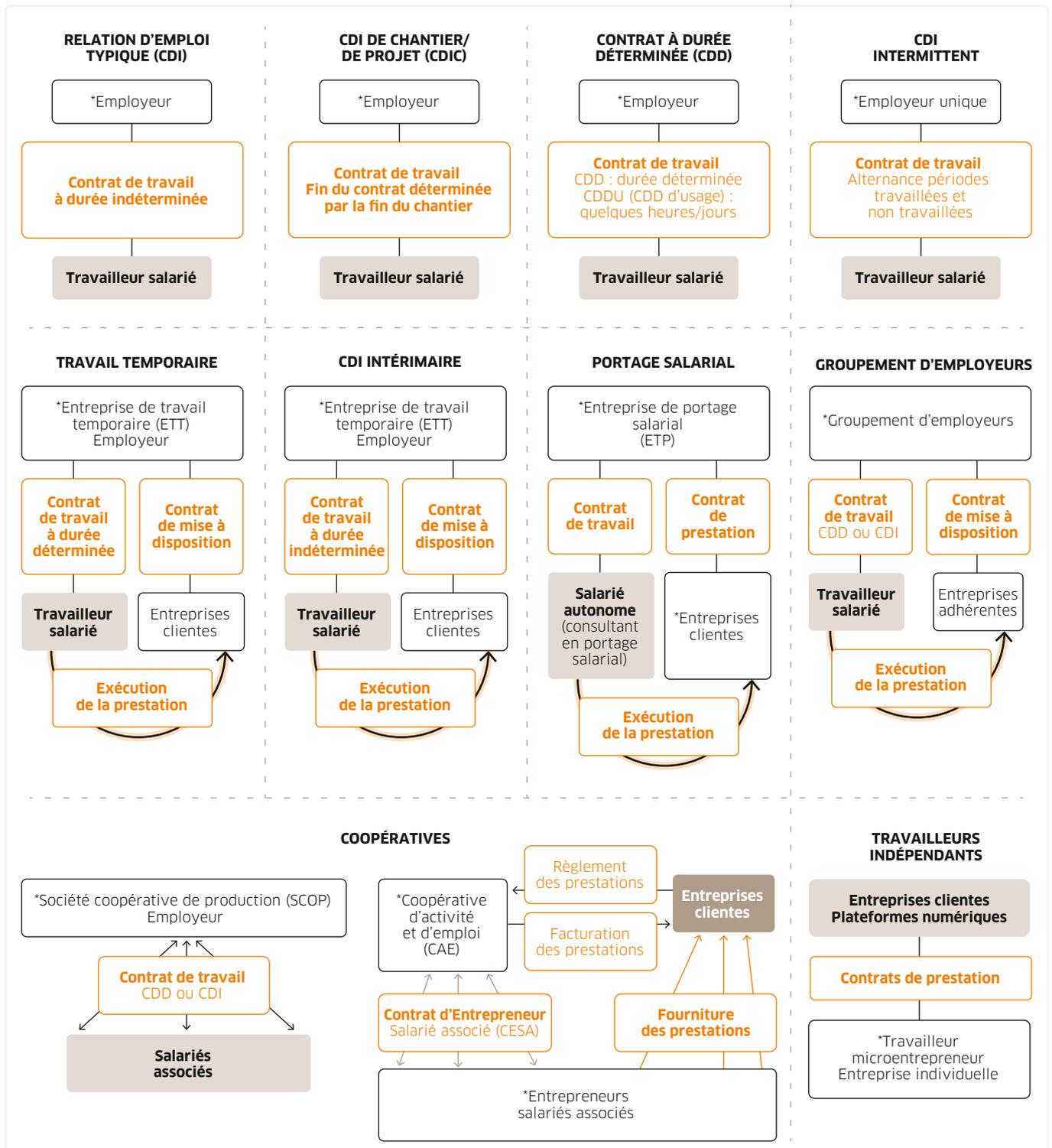
modalités de mise en œuvre effective. À ce titre, elles interrogent le champ de la prévention à plusieurs niveaux : celui des acteurs, des pratiques et des outils mobilisés.

Selon l'article L. 4121-1 du Code du travail, l'employeur est garant de la santé (physique et mentale) et de la sécurité des travailleurs. Il est ainsi l'acteur principal de la prévention des risques professionnels, même s'il s'appuie sur une pluralité d'acteurs (Comité social et économique, représentants de proximité, services de prévention et de santé au travail, intervenants en prévention des risques professionnels, salariés<sup>10</sup>, etc.).

Dans le cadre de la relation d'emploi typique, l'unicité de l'employeur rend possible une gestion organisée et centralisée de la prévention des risques professionnels, malgré la pluralité d'acteurs impliqués. Or, les écarts introduits par les formes atypiques d'emploi par rapport à l'emploi salarial en CDI – pluralité des entreprises impliquées dans la relation d'emploi et pluralité des lieux d'exercice



© Gael Kerbaol / INRS, 2020



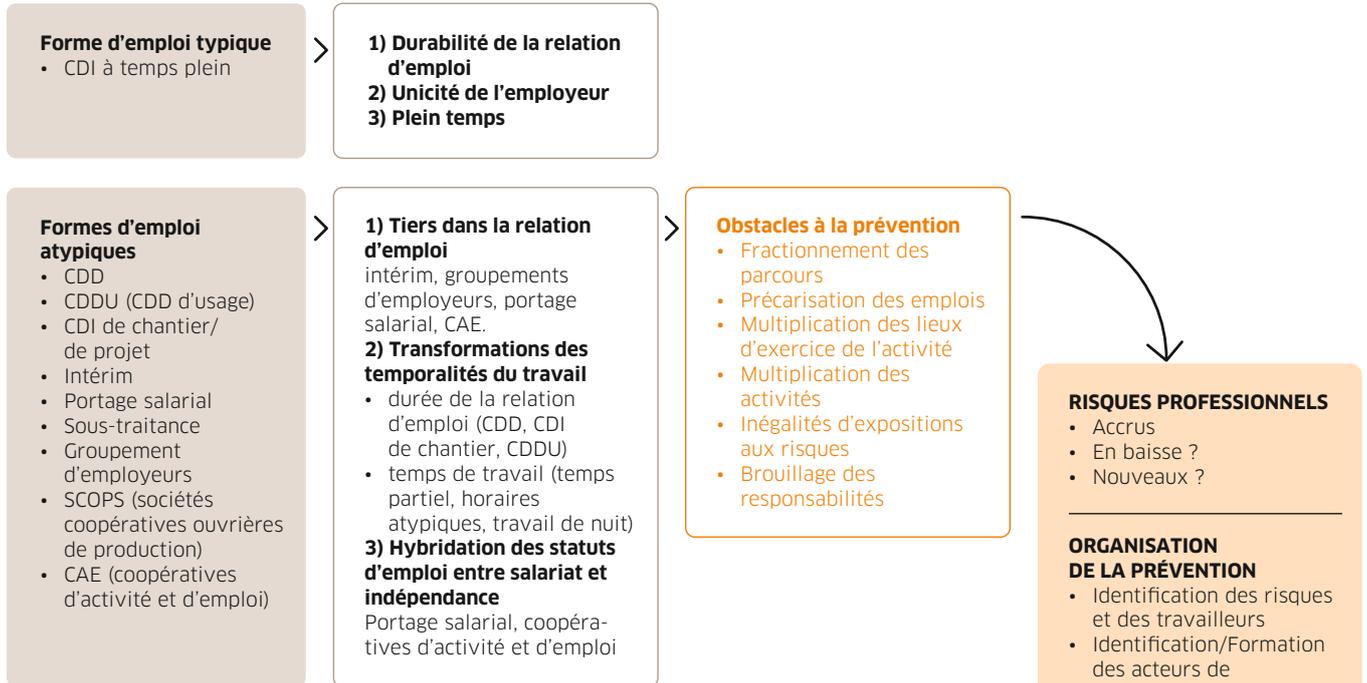
Légende :

\*En charge de la prévention des risques  
Type de contrat/relation

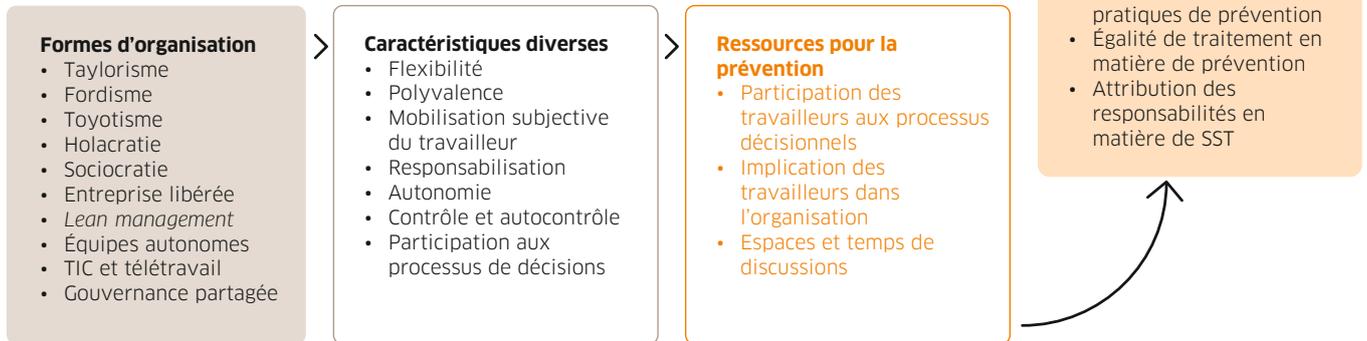
↑ FIGURE 1 Relations d'emploi, types de contrats et responsabilité de la prévention des risques professionnels.



DÉVELOPPEMENT DE NOUVELLES FORMES D'EMPLOI



DÉVELOPPEMENT DE NOUVELLES FORMES D'ORGANISATION



↑ FIGURE 2  
 Nouvelles formes d'emploi et d'organisation et enjeux pour la prévention des risques professionnels.

de l'activité – constituent autant d'éléments susceptibles d'avoir un impact sur la question de la responsabilité en matière de prévention (Cf. Figure 1). Les relations multipartites sont celles qui interrogent le plus le champ de la prévention des risques professionnels. En effet, l'introduction d'un ou plusieurs tiers dans la relation d'emploi impose d'identifier le ou les acteurs en charge de la prévention des risques professionnels et les conditions de sa mise en œuvre effective. Outre la question des acteurs, ce sont aussi les pratiques de prévention des risques professionnels qui peuvent se heurter à différents obstacles induits par les nouvelles formes d'organisation et d'emploi. En effet, du fait de la complexification croissante des formes d'organisation et d'emploi, qui vont souvent de pair avec un fractionnement des parcours et une précarisation des emplois,

l'association entre santé-sécurité et travail est rendue encore moins aisée (les parcours professionnels fragmentés ne facilitent pas le suivi médical des travailleurs ni l'association entre les risques liés aux postes actuels et antérieurs occupés et la santé des travailleurs). Par ailleurs, la moindre insertion des travailleurs dans les collectifs de travail, le « turn-over » accru, la multiplicité des lieux d'exercice de l'activité (CAE, intérim, sous-traitance), voire la multiplicité des activités (portage salarial, coopératives d'activité et d'emploi) rendent moins aisé le repérage par les acteurs de la prévention des risques et des travailleurs concernés (les travailleurs en contrat atypique bénéficient moins souvent d'une visite à l'embauche et ne sont trop souvent identifiés par les services de prévention et santé au travail que lors des constats d'atteintes à la santé).

Enfin, dans certains cas, les outils de prévention usuels, comme le document unique d'évaluation des risques professionnels (DUERP) sont aussi plus difficiles à utiliser dans les entreprises mobilisant des salariés autonomes qui exercent dans des secteurs d'activités multiples (CAE et portage salarial). Face à ces transformations des formes d'organisation et d'emploi, une question se pose : comment assurer une prévention efficace pour tous les travailleurs qui tiennent compte des formes d'organisation et/ou d'emploi dans lesquels ils se trouvent (Cf. Figure 2) ?

Le Code du travail prévoit que la prévention des risques professionnels s'applique à l'ensemble des travailleurs. À ce cadre général s'ajoutent des dispositions spécifiques à destination de certaines catégories de travailleurs vulnérables : les travailleurs en contrat à durée déterminée et les intérimaires<sup>11</sup>, les jeunes travailleurs<sup>12</sup>, les femmes enceintes<sup>13</sup>, les nouveaux embauchés<sup>14</sup>, les travailleurs handicapés<sup>15</sup>.

Malgré cet encadrement juridique de la prévention impliquant à la fois une prévention universelle et des dispositions spécifiques pour les salariés les plus vulnérables, plusieurs constats invitent à la vigilance quant à l'assurance d'une prévention et adaptée aux situations d'emploi et d'organisation dans lesquelles se trouvent les différents travailleurs :

- **les salariés sont plus ou moins soumis aux risques professionnels** selon le secteur et le type d'activité mais aussi selon leur statut d'emploi et/ou

le mode d'organisation du travail dans lequel ils se trouvent ;

- **les nouvelles formes d'emploi touchent inégalement les différentes catégories de main-d'œuvre** (catégorie socio-professionnelle, genre, âge, nationalité, etc.) du fait de la segmentation du marché du travail qui conduit à apparier statuts d'emploi atypiques et catégories de main-d'œuvre fragiles ;
- **des inégalités sont observées en matière de prévention** : les travailleurs inscrits dans des formes d'emploi atypiques (notamment CDD, CDI fragilisés, intérim) bénéficient d'une moindre formation quant au métier et à la prévention des risques, d'une moindre insertion dans les collectifs de travail ainsi que parfois d'une moindre prévention.

### Conclusion

Les nouvelles formes d'emploi et d'organisation se révèlent porteuses de difficultés qui se cumulent : d'une part, elles nécessitent une vigilance accrue en ce qu'elles peuvent être productrices de risques, d'autre part, une partie de leurs caractéristiques propres tend à freiner le travail de prévention. De manière générale, les nouvelles formes d'emploi et d'organisation complexifient l'établissement des liens entre santé-sécurité et travail, de même que l'identification des risques et celle des travailleurs exposés. Une question se pose alors : l'organisation de la prévention doit-elle être repensée pour mieux appréhender ces transformations ou bien faut-il imaginer une mobilisation renforcée



Plateforme spécialisée dans la livraison de colis aux particuliers. Un plan d'action en prévention a permis de surélever le tapis sur lequel défilent les colis, de réaménager les fourgons et de mettre en place des sessions de formation.



des ressources déjà existantes ? La question reste ouverte et mérite d'être abordée avec l'appui de recherches empiriques et en collaboration avec les différents acteurs de la prévention. Pour l'heure, une partie des nouvelles formes d'emploi (entrepreneuriat salarié, CDI intérimaire, portage salarial, hors CDD et intérim) ainsi que les formes d'organisation les plus récentes (holocratie, sociocratie,

entreprise libérée, etc.) restent statistiquement marginales. Les efforts semblent ainsi devoir se concentrer sur les formes d'emploi atypiques qui concernent le plus de travailleurs et pour lesquelles on connaît d'ores et déjà la sinistralité, telles que l'intérim et les contrats courts, même s'il convient de rester vigilant face aux évolutions en cours afin d'anticiper les enjeux de prévention à venir. ●

## POUR EN SAVOIR +

- AUNIS E. – *Nouvelles formes d'emploi et d'organisation du travail. Quels enjeux en matière de prévention des risques professionnels ?* INRS, 2023, coll. Notes scientifiques et techniques, NS 382. Accessible sur : [www.inrs.fr](http://www.inrs.fr)
- CANIVENC S. – *Les nouveaux modes de management et d'organisation. Innovation ou effet de mode ?* La fabrique de l'industrie, 2022.
- COE – *L'évolution des formes d'emploi*, 2014. Accessible sur : <https://www.strategie.gouv.fr/publications/levolution-formes-demploi>
- COUPRIE H., JOUTARD X. – La place des emplois atypiques dans les trajectoires d'entrée dans la vie active. *Revue française d'économie*, 2017, 32 (1), pp. 59-93.
- FOURCADE B. – L'évolution des situations d'emploi particulières de 1945 à 1990. *Travail et emploi*, 1992, pp. 4-19.
- GAZIER B., PICART C., MINNI C. – *Rapport « La diversité des formes d'emploi »*. Conseil national de l'information statistique, 2016, 167 p.
- GROSJEAN V., LEÏCHLE J., THÉVENY L. – Les nouvelles formes d'organisation du travail. Opportunités ou illusions ? *Hygiène & sécurité du travail*, 2016, 245, 4 p. Accessible sur : [www.inrs.fr](http://www.inrs.fr)
- KORNIG C., MICHON F. – *Les formes particulières d'emploi en France : un état des lieux*. HALSHS, 2010, 52 p.
- LAPOIRE-CHASSET M., CLERC-URMES I., WILD P., TISSOT C. – Expositions professionnelles et santé des travailleurs intérimaires. *Références en santé au travail*, 2022, pp. 63-76. Accessible sur : [www.inrs.fr](http://www.inrs.fr)
- LEROUGE L. – Les effets de la précarité du travail sur la santé : Le droit du travail peut-il s'en saisir ? *Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé*, 2009, 23 p.
- MANDL I. – *New forms of employment: 2020 update*. Eurofound, 2020, 72 p.
- ORGANISATION INTERNATIONALE DU TRAVAIL (OIT) - *La sécurité et la santé au cœur de l'avenir du travail : mettre à profit 100 ans d'expérience*, 2019. Accessible sur : [https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---dgreports/---dcomm/documents/publication/wcms\\_686763.pdf](https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---dgreports/---dcomm/documents/publication/wcms_686763.pdf)
- PREVOST-CARPENTIER M., VAN DE WEERDT C. – Nouvelles formes d'emploi et de travail : les comprendre pour les positionner comme enjeu de prévention. *Hygiène & sécurité du travail*, 2019, 255, 5 p. Accessible sur : [www.inrs.fr](http://www.inrs.fr)
- QUINLAN M. – The effects of non-standard forms of employment on worker health and safety. *Conditions of work and employment series*, 2015, 67, 46 p.
- ROUXEL C. – *Conditions de travail et précarité dans l'emploi. Premières synthèses*. Dares, 2009, 7 p.
- SUPIOT A. – Les nouveaux visages de la subordination. *Droit social*, 2000, pp. 131-145.

1. Le portage salarial est une relation contractuelle tripartite qui lie un travailleur à une entreprise de portage salarial par un contrat de travail à durée déterminée (CDD) ou indéterminée (CDI) et des entreprises clientes pour lesquelles ce dernier effectue des prestations. Les salariés portés trouvent eux-mêmes leurs missions, bénéficient de la protection du salariat sans avoir de lien de subordination à l'employeur et peuvent quitter l'entreprise de portage salarial à la fin d'une mission.
2. L'entrepreneuriat salarié est une forme hybride d'emploi située entre l'indépendance et le salariat qui s'exerce au sein d'entreprises spécifiques : les coopératives d'activité et d'emploi (CAE) multisectorielles ou spécialisées. Les CAE fédèrent des travailleurs sous statut d'entrepreneurs-salariés qui exercent leur propre activité de manière autonome tout en étant rattachés à l'organisation coopérative par leur qualité de membres et par un contrat leur conférant la protection du salariat. Ils exercent leur activité selon les modalités négociées avec leurs clients, dans des lieux divers : à domicile, chez le client ou encore dans des espaces de coworking.
3. Le contrat à durée déterminée d'usage (CDDU) est un contrat à durée limitée spécifique, réservé à certains secteurs d'activité (hôtellerie-restauration, spectacles, etc.).
4. Le portage salarial et l'entrepreneuriat au sein de coopératives d'activité partagent les caractéristiques propres à la première et à la troisième évolution. Ces trois tendances ne sont pas exclusives les unes des autres, une forme d'organisation peut combiner des dimensions inhérentes à chacune d'entre elles.
5. Voir : <https://www.inrs.fr/risques/lean-management/ce-qu-il-faut-retenir.html>
6. Voir : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Entreprise\\_opale](https://fr.wikipedia.org/wiki/Entreprise_opale)
7. Les caractéristiques des nouvelles formes d'organisation et leurs impacts sont plus longuement détaillés dans une note scientifique et technique de l'INRS (NS 382). Sur ces questions, se référer également aux travaux de V. Grosjean et de S. Canivenc (voir rubrique « Pour en savoir plus »).
8. Cet article s'inscrit dans la lignée de l'article ; PREVOST-CARPENTIER M., VAN DE WEERDT C. – Nouvelles formes d'emploi et de travail : Les comprendre pour les positionner comme enjeu de prévention, INRS. *Hygiène & sécurité du travail*, 2019, 255, 5 p. Il vise à poursuivre le positionnement par l'analyse d'une revue de littérature recensant les résultats de travaux empiriques sur ces questions afin de faire apparaître les risques déjà identifiés ou hypothétiques et d'identifier les caractéristiques particulières de ces transformations qui influencent la prévention des risques professionnels.
9. Voir : OIT (2019). Cf. Pour en savoir plus.
10. Voir sur le site de l'INRS : Acteurs de la prévention – Démarches de prévention. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/demarche/acteurs-prevention/introduction.html>
11. Voir : <https://www.inrs.fr/demarche/salaries-interimaires/ce-qu-il-faut-retenir.html>
12. Voir : <https://www.inrs.fr/demarche/jeunes-travailleurs/ce-qu-il-faut-retenir.html>
13. Voir : <https://www.inrs.fr/demarche/femmes-enceintes/ce-qu-il-faut-retenir.html>
14. Voir : <https://www.inrs.fr/demarche/nouveaux-embauches/ce-qu-il-faut-retenir.html>
15. Voir : <https://www.inrs.fr/media.html?reflNRS=TS789page44>

# Et si on pensait aux risques professionnels dès la conception des lieux de travail ?



**Circulation, organisation, maintenance,  
éclairage, ventilation...**

La prévention des risques au travail est plus efficace et moins coûteuse lorsqu'elle est prise en compte dès les premières étapes du projet.

Pour en savoir plus, rendez-vous sur

**[www.inrs.fr/clst](http://www.inrs.fr/clst)**

## Actualité juridique

# FAUTE INEXCUSABLE: L'EMPLOYEUR NE PEUT S'AFFRANCHIR DE SON OBLIGATION DE SÉCURITÉ EN PRÉVOYANT QU'UN TIERS ASSURERA CETTE RESPONSABILITÉ

*Cour de cassation (2<sup>e</sup> chambre civile), 16 novembre 2023, n°21-20.740.*

*Accessible sur : [www.legifrance.gouv.fr](http://www.legifrance.gouv.fr)*

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

**D**ans un arrêt rendu le 16 novembre 2023, la deuxième chambre civile de la Cour de cassation rappelle que le manquement à l'obligation de sécurité et de protection de la santé à laquelle l'employeur est tenu envers le travailleur a le caractère de 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<sup>1</sup>. L'employeur ne peut s'affranchir de son obligation de sécurité par la conclusion d'un contrat prévoyant qu'un tiers assurera cette sécurité.

### Définition de la faute inexcusable

La notion de faute inexcusable a été définie par la jurisprudence. Le Code de la Sécurité sociale précise les conséquences de la reconnaissance d'une faute inexcusable.

Ainsi, en vertu du contrat de travail, l'employeur est tenu à une obligation de sécurité envers le salarié. Le non-respect de cette obligation constitue, en cas d'accident du travail, une faute inexcusable, dans la mesure où :

- l'employeur avait conscience, ou, en raison de son expérience et de ses connaissances techniques, aurait dû avoir conscience du danger encouru par les salariés ;
- et ayant cette conscience du danger, l'employeur n'a pas pris les dispositions nécessaires pour préserver les salariés<sup>2</sup>.

La faute inexcusable repose donc sur deux éléments : la connaissance du danger, d'une part, et l'absence de mesures de prévention et de protection

nécessaires pour préserver la santé et la sécurité des salariés, d'autre part.

Le manquement à l'obligation de sécurité n'est imputable à l'employeur que s'il est démontré qu'il a eu (ou aurait dû avoir) conscience du danger auquel il exposait son personnel, et qu'en dépit de ce fait, il n'a pas pris les mesures nécessaires pour préserver la santé et la sécurité des travailleurs. La jurisprudence n'exige pas la connaissance effective par l'employeur de la situation de mise en danger, mais la conscience qu'il doit ou devrait avoir du danger.

### Enjeux du contentieux pour faute inexcusable

L'existence d'une faute inexcusable de l'employeur constitue une exception au principe de réparation forfaitaire des accidents du travail qui ne compense que la perte de salaire de la victime, la prise en charge des soins et la diminution de la capacité de travail. Elle permet à la victime ou à ses ayants droit d'obtenir une majoration de la rente et une réparation complémentaire du préjudice subi.

La majoration de la rente d'incapacité allouée est payée par la caisse primaire d'assurance maladie qui en récupère le montant, par le biais de l'imposition d'une cotisation supplémentaire, à l'employeur. Par ailleurs, la victime peut obtenir l'indemnisation de préjudices extrapatrimoniaux (préjudices physiques et moraux, perte d'une chance de promotion professionnelle, préjudice esthétique et d'agrément...).

Cette indemnisation est assurée par la caisse qui exerce ensuite un recours en remboursement auprès de l'employeur<sup>3</sup>.

## Personnes exclues du bénéfice du régime dérogatoire

Le régime dérogatoire du droit commun, qui prévoit une indemnisation forfaitaire et automatique, ou une indemnisation complémentaire en cas de faute inexcusable de l'employeur, est fondé sur un mécanisme prévu par le Code de la Sécurité sociale.

Ce régime ne prévoit cependant pas l'indemnisation de toutes les victimes d'un dommage consécutif à un accident de travail ou une maladie professionnelle ; en effet, seuls peuvent bénéficier de ces dispositions les salariés victimes de l'accident ou de la maladie et, en cas de décès, leurs ayants droit, tel que cela était le cas dans l'affaire présentée dans cet article (Cf. *Encadré*).

En conséquence, l'indemnisation d'autres personnes (proches parents de la victime, par exemple) se fera sur le fondement du mécanisme traditionnel de la responsabilité civile et, en l'occurrence, sur le fondement de la responsabilité extracontractuelle prévue par le Code civil.

Il convient de noter que le régime de droit commun et le régime dérogatoire sont exclusifs l'un de l'autre. La victime ne peut pas choisir entre l'un ou l'autre de ces mécanismes. Selon sa qualité (salarié victime directe, ayants droit ou proches non ayants droit), sa demande relèvera obligatoirement du régime correspondant.

En résumé :

- régime dérogatoire, prévu par le Code de la Sécurité sociale : indemnisation forfaitaire et automatique,

### ENCADRÉ

#### UN ACCIDENT MORTEL À L'ORIGINE DE CET ARRÊT

##### *Faits et procédure*

Dans le cadre du tournage d'une émission de télévision en Argentine, deux hélicoptères transportant des passagers sont entrés en collision, entraînant le décès de dix personnes. Parmi les victimes se trouvait un cameraman, salarié de l'entreprise de production audiovisuelle. L'accident mortel a été pris en charge au titre de la législation professionnelle par la caisse primaire d'assurance maladie (CPAM). Les ayants droit de la victime ont saisi une juridiction chargée du contentieux de la Sécurité sociale, aux fins de reconnaissance de la faute inexcusable de la société de production de l'émission, en sa qualité d'employeur. Les juges du fond ont relevé que la décision d'organiser le vol des deux hélicoptères en formation rapprochée avait été prise par l'employeur, qui souhaitait réaliser des prises de vues dans le cadre du tournage de l'émission. Le vol des hélicoptères transportant des passagers représentait bien un risque, que l'employeur avait choisi de prendre et qui se trouvait à l'origine directe et certaine de la collision entre les appareils, ayant entraîné le décès de la victime.

Ils ont considéré que :

- l'employeur aurait pu prendre des mesures pour préserver les

passagers de l'accident, en excluant la possibilité d'un vol en formation des hélicoptères ou en modifiant leurs trajectoires de vol ;

- en l'absence de vol d'essai sans passagers, de vérification de l'existence d'un moyen de communication entre les aéronefs ou entre ces derniers et le sol, ou de mention d'un risque de collision dans le plan de sécurité et de sûreté, l'employeur n'avait pas pris les précautions qui s'imposaient ;
  - enfin, les sociétés tierces intervenant pour assurer les prestations techniques et de sécurité demeuraient sous la supervision, la direction et le contrôle de l'employeur.
- Pour les juges, l'employeur, qui avait ou aurait dû avoir conscience du danger résultant pour son salarié du vol en formation rapprochée de l'hélicoptère dont il était passager, n'a pas pris les mesures nécessaires pour l'en préserver. Sa responsabilité devait donc être engagée pour faute inexcusable.

##### *Arguments invoqués par l'employeur*

L'employeur indiquait en défense que, n'étant pas un professionnel de l'aviation civile, il n'était pas en mesure d'appréhender lui-même les risques liés à l'utilisation d'hélicoptères, raison pour laquelle il s'était précisément entouré de

professionnels compétents. Il avait conclu un contrat avec une société de production en Argentine, confiant à cette dernière la réalisation de prestations techniques, dans le respect de la réglementation locale en matière de sécurité. Pour les aspects tenant à la sécurité des salariés et des participants au programme, il avait confié à la société et à son dirigeant, hautement spécialisé et expérimenté, une mission complète, afin d'assurer la sécurité du tournage. Enfin, les caractéristiques techniques des hélicoptères et les compétences des pilotes garantissaient un niveau de sécurité optimal, ayant permis une préparation des vols conforme au respect des règles de sécurité. L'employeur estimait donc avoir pris les mesures nécessaires pour assurer la sécurité du tournage, ce qui ne permettait pas de retenir la faute inexcusable à son encontre.

##### *Décision de la Cour de cassation*

Pour la Cour, l'employeur ne peut s'affranchir de son obligation de sécurité par la conclusion d'un contrat prévoyant qu'un tiers assurera cette sécurité. La Cour de cassation en a déduit que l'employeur avait ou aurait dû avoir conscience du danger pour son salarié et n'a pas pris les mesures nécessaires pour l'en préserver, commettant de ce fait une faute inexcusable.



et indemnisation complémentaire en cas de faute inexcusable de l'employeur, des salariés victimes et, en cas de décès, de leurs ayants droit ;

- régime de droit commun, prévu par le Code civil : indemnisation des proches parents de la victime.

### La faute du préposé

#### « substitué dans la direction »

Tel que le précise l'article L. 452-1 du Code de la Sécurité sociale, la responsabilité de l'employeur peut se trouver engagée en raison, non seulement de sa propre faute inexcusable, mais également de celle des personnes « *qu'il s'est substitué dans la direction* ».

Tel que cela ressort de la jurisprudence constante, doivent être considérés comme « *préposés substitués à l'employeur* » les cadres, les chefs de chantiers ou les conducteurs de travaux, les chefs d'équipe, dès lors que l'employeur leur a donné la charge d'assurer, pendant le travail, la sécurité des travailleurs placés sous leurs ordres.

Toutefois, les juges examinent la réalité des prérogatives exercées par le préposé. Ainsi, la Cour de cassation a notamment considéré que le rôle de chef d'équipe, investi d'aucune mission particulière de sécurité, ne suffit pas à considérer ce dernier comme « *substitué de la société, dans la direction d'un chantier* ». Il doit être clairement établi que le préposé est investi d'un pouvoir de direction et d'une mission particulière de sécurité<sup>4</sup>.

Il convient de noter que, selon la jurisprudence, il n'est pas nécessaire, pour être considéré comme « *substitué de l'employeur* », qu'il y ait une délégation de pouvoir : « *L'absence de délégation formelle n'exclut pas la possibilité d'une substitution dans la direction du travail.* » Les magistrats considèrent en effet qu'est un substitué de l'employeur, même en l'absence de délégation de pouvoir, le salarié qui exerce, dans son service, un pouvoir de direction sur un autre salarié dans l'exécution des tâches confiées à celui-ci<sup>5</sup>.

#### Différence entre substitution de l'employeur et délégation de pouvoir

Il convient de ne pas confondre la substitution et la délégation de pouvoir :

- la substitution permet d'engager la responsabilité de l'employeur vis-à-vis de la victime aux termes de l'article L. 452-1 du Code de la Sécurité sociale, en raison non seulement de sa propre faute, mais également de celles des personnes qu'il s'est substituées dans la direction ;
- la délégation de pouvoir est une construction purement jurisprudentielle, partant du constat que dans les grandes entreprises, l'employeur ne peut veiller personnellement et en permanence à la stricte application de la réglementation. Accordée dans un domaine précis, tel que par exemple

la santé et la sécurité, elle consiste à transférer à une personne les pouvoirs et moyens nécessaires pour qu'elle se substitue à l'employeur et veille à sa place à la bonne application des règles dans le domaine visé.

La délégation de pouvoir constitue ainsi un véritable outil d'organisation de la sécurité dans l'entreprise, permettant de choisir un responsable, plus proche du terrain où peuvent intervenir des infractions aux règles de sécurité, et donc plus apte à y remédier.

Plus qu'une possibilité, elle s'impose au chef d'entreprise lorsqu'il ne peut tout contrôler lui-même et l'absence de délégation pourrait être appréciée par les juges comme une négligence coupable.

Parmi les conséquences notables de la délégation de pouvoir, ressort le transfert de l'employeur au délégataire, non seulement de son pouvoir, mais également de sa responsabilité pénale (si les conditions de la délégation sont valablement remplies).

En pratique, les juges s'attachent, au cas par cas, à rechercher quel salarié, au moment de l'accident, exerçait de façon factuelle le pouvoir de direction mettant en jeu la responsabilité de l'employeur.

#### Lien entre faute inexcusable et faute pénale

De façon générale, la faute inexcusable ne s'assimile pas à la faute pénale.

En cas d'accident du travail ou de maladie professionnelle, si l'employeur poursuivi par les juridictions pénales est relaxé, cela n'empêche pas les tribunaux du contentieux de la Sécurité sociale de rechercher les éléments constitutifs d'une faute inexcusable.

Ainsi, par exemple, dans un arrêt du 28 mars 2002, la Cour de cassation<sup>6</sup> retient la faute inexcusable d'un employeur, pourtant relaxé au pénal. En l'espèce, un salarié avait fait une chute mortelle d'un balcon après avoir démonté lui-même le garde-corps. Considérant que le chef d'entreprise n'avait commis aucune faute caractérisée ni aucun manquement délibéré, le juge pénal l'avait relaxé. Toutefois, la Cour de cassation a considéré que le chef de chantier aurait dû intervenir lors du démontage du garde-corps par le salarié pour lui imposer le port d'un harnais de sécurité avant cette opération. La faute commise par le chef de chantier, dont l'employeur est civilement responsable, permet de retenir l'existence d'une faute inexcusable de l'employeur. ●

1. Article L. 452-1 du Code de la Sécurité sociale; Article L. 4121-1 et L. 4121-2 du Code du travail.

2. Cour de cassation, chambre sociale, 28 février 2002, n° 00-13.172.

3. Article L. 452-2 du Code de la Sécurité sociale.

4. Cour de cassation, chambre sociale, 19 octobre 1988, n° 87-12.252.

5. Cour de cassation, chambre sociale, 23 mai 1991, n° 89-18.294; Cour de cassation, 2<sup>e</sup> civile, 18 décembre 2014, n° 13-26.881.

6. Cour de cassation, chambre sociale, 28 mars 2002, 00-11.627.

# FAUTE INEXCUSABLE DE DROIT ET ACCIDENT DE LA ROUTE PROVOQUÉ PAR LA FATIGUE D'UN CHAUFFEUR

*Cour de cassation (2<sup>e</sup> chambre civile), 16 novembre 2023, pourvoi n° 22-10.357.*

Accessible sur : [www.legifrance.gouv.fr](http://www.legifrance.gouv.fr)

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

Un salarié chauffeur livreur a été victime d'un accident de la circulation au volant de son véhicule de travail. L'accident s'est produit alors qu'en roulant à vive allure, il avait franchi une ligne continue pour effectuer un dépassement sans visibilité à l'approche d'un virage. Le matin de l'accident, la victime avait informé son employeur de l'état de fatigue dans lequel elle se trouvait, en raison d'un souci familial.

Le tribunal correctionnel a condamné le salarié conducteur, pour violation manifestement délibérée d'une obligation de prudence ou de sécurité prévue par la loi et par le règlement, et en particulier pour avoir effectué un dépassement sans visibilité suffisante, franchissant à cet effet une ligne continue, le tout à une vitesse excessive, alors que la route était mouillée et composée de nombreux virages. De son côté, la Sécurité sociale a pris en charge l'accident au titre des accidents du travail.

Par la suite, la victime a saisi la juridiction de Sécurité sociale, en vue de faire reconnaître une faute inexcusable de l'employeur. Elle faisait valoir qu'elle avait informé son employeur, le jour de l'accident, qu'elle avait passé la nuit aux urgences pédiatriques avec son enfant et qu'elle se trouvait de ce fait très fatiguée.

Les juges du fond ont accueilli sa demande. La cour d'appel a jugé en particulier que, conformément aux dispositions de l'article L. 4131-4 du Code du travail, la reconnaissance de la faute inexcusable est de droit pour le salarié, dès lors qu'il avait été victime d'un accident après avoir informé l'employeur de son état de fatigue extrême. Pour les juges, la victime avait signalé un risque auquel elle se trouvait exposée, au regard de son poste de chauffeur, et le risque s'était matérialisé car elle avait ensuite eu un accident de la route.

Le chef d'entreprise a formé alors un pourvoi en cassation. Il invoquait le fait que son salarié n'avait pas réellement signalé un risque auquel il était exposé

à son poste de travail. Il avait simplement indiqué qu'il avait peu dormi, en raison d'un souci personnel. Or cet état de fatigue n'avait pas été causé par le non-respect par l'employeur, du temps de repos obligatoire du salarié ou de l'amplitude maximale de travail et donc ne constituait pas un risque auquel l'intéressé se trouvait exposé au regard de son poste de chauffeur.

L'employeur se prévalait également du fait, qu'après avoir été informé de l'état de fatigue de son salarié, il ne l'avait pas contraint à prendre son poste de chauffeur et ce dernier n'avait pas demandé non plus à se retirer de son poste de travail. L'employeur ne pouvait donc se voir imputer une faute inexcusable de droit, alors que le salarié n'avait ni sollicité, ni exercé son droit de retrait. L'employeur faisait valoir en dernier lieu que la faute inexcusable de droit de l'employeur ne peut être retenue que si le risque signalé s'est matérialisé. Or, l'accident de la route avait été provoqué par le comportement fautif du salarié qui avait manifestement violé les règles du code de la route et la cour d'appel n'avait pas établi que c'était la fatigue dont le salarié s'était plaint à son employeur, qui était à l'origine de violation des règles de conduite ayant produit l'accident.

La Cour de cassation rejette le pourvoi et approuve le raisonnement de la cour d'appel. Elle relève que le salarié avait alerté son employeur de son état de fatigue important, lié à l'absence de repos durant la nuit en produisant une ordonnance des urgences pédiatriques de la veille pour son enfant, et des attestations de deux collègues, corroborées par une attestation produite par l'employeur lui-même. Ces éléments caractérisaient bien un signalement à l'employeur d'un risque auquel il se trouvait exposé au regard de son poste de chauffeur. La cour d'appel avait ainsi établi l'existence d'un lien entre la fatigue signalée et les fautes de conduite de la victime à l'origine de l'accident. Pour la Cour de cassation, le fait que le salarié n'ait pas exercé son droit de retrait n'avait pas d'importance, dans ces circonstances. ●



## Dossier

# CONCEPTION DES LIEUX ET SITUATIONS DE TRAVAIL : RÔLE ET APPORTS DE LA SIMULATION

❶ S'appuyer sur la simulation pour concevoir des systèmes de travail

P. 20

❷ Usage de la simulation en prévention primaire : accompagnement de la conception d'un atelier de fabrication de produits à risques

P. 29

❸ Prévenir les risques professionnels par l'usage de la modélisation et de la simulation numérique

P. 37

❹ Les mannequins numériques : des outils de simulation pour la prévention des risques en conception d'équipements de travail

P. 43

❺ La réalité virtuelle : rôle et apports pour la conception sûre des postes et équipements de travail

P. 49

Au cours des projets de conception des lieux et des situations de travail, de très nombreuses questions se posent sur l'utilisation des futurs équipements, la gestion des flux (de matières, d'activités, d'informations, etc.) et l'adaptation des organisations, techniques ou humaines. L'usage de la simulation peut alors être particulièrement pertinent, afin d'élaborer et d'instruire des scénarios ou de trouver des solutions à des problèmes parfois complexes, notamment en termes de prévention des risques professionnels. Quels acteurs impliquer, quels outils utiliser ? Ce dossier se propose d'explorer un certain nombre de situations d'usage et d'outils mis en œuvre dans le cadre de la simulation, avec les personnes intéressées dans l'entreprise : plans, maquettes et prototypes, mannequins et avatars (analogiques ou numériques), logiciels et réalité virtuelle peuvent contribuer à l'amélioration de la conception des futurs lieux, postes ou situations de travail, en prenant en compte les questions de santé et de sécurité au travail.

**DESIGN OF WORKPLACES AND WORK SITUATIONS: THE ROLE AND BENEFITS OF SIMULATION** – *In the process for designing workplaces and work situations, many questions are raised about the future use of the equipment, flows (material, activities, information, etc.) and technical and human organisation. The use of simulation can therefore be particularly useful to plan and select scenarios or find solutions to sometimes complex issues, particularly in terms of occupational risk prevention. Which stakeholders should be involved, what tools to use? This dossier explores some experiments and technology implemented within the context of simulation with relevant people in the company. Plans, mock-ups, prototypes, dummies and avatars (analogue and digital), software and virtual reality can contribute to improving the design of future workplaces, workstations and work situations, taking into account occupational safety and health matters.*

# S'APPUYER SUR LA SIMULATION POUR CONCEVOIR DES SYSTÈMES DE TRAVAIL

L'usage de la simulation dans les milieux professionnels, en particulier au sein des processus de conception des dispositifs techniques (équipements, logiciels, machines, espaces de travail...) et des organisations de travail, s'est largement développé depuis plusieurs années. Que recouvre cette démarche ?

À quoi sert la simulation et comment se déploie-t-elle ? Quelles sont les conditions nécessaires à sa mise en œuvre et quelles formes prend-elle ?

Que produit une simulation et comment s'intègre-t-elle dans les projets de conception ?

Quels sont les acteurs associés à sa mise en œuvre et pour qui est-elle un outil ?

L'objectif de cet article est de proposer un cadre général de ce que recouvre la notion de simulation dans le champ du travail et de proposer ainsi une introduction aux différents articles qui composent ce dossier.

---

ÉRIC  
LIEHRMANN  
INRS,  
département  
Expertise  
et conseil  
technique

---

## Que recouvre la notion de simulation en conception ?

D'un point de vue générique, la simulation peut être définie comme une procédure visant à anticiper le comportement d'un système ou d'un phénomène en faisant varier les actions que l'on peut exercer sur lui et à en déduire ce qui se passerait dans la réalité [1].

Dans le champ de la conception appliquée aux milieux professionnels, la simulation constitue une démarche qui vise à anticiper les conditions d'utilisation des dispositifs techniques conçus (équipement, machine, espace, poste de travail, processus...) dans des configurations variées, afin de définir des caractéristiques permettant leur usage de façon efficace et sûre.

Plusieurs approches peuvent être identifiées concernant l'usage de la simulation en conception, parmi lesquelles deux sont à distinguer : la simulation en ingénierie et la simulation en ergonomie.

### La simulation en ingénierie

La simulation en ingénierie correspond à une reproduction expérimentale d'un phénomène, d'un fonctionnement ou d'un process qui s'appuie sur une représentation modélisée du système à étudier, afin d'aider à la définition de ses caractéristiques futures.

L'objet des simulations en ingénierie est essentiellement du domaine du « prescrit » de la tâche et concerne l'ensemble des dispositifs techniques.

L'ingénieur, dans sa démarche de simulation, construit une représentation de la réalité d'un système technique pour appréhender son comportement futur.

Les formes de ces simulations s'appuient sur des représentations modélisées (souvent, des modèles mathématiques informatisés) de phénomènes techniques qui conduisent à schématiser la réalité, de façon à ne retenir que les éléments significatifs du système à concevoir. D'une façon générale, un modèle comprend les éléments qui constituent le système (les équipements, par exemple) et les règles de leur fonctionnement.

Le principe général de la simulation en ingénierie consiste alors à tester les modèles qui auront été éprouvés préalablement (à partir de calculs théoriques, d'animations graphiques) en leur soumettant des scénarios. Ces scénarios sont constitués d'un ensemble de variables déterminées, dont on fait varier les valeurs, afin d'observer en retour l'évolution dans le temps des états que peut prendre le système. Les résultats des simulations doivent permettre de valider les spécifications techniques des principes de fonctionnement du système et des volumétries associées (dimensions, encombrements...).

### La simulation en ergonomie

La simulation en ergonomie correspond à une mise en situation qui vise à faciliter la projection des travailleurs dans leur travail futur en les invitant



© Hervé Bouet pour l'INRS / 2017

à « jouer » leur propre activité sur un support ou dans un dispositif *ad hoc*, en capacité de rendre compte des caractéristiques du cadre prescriptif en cours de conception [2].

L'objet central travaillé dans le cadre des simulations en ergonomie est celui de l'activité future (« probable » et/ou « possible »). L'ergonome, dans sa démarche de simulation, tente de formaliser les conditions dans lesquelles les travailleurs auront à développer une activité de travail dans un cadre d'objectifs et de production donnés.

Les formes de ces simulations s'appuient souvent sur des supports propices à représenter l'activité de travail : plan 2D, maquette 3D, prototype...

Le principe général de ce type de simulation consiste à inviter les travailleurs à interagir avec les supports de simulation (plan, maquette...) au moyen d'un avatar (représentation personnelle du travailleur lui permettant d'incarner ce personnage en le manipulant). Ces situations de simulation permettent de « jouer » des séquences d'action, face à la survenue d'événements préalablement repérés, sous forme de scénarios [3]. Au cours de séances successives, il est ainsi possible de tester des situations d'action caractéristiques futures (définies

comme des ensembles de déterminants des situations dont la présence va influencer sur la structuration de l'activité) en intégrant les caractéristiques du cadre prescriptif associé à leur travail futur (*i.e.*, les données du projet). Le dispositif de simulation cherche à formuler un pronostic sur l'adaptation des futures situations de travail, au regard des conditions de travail imaginées par le concepteur. Les résultats des simulations doivent ainsi permettre, par itération, de faire évoluer et d'affiner les choix de conception proposés par le concepteur pour aboutir à une solution éprouvée et partagée par l'ensemble des acteurs.

Les formes d'usage de la simulation sont donc variées. Elles dépendent de l'objet que l'on cherche à simuler (une chaîne de montage, le travail, le fonctionnement organisationnel), des techniques mobilisées pour simuler (la reproduction physique ou virtuelle de l'objet), des finalités pour lesquelles on les mobilise (spécifier les caractéristiques d'un dispositif, comprendre et/ou agir sur le réel) et des acteurs qui sont mobilisés pour les mettre en œuvre et qui en sont les porteurs (concepteurs *vs.* ergonomes). Les démarches de simulation en ingénierie et en ergonomie ne sont toutefois pas

Présentation de l'outil d'aide à la conception Mavimplant lors d'une journée d'information de l'INRS aux services de prévention et de santé au travail.



redondantes ou concurrentes mais sont plutôt complémentaires et peuvent se nourrir mutuellement. Les informations issues des simulations d'ingénierie peuvent constituer des données de base utiles à l'élaboration des scénarios de simulations en ergonomie autour des activités futures [4]; les résultats des simulations en ergonomie viennent souvent interroger et enrichir en retour les modèles des concepteurs, largement fondés sur la notion de « moyenne » (intégrant peu les éléments de diversité, comme ceux touchant aux individus, et de variabilité, comme par exemple ceux touchant aux variations de l'état de la matière première au cours des saisons en fonction des conditions climatiques). Bien qu'utile et nécessaire à tout processus de conception des situations de travail, la question de la simulation dans le domaine de l'ingénierie ne sera pas développée dans ce dossier. Dans la suite (i.e., la simulation en ergonomie), est approfondi le lien avec les questions de conception.

↓ FIGURE 1  
Rappel des rôles et missions de chacun des niveaux d'acteurs dans un projet de conception.



### Quels sont les acteurs d'une démarche de simulation ?

Cette question est fortement dépendante de la forme de conduite de projet dans laquelle est intégrée la démarche de simulation et, donc, du cadre dans lequel s'intègre ce projet. Qu'il s'agisse d'un projet de développement informatique, industriel, de conception d'une machine, ou bien encore de conception architecturale, la structure de conduite de projet est différente et ne fait pas appel aux mêmes acteurs ; par exemple, l'architecte en tant que concepteur ne sera présent que dans des projets de cadre bâti. La démarche de simulation doit donc s'adapter à ces contextes particuliers.

Il est toutefois possible de distinguer trois niveaux d'acteurs/fonctions rencontrés habituellement dans les projets de conception. Dans tout projet, il est habituel de différencier la maîtrise d'ouvrage – MOA, la maîtrise d'œuvre – MOE ; et la maîtrise d'usage – MUS. Ces fonctions se différencient quant aux rôles et missions dévolus aux acteurs qui les incarnent (Cf. Figure 1 et Tableau I). Évidemment, ces différences se retrouvent également dans l'usage des démarches de simulation.

- Le maître d'ouvrage (MOA), décideur, parfois chef d'entreprise voire chef de projet, est le destinataire principal des résultats d'une simulation. Ils vont permettre de le conforter ou non dans ses choix et ses décisions structurantes vis-à-vis du projet : aide à la décision quant aux orientations, choix techniques et financiers, choix organisationnels associés... La dynamique sociale (dimension participative, association des différents acteurs de l'entreprise à l'élaboration des choix...) associée à la mise en œuvre d'une démarche de simulation permet au MOA de s'assurer de la qualité de la conduite du projet et à terme de son acceptabilité sociale, gage essentiel de sa réussite.

En contrepartie, le MOA doit s'impliquer dans la démarche de simulation elle-même. C'est lui qui s'assure que les conditions nécessaires à la mise en place du dispositif de simulation puissent être réunies (mise à disposition des ressources humaines, temporelles et matérielles). Il est également le garant de la mise à disposition des éléments d'information liés à sa sphère décisionnelle (connaissance des informations et des données structurantes du projet), éléments qui sont nécessaires à la mise en place de la démarche de simulation (alimentation des scénarios).

- Le maître d'œuvre (MOE), concepteur sous différentes formes (architecte, bureau d'études...), est un interlocuteur incontournable dans le cadre d'une démarche de simulation. C'est avant tout le fournisseur des informations touchant aux

	RÔLES ET MISSIONS DANS LE PROJET EN GÉNÉRAL	RÔLES ET MISSIONS DANS LA DÉMARCHE DE SIMULATION	ATTENTES VIS-À-VIS DE LA DÉMARCHE DE SIMULATION
<b>Maîtrise d'ouvrage</b> « décideur »	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porte la volonté du changement</li> <li>• Fixe les orientations du projet</li> <li>• Décide des choix d'investissement</li> <li>• Coordonne le projet (ex : comité de pilotage)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• S'assure des moyens mis à disposition pour organiser la démarche de simulation</li> <li>• Fournit les éléments et les connaissances du projet utiles à l'élaboration des simulations</li> <li>• Valide les options instruites dans le cadre des simulations</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dispose d'éléments précis pour prendre les bonnes décisions</li> <li>• Réduit l'incertitude liée au projet</li> <li>• Favorise l'acceptabilité sociale du projet</li> </ul>
<b>Maîtrise d'œuvre</b> « concepteur »	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porte la faisabilité du projet</li> <li>• Conduit les études</li> <li>• Conçoit et met en œuvre les décisions prises et les objectifs fixés par la MOA</li> <li>• Garantit les choix au regard des contraintes et moyens associés</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fournit les caractéristiques des dispositifs techniques en cours de conception</li> <li>• Fournit les supports utiles à la simulation (scénarios prescriptifs) : plans, maquettes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peut tester ses solutions pour ne pas se tromper</li> <li>• Vérifie rapidement des hypothèses</li> <li>• Comprend mieux les besoins</li> </ul>
<b>Maîtrise d'usage</b> « utilisateur »	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porte l'expertise de sa propre activité</li> <li>• Participe au diagnostic du fonctionnement</li> <li>• Instruit les choix et éprouve les solutions à partir du point de vue du travail (ex : groupe de travail)</li> <li>• S'approprie le projet et le fait vivre</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teste les choix et solutions proposées en mettant en œuvre les scripts d'usage</li> <li>• Valide/invalidé les solutions envisagées</li> <li>• Propose des scénarios alternatifs sur la base de son expérience</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se projette plus facilement dans la future situation</li> <li>• Valorise et enrichit son expérience</li> <li>• Dispose au final de moyens adaptés</li> </ul>

caractéristiques techniques des nouveaux dispositifs en cours de conception. Ces éléments sont indispensables à la structuration du dispositif de simulation (éléments permettant de définir des scénarios de prescription). Il fournit en particulier les éléments descriptifs du futur dispositif (caractéristiques dimensionnelles...) voire des représentations graphiques (dessins, plans...) nécessaires à la démarche de simulation.

Le MOE est en retour le destinataire des résultats de la démarche de simulation (remontée des difficultés rencontrées ou sur la pertinence des choix techniques proposés) qu'il va s'approprier et intégrer sous forme itérative au processus de conception (modifications techniques successives apportées au projet qui tiennent compte des évolutions souhaitables).

Il apparaît pertinent que le maître d'œuvre participe directement au travail de simulation (présence dans les séances de travail) afin de pouvoir mieux appréhender les écarts ou les difficultés rencontrés dans l'usage projeté des solutions techniques qu'il propose. C'est l'occasion de mettre en place des échanges directs avec les utilisateurs en facilitant la confrontation des points de vue.

- Le maître d'usage (MUS), l'utilisateur, constitue une autre partie prenante essentielle d'une démarche de simulation. En résumé, une démarche de simulation ne peut être mise en œuvre sans la participation des utilisateurs (les

travailleurs en l'occurrence) qui, de par leur expérience et leur vécu des conditions réelles de réalisation du travail, sont les seuls à même de pouvoir éprouver réellement les solutions de conception des futures situations.

La mobilisation de leurs savoir-faire d'usage aux cours des séances de simulation est centrale et permet de tester les différents scénarios, ainsi que d'envisager des solutions alternatives face aux éventuels problèmes rencontrés.

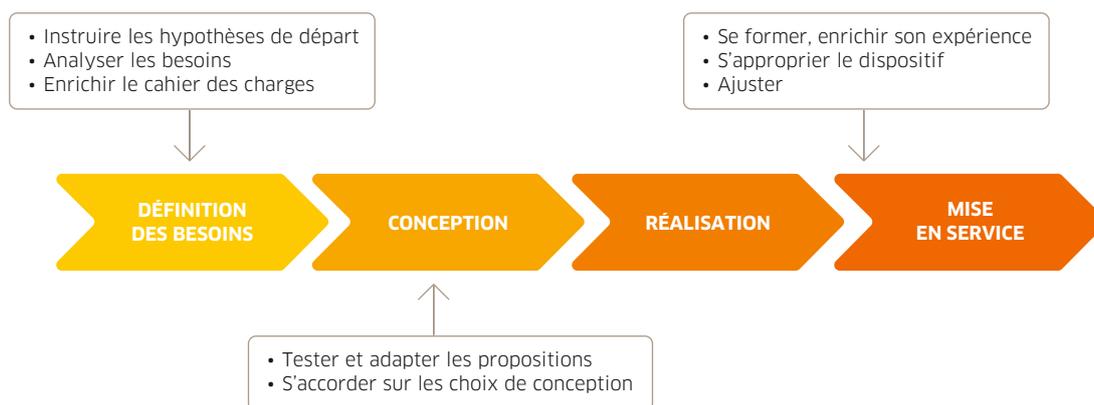
En retour, l'intégration des travailleurs à la démarche de simulation participe au développement de l'activité et de leurs compétences tout au long de la conduite de projet, permettant ainsi un début de maîtrise des futures situations avant même leur déploiement [5]. Cette intégration contribue également à faciliter l'adhésion et l'appropriation des solutions définies (techniques, organisationnelles et humaines).

Il faut statuer sur plusieurs questions au préalable, afin de garantir la réussite de leur association à la démarche de simulation. Sont en particulier concernées les questions de représentativité (diversité et hétérogénéité des utilisateurs : métiers différents, statuts différents, expériences différentes, vécu et ressenti différents...) et celles touchant au statut dans le processus de décision face à la transformation des situations de travail (information, instruction, consultation, co-construction, co-décision sur les choix...).

↑ **TABLEAU 1**  
Synthèse des principales caractéristiques des différents niveaux d'acteurs dans les démarches de simulation.



FIGURE 2 →  
Les principaux apports de la simulation aux différentes étapes du projet de conception.



### À quels moments du projet mettre en place une démarche de simulation ?

Le recours à une démarche de simulation dans le cadre d'un projet de conception peut s'envisager à plusieurs moments du projet avec des finalités et des modalités différentes (Cf. Figure 2).

#### Durant les phases préalables de conception

Que ce soit dans le cadre de réflexions en amont, visant à juger de l'opportunité et à évaluer la faisabilité du projet, ou dans des phases préparatoires à la conception détaillée visant à préciser les besoins du projet, le recours à la simulation peut utilement aider à la prise de décision et à la définition des spécifications de la future situation.

Par exemple, l'élaboration de représentations graphiques de différents modèles d'organisation possible au sein d'un groupe de réflexion décisionnel peut aider à instruire les choix d'orientation futurs (c'est par exemple le cas pour une entreprise qui souhaite s'engager dans un projet de déménagement, et qui se pose la question de l'opportunité de passer d'un modèle de bureau classique à un modèle de bureau de type *flex-office*).

Il est également très utile de pouvoir travailler par simulation dans le cadre de l'élaboration d'un cahier des charges de conception à destination des concepteurs (cahier des charges fonctionnel dans le cadre d'un projet de conception d'un système technique, programme dans le cadre d'un projet de conception d'espace). En particulier, l'élaboration de schémas fonctionnels nécessite de définir plus précisément : des étapes et des processus de traitement, des logiques de flux, des logiques de proximité ou d'éloignement entre les phases de travail, des besoins d'espaces spécifiques, l'organisation du travail associée... Ce travail peut être utilement mis en œuvre dans des séances de travail avec différents acteurs de l'entreprise sur la base de l'instruction de plusieurs scénarios de fonctionnement ou d'implantation spatiale. Les résultats des différentes simulations réalisées permettent d'enrichir

le cahier des charges, de préciser le besoin et de faciliter la compréhension et l'appréhension du projet par le concepteur dans le processus ultérieur d'élaboration de solutions techniques.

#### Durant les phases de conception détaillée

C'est à ce niveau que le déploiement des outils de simulation prend toute sa mesure. L'usage de la simulation vise de façon globale à tester et adapter les propositions de conception formulées par le concepteur et à s'accorder sur les choix définitifs de conception. Les modalités de mise en œuvre correspondent précisément au cadre de simulation en ergonomie décrit précédemment.

À ce stade, les modalités et les formes de simulation peuvent être très différentes selon les objets travaillés (espaces, accessibilité, gestion des flux...). Elles sont détaillées ci-après.

#### Au moment de la phase de mise en service et au-delà

La simulation est également un outil pertinent dans l'accompagnement de la mise en place du projet et plus largement dans la vie des dispositifs et leur intégration dans le fonctionnement global de l'entreprise. À ce niveau, il ne s'agit plus simplement de définir et concevoir des dispositifs, mais plutôt de favoriser la montée en compétences des utilisateurs et leur capacité à s'approprier la prise en main des dispositifs conçus et de les inscrire dans des modalités d'usage adaptées.

Dans ces phases, les démarches de simulation utilisent en particulier des outils de formation. C'est le cas par exemple pour les simulateurs de conduite de systèmes, ou les outils d'immersion à base de réalité virtuelle permettant d'interagir avec le système en testant les modes d'action de manière fictive et sécurisée. Ces systèmes permettent donc de simuler l'activité réelle au plus proche des configurations conçues et participent ainsi au développement de l'expérience des futurs utilisateurs. Ils peuvent également contribuer à la définition parta-

gée d'une organisation du travail adaptée aux nouvelles configurations.

Ce type d'usage de la simulation ne fait pas l'objet d'un développement spécifique dans le cadre de ce dossier centré essentiellement sur les processus de conception eux-mêmes.

## Quels supports et modalités de simulation choisir ?

On s'intéresse ici uniquement aux modalités de mise en œuvre des démarches de simulation dans le cadre des phases de conception détaillée, telles que définies dans le paragraphe précédent. Les choix des supports de simulation et leurs modalités d'utilisation vont dépendre essentiellement des types d'objets travaillés dans le cadre du projet de conception (espace, système technique, machine, organisation du travail...) et des niveaux de précision utilisés selon la phase de conception (esquisses, plans de principe, plans de détail, plans de réalisation). On distingue deux grandes catégories de supports : les supports analogiques et les supports numériques.

### Les supports analogiques

Les supports analogiques constituent une modalité pratique de mise en œuvre de la simulation sur la base d'éléments matériels qui permettent une modélisation simple des dispositifs à concevoir. La matérialité de ces supports en fait des outils plus facilement appréhendables par tous les acteurs impliqués.

#### → Le plan

Un plan est une représentation en deux dimensions, à une échelle déterminée, d'un système de travail. L'utilisation du plan comme support de simulation est particulièrement pertinente dans les projets touchant à la conception d'espaces de travail : poste, ligne de production, implantation de zones, construction de bâtiment... C'est souvent le premier niveau de représentation qui est utilisé pour la mise en place de démarches de simulation, très tôt dans les projets. Les caractéristiques d'un plan et des éléments d'information le constituant présentent l'avantage de pouvoir instruire rapidement des questions touchant au dimensionnement des surfaces (avec les questions de sous-estimations récurrentes de certains besoins d'espace), aux relations fonctionnelles de proximité entre zones (avec les questions portant sur les flux associés, leur longueur, leur hétérogénéité, leur répétition, leur croisement), à la gestion des environnements physiques (éloignement des sources d'éclairage naturel, proximité de sources de nuisance sonore...). La forme basique du plan en facilite sa modification et son évolution (par l'usage de calques successifs, par exemple), ce qui en fait un outil propice

à la mise en œuvre d'itérations et d'explorations de scénarios variés.

Le plan présente néanmoins des limites d'utilisation :

- il comporte des caractéristiques graphiques et symboliques codifiées qui rendent son interprétation et son utilisation parfois difficiles pour des personnes non acculturées. Cet aspect incite à préparer de façon spécifique les séances de simulation, afin que le travail participatif puisse s'y développer (apprentissage de la lecture, consignes particulières, simplification des plans...);
- il ne permet pas de gérer la troisième dimension et donc les problématiques de volumétrie de façon aisée. Les questions d'encombrement dans l'espace, de contraintes de franchissement, de visibilité sur les zones de travail... ne peuvent être traitées directement par ce type de support ;
- il n'intègre pas la dimension temporelle de l'activité de travail. Or, cette dimension est souvent essentielle dans les dynamiques à l'œuvre et les régulations opérées dans les situations de travail (exemples : fluctuation d'une file d'attente au cours de la journée, changements de production et d'engagements sur une ligne de production...). Il est donc nécessaire de traiter cette dimension temporelle en parallèle.

#### → La maquette volumétrique

Une maquette volumétrique est une représentation en trois dimensions, à une échelle déterminée, d'un système de travail. La maquette à échelle réduite est souvent utilisée pour travailler sur des systèmes de grandes dimensions : du poste de travail, zone



© Unsplash / 2024



une représentation en trois dimensions, à une échelle déterminée, d'un système de travail. Cette version numérique vise les mêmes objectifs que la version matérielle : elle permet de tester des configurations variées et de les améliorer par itérations successives. Ces maquettes numériques font l'objet aujourd'hui d'offres logicielles multiples et d'une réflexion centrale dans le processus de conception architecturale des bâtiments, par la mise en place d'un format standardisé : le BIM (*Building Information Modeling*).

La version numérique de la maquette comporte des avantages supplémentaires à sa version physique. Elle permet en particulier :

- d'intégrer des éléments d'information supplémentaires associés aux objets manipulés (par exemple, des informations particulières sur les exigences techniques de certains équipements, sur les risques associés à certaines configurations...);
- de proposer une richesse de codage plus importante des objets (choix des couleurs, des matériaux...) afin d'en faciliter la reconnaissance et la manipulation ;
- d'intégrer des bibliothèques d'objets plus importantes, facilitant ainsi la recherche d'équipements adaptés et leur implantation ;
- de faciliter son stockage et sa manipulation : dématérialisation du support qui permet le stockage et la conservation de versions différentes ;
- de conserver un historique des états successifs de la conception et une mémorisation des scénarios de développement. Cette fonctionnalité est propice au fait de pouvoir revenir de façon itérative sur des choix antérieurs ;
- de partager à distance des états et l'évolution de la conception avec une multitude d'acteurs, facilitant ainsi leurs interventions, sans avoir obligatoirement une exigence d'unité de temps et de lieu pour ces échanges. Cette fonctionnalité facilite une forme participative et le transfert d'informations entre les différents niveaux d'acteurs (en particulier, entre la MOA et la MOE) ;
- d'interfacer différents éléments hétérogènes dans la conception du dispositif (par exemple, l'utilisation de plusieurs couches en fonction des corps d'état concernés : énergie, fluides...);
- d'intégrer divers éléments de modélisation très complexes à formaliser sans un modèle informatique. Par exemple, l'intégration de l'évolution du niveau et de la qualité de l'éclairage naturel, de l'azimut du soleil en fonction des coordonnées géographiques du bâtiment, de la période de l'année et du moment de la journée – ce qui est très compliqué, voire impossible à réaliser à l'aide d'une maquette physique.

La maquette numérique présente des limites d'utilisation, à plusieurs niveaux :

- elle nécessite un niveau d'apprentissage minimum pour en maîtriser l'utilisation. Cet aspect se traduit bien souvent par la présence d'un tiers « manipulateur » lors des séances de travail utilisant ces technologies ;
- elle reste moins flexible dans sa capacité à évoluer en temps réel afin de servir de support de simulation interactif pour un groupe de travail. La modification substantielle de plusieurs éléments de la maquette demande un certain temps ;
- elle ne permet pas le même niveau d'appropriation par les utilisateurs dans son maniement et ne permet pas une immersion aussi simple que dans une maquette physique, par l'intermédiaire de la manipulation d'un avatar physique ;
- elle fait plus difficilement l'objet d'un travail collectif autour de son interface ; il est plus difficile d'interagir autour d'un écran qu'autour d'une table.

Cette modalité d'usage de la simulation est développée dans un article consacré aux maquettes numériques (*Cf. pp. 37-42*).

### → La conception 3D assistée par ordinateur

La conception 3D assistée par ordinateur (CAO-3D) permet de concevoir des dispositifs physiques complexes de façon détaillée. Des modules de modélisation des opérateurs sous forme de mannequins numériques sont disponibles et permettent de les implanter de façon réaliste dans l'environnement 3D conçu.

Outre la possibilité d'une vision dynamique du mannequin numérique dans cet environnement, des fonctionnalités de mesures et d'analyses de contraintes biomécaniques et anthropométriques sont également proposées. Elles permettent d'évaluer l'impact d'un dispositif technique conçu vis-à-vis de l'opérateur sur ces deux composantes. Ces fonctionnalités sont développées sur la base de l'intégration de modèles de l'être humain (bases de données anthropométriques) et de référentiels d'évaluation des contraintes (par exemple : intégration des équations du Niosh ou de l'évaluateur Rula pour les dimensions biomécaniques)<sup>1</sup>. Cette fonctionnalité permet donc une première évaluation des choix dimensionnels d'un poste de travail et des efforts associés à son utilisation.

Ces outils 3D sont à ce jour largement intégrés par l'ingénierie dans les processus de conception et facilitent le travail du concepteur dans l'intégration de ces aspects parmi d'autres.

Le modèle 3D de l'objet conçu et l'utilisation du mannequin numérique peuvent favoriser les échanges et la coordination entre des acteurs de différents domaines (ingénierie, méthodes, ergonomie, prévention...) autour du projet de conception. La CAO 3D présente des limites à plusieurs niveaux :



- elle ne permet pas la participation directe des utilisateurs aux phases de simulation, ce qui n'en constitue d'ailleurs pas l'objet ;
- elle ne permet pas de garantir une évaluation complète et fiable des contraintes biomécaniques d'une situation de travail projetée ;
- elle reste limitée dans l'état actuel des techniques par son incapacité à intégrer toute la complexité du fonctionnement humain.

Cette modalité d'usage de la simulation est développée dans un article qui suit (Cf. pp. 43-48).

#### → La réalité virtuelle

La réalité virtuelle est une technologie qui permet l'immersion d'un individu dans un environnement artificiel de façon interactive, que cet environnement soit projeté ou qu'il s'agisse d'une situation réelle reconstituée.

Ce type de technologie nécessite la mise en œuvre de plusieurs dispositifs permettant de matérialiser l'interaction :

- un dispositif de présentation visuelle de l'information qui peut prendre des formes différentes (écran de projection, casque de réalité virtuelle, espace immersif) ;
- un dispositif de capture de posture et de mouvement (capteurs, gants, combinaison...) ;
- un dispositif de retour proprioceptif et cutané (capteur de pression, commande haptique...) ;
- un dispositif de présentation et de captage sonore (reconnaissance vocale, enceintes spatialisées...).

Les deux derniers dispositifs restent optionnels, mais améliorent l'expérience d'immersion de l'utilisateur.

Le principe consiste à modéliser l'objet technique et/ou l'environnement à partir d'un logiciel de

conception 3D que l'on va mettre en lien avec le support d'immersion par un système de tracking.

En fonction des dispositifs mobilisés, l'utilisateur immergé va donc pouvoir interagir avec l'environnement virtuel et simuler les différents scénarios établis en éprouvant les solutions techniques proposées.

Les domaines d'application de la réalité virtuelle sont nombreux et son utilisation peut être particulièrement intéressante lors d'études de détail, au moment de la spécification des caractéristiques de l'objet conçu. La réalité virtuelle peut également trouver tout son intérêt en phase aval de déploiement du projet pour accompagner la montée en compétences des utilisateurs et l'appropriation des nouvelles situations, en particulier dans le cadre du déploiement de dispositifs de formation.

La réalité virtuelle présente des limites d'utilisation :

- elle comporte encore aujourd'hui des lacunes quant à sa capacité à représenter fidèlement les configurations projetées ;
- le développement et le déploiement de ce type de solution restent encore parfois difficilement accessibles pour toutes les structures, à la fois du fait de son coût très élevé et de la maîtrise technique qui s'impose.

Cette modalité d'usage de la simulation est développée dans le dernier article de ce dossier (Cf. pp. 49-53).

#### Conclusion

Les démarches de simulation s'avèrent particulièrement adaptées pour satisfaire aux besoins d'instruction des choix et à l'aide à la décision qui jalonnent les projets de conception de dispositifs de travail.

Ces processus de conception, pour être pertinents, doivent pouvoir s'appuyer sur une exploration fine et précise des questions liées au contenu du travail et à sa réalisation dans le cadre d'une projection exploratoire des futures conditions de réalisation du travail [6]. Les méthodes et outils de simulation permettent justement de proposer des mises en situation et des moyens nécessaires à l'élaboration de configurations projectives.

Ce dossier a pour objectif de montrer en quoi les différentes modalités de simulation (analogiques et numériques) peuvent apporter une aide structurante aux différents acteurs des projets qui souhaitent intégrer la prévention des risques professionnels à la conception de dispositifs de travail. ●

1. Équation du Niosh : Cf. par exemple : <https://www.cdc.gov/niosh/docs/94-110/default.html> . Une liste d'outils est également accessible sur : <https://beswic.be/fr/outils/troubles-musculosquelettiques-tms-outils>  
Rula : Rapid Upper Limb Assessment. Il s'agit d'un outil d'évaluation de l'exposition aux facteurs de risques biomécaniques, calculés à partir des caractéristiques de la tâche observée : postures, charges, répétitivité, etc.

## BIBLIOGRAPHIE

[1] MALINE J. – *Simuler le travail, une aide à la conduite de projet*. Anact, 1994.

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

[3] VAN BELLEGHEM L. – *La simulation de l'activité en conception ergonomique : acquis et perspectives*. Activités, 2018, [En ligne], 15-1. Accessible sur : <http://journals.openedition.org/activites/3129>

[4] DANIELLOU F. – *L'ergonomie dans la conduite de projets de conception de systèmes de travail*. In : FALZON P. (coord.) – *Ergonomie*. PUF, 2004, pp. 359-373.

[5] BARCELLINI F., VAN BELLEGHEM L., DANIELLOU F. – *Les projets de conception comme opportunité de développement des activités*. In : FALZON P. (coord.) – *Ergonomie constructive*. PUF, 2013, pp. 191-206.

[6] MALINE J. – *Simuler pour approcher la réalité des conditions de réalisation du travail : la gestion d'un paradoxe*. In : BEGUIN P., WEILL-FASSINA A. (coord.) – *La simulation en ergonomie : connaître, agir et interagir*. Octarès, 1997, pp. 97-111.

# USAGE DE LA SIMULATION EN PRÉVENTION PRIMAIRE : ACCOMPAGNEMENT DE LA CONCEPTION D'UN ATELIER DE FABRICATION DE PRODUITS À RISQUES

Si la simulation est de plus en plus mobilisée en conception pour contribuer à l'amélioration des conditions de réalisation du travail, elle n'en a pas moins un impact majeur sur les enjeux de prévention des risques. Or, ces effets sont rarement formalisés ou explicités dans la littérature, peut-être parce que les risques que la démarche a contribué à contenir ou à supprimer ne sont plus visibles. De fait, c'est bien en termes de prévention primaire que l'usage de la simulation en conception est primordial. Une intervention visant la conception d'un atelier de fabrication de produits utilisant des matières à risques en donne une illustration.

---

NADIA  
HEDDAD  
Université  
Paris 1,  
Panthéon-  
Sorbonne

---

LAURENT  
VAN  
BELLEGHEM  
Realwork,  
Université  
Paris-Cité

---

L'objectif classiquement affiché de la prévention primaire est de « combattre les risques à la source ». Cette expression invite à agir le plus en amont possible du processus d'apparition des risques professionnels pour idéalement les supprimer, à tout le moins en limiter la probabilité d'occurrence. Elle se différencie ainsi des démarches de prévention secondaire, visant la détection précoce de l'apparition de troubles, ou tertiaire, visant à limiter les conséquences de dommages avérés (suite à un accident par exemple). De fait, la démarche de prévention primaire est à privilégier car elle est considérée comme plus structurelle et plus efficace à court et long terme, et répondant mieux aux enjeux de préservation de la santé et de la sécurité des salariés dont l'employeur a la responsabilité. Agir au moment de la conception (ou de la reconception) d'une situation de travail est, dans cette perspective, tout à fait pertinent.

Encore faut-il que l'enjeu de prévention soit traité en lien avec les autres enjeux associés à la situation de travail : enjeux de production et de service, enjeux de qualité, enjeux de sens du travail, d'évolution du contenu du travail, de métier, etc. Une compréhension globale du travail, de ses

logiques et de son organisation doit ainsi structurer la démarche engagée, dans l'objectif de contribuer à la convergence de ces enjeux multiples. Dans le cas contraire, le risque est grand de voir réapparaître des contradictions dans les attendus du travail... et de générer de nouveaux risques. Dès lors, il y a lieu de s'assurer, au moment de la définition des choix techniques et organisationnels caractérisant la future situation de travail, si ces choix permettent ou non de favoriser la convergence de ces enjeux de différentes natures. Sachant que toute situation de travail est complexe et variable, cette évaluation doit pouvoir porter sur les différentes configurations que la situation est susceptible de prendre, en fonction notamment des événements qui pourraient survenir. Une démarche de simulation du travail [1-2] s'avère particulièrement adaptée pour réaliser cette évaluation, conformément à l'exigence d'évaluation *a priori* des risques professionnels portée par le cadre légal et réglementaire [3]. L'objectif n'est cependant pas ici de transcrire cette évaluation dans le document unique d'évaluation des risques professionnels (DUERP), mais bien de la traduire en choix techniques et organisationnels supposés réduire, voire supprimer, le ou les risques identifiés.



Une intervention visant la reconception d'un atelier de fabrication de vernis à ongles (VAO) intégrant un poste de pesée de matières dangereuses ayant révélé des risques, nous permettra d'illustrer le déroulement et les effets d'une démarche de simulation de ce type. Cette étude de cas illustre la pertinence de penser, dans un même temps, la question de la place de l'activité de pesée dans l'espace de l'atelier, le déroulé des tâches dans un ordre propre à l'activité de travail et l'organisation du travail [1].

### Le contexte : un atelier avec de fortes contraintes de sécurité

Une usine de produits cosmétiques met en œuvre plusieurs technologies pour la fabrication de ses produits de maquillage (poudres, vernis à ongles, rouges à lèvres, émulsions, etc.).

L'atelier de fabrication de vernis à ongles se caractérise par une organisation spécifique liée à sa classification ATEX (atmosphère explosive) due à la présence de solvants dans les produits, et donc au sein des zones de fabrication. Les contraintes de sécurité y sont fortes et de nombreuses règles de sécurité intégrées aux procédés de fabrication doivent être respectées. L'activité de travail des fabricants (population exclusivement masculine) comporte par ailleurs de nombreuses manipula-

tions lourdes de cuves ou de matériels dans un environnement inconfortable (odeurs fortes) et potentiellement dangereux (vapeurs toxiques et atmosphère explosive).

L'encadrement est particulièrement attentif à la question de la sécurité, mais est aussi soucieux d'améliorer les conditions de déroulement de l'activité des fabricants dans l'atelier VAO. Cette ambition est soutenue par le choix affiché de l'entreprise de maintenir la production VAO au sein de son organisation malgré les lourdes contraintes de sécurité.

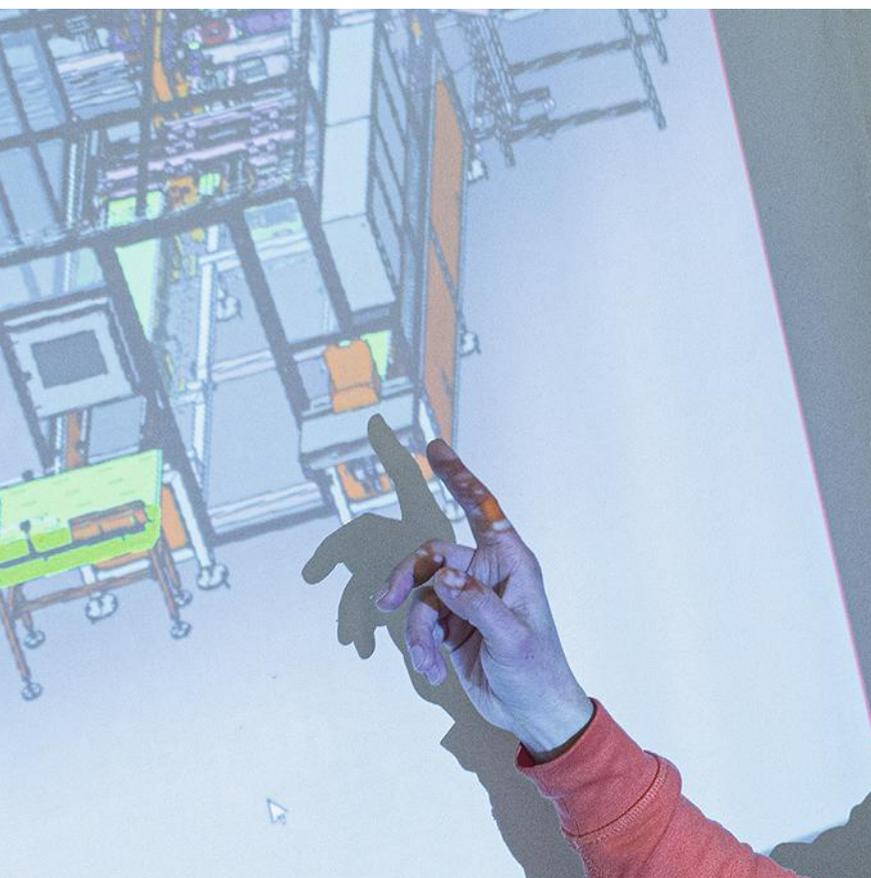
Dans ce contexte, un projet de reconception de l'atelier VAO a été engagé, visant quatre objectifs :

- optimiser le fonctionnement de l'atelier;
- éloigner le stockage des matières à risque;
- réduire l'exposition des fabricants aux produits chimiques;
- réduire les opérations de manipulation et les risques liés aux ports de charges.

Au cœur de ce projet sont prévus notamment le déport de certaines matières à risques, la modification de l'agencement de l'atelier dans une logique en cohérence avec le process, et la modification du poste de pesée. Ce dernier est central et constitue une étape obligatoire de la fabrication, à l'interface entre le stockage des matières premières et les équipements de fabrication des produits intermédiaires ou finis. Composé actuellement d'une balance et d'un terminal permettant d'accéder au logiciel de pesée en lien avec la base de gestion des ordres de fabrication, il doit être équipé dans le projet de trois balances de différentes tailles (une balance au sol de 1,5 t, une balance de 30 kg et une balance plus petite) pour mieux gérer la variabilité des pesées à réaliser, de quelques grammes à plusieurs centaines de kg parfois). Cette évolution modifie structurellement la façon dont les activités des fabricants vont s'agencer entre la zone de pesée et les autres zones de l'atelier, mais aussi au sein de la zone de pesée elle-même. Elle doit donc être tout particulièrement accompagnée et focalise les attentions (voire les inquiétudes) de chacun, et notamment des fabricants. L'entreprise a déjà fait appel à un institut spécialisé pour l'accompagner sur les questions de risques et souhaite maintenant élargir la réflexion à la question du travail dans l'atelier VAO. C'est dans ce contexte qu'elle a souhaité une intervention ergonomique. La démarche est organisée en deux phases successives :

- une phase d'analyse des situations de travail actuelles dans l'atelier VAO avec un focus sur le poste de pesée à partir d'observations de l'activité des fabricants. Cette phase doit fournir les éléments de compréhension utiles de l'activité de travail réel pour penser les évolutions de la situation de travail ;

Présentation d'une étude ergonomique menée à l'aide d'outils numériques sur une ligne de fabrication industrielle.



© Fabrice Dimier pour l'INRS / 2022



← PHOTOS 1  
Préparation  
et réalisation  
de pesées  
de matières  
premières.

- une phase de co-construction de propositions d'aménagement du poste de pesée. Un groupe de travail est mis en place, principalement centré sur les fabricants, l'encadrement et les concepteurs, réunis autour de différentes modalités de scénarisation et de simulation. La simulation a été réalisée dans un premier temps sur une maquette en carton à l'échelle 1/25<sup>e</sup>, puis à l'échelle 1/1 au sein d'un espace de simulation créé pour l'occasion dans une salle. Les résultats de ces deux phases sont présentés ci-dessous.

### Un travail de fabrication complexe

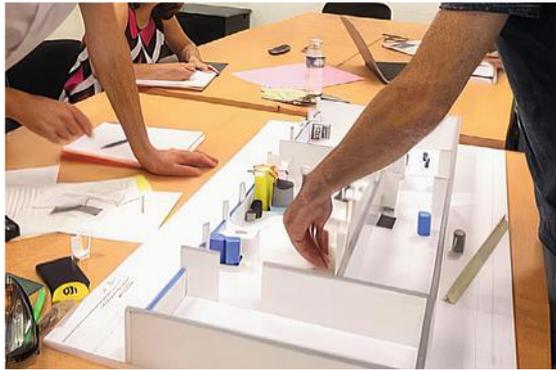
Les observations de l'activité des fabricants montrent que le travail réalisé s'avère particulièrement complexe. L'analyse de l'activité met en lumière plusieurs caractéristiques de la situation de travail, chacune d'elles articulant un rapport particulier entre les exigences de sécurité et les exigences de production.

- **Les fabricants sont autonomes sur l'ensemble du processus VAO**, de la commande à la fabrication, en passant par la gestion des stocks. Cette autonomie offre l'avantage d'un travail varié et favorise une organisation opérationnelle mise en œuvre par les opérateurs eux-mêmes. Un appui hiérarchique est toutefois observé, venant en soutien des fabricants en cas d'interrogations ou de difficultés rencontrées. Cette autonomie « soutenue » est appréciée par les opérateurs et constitue une ressource face aux risques éventuels.
- **L'activité de pesée est une activité centrale dans le processus de fabrication VAO**, générant de nombreuses allées et venues entre le poste de pesée et le reste de l'atelier. Le projet prévoyant trois balances au lieu d'une seule, cet effet risque de s'amplifier si leur intégration dans le processus de fabrication est insuffisamment anticipée.

- **Les fabricants gèrent plusieurs fabrications aux temporalités différentes en parallèle**. Pas moins de six processus différents peuvent être déployés en même temps, nécessitant de gérer l'avancement des fabrications par l'exploitation de moyens de stockage (en cuve, en fûts, en bidons en racks, voire à même le sol) des fabrications en cours. Des pesées dites « sauvages » réalisées à la demande d'autres entités (R&D, soins, maquillage) viennent s'ajouter et s'imbriquer dans cette logique, complexifiant un peu plus la gestion des six processus.
- **L'activité comporte une dimension cognitive importante**. L'imbrication des temps des différents ordres de fabrication réalisés en parallèle, la gestion de tout le processus de bout en bout et notamment celle des stocks et des commandes, conduisent les opérateurs de l'atelier VAO à traiter un nombre important d'informations et de données. Surveiller les différents temps (fabrication, attente des résultats coloris ou de la chimie), suivre et assurer l'avancement de la fabrication de chacun des ordres de fabrication, avoir un regard sur l'état des stocks, gérer les aléas (machine broyeur ou tableau de pontage) combinés aux sollicitations extérieures (interruptions fréquentes) rend complexe le nombre d'éléments à retenir. Les risques d'erreurs de manipulation ne sont jamais complètement absents. « Avec tout ce que l'on a en tête, il ne faut pas être facilement distrait dans ce métier », souligne un fabricant.
- **Le travail des fabricants comporte de nombreuses manipulations de contenants** (cuves, fûts, bidons, seaux, piluliers) aux dimensions variées (de 1 dL à 400 L), remplis ou vides, vers et au départ du poste de pesée (Cf. Photos 1). Il en résulte une diversité importante de stratégies gestuelles mises en œuvre pour réaliser les transferts de matière d'un contenant à l'autre.



PHOTOS 2 →  
Construction  
des scénarios  
sur la maquette  
au 1/25°.



© Nadia Heeddd / 2024



© Nadia Heeddd / 2024

- **L'activité comporte d'importants ports de charge**, parfois dans des postures délicates. Si les fabricants ont recours à un palan pour manipuler les plus gros fûts, celui-ci s'avère inadapté pour les fûts de 60L ou les bidons, qui sont majoritaires dans l'atelier et doivent être portés manuellement.
- **L'usage de la balance unique du poste de pesée est délicat.** Adaptée à la pesée des grosses cuves, elle ne facilite pas la manipulation des fûts de moindres volumes : pour éviter de mettre ses pieds sur la balance pendant la pesée, le fabricant doit disposer le chariot dans un coin de la plate-forme et placer ses pieds à angle droit de façon à épouser le coin du cadre de la balance sans la toucher. L'opération consiste alors à maintenir cette position inconfortable pour verser à bout de bras les matières à peser tout en gardant les yeux rivés sur l'écran ou l'afficheur. Le corps se voit ainsi contraint en même temps au niveau de la nuque, du tronc, des membres supérieurs et des membres inférieurs.
- **L'activité intègre des stratégies d'économie.** Ainsi, la pesée en cumul de poids consistant à réaliser les pesées directement dans la cuve ou le fût en cumulant les matières (une pesée après l'ajout de chaque ingrédient) permet une économie des gestes, mais aussi des temps de fabrication et des tâches de nettoyage, tout en évitant la perte de matières. Le futur process ne doit pas entraver ce type de stratégies.

- **L'activité de travail se réalise avec des EPI souvent encombrants.** Il est, par exemple, difficile de se parler ou de réaliser certains gestes (brancher une cuve par la sortie du bas) en portant le casque branché à la ventilation. Par ailleurs, les opérateurs entrent et sortent en permanence de l'atelier (réaliser un contrôle de couleur, récupérer de la matière au magasin, se rendre au local déchets, imprimer un ordre de fabrication, réaliser des commandes sur le PC, etc.). Ils enlèvent et remettent en permanence l'EPI qu'ils déposent sur un fût quelque part dans l'atelier à chaque sortie.

- **Enfin, la fatigue mentale est aggravée par un bruit ambiant permanent** généré par le système de renouvellement de l'air de l'atelier.

Ces éléments d'analyse, restitués et validés auprès des fabricants et des responsables, ont permis de poser une base objective des contraintes et des ressources rencontrées dans le travail des fabricants et que le projet doit intégrer.

Dans le même temps, le nombre et la finesse de ces éléments révèlent la complexité de l'exercice de conception dans lequel le groupe s'apprête à s'engager. À ce moment, chacun des participants prend conscience qu'un simple plan du futur atelier ne suffira pas, à lui seul, à mettre en évidence la diversité des configurations d'usage possibles et l'évaluation de leurs impacts sur le travail futur.

Si la démarche de co-conception doit contribuer à faire converger les différents enjeux du travail (de production et de service, de qualité, de santé-sécurité, de sens du travail, etc.), elle doit pouvoir s'appuyer sur une méthodologie qui permette de rendre visibles ces enjeux, de les mettre à l'épreuve du projet et de contribuer à les faire converger. La méthodologie de simulation du travail mise en œuvre porte cette ambition.

### Un outillage adapté pour faciliter la scénarisation et la simulation du travail

De façon générale dans un projet de cette nature, la démarche engagée poursuit deux objectifs, menés en parallèle :

- élaborer, par un travail de scénarisation, l'aménagement du futur espace de travail ;
  - évaluer, par la simulation, l'activité future des professionnels travaillant au sein de cet aménagement.
- Pour soutenir ce double exercice de scénarisation et de simulation, un support permettant de visualiser et décliner les caractéristiques de la situation future (une maquette le plus souvent) est réalisé et mis à disposition du groupe de travail. La conception de la maquette permet de représenter différents scénarios d'aménagement, la plupart des éléments devant être manipulables et déplaçables, à l'exception des éléments structurants non modifiables (façades, murs porteurs, poteaux...). Les participants peuvent ainsi tester différentes hypothèses d'organisation,

élaborer différents scénarios, et arrêter un choix dès lors qu'un compromis acceptable par tous semble se dégager sur la cohérence du scénario en cours de construction.

Pour chacun des scénarios explorés, les fabricants sont invités à venir y simuler leur activité en manipulant des figurines les représentant et en les déplaçant sur la maquette. L'exercice consiste ici à reproduire le plus précisément possible le déroulé du travail, tout en invitant les fabricants à verbaliser l'ensemble des actions qu'ils ont à réaliser pour accomplir leurs tâches. Plusieurs situations peuvent ainsi être simulées, y compris en rajoutant des variabilités (une urgence, un imprévu, etc.). La simulation ainsi menée permet d'évaluer la pertinence du scénario à soutenir (ou pas) leur activité. Réalisée au vu et au su des autres participants, elle facilite la délibération sur les choix à réaliser à partir d'un débat contradictoire sur les différentes options d'aménagement et l'évaluation des avantages/inconvénients pour l'activité.

Par itération progressive entre scénarisation et simulation, un scénario privilégié se dégage. Il doit correspondre à la situation présentant le plus d'avantages pour l'activité des professionnels tout en limitant au mieux les contraintes sur le travail et les corps. En poursuivant les itérations, le scénario privilégié est affiné en même temps que les logiques d'action des professionnels adaptées à ce scénario se précisent. En rappelant les différentes

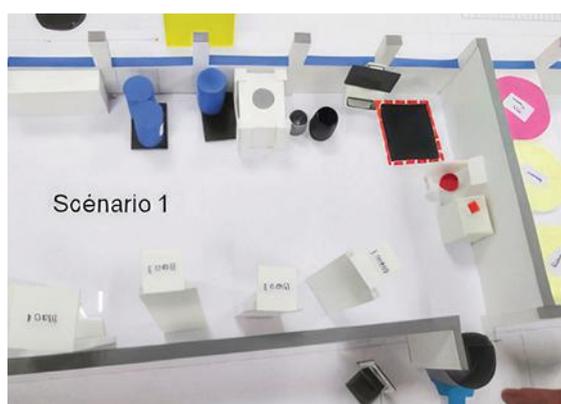
dimensions du travail à chaque étape (production, qualité, risques, etc.), la démarche contribue à la convergence progressive des enjeux du travail.

La conception du futur espace de pesée est menée selon ces principes sur deux séances.

## Une première réunion de simulation sur une maquette en carton

La première séance est centrée sur l'exploration de scénarios d'aménagement sur une maquette en carton du futur espace à l'échelle 1/25<sup>e</sup> (Cf. Photos 2). Les participants ayant la possibilité de manipuler et repositionner les différents éléments de l'aménagement (balances, palan, écran de visualisation, zones de stockage des fûts, etc.) directement sur la maquette, plusieurs pistes techniques et organisationnelles sont explorées et discutées collectivement. Chaque piste suivie doit aboutir à un scénario complet trouvant sa propre cohérence. Ce travail de scénarisation est guidé principalement par le positionnement de la balance de grande capacité (1,5 t), dont la surface au sol est particulièrement structurante. Associée aux contraintes de manipulation identifiées lors des analyses, cette recherche aboutit à l'élaboration successive de quatre scénarios d'implantation par le groupe de travail, chacun d'eux proposant un positionnement différent des balances (Cf. Photos 3) :

- le scénario d'implantation n° 1 propose un emplacement de la balance 1,5 t dans l'angle de l'ate-



© Nadia Heddad / 2024



© Nadia Heddad / 2024



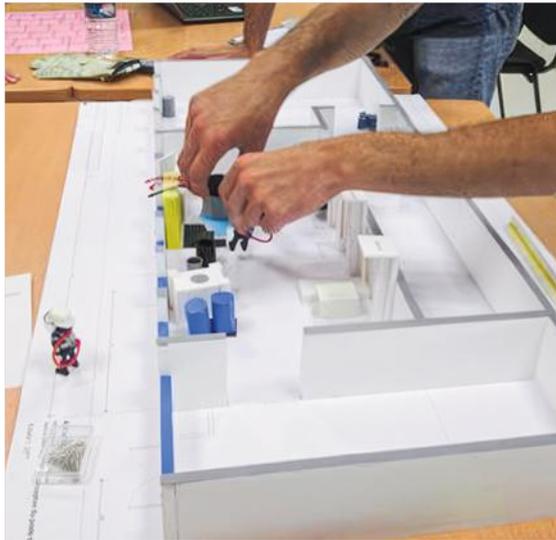
© Nadia Heddad / 2024



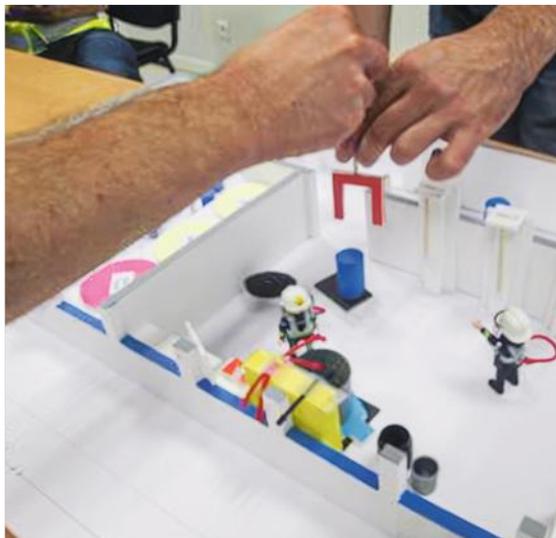
© Nadia Heddad / 2024

← PHOTOS 3  
Les quatre scénarios proposés par le groupe, explorant différents positionnements de la balance 1,5 t (en rouge).

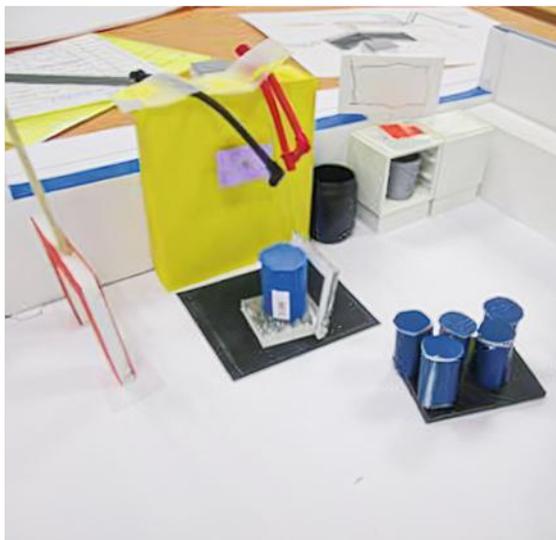




© Nadia Heddiac / 2024



© Nadia Heddiac / 2024



© Nadia Heddiac / 2024

lier, suivant ainsi l'intention initiale du projet visant à libérer au mieux les zones de maintenance dans l'atelier ;

- **le scénario n°2** propose un premier déplacement de la balance 1,5 t, pour implanter à sa place les petites balances dans l'angle de l'atelier ;
- **le scénario n°3** propose de privilégier l'implantation du poste informatique dans l'angle de l'atelier et de disposer de part et d'autre les balances : la petite et la moyenne à gauche du poste informatique et la grande balance à sa droite (le critère privilégié ici étant de faciliter toutes les opérations à réaliser sur PC lors des différentes opérations de pesée quel que soit le poids à peser) ;
- **Le scénario n°4** reprend l'emplacement actuel de la balance 1,5 t en disposant les petites balances à sa droite et en dédoublant les écrans de visualisation, de façon à permettre de travailler le plus en face possible de l'écran et du clavier du PC.

Pour chaque scénario proposé, des simulations du travail sont engagées par les fabricants, qui doivent saisir les figurines (ici, des sujets Playmobil) les représentant et leur faire jouer, tout en les verbalisant, les opérations qu'ils sont supposés réaliser dans le nouvel environnement. Les six processus de fabrication sont simulés sur la maquette pour chacun des quatre scénarios, en détaillant précisément les différentes étapes de leur mise en œuvre (Cf. Photos 4). Les fabricants parviennent ainsi à se projeter dans chacun des dispositifs techniques et spatiaux illustrés successivement sur la maquette.

C'est à ce moment que les avantages et les inconvénients des différentes implantations apparaissent et peuvent être débattus en connaissance de cause. Il s'opère alors un basculement, classique à ce moment de la méthode : ce n'est plus l'avis ou les préférences de chacun qui sont discutés et mis en débat, mais bien l'activité de travail. En révélant les contraintes et les ressources du travail en situation, l'activité (simulée) fait référence dans le processus décisionnel relatif au projet.

En l'occurrence, le premier scénario positionnant la balance 1,5 t dans l'angle de l'atelier, envisagé au départ comme une solution idéale par les concepteurs, est vite écarté à l'épreuve de la simulation. Tout d'abord, l'emplacement des différents équipements ne respecte pas l'enchaînement des tâches à réaliser, accentuant les contraintes physiques et cognitives dans l'organisation autonome des opérations, surtout sur plusieurs fabrications en parallèle. Ensuite, l'emplacement de la balance dans l'angle de l'atelier ne favorise pas le positionnement du corps de façon à gérer les besoins d'interaction entre les différents équipements, notamment pour assurer le transvasement de matière première tout en surveillant l'écran de visualisation. Enfin, le recours à un palan, envi-

↑ PHOTOS 4 Simulation du travail de fabrication par les fabricants sur les différents scénarios.



← PHOTOS 5  
Simulation comparée de la manipulation de fût sans et avec palan.

sagé comme une amélioration du projet, s'avère malaisé. À l'épreuve, cet emplacement devient réhibitoire et le scénario n° 1 est écarté.

Les scénarios suivants explorent alors les moyens de limiter ces contraintes et de mieux soutenir l'activité, jusqu'au scénario n° 4, positionnant la balance à proximité de son emplacement actuel. L'emplacement retenu, associé à l'investissement dans de nouveaux moyens de manutention et des écrans complémentaires, semble donner satisfaction aux fabricants à travers les simulations sur maquette, en favorisant à la fois la gestion de fabrications multiples en simultané et les contraintes de manipulation des différents équipements entre eux, tout en leur permettant un contrôle visuel sur l'écran du PC.

Les membres du groupe de travail s'accordent à retenir le scénario n° 4 comme étant la réponse la plus satisfaisante permettant de tenir les exigences de production tout en minimisant les contraintes physiques et cognitives de réalisation des opérations et les risques associés. Il est retenu comme scénario privilégié par le groupe de travail.

### Une seconde réunion de simulation à l'échelle 1/1

La simulation sur maquette réduite permet de stabiliser un agencement pertinent des différentes zones, balances et matériels utiles au travail. Elle n'est cependant pas suffisante pour visualiser précisément les effets sur les gestes à opérer.

La seconde séance est dédiée à la réalisation d'une simulation à l'échelle 1/1 pour permettre aux fabricants de mieux se rendre compte des gestes au travail suggérés par les options techniques du scénario privilégié et d'ajuster ces dernières.

Il est décidé de réaliser ces vérifications dans une salle avec un aménagement spécifique.

L'environnement du futur poste est reconstitué avec des éléments du poste actuel (chariot, plateforme de pesée, fûts, balances...) et des éléments fabriqués en carton et positionnés conformément au scénario n° 4. Des éléments mobiles sont également fabriqués, comme le futur palan permettant la manipulation de fûts de 60 L, et tenus à bout de bras par des collègues pour en simuler le déplacement dans l'espace. Les simulations consistent alors à vérifier que les aménagements permettent bien d'assurer l'enchaînement des gestes et manipulations nécessaires à la réalisation des tâches tout en contribuant à améliorer leurs conditions de réalisation.

Des simulations comparées des gestes réalisés sans et avec palan (Cf. Photos 5) sont aussi réalisées pour évaluer l'intérêt réel de l'investissement dans des aides à la manutention dont on sait qu'elles peuvent être délaissées si elles s'avèrent mal adaptées.

L'accès aux commandes tout en réalisant les gestes est enfin simulé dans l'objectif de préciser la place de chaque matériel sur chaque zone de travail en intégrant les besoins d'accès et de contrôle visuel.

### Conclusion

On le comprend à demi-mot dans l'accompagnement réalisé pour cette entreprise : l'enjeu de la prévention primaire est de limiter au mieux les actions de prévention en fonctionnement courant. En effet, en inscrivant dans l'organisation du travail, dans l'aménagement des espaces, dans l'agencement des équipements, dans le choix des moyens..., les principes de prévention visant à supprimer les risques en amont, l'enjeu de prévention en aval est d'autant mieux tenu. Agir au moment de la conception offre l'avantage d'inscrire ces





© Laurent Van Belleghem / 2024

Lors d'une intervention sur un autre site, exercice de simulation mettant en œuvre des avatars sur une maquette.

principes dans le temps, comme une ressource pérenne, agissant sans qu'on s'en aperçoive.

Comme on le comprend aussi, ce n'est pas tant le risque que cherche à rendre visible la démarche, que le travail réel. En révélant ce que l'activité cherche à tenir ensemble (la production, la qualité, les délais, les coopérations, l'évitement des risques...), la simulation du travail donne à voir et à débattre le projet sous un angle nouveau. Dans les échanges entre participants, le projet n'est plus constitué de plans, de schémas de process ou de fichiers Excel, mais bien de stratégies d'action, de tactiques opératoires, de savoir-faire de prudence, de régulations collectives... qui sont tout autant à l'œuvre dans la prévention et qui méritent d'être discutés et débattus collectivement. « *Sans la démarche de simulation, on allait dans le mur avec notre premier scénario* », reconnaît le responsable du projet quelques mois après sa mise en route. C'est pour cela que la démarche est nécessairement participative (engageant les salariés dans la mise en œuvre des simulations) et pluridisciplinaire (engageant les différents acteurs du projet dans une réflexion commune sachant apprendre

des simulations). En remettant le travail réel des professionnels au cœur du travail réel des concepteurs, la démarche de simulation ouvre un chemin pour faire converger les enjeux de performance de l'entreprise avec les enjeux de santé et de sécurité des salariés. ●

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] HEDDAD N. – Intervenir pour la conception de l'espace de l'activité : vers un cadre méthodologique. *Activités*, 2017 [en ligne], 14-1. Accessible sur : <https://doi.org/10.4000/activites.2958>
- [2] VAN BELLEGHEM L. – La simulation de l'activité en conception ergonomique : acquis et perspectives. *Activités*, 2018 [en ligne], 15-1. Accessible sur : <http://journals.openedition.org/activites/3129>
- [3] LIEHRMANN É., VAN BELLEGHEM L. – La simulation du travail : un outil pour la prévention. *Hygiène & sécurité du travail*, 2024, 274, pp. 5-11. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=DC%2040>

# PRÉVENIR LES RISQUES PROFESSIONNELS PAR L'USAGE DE LA MODÉLISATION ET DE LA SIMULATION NUMÉRIQUE

L'utilisation de la modélisation et de la simulation numérique lors de la conception des locaux tend à s'imposer dans le domaine de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction. Ces outils permettent d'évaluer les solutions techniques et fonctionnelles envisagées. Y intégrer la prévention des risques professionnels contribuerait à définir un environnement de travail sécurisé. Alors qu'aujourd'hui la modélisation des informations du bâtiment (BIM) n'intègre pas les aspects de santé et de sécurité, le logiciel Mavimplant répond aux exigences de prévention, en simulant l'implantation des espaces de travail autour d'une maquette numérique.

STÉPHANE GILLE,  
REMIEL FENO  
INRS,  
département  
Ingénierie des  
équipements  
de travail

Les projets de conception sont le plus souvent conditionnés par des aspects économiques et techniques. L'INRS préconise une démarche plus globale de conception des lieux et des situations de travail (CLST) en intégrant la prévention des risques professionnels. Elle consiste à intégrer en plus, dès la conception des locaux, les besoins liés à l'activité de travail afin d'identifier et de réduire les facteurs de risque de manière itérative, globale et participative [1]. Il s'agit d'une démarche essentielle, qui fait partie des huit bonnes pratiques pour prévenir les risques professionnels [2] et des neuf principes généraux de prévention, en particulier le troisième principe qui consiste à combattre les risques à la source (article L. 4121-2 du Code du travail). Pour faciliter l'intégration de la santé et de la sécurité au travail dans les projets de conception de locaux, dix points clés incontournables (organisation des espaces de travail, circulations, maintenance, éclairage...) sont à prendre en compte dès les premières phases du projet [3] (Cf. Encadré 1). Dans ce cadre, la modélisation et la simulation sont deux outils complémentaires qui sont très employés dans le domaine de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction (AIC). Alors que la modélisation consiste à créer une représentation d'un local sous forme d'une maquette numérique en trois dimensions (maquette 3D), la simulation

techniques (éclairage, ventilation, sécurité incendie...) et fonctionnelles (accès, circulation...) envisagées à partir de la maquette numérique. Dans cet article, nous allons voir comment la modélisation et la simulation des locaux peuvent être employées dans une démarche de conception sûre intégrant la prévention des risques professionnels très en amont. En particulier, seront apportés des éclaircissements sur les outils associés à la modélisation des informations du bâtiment (BIM) et le logiciel de conception Mavimplant développé par l'INRS.

## ENCADRÉ 1 CRÉATION DE LIEUX DE TRAVAIL ET PRÉVENTION : 10 POINTS CLÉS POUR UN PROJET RÉUSSI [3]

1. Organisation des espaces de travail
2. Circulations
3. Maintenance
4. Éclairage
5. Qualité de l'air et confort thermique
6. Acoustique
7. Manutentions
8. Produits chimiques et déchets
9. Incendie et explosion
10. Installations sanitaires et locaux sociaux



### Modélisation numérique

La maquette numérique est un outil essentiel tout au long du processus de conception et de planification. Elle permet une visualisation détaillée et une analyse approfondie à chaque étape du projet, de la programmation à l'exploitation du bâtiment :

- en phase de programmation, enrichie des besoins et des contraintes du projet, la maquette numérique facilite l'analyse fonctionnelle pour définir le programme architectural et valider l'organisation spatiale du bâtiment ;
- en phase de conception (esquisse, avant-projet sommaire et détaillé), elle regroupe des modèles métiers provenant des différents acteurs du projet. Il est reconnu que, par rapport à l'utilisation de plans 2D, la visualisation d'une maquette numérique en 3D permet aux utilisateurs des locaux de beaucoup mieux se projeter dans leur futur environnement de travail et d'avoir une meilleure compréhension du projet [4] ;
- en phase de construction, la maquette numérique facilite la planification des différentes étapes du chantier et permet ainsi de le sécuriser en limitant, par exemple, les zones de coactivité ;
- en phase d'exploitation, elle permet de faire évoluer l'implantation des équipements dans un local (réaménagement), de préparer les diverses interventions pour maintenir le bâtiment en bon état et de planifier les travaux pour le faire évoluer.

La maquette facilite la collaboration entre les acteurs du projet, permet de procéder par itérations et de bénéficier d'une vision globale pour concilier les approches de conception techniques et l'organisation du travail. Dans la pratique, l'usage de maquettes 3D est généralement réservé pour réaliser une multitude de représentations 2D (plans, coupes, élévations, rendus) ou partager les apports des différentes équipes impliquées dans le projet (livrables partiels).

Les projets de conception et d'aménagement de locaux s'appuient aujourd'hui sur des outils de conception numérique qui offrent l'avantage de représenter le local avec une maquette numérique en 3D. Cette maquette facilite la projection de chacun dans le futur local, mais aussi l'exploration des différents scénarios d'aménagement des espaces. Or, le projet de conception d'un nouveau local de travail ou d'aménagement d'un local existant est un moment privilégié pour repenser à la fois l'aménagement et l'organisation des activités de l'entreprise, mais aussi la prise en compte de la prévention des risques professionnels.

De nombreux outils de modélisation numérique existent ; ils ne sont toutefois pas interopérables puisqu'ils utilisent des modèles de données propriétaires. Ceci a pour conséquence de rendre les échanges difficiles entre les différents acteurs d'un même projet. C'est pourquoi une standardisa-

tion du modèle de données, au travers du *Building Information Modelling* (BIM), a été mise au point à la fin des années 1990 et a permis d'apporter une solution pour faciliter ces échanges de données.

Par ailleurs, la plupart de ces outils n'intègrent pas les questions de santé et de sécurité au travail, puisqu'ils restent aujourd'hui généralistes et par conséquent ne sont pas dédiés à un secteur d'activité donné. Pour répondre à cette problématique, l'INRS a développé l'outil Mavimplant, qui combine conception des locaux et prévention des risques professionnels [4-7] ; il facilite la prise en compte des dix points clés pour une conception sûre.

### Modélisation des informations du bâtiment (BIM)

Le BIM a émergé au début des années 2000, puis a été progressivement adopté par les professionnels du bâtiment, notamment les cabinets d'architecture et d'ingénierie. Il apporte une vision plus collaborative de la conception des locaux en fédérant les différents acteurs d'un projet de conception autour d'une maquette numérique et des informations qu'elle contient. L'objectif est de faciliter la communication, la collaboration et le partage des données entre ces différents acteurs, mais aussi de repérer en amont des difficultés pouvant apparaître en phase de construction. Les processus de travail associés au BIM permettent de coordonner dans le temps et dans l'espace l'intervention de plusieurs entreprises. Ainsi, un des objectifs affichés est de rendre efficiente la construction des locaux en réduisant les risques de malfaçons et, par conséquent, les coûts et les délais de livraison. Toutefois, ces outils s'adressent aux professionnels et ne prennent pas en compte les exigences d'exploitation (en particulier l'utilisation réelle en exploitation des locaux et la nécessité de maintenance) issues de l'analyse du travail. Des travaux complémentaires sont en cours pour intégrer ces aspects au BIM [8]. Par exemple, en phase d'exploitation, la maquette numérique pourrait être utilisée pour anticiper les travaux ultérieurs ou les interventions de maintenance.

### Mavimplant, un outil de conception intégrant la prévention des risques professionnels

Mavimplant est un outil logiciel utilisable directement sur le Web, développé par l'INRS, mis en ligne en 2015 et qui a fait l'objet d'une refonte en 2021 (Cf. Encadré 2). Ce logiciel permet de construire la maquette numérique d'un local de travail. Il a pour objectif de faciliter l'échange entre les différents acteurs d'un projet de conception ou d'aménagement d'un local, et d'y intégrer les réflexions apportées au fur et à mesure de la réalisation de la maquette. Il inclut des fonctionnalités de partage, afin d'apporter une réflexion

collective pour définir le meilleur scénario d'implantation parmi différentes configurations qui auront été étudiées. Cet outil est décliné pour différents secteurs d'activité, afin de mieux prendre en compte les spécificités de chacun. À ce jour, six secteurs d'activité sont couverts par ce logiciel : la boulangerie – pâtisserie – glacerie, l'entretien – réparation automobile – carrosserie industrielle, la logistique, l'hôtellerie – restauration, le travail de bureau et le mareaige. De nouveaux secteurs d'activité sont ajoutés au fur et à mesure de l'usage de Mavimplant et de ses évolutions. Deux nouveaux secteurs seront disponibles en 2024 : la transformation du bois (menuiserie, agencement et charpente) et l'accueil des jeunes enfants. Mavimplant s'adresse plus particulièrement aux maîtres d'ouvrage occasionnels (TPE/PME), mais aussi aux professionnels (consultants, ergonomes, préventeurs, intervenants en prévention des risques professionnels...) pouvant être amenés à participer à l'aménagement d'un local ou d'une partie de celui-ci, pour le compte d'une entreprise. Ainsi, il les aide à concevoir un local combinant les exigences de productivité, de santé et de sécurité au poste de travail, et à suivre les évolutions techniques et réglementaires. Mavimplant combine à la fois la conception du local et la modélisation

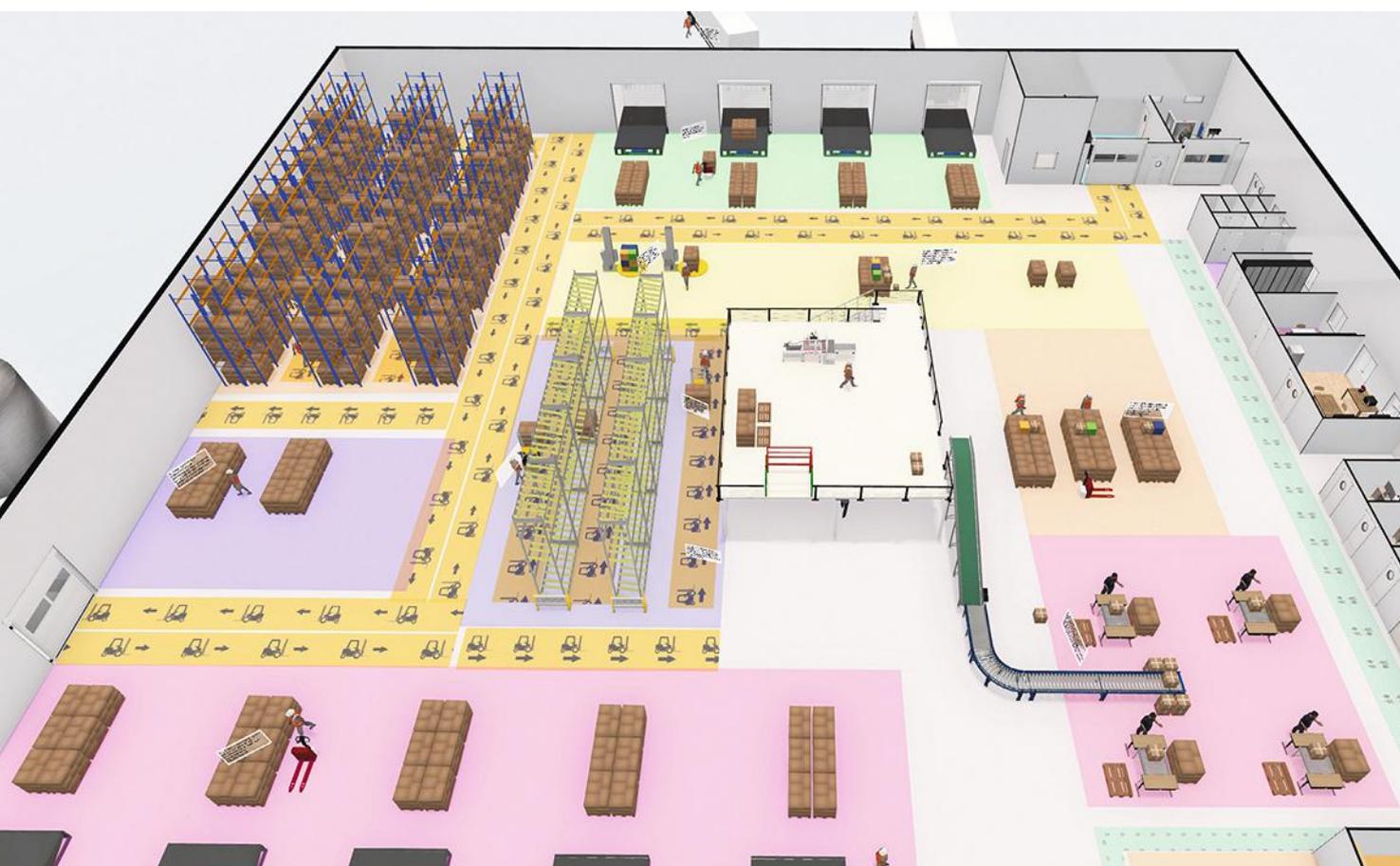
**ENCADRÉ 2**  
**L'OUTIL MAVIMPLANT : CHIFFRES CLÉS**

Depuis 2021, plus de 14 000 comptes utilisateurs et 32 000 projets ont été créés, soit 350 nouveaux utilisateurs et 750 projets en moyenne chaque mois.

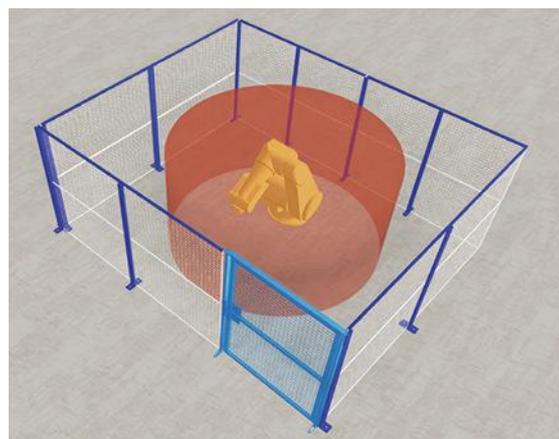
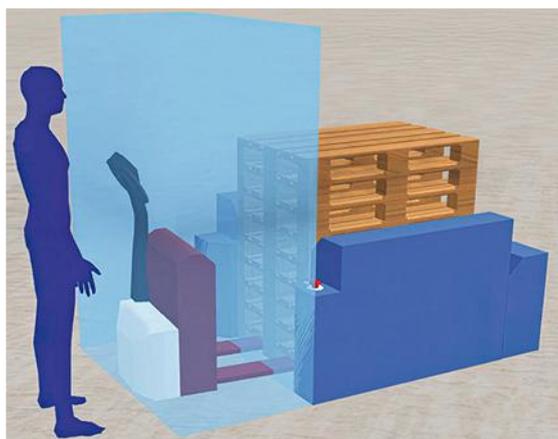
Pour accéder au logiciel Mavimplant : <https://mavimplant.inrs.fr>

des espaces de travail (Cf. Figure 1). À ce jour, le format des maquettes numériques réalisées avec Mavimplant n'est pas compatible avec d'autres logiciels BIM. Tandis que ces derniers ont pour vocation de produire un modèle technique pour la construction d'un bâtiment, Mavimplant vise plutôt à produire une « esquisse » qui permet à un maître d'ouvrage d'exprimer son besoin. Mavimplant propose une bibliothèque d'équipements susceptibles d'être présents dans un local de travail du secteur pour modéliser l'aménagement des espaces. Ces équipements sont configurables (dimensions, caractéristiques techniques) pour s'adapter aux besoins de l'entreprise. De plus, des alertes sont définies pour certains équipements

↓ **FIGURE 1**  
Outil Mavimplant : exemple de maquette 3D d'un entrepôt logistique.



© INRS



↑ FIGURE 2 Outil Mavimplant : volumes d'accès (à gauche) et de sécurité (à droite).

afin d'apporter des conseils et préconisations en matière de prévention quant à leur implantation dans l'espace de travail. Enfin, des volumes d'accès leur sont associés pour permettre aux salariés de disposer d'un espace de travail suffisant pour exploiter l'équipement et assurer sa maintenance opérationnelle. Ces volumes peuvent également être définis comme des volumes de sécurité pour identifier des espaces tridimensionnels dans lesquels l'accès est dangereux (Cf. Figure 2).

### Simulation de l'activité de travail

La simulation d'activité de travail est une méthode essentielle dans les projets de conception ou d'aménagement de locaux, et est complémentaire de la modélisation numérique. Elle permet d'évaluer et de valider les solutions d'aménagement envisagées pour un espace de travail donné. Elle consiste en une analyse dynamique des projets par la simulation de situations de travail projetées à partir de modèles spécifiquement développés à cet effet. Cette approche offre aux utilisateurs la possibilité d'explorer systématiquement l'hypothèse que le projet réponde aux exigences de leurs activités professionnelles. L'objectif de la simulation de l'activité de travail est de refléter celle-ci au plus proche de la réalité, d'en déduire les caractéristiques techniques et fonctionnelles de l'espace de travail, d'évaluer et de faire évoluer les choix de conception, tout en favorisant leur appropriation par les travailleurs. Les outils de simulation associés au BIM permettent aujourd'hui de prendre en compte les questions d'ambiances physiques (éclairage, acoustique, thermique...), mais celles liées à l'organisation du travail restent à développer. Mavimplant permet de matérialiser les caractéristiques techniques et fonctionnelles de l'activité de travail (organisation des espaces de travail, définition des flux et des voies de circulation...), aidant ainsi l'utilisateur de ce logiciel dans la prise en compte des solutions de prévention.

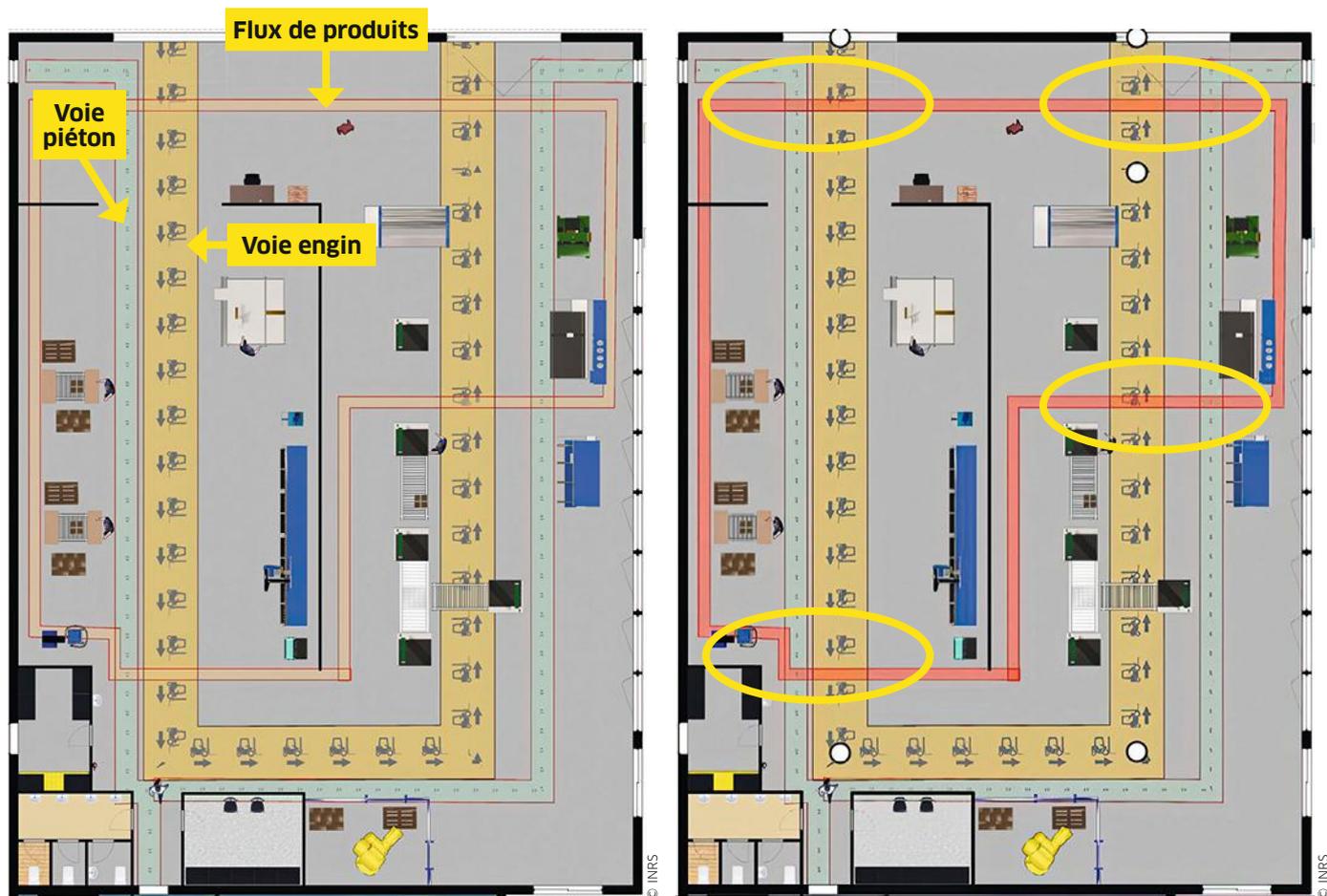
### Différents supports pour la simulation de l'activité de travail

Les différentes techniques de simulation numérique peuvent être classées en fonction de leur objectif, du type de support utilisé, du niveau de détail et de leur complexité. La simulation de l'activité de travail peut s'appuyer sur différents types de supports extraits d'un modèle numérique du bâtiment. Trois types de supports sont développés dans ce contexte : les plans 2D ou esquisses, les maquettes 3D et les visites virtuelles.

- La simulation sur plan 2D ou esquisses consiste à élaborer des scénarios d'usage des espaces de travail afin de décrire les fonctionnements optimaux et les contraintes rencontrées par les utilisateurs. Cette représentation des espaces et des interactions permet de confronter les connaissances des parties prenantes autour d'un plan.
- La simulation sur maquettes 3D intègre la hauteur des éléments présents dans les espaces de travail, facilitant ainsi l'appropriation et la compréhension des volumes par les utilisateurs. Elle offre une meilleure perception de la dimension verticale dans les scénarios de déplacement dans l'espace.
- Les visites virtuelles permettent une immersion individuelle ou collective des utilisateurs dans l'environnement futur de travail. Réaliser ce type de support demande plus de temps et de compétences en réalité virtuelle. Il peut également être utilisé pour mettre en situation des risques potentiels pour les salariés et évaluer les mesures de prévention.

### Simulation de l'organisation des espaces de travail

L'organisation des espaces de travail au sein d'un local est une étape importante dans un processus de conception car elle vise à identifier, pour chaque équipement et poste de travail, l'emplacement qui répondra au mieux aux exigences de



production et aux impératifs en matière de santé et de sécurité. En effet, les conditions de travail dans un local dépendent de la manière dont ces espaces de travail (zones d'activité et équipements de travail qui y sont regroupés) sont agencés. Une implantation inadaptée des espaces de travail, par rapport aux besoins de l'activité, fait souvent apparaître des facteurs de risques professionnels difficilement modifiables par la suite (distances importantes à parcourir, croisements de flux, espace de travail exigu ou encombré...). Pour répondre à cette problématique, Mavimplant utilise une approche novatrice, au travers d'indicateurs d'implantation, pour aider à définir la meilleure implantation au regard des critères de circulation des produits et des personnes. Tout d'abord, l'outil permet de définir des relations de proximité ou d'éloignement entre les différentes zones d'activité placées dans la maquette, afin d'exprimer les besoins et les contraintes liés à la nature et à l'enchaînement des activités. Définir un niveau de proximité entre les postes de travail permet de réduire les distances à parcourir, de faciliter la communication, de regrouper les activités homogènes (indépendantes, compatibles), de rapprocher les équipements qui utilisent les mêmes ressources (outillage, évacuation, alimentation) ou

qui font intervenir les mêmes personnes. Définir un niveau d'éloignement matérialisé par une distance importante permet d'éloigner les activités à risques spécifiques (incendie explosion, produits dangereux, équipement bruyant...) ou de séparer physiquement les activités incompatibles (propre/sale, chaud/froid, bruyant/calme, soudure/peinture, voie de circulation/zone de travail...). Ensuite, la façon dont l'organisation du travail est envisagée dans l'entreprise peut également être représentée par la description des différents flux de circulation et de production. La représentation de ces flux permet d'identifier les croisements et de visualiser les distances à parcourir, sources de risques professionnels (Cf. Figure 3). Ainsi, l'association de la définition des relations de proximité et d'éloignement, des informations sur les flux et de la maquette numérique facilite l'exploration de différentes configurations d'implantation des espaces de travail [9]. Enfin, la maquette numérique de Mavimplant permet d'évaluer la répartition de surface reflétant l'occupation d'une zone d'activité. Cette information, représentée par un camembert de ratio de surface, illustre les surfaces au sol occupées par les équipements, par l'espace nécessaire pour exploiter et maintenir les équipements (volumes

↑ FIGURE 3  
Représentation des flux (à gauche) et identification des croisements potentiellement dangereux (entourés en jaune à droite).



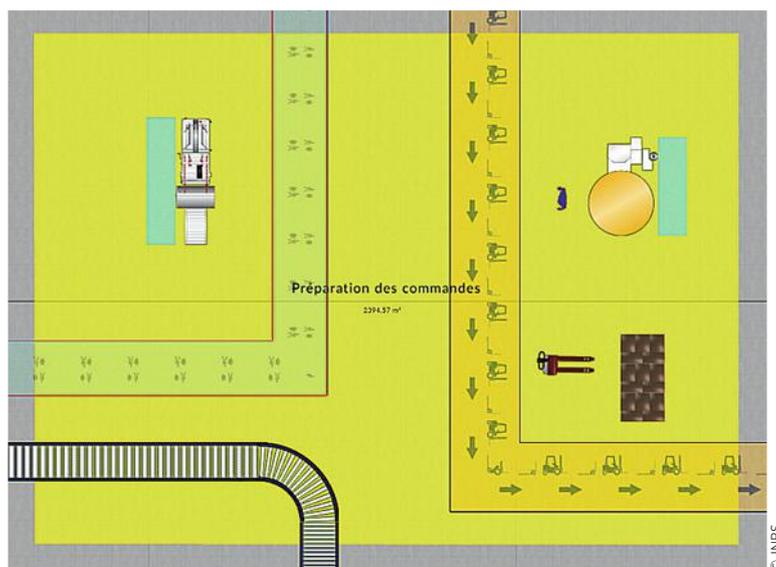
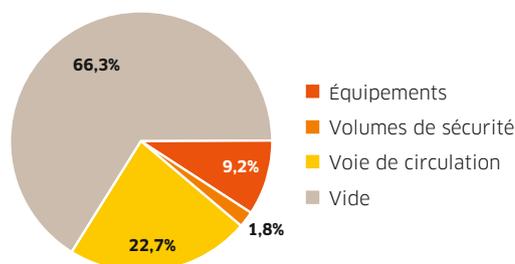


FIGURE 4 ↑ →  
Occupation d'une zone d'activité et camembert de ratio de surface.



d'accès et de sécurité), par les voies de circulation et par les surfaces vides disponibles pour des évolutions futures (Cf. Figure 4). Les indicateurs visuels tels que l'identification des croisements de voies de différentes natures guident le concepteur au moment du tracé pour l'aider à définir au mieux le plan de circulation.

## Conclusion

Depuis plusieurs années, la modélisation et la simulation sont des outils puissants et complémentaires qui tendent à s'imposer dans le domaine de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction. Ces outils sont mis en œuvre pour concevoir des projets, les visualiser en détail, faciliter la communication et planifier les différentes étapes de la construction. Leur utilisation dans la conception des locaux de travail offre des avantages significatifs, et pourrait contribuer à prévenir en amont les risques professionnels. En intégrant ces outils dans une approche collaborative, les entreprises pourraient créer dès le début des lieux de travail sécurisés et ainsi réduire les coûts liés aux actions correctives à mener pour modifier les espaces de travail.

L'outil de conception numérique Mavimplant, développé par l'INRS, permet à la fois de modéliser un projet de construction et de simuler l'organisation des espaces de travail tout en intégrant des solutions de prévention des risques professionnels, en modélisant différents scénarios d'implantation des activités dans le local de travail et en visualisant les différents flux de circulation et de production. Au-delà de l'aspect relatif à la conception technique du local de travail, les maquettes numériques et la simulation peuvent également être employées pour sensibiliser les entreprises aux situations à risques qu'elles sont susceptibles de rencontrer dans leurs futurs espaces de travail. Elles peuvent ainsi identifier *a priori* les risques et prendre les mesures de sécurité appropriées. Dans cette optique, la maquette numérique peut être visualisée avec un équipement de réalité virtuelle pour une meilleure immersion. ●

## BIBLIOGRAPHIE

[1] INRS – *Conception des lieux et des situations de travail. Santé et sécurité : démarche, méthodes et connaissances techniques*. ED 950, 2021, p. 193. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%20950>

[2] INRS – *Valeurs essentielles et bonnes pratiques de prévention*. ED 902, 2003. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%20902>

[3] INRS – *Création de lieux de travail et prévention : 10 points clés pour un projet réussi*. ED 6096, 2022. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206096>

[4] GARDEUX F., MARSOT J. – A 3-D interactive software tool to help VSEs/SMEs integrate risk prevention in workplace

design projects. *Safety science*, fév. 2014, 62, pp. 214-220.

[5] CANETTO P., MARSOT J. – Conception des espaces de travail : la prévention en amont. *Hygiène & sécurité du travail*, 2016, 242, NT 35, pp. 42-45. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=NT%2035>

[6] FENO R., GILLE S., MARSOT J., SAVESCU A. – Comment prendre en main Mavimplant, outil pour la conception des locaux de travail ? *Hygiène & sécurité du travail*, 2021, 265, Fiche FI 30, 2 p. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=FI%2030>

[7] GASQUÈRES L., GILLE S., FENO R., SAVESCU A. – Intervention ergonomique en prévention des risques professionnels

à l'aide de l'outil Mavimplant. *Références en santé au travail*, 2023, TF 307. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=TF%20307>

[8] FENO R., RICCI E., SAVESCU A., LIEHRMANN E. – Conception des locaux de travail en BIM : quels enjeux pour la prévention des risques professionnels ? *Hygiène & sécurité du Travail*, 2022, 266, DC 33, pp. 5-9. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=DC%2033>

[9] FENO R., SAVESCU A. – *Safe workplace layout design by joint analysis of workers and material flows*. In : *International Conference on Industry 4.0 and smart manufacturing*, 2023.

# LES MANNEQUINS NUMÉRIQUES : DES OUTILS DE SIMULATION POUR LA PRÉVENTION DES RISQUES EN CONCEPTION D'ÉQUIPEMENTS DE TRAVAIL

Les mannequins numériques sont des outils informatisés permettant de simuler les interactions entre un opérateur et son futur équipement de travail. Ils constituent des outils précieux pour l'estimation et la réduction des risques professionnels dès le début du processus de conception, sous réserve de bien tenir compte de leurs limites, notamment pour l'estimation des facteurs de risques biomécaniques.

JONATHAN  
SAVIN  
INRS,  
département  
Ingénierie des  
équipements  
de travail

**E**n France, la conception ou l'adaptation d'un équipement ou d'une situation de travail doivent suivre la réglementation en vigueur. Celle-ci comprend notamment les textes issus de la transposition de la directive européenne 2006/42/CE dite « Machines » [1], en cours de remplacement par le règlement européen 2023/1230 du 14 juin 2023 [2]. Cette réglementation vise à éviter la survenue d'accidents ou de maladies professionnelles en imposant aux concepteurs d'équipements de travail de respecter les principes de prévention. Elle définit des exigences essentielles de santé et de sécurité, afin de réduire au maximum les risques liés à l'utilisation de ces futurs équipements. Ces exigences couvrent différents aspects, par exemple les postures et les efforts des futurs opérateurs, l'accessibilité et la visibilité des organes de commande et le dimensionnement du poste [3].

Différentes normes viennent en appui de cette réglementation afin d'assister les concepteurs dans la démarche de prévention intégrée à la conception. Elles présentent l'état de l'art et comportent des recommandations pour quantifier les risques au poste de travail et les réduire au travers d'une démarche itérative et participative. Par exemple, la partie 4 de la norme NF EN 1005 [4] s'attache à l'analyse des postures et mouvements de l'opérateur futur. Dans sa section 4.2, ce document préconise différentes étapes relatives à l'appréciation du risque. Il stipule expressément la

possibilité d'utiliser des « modèles corporels ou des mannequins simulés par ordinateur » dès les stades précoces de la conception, quand aucun prototype physique n'existe ou que les choix technologiques ne sont pas encore figés.

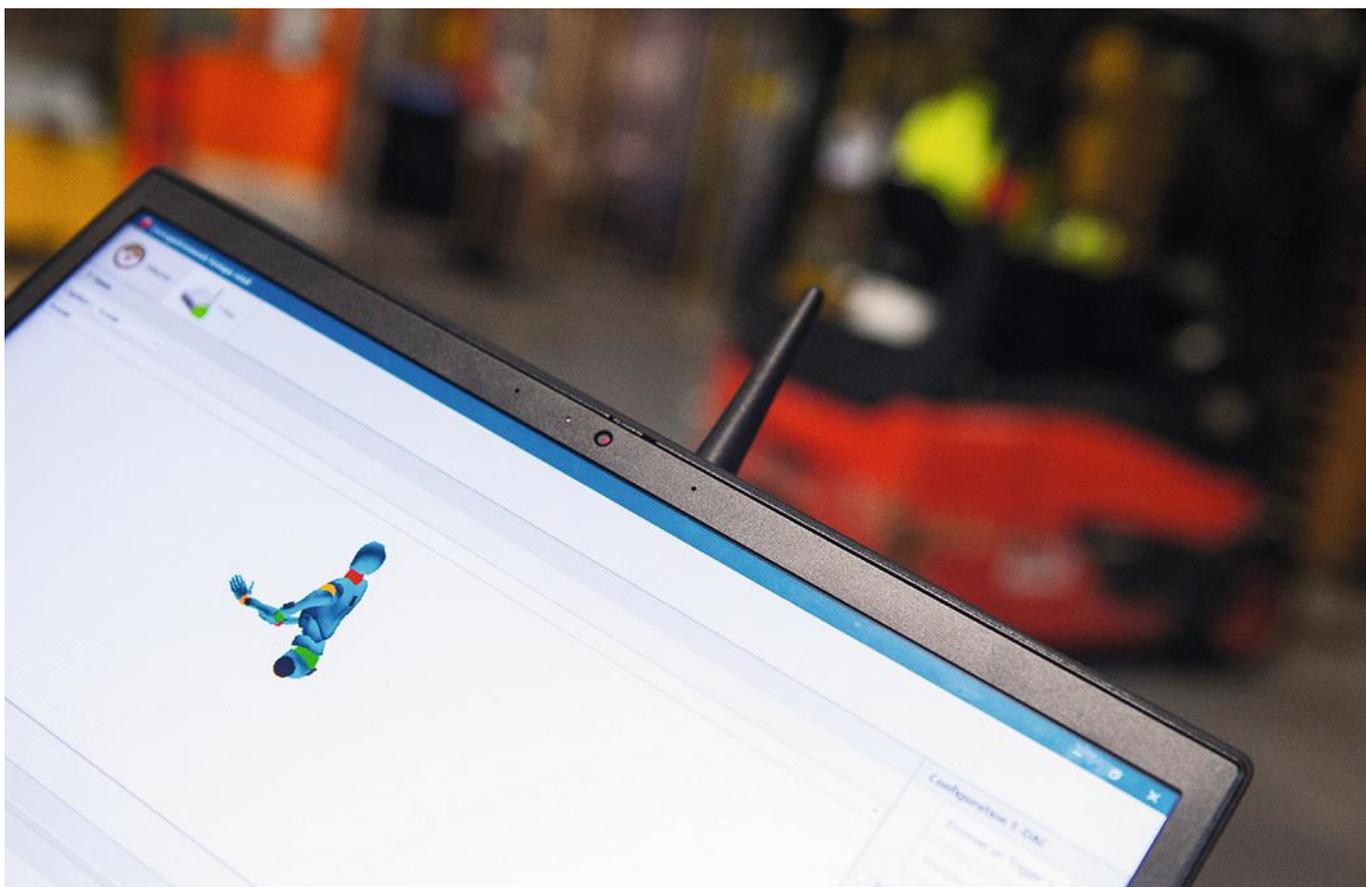
Cet article présente un état de l'art de ce type d'outil d'aide à la conception de situations et d'équipements de travail. La première partie présente les apports et limites des mannequins numériques (MN), également appelés Humains virtuels (en anglais *Digital Human Models*). La deuxième partie présente quelques orientations des travaux de recherche en cours visant à améliorer ces mannequins afin de mieux tenir compte des spécificités du comportement humain, concernant notamment les performances physiques ou la prise en compte de la variabilité des mouvements des opérateurs au poste de travail.

## Des mannequins numériques pour la conception d'équipements de travail

### La genèse des mannequins numériques : approche géométrique et CAO

Les mannequins numériques (MN) sont des outils logiciels fortement associés au domaine de l'ingénierie et de la conception assistée par ordinateur (CAO). À leur origine, dans les années 1960, ils étaient conçus pour fournir des représentations graphiques statiques en deux dimensions d'humains de différentes tailles, généralement pour étudier des problèmes d'accessibilité et de dimensionnement de postes de travail.





© Fabrice Dimier / 2023

Par la suite, grâce aux progrès des technologies numériques, leurs fonctionnalités se sont enrichies. Depuis le début des années 2000, ces MN offrent généralement les fonctionnalités suivantes : visualisation d'un MN dans une scène 3D ; animation automatique du MN à partir de mouvements élémentaires prédéfinis ou grâce à des systèmes de capture de mouvement ; calcul de zones d'atteintes et de champs de vision ; calculs de collision avec l'environnement ; couplage avec des bases de données anthropométriques, etc. Toutes ces fonctions, basées sur de la géométrie, permettent de créer des supports (vues ou vidéos 3D par exemple) pouvant favoriser la collaboration et la communication au sein d'une équipe « projet » (concepteurs, préventeurs, décideurs, etc.). Ils permettent donc de comparer des scénarios, de vérifier l'adéquation de modifications avec les enjeux de prévention (en matière de réduction des risques), de recueillir l'avis de futurs utilisateurs, au cours d'une démarche itérative et participative de prévention intégrée.

L'avènement des technologies de « l'Industrie 4.0 » a encore accéléré le développement et l'intégration des MN dans des solutions logicielles complexes. Ainsi, le concept de « jumeau numérique<sup>1</sup> » a étendu l'usage des MN en vue de la simulation des interactions entre l'opérateur et l'équipement de

travail, depuis les premières phases de conception jusqu'au démantèlement en fin de vie du produit. Aujourd'hui, les principaux éditeurs de logiciels de CAO proposent des MN dans leurs solutions. On peut citer par exemple Delmia Human et la plateforme 3D-Experience chez Dassault Systèmes<sup>2</sup>, ou encore Tecnomatix Jack et la plateforme Process Simulate chez Siemens<sup>3</sup>. Ces éditeurs ajoutent régulièrement des fonctionnalités innovantes à leurs solutions pour faciliter le travail de conception. Ainsi, Dassault Systèmes déploie sa technologie *Smart Posturing Engine* pour proposer automatiquement au concepteur une posture permettant la réalisation d'une tâche, ainsi que sa technologie Ergo4All pour automatiser les vérifications anthropométriques [5]. De la même manière, certains industriels ont développé leur propre logiciel de MN, généralement en collaboration avec des partenaires académiques. C'est le cas par exemple du logiciel IMMA<sup>4</sup> (*Intelligent Moving MANikin*) issu de l'industrie automobile scandinave [6].

Il est à noter que la conception et le développement d'un logiciel de mannequin numérique doivent respecter une norme internationale spécifique à ce domaine, à savoir la norme NF EN ISO 15536 « Mannequins informatisés et gabarits humains ». Celle-ci concerne spécifiquement les aspects anthropométriques et biomécaniques (postures,

efforts) des MN. Sa première partie fixe des exigences générales (définitions, documentation) et sa deuxième partie porte sur la vérification et la validation des grandeurs estimées grâce aux mannequins numériques [7-8].

### Évolutions de l'évaluation des facteurs de risques biomécaniques vers « l'ergonomie virtuelle »

Au-delà des fonctionnalités « géométriques » évoquées précédemment, les éditeurs de MN ont développé des fonctionnalités dites « ergonomiques », c'est-à-dire liées à l'estimation des sollicitations et des facteurs de risques biomécaniques au poste de travail<sup>5</sup>.

En modélisant l'humain sous forme d'un système de « corps rigides polyarticulés », les MN permettent de calculer les efforts mécaniques au niveau des articulations (rachis, épaule, coude, poignet) ou de l'organe effecteur (généralement la main) lors de l'exécution d'une tâche. Ainsi, grâce à un MN, il est possible d'aller plus loin que la conception mécanique et technique d'un équipement de travail, pour calculer des indicateurs couramment utilisés pour l'analyse de l'activité au poste de travail<sup>6</sup> (Rula, Reba, Ocra, EAWS, équations du Niosh, etc.). De fait, le recours aux MN n'est plus cantonné aux logiciels d'aide à la conception (CAO, *Product Lifesystem Management* – PLM). Progressivement, des solutions logicielles ont été développées spécialement pour l'étude et l'évaluation biomécanique des interactions opérateur-système, que ce soit en environnement virtuel ou sur le terrain<sup>7</sup>. On peut citer par exemple les solutions « corps entier » telles que Ergolife (en mode terrain) et Captiv-VR (en mode virtuel) de la société TEA<sup>8</sup>; Nawo Life (en mode terrain) et Nawo Studio (en mode virtuel) de la société HRV simulation<sup>9</sup>; ou encore les solutions XR Ergo (LS Group<sup>10</sup>) et Virtual Manikin (TechViz<sup>11</sup>). D'autres solutions plus légères existent, qui utilisent moins de capteurs et se concentrent sur les membres supérieurs, comme Kimea Lite (sur le terrain) ou Kimea VR (en virtuel) de la société Moovency<sup>12</sup>. Ces solutions reposent sur des systèmes de capture de mouvement récemment démocratisés par l'industrie du jeu vidéo (centrales inertiels, capteurs de profondeur), et d'autres capteurs (rythme cardiaque, activations musculaires, etc.) permettant de quantifier l'activité de l'opérateur (au sens large : *Range of Motion*, positions, vitesses, orientation).

Des solutions encore plus légères sont également proposées, basées sur des dispositifs mobiles (téléphones portables, tablettes), par exemple KIMEA Cloud (Moovency) ou LEA (Ergosanté<sup>13</sup>). Ces solutions sont basées sur la reconnaissance de postures à partir d'images 2D. Cette approche est par principe moins précise qu'une approche par capture de mouvement (par exemple parce que le port

d'habits et le traitement d'informations 2D rendent difficile l'identification des centres articulaires [9]), mais les progrès constants des techniques d'intelligence artificielle (IA) pourraient atténuer ces biais à court ou moyen terme.

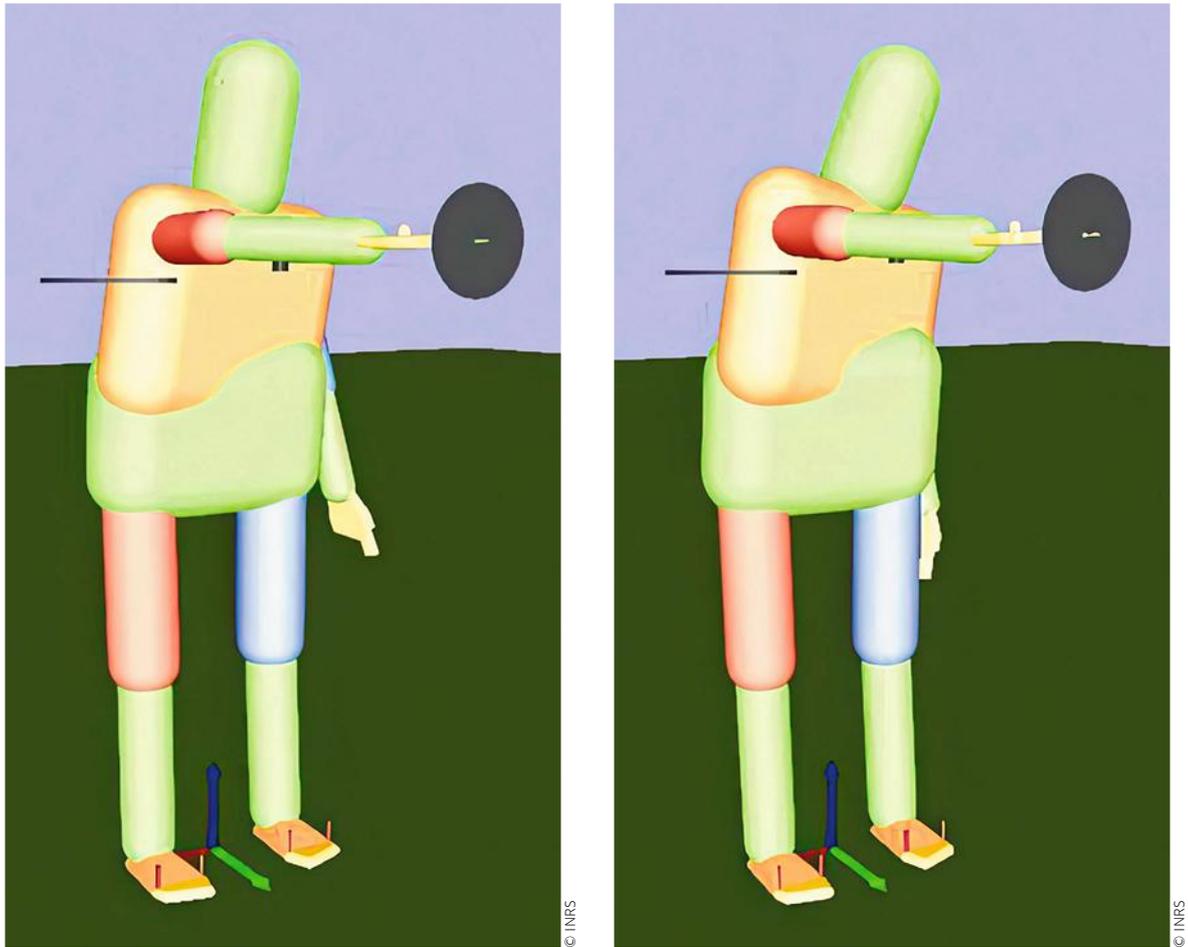
### Perspectives d'amélioration : mieux prendre en compte les caractéristiques du mouvement humain

Le paragraphe précédent a présenté quelques évolutions récentes intégrées dans les logiciels de MN. Le développement de fonctionnalités d'aide à la conception, la convergence avec les technologies virtuelles et la démocratisation de capteurs déployables sur le terrain facilitent effectivement la création de supports de collaboration et de communication au sein d'une équipe « projet » (concepteurs, utilisateurs, préventeurs, etc.). Ce sont des apports significatifs des MN pour la démarche de prévention intégrée à la conception, comme cela avait été identifié au début des années 2010 lors de précédents travaux de l'INRS [10].

Cependant, ces travaux avaient également permis d'établir que le niveau de confiance dans les calculs d'efforts avec ces outils n'était « pas suffisant pour pouvoir les appliquer de manière quantitative et fiable à l'évaluation biomécanique d'une situation future probable ». Or, les principes de simulation mécanique des MN n'ont que très peu évolué, en particulier pour ce qui concerne le calcul des sollicitations biomécaniques (postures extrêmes, effets dynamiques, dualité des efforts articulaire/musculaire, etc.). De même, les bases de données d'efforts maximaux de référence n'ont pas été significativement enrichies ni actualisées. De ce fait, à ce jour, les logiciels de MN à disposition des concepteurs d'équipement de travail souffrent encore de limites qui affectent leur usage pour l'appréciation des postures ou efforts :

- ils sont limités à des simulations statiques, les effets d'inertie sont ignorés (accélération, effets centrifuges). De plus, les capacités de production de force sont supposées indépendantes de la vitesse de mouvement, alors que l'effort qu'un muscle peut fournir dépend de sa vitesse de contraction (« relation force-vitesse ») [11] ;
- ils sont basés sur l'hypothèse des axes indépendants (*Independent Axis Approximation*, IAA). Celle-ci suppose que les capacités de production de force d'un degré de liberté (DDL) d'une articulation (par exemple la flexion-extension du coude) ne dépendent pas de celles des autres DDL de cette articulation ou des articulations voisines (par exemple la pronosupination de l'avant-bras). Or des couplages inter- et intra-articulaires existent et ne sont pas négligeables [12]. En outre, si la littérature scientifique fournit quelques valeurs d'efforts de référence, celles-ci





**FIGURE 1 ↑** Simulation de la VM induite par la survenue de la fatigue musculaire à l'aide d'un MN lors d'une tâche de pointage répétitive. À gauche : sans fatigue. À droite : avec fatigue. Les lois de commande du MN induisent une adaptation de la posture au niveau du tronc, de l'épaule et de la tête.

correspondent généralement à des tâches de laboratoire, non représentatives d'une activité au poste de travail ;

- enfin, ils ne prennent pas en compte une caractéristique essentielle du comportement humain, la variabilité du mouvement (VM). En effet, un humain n'exécute jamais deux fois exactement de la même manière une activité, même répétitive. De même, deux humains n'exécuteront pas une tâche donnée exactement de la même manière. Ce phénomène peut avoir une influence sur l'estimation des facteurs de risques biomécaniques au poste de travail [13].

Les paragraphes qui suivent présentent des travaux de recherche, récents ou en cours, visant à répondre à ces défis scientifiques et techniques, et ainsi améliorer la fiabilité des MN dans le domaine de la simulation des postures et des sollicitations biomécaniques d'un opérateur à son poste de travail.

#### **Prise en compte de la variabilité des mouvements**

La VM est une caractéristique fondamentale du comportement humain. Au poste de travail, elle

se manifeste par des modifications des postures, des trajectoires (positions successives, vitesses de mouvement), des coordinations intra- et intersegmentaires, des efforts exercés et des activations musculaires de l'opérateur au cours du temps. Elle peut être influencée par des facteurs liés à la tâche (taille et masse des objets manipulés, géométrie du poste, etc.) et liés à l'opérateur (âge, sexe, charge mentale, fatigue, expérience, état de santé, etc.). Elle existe aux niveaux intra- et inter-individuels. Au niveau biomécanique, il est admis que la VM peut avoir un effet protecteur sur le système musculosquelettique, par exemple en retardant la survenue de la fatigue musculaire et en répartissant les sollicitations. Il est donc essentiel de la préserver. De plus, puisqu'elle modifie les postures et les efforts, elle peut avoir une influence sur l'appréciation des risques, et ne doit donc pas être négligée dans la démarche de prévention intégrée à la conception [13]. Pourtant, à ce jour, elle n'est pas prise en compte dans les logiciels de MN.

Des travaux de l'INRS ont porté sur la simulation par MN de la VM induite par la fatigue mus-

culaire lors d'une tâche répétitive. Un modèle de fatigue très simplifié et des lois de commandes inspirées du comportement humain ont été intégrés à un humain virtuel très similaire aux MN de CAO [14]. Cette approche a conféré au MN des capacités d'adaptation posturales comparables à celles observées expérimentalement (inclinaison du tronc, élévation de l'épaule et réduction de l'angle d'abduction de l'épaule ; cf. Figure 1). Cette démarche de modélisation de la VM pourrait être améliorée et/ou adaptée à d'autres aspects du comportement humain (apprentissage, expertise, etc.).

### Estimation des capacités humaines de production de force

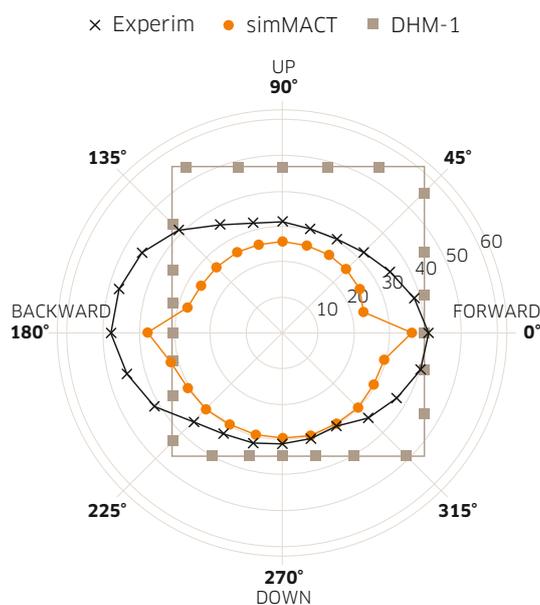
Estimer les capacités de production de force d'un humain est indispensable pour la conception et le dimensionnement d'équipements de travail : l'opérateur pourra-t-il fournir les efforts nécessaires à la réalisation des tâches prescrites tout en préservant sa santé ? Si un dispositif d'assistance physique doit être prévu (exosquelette, robot collaboratif), quelle assistance celui-ci devra-t-il pouvoir fournir ? Comme cela a été évoqué, les estimations des performances physiques humaines fournies par les MN actuels ne sont pas suffisamment fiables pour répondre à ces questions.

Pour pallier cette lacune, des travaux de recherche en cours visent à intégrer dans les MN des fonctionnalités avancées, basées sur des modèles musculosquelettiques (MMS). Ces modèles intègrent des éléments anatomiques et physiologiques de l'appareil locomoteur (muscles, tendons, cartilages) pour bien rendre compte des spécificités motrices humaines. Ils sont plutôt destinés à la recherche dans les domaines de la biomécanique et de l'analyse du mouvement mais sont, pour le moment, trop complexes pour une utilisation directe en conception de poste de travail.

Une première étape vers la combinaison de ces deux types de modèles (MN et MMS) a été développée sous la forme du démonstrateur logiciel « simMACT » [11, 15]. Les simulations ainsi réalisées permettent d'estimer les efforts maximaux d'actionnement pour une configuration quelconque du membre supérieur (angles et vitesses articulaires), avec des résultats comparables ou meilleurs que les MN actuels pour différentes tâches de laboratoire (cf. Figure 2).

### Conclusion

Depuis des décennies, les mannequins numériques font partie de la « boîte à outils » des concepteurs d'équipements de travail. Les progrès de l'informatique (capacités de calculs, environnements virtuels, rendu graphique) et les évolutions technologiques (« industrie du futur », intelligence artificielle) ont élargi leur champ d'application et



↑ FIGURE 2 Couples d'actionnement maximaux de l'épaule en fonction de la direction de l'effort lors d'un exercice statique (en degrés d'angles). En noir : mesures en laboratoire. En marron : simulation par un mannequin numérique. En orange, simulation par la bibliothèque logicielle simMACT, basée sur une simulation musculosquelettique. Celle-ci ne surestime pas les efforts et tient compte des couplages inter-articulaires [15].

le spectre de leurs utilisateurs. Pour autant, fondamentalement, certains constats faits il y a une dizaine d'années sur leurs limites sont toujours d'actualité [10] :

- en tant que support favorisant la collaboration et la communication au sein d'une équipe « projet » (concepteurs, utilisateurs, préventeurs, etc.), les MN présentent un intérêt réel pour la prise en compte des aspects santé et sécurité de travail dans le processus de conception, notamment pour le dépistage précoce de postures sollicitantes à éviter ;
- le niveau de confiance que l'on peut avoir dans les calculs d'efforts avec ces mannequins n'est pour l'instant pas suffisant pour pouvoir les appliquer de manière quantitative et fiable à l'évaluation biomécanique d'une situation future.

Les évolutions régulièrement apportées aux mannequins numériques ne doivent donc pas masquer quelques points de vigilance :

- les simulations de tâches à l'aide de mannequins numériques nécessitent toujours d'être confirmées en conditions réelles. Comme l'indique la norme NF EN ISO 15536-1 : « il est recommandé de vérifier les résultats de [simulation par mannequin numérique] à l'aide d'essais pratiques réalisés sur des personnes réelles » ;
- les bonnes pratiques de conception recommandent une démarche de conception itérative et collaborative. En d'autres termes, des simulations avec mannequins numériques doivent



faire l'objet de revues et d'analyses associant des concepteurs, des utilisateurs et des préventeurs (ergonomes, experts en santé et sécurité au travail) tout au long de la conception de la situation de travail ;

- l'estimation et la réduction des risques professionnels en conception d'équipements de travail ne peuvent pas se limiter à l'aspect « biomécanique » de l'activité future. D'autres facteurs de risques doivent être pris en compte (risques physiques, dimensions cognitives et psychiques, organisation, etc.). Des outils de simulation permettent d'estimer et de réduire spécifiquement certains de ces risques, dont plusieurs sont présentés dans ce dossier.

En conclusion, le recours aux mannequins numériques peut apporter une aide considérable aux concepteurs d'équipements de travail dès les phases initiales de la conception. Des fonctionnalités supplémentaires leur sont progressivement apportées, notamment pour permettre une meilleure prise en compte des sollicitations biomécaniques. Néanmoins, la communauté scientifique et les éditeurs de MN doivent encore fournir des efforts afin d'améliorer ces outils pour une estimation au plus proche du comportement des opérateurs humains au poste de travail. ●

1. Un jumeau numérique est un modèle virtuel d'un objet physique ou d'un système technique, alimenté par des mesures de terrain et conçu pour l'étude, l'optimisation et la maintenance de ce système dans son environnement et sur tout son cycle de vie.

2. Voir : <https://www.3ds.com/products/delmia/industrial-engineering/ergonomics>

3. Voir : <https://www.dex.siemens.com/plm/tecnomatix/process-simulate-human>

4. Voir : <https://www.youtube.com/watch?v=4rP36HA8yjY> (interview en suédois).

5. Cela correspond à la terminologie habituelle dans le domaine des MN. Pour autant, il est indispensable de souligner que la démarche ergonomique ne doit absolument pas se limiter à l'estimation des facteurs de risques biomécaniques, mais qu'elle doit intégrer d'autres aspects de l'activité, notamment cognitifs, psychologiques, organisationnels, etc.

6. Rula : Rapid Upper Limb Assessment. Reba : Rapid Entire Body Assessment. Ocr : Occupational Repetitive Action. EAWS : European Assembly Work Sheet. Il s'agit d'outils d'évaluation de l'exposition aux facteurs de risques biomécaniques, calculés à partir des caractéristiques de la tâche observée : postures, charges, répétitivité, etc.

7. La différence ne se joue pas sur l'opposition « RV versus terrain », mais sur l'opposition « MN en mode CAO versus MN en mode non CAO {RV ou terrain} ».

8. Voir : <https://www.teaergo.com/fr/>

9. Voir : <https://nawo-solution.com/>

10. Voir : <https://fr.xrsuite.fr/xr-ergo-1>

11. Voir : <https://www.techviz.net/fr/virtual-manikin/>

12. Voir : <https://moovency.com/kimea-cloud>

13. Voir : <https://lea.ergosante.fr>

## BIBLIOGRAPHIE

[1] DIRECTIVE 2006/42/CE du Parlement européen et du conseil du 17 mai 2006. *Journal officiel de l'Union européenne (JOUE)*, n° L 157-24 du 09 juin 2006, pp. 24-86.

[2] RÈGLEMENT (UE) 2023/1230 du Parlement européen et du conseil du 14 juin 2023 sur les machines. *JOUE* du 29 juin 2023. Voir aussi : Dossier Machines. *Hygiène & sécurité du travail*, 2023, 273, pp. 18-44. Accessible sur : [www.hst.fr](http://www.hst.fr)

[3] INRS – *Conception et aménagement des postes de travail*. 2013, ED 79, coll. Fiche pratique de sécurité. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?ref=INRS=ED%2079>

[4] NORME NF EN 1005-4 – *Sécurité des machines. Performance physique humaine – Partie 4 : évaluation des postures et mouvements lors du travail en relation avec les machines*. Afnor, 2008.

[5] BOURRET Q. ET AL. – *Ergo4All: an ergonomic guidance tool for non-ergonomist*. In : *Congress of the International Ergonomics Association*. Springer, 2021, pp. 382-390.

[6] HANSON L. ET AL. – *IMMA-Intelligently moving manikins in automotive applications*.

In : *Third international summit on human simulation* (ISHS2014), 2014.

[7] NORME NF EN ISO 15536-1 – *Ergonomics. Computer manikins and body templates – Part 1: General requirements*. Afnor, 2008.

[8] NORME NF EN ISO 15536-2 – *Ergonomics. Computer manikins and body templates – Part 2: Verification of functions and validation of dimensions for computer manikin systems*. Afnor, 2007.

[9] KELLER M. ET AL. – From skin to skeleton: towards « Biomechanically accurate 3D Digital Humans ». *ACM Transactions on graphics* (TOG), 2023, 42 (6), pp. 1-12.

[10] SAVIN J. – Apports et limites des modèles anthropométriques numériques pour l'évaluation ergonomique de postes de travail. *Hygiène & sécurité du travail*, 2012, 226, pp. 27-34. Accessible sur : [www.hst.fr](http://www.hst.fr)

[11] SAVIN J. ET AL. – Simulation of maximum isometric and isokinetic elbow actuation torques based on zonotopes. *Computer methods in biomechanics and biomedical engineering*, 2023, pp. 1-2. Accessible sur : [hal-04140099](https://hal-04140099)

[12] HODDER J.N. ET AL. – Testing the assumption in ergonomics software that overall shoulder strength can be accurately calculated by treating orthopedic axes as independent. *Journal of electromyography and kinesiology*, 2016, 29, pp. 50-54.

[13] SAVIN J., GAUDEZ C. ET AL. – Evidence of movement variability patterns during a repetitive pointing task until exhaustion. *Applied Ergonomics*, 2021, 96. Accessible sur : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003687021001113>

[14] SAVIN J., GAUDEZ C. ET AL. – Digital human model simulation of the movement variability induced by muscle fatigue during a repetitive pointing task until exhaustion. *International journal of the digital human*, 2023, 2 (3), pp. 197-222.

[15] SAVIN J., REZZOUG N. – SimMACT, a software demonstrator to improve maximum actuation joint torques simulation for ergonomics assessment. *Journal of biomechanical engineering*, 2024, 146 (4).

# LA RÉALITÉ VIRTUELLE : RÔLE ET APPORTS POUR LA CONCEPTION SÛRE DES POSTES ET ÉQUIPEMENTS DE TRAVAIL

La réalité virtuelle, technologie qui connaît un renouveau depuis quelques années, s'illustre par de nombreuses applications dans l'industrie. Elle permet notamment de simuler un poste de travail pour en analyser le fonctionnement et les risques. Elle offre des opportunités pour un processus de conception plus efficace et des postes de travail plus sûrs mais, comme tout outil de simulation, elle présente certaines limites qu'il convient de prendre en compte.

---

GABIN  
PERSONENI  
INRS,  
département  
Ingénierie des  
équipements  
de travail

---

## Les technologies de la réalité virtuelle

La réalité virtuelle (RV) désigne communément un ensemble de technologies numériques ayant pour objectif d'immerger leur utilisateur dans un environnement virtuel. L'immersion est accomplie *via* différents périphériques visuels, auditifs voire haptiques, permettant de voir, entendre et interagir avec l'environnement virtuel et les objets qui le composent.

Ainsi, la RV peut être définie par trois caractéristiques principales [1] : la simulation en temps réel d'un environnement, objet ou système virtuel ; la capacité d'interaction avec ce qui est simulé ; le sentiment de présence, d'exister dans et de faire partie de l'environnement virtuel.

Bien que le concept de la RV existe depuis les années 1960, qui ont vu naître les premiers prototypes de visiocasques ou HMD (*head-mounted display*), ce n'est qu'à partir des années 1990 que la RV commence à être adoptée dans l'industrie. Cette époque est notamment marquée par l'invention des systèmes de salles immersives ou Cave [2] (*Cave automatic virtual environment*). Ces technologies y seront utilisées notamment pour la formation, la télé-opération, ou l'aide à la conception de postes de travail à laquelle on s'intéressera dans cet article.

Au début des années 2000, une étude de l'INRS avait mis en évidence des limites d'utilisation des environnements virtuels, notamment la difficulté de simuler fidèlement le fonctionnement des équipements avec lesquels l'opérateur inter-

agit dans les limites techniques des solutions de RV de l'époque [3]. Néanmoins, elle concluait que la RV favorisait l'intégration des opérateurs dans le processus itératif de conception d'un poste, en leur permettant de se projeter dans une maquette interactive virtuelle et d'y simuler la réalisation d'une tâche [4] et qu'un futur poste de travail pouvait ainsi être mis à l'épreuve par des opérateurs, puis rapidement décliné en différentes versions prenant en compte leurs retours.

C'est dans les années 2010 qu'émerge la nouvelle génération technologique de la RV avec la commercialisation de visiocasques à bas coût, originellement destinés au grand public à des fins ludiques [5]. Elle sera accompagnée par l'évolution des capacités de rendu visuel et des outils de développement des environnements virtuels. Cette nouvelle génération d'outils de RV trouve ses applications industrielles dans la quatrième révolution industrielle ou industrie 4.0 : un changement de paradigme dans les techniques de fabrication et l'organisation du travail, rendu possible par les avancées des technologies numériques telles que l'intelligence artificielle, la *Big Data*, la fabrication additive, les simulations numériques, la robotique collaborative et la réalité mixte. Cette quatrième révolution industrielle permettrait une plus grande autonomie et flexibilité des systèmes de production, avec une itération rapide des conceptions de produits ou de postes de travail à un coût réduit. Si les applications de la RV y restent inchangées (conception,



formation, téléopération), la technologie et sa facilité de mise en œuvre ont bien évolué. L'intérêt de l'utilisation de cette technologie en conception est double : d'une part, le recours à la RV peut remplacer partiellement l'utilisation de maquettes physiques en favorisant une itération rapide sur des modèles virtuels ; d'autre part, la RV permet de détecter les risques quand ils ne sont encore que virtuels, identifiables par le retour d'expérience des futurs opérateurs. Les outils de RV constituent donc des aides à la conception pour évaluer en amont le bon fonctionnement et la sécurité d'un poste de travail. Ils ne sont néanmoins pas sans limites et inconvénients pour les concepteurs. Afin d'en promouvoir un meilleur usage, on présentera quelques cas d'utilisation pertinents de ces outils, et les limites qu'ils peuvent présenter en conception de postes de travail.

### Applications en conception et prévention

Un nouveau poste de travail doit répondre à la fois aux exigences fonctionnelles et de sécurité. Ainsi, il convient de mettre en œuvre un processus itératif de conception et d'évaluation des risques. En effet, pour chaque phénomène dangereux identifié lors de l'analyse des risques d'une solution proposée, des mesures de prévention ou de protection doivent être envisagées. Chaque modification ainsi apportée doit mener à une nouvelle analyse des risques. En suivant ce processus itératif, il est possible de prendre en compte un maximum de facteurs de risques professionnels. À chaque itération au cours du processus de conception, la RV est censée permettre d'obtenir des retours d'expérience des opérateurs en immersion sur le prototype de poste de travail virtuel, et donc de valider les choix de prévention en considérant les retours du futur opérateur ainsi que l'ensemble du poste de travail et de la tâche à effectuer.

### Évaluation fonctionnelle et ergonomique

La RV est couramment utilisée pour aider aux choix de conception d'un poste de travail d'un point de vue fonctionnel : on vérifie si la tâche est réalisable dans de bonnes conditions et si l'opérateur peut accéder à, et manipuler sans difficulté des pièces et outils, et effectuer les contrôles nécessaires. Cette validation fonctionnelle doit s'accompagner d'une validation des choix de prévention : on pourra s'assurer, par exemple, que la mise en œuvre d'un dispositif de protection (par exemple, scrutateur, barrière immatérielle) est adaptée au poste et à la tâche à réaliser.

Les systèmes de RV peuvent également incorporer des capteurs de position, de vitesse, d'*eye-tracking*, voire de capture du mouvement du corps entier. Ils sont ainsi censés aider à l'analyse des postures et des mouvements des opérateurs sur

le futur poste de travail, notamment *via* des outils permettant d'automatiser la cotation des facteurs biomécaniques (plus particulièrement des postures).

### Robotique collaborative

L'évolution de l'industrie et des machines utilisées soulève une nouvelle problématique pour la RV : simuler des machines toujours plus complexes. C'est le cas, par exemple, pour les postes de travail mettant en œuvre un robot collaboratif [6]. L'interaction entre l'humain et la machine est omniprésente, et l'évaluation du poste de travail en RV ne saurait faire abstraction de la complexité du fonctionnement du robot.

La RV peut néanmoins compter sur des composants logiciels de simulation robotique existants tels que ROS (*Robot Operating System*) [7], un projet *open source* auquel les fabricants contribuent en mettant à disposition des caractéristiques techniques et des outils de simulation pour leurs robots. Des *plug-in* permettant d'interfacer ROS avec des logiciels de RV existent [8, 9] ; ils rendent possible l'intégration à l'environnement virtuel de robots d'apparence et de fonctionnement réalistes. Ces développements ouvrent la possibilité de simuler avec une bonne conformité ces nouvelles situations de travail, avec toutefois certaines limites, liées notamment aux modèles de simulation physique. De même, il n'existe pas à ce jour d'outils de simulation pour l'ensemble des machines industrielles : les concepteurs souhaitant utiliser la RV doivent s'assurer d'être capables de simuler le plus fidèlement possible les machines du poste de travail.

### Validité et limites

Pour que les outils de RV soient utiles à la conception de postes de travail, les observations réalisées dans l'environnement virtuel sur l'analyse des postures, la sécurité et la fonctionnalité d'un poste doivent s'approcher au mieux de la situation réelle : on parlera alors de la validité de la simulation. On peut s'intéresser à deux composantes de la validité : la validité interne et la validité externe [4].

- La validité interne repose sur la capacité de la technologie à reproduire et simuler correctement et en temps réel, sur les plans visuel et fonctionnel les situations, machines et équipements réels, dans l'environnement virtuel : l'opérateur peut reproduire dans la simulation les mêmes séquences d'opérations, en disposant des mêmes repères visuels que dans la situation réelle. On peut considérer la validité interne comme la conformité de la simulation vis-à-vis des caractéristiques des équipements de travail et de la tâche prescrite.

- La validité externe correspond à la capacité de la simulation à produire des observations, notamment sur l'activité d'un opérateur, généralisables au futur poste de travail. On détaillera ici certaines limites de la validité des outils de RV, notamment sur la façon dont un opérateur perçoit, agit et interagit dans l'environnement virtuel.

## Perception de l'environnement

La perception de l'environnement virtuel est l'un des éléments déterminants du sentiment de présence et d'interaction avec le poste de travail virtuel. La plupart des dispositifs visuels de RV offrent à l'utilisateur une vision stéréoscopique : en affichant à chaque œil une image rendue d'un point de vue légèrement différent, ils produisent une illusion de profondeur, on perçoit alors l'environnement virtuel en « 3D ». Néanmoins, ces dispositifs affectent la perception des distances ou de la vitesse dans l'environnement virtuel, la précision de la perception s'améliorant avec la qualité des affichages [10-11] et le champ de vision du dispositif [12]. L'opérateur peut être amené à modifier son comportement à cause de cette distorsion de la perception, en se positionnant par exemple plus loin d'une machine en fonctionnement dans l'environnement virtuel. Ainsi le placement d'un dispositif de protection validé auprès des opérateurs en RV pourrait s'avérer inadéquat sur le poste de travail réel. L'effet de distorsion peut toutefois être réduit en ajoutant à l'environnement virtuel le maximum d'éléments visuels issus de l'espace de travail réel de l'opérateur [13]. Au-delà de l'immersion visuelle, la RV permet de placer un opérateur dans une situation virtuelle présentant des risques, sans l'exposer à un danger réel. Néanmoins, la perception du risque par l'opérateur dans l'environnement virtuel diffère de la réalité : s'il est possible, par exemple, de réaliser une évaluation objective du risque sur une interaction virtuelle avec un robot, le ressenti subjectif qu'en aurait l'opérateur est amoindri [14]. Le risque restant virtuel, des mesures physiologiques montrent que le stress engendré n'est pas représentatif d'une situation réelle [15]. Ainsi, la RV ne semble pas être un outil adéquat pour évaluer l'acceptabilité ou le stress liés à un équipement ou une situation de travail.

## Interaction

La RV est généralement utilisée pour simuler des interactions manuelles entre l'opérateur et son poste de travail pour la réalisation d'une tâche donnée. Cependant, aux consignes et contraintes de la tâche viennent s'ajouter les contraintes des dispositifs de RV employés. Une interaction simple, telle que la prise d'un objet peut par

exemple se réaliser *via* une simple pression d'un bouton ou une surface tactile d'un contrôleur, ou *via* des systèmes de capture de mouvement estimant la position de chaque doigt de la main (par exemple, gants ou capteurs optiques).

D'autres dispositifs, dits « haptiques », permettent des interactions avec l'environnement virtuel avec retour de force et sensation tactile, apportant des informations sensorielles complémentaires à l'opérateur. Le retour de force peut également être utilisé pour simuler la masse des objets manipulés, ou encore prévenir l'interpénétration d'objets virtuels par l'utilisateur de façon à lui éviter d'effectuer des gestes impossibles à



© Fabrice Dimier pour l'INRS / 2023

réaliser sur le poste réel. Ce retour haptique peut également améliorer les performances et la validité de la simulation dans les tâches où le retour visuel est insuffisant, par exemple lors de la manipulation d'une pièce non visible par l'opérateur. Néanmoins, certains de ces dispositifs limitent la liberté de mouvement ou rendent plus difficiles certaines interactions avec l'environnement. Des combinaisons haptiques voient également le jour : elles offrent aux utilisateurs un retour tactile au contact d'obstacles dans l'environnement virtuel. Ce type de combinaison simule, à l'aide d'une

Utilisation de la réalité virtuelle par des salariés du secteur de la grande distribution lors d'une formation – action à la sécurité.





© Gaël Kerbaol / INRS / 2018

Soutenance de fin d'étude à l'UTBM (département ergonomie, design et ingénierie mécanique). Les étudiants utilisent la RV pour mettre en situation des propositions d'aménagements de lieux et de situations de travail.

simple sensation tactile, un contact qui amènera l'opérateur à ajuster son geste de manière à éviter les collisions ou une interpénétration avec l'environnement virtuel, le conduisant à adopter des postures ou des actions sur le poste plus proches du travail réel [16]. Cela peut aider le concepteur à estimer si l'opérateur peut bien réaliser la tâche sur le poste de travail et à observer des postures davantage représentatives de la situation réelle. Le choix d'un système a une influence sur le type d'interaction qu'il est possible de simuler, mais aussi sur la difficulté de prise en main du système lui-même. Par exemple, saisir un objet par la pression d'un bouton est simple pour l'opérateur, mais ne sera pas représentatif du mouvement réel. En revanche, un système de capture du mouvement de

la main complète produira des mouvements plus réalistes, mais représentera une charge mentale supplémentaire pour l'opérateur [17]. Le concepteur devra alors faire un choix entre observer la tâche dans le détail ou l'observer dans sa globalité. Malgré les progrès technologiques, les limites techniques des interfaces physiques et modèles numériques d'interaction persistent : le concepteur pourra alors être confronté à une difficulté voire à l'impossibilité à simuler certaines interactions très fines avec l'environnement virtuel [18]. De manière générale, l'opérateur immergé dans un environnement virtuel réalisera ses tâches de manière moins précise ou plus lente que dans la réalité.

### Cybercinétose

Au-delà des limites techniques de la RV, il existe certains risques pour ses utilisateurs. Notamment, la perception visuelle de l'environnement virtuel en mouvement peut être ressentie comme incohérente avec les informations perçues par le système vestibulaire impliqué dans la gestion de l'équilibre et de la position dans l'espace, ce qui peut être source de cybercinétose. Ce terme désigne un ensemble de symptômes qui s'apparentent au mal des transports, tels que la nausée, des maux de tête, une fatigue oculaire ou une sensation de vertige [19]. Sa prévention est complexe : les caractéristiques techniques du dispositif de RV et de l'application utilisées peuvent avoir un fort impact sur le risque de cybercinétose. D'autres facteurs, comme la durée, la fréquence d'exposition [20], l'activité réalisée et les mouvements simulés [21] dans l'environnement virtuel peuvent également accroître ou réduire l'incidence des symptômes de cybercinétose. Même si des recommandations existent pour en réduire l'incidence [19], elles restent néanmoins partielles et l'usage de ce type de technologie doit faire l'objet d'une vigilance particulière. Au-delà des symptômes imposant l'arrêt de l'usage de la RV, la cybercinétose présente un obstacle évident au sentiment de présence dans l'environnement virtuel [22], affectant négativement la validité de la simulation [23]. En effet, les utilisateurs sont susceptibles de modifier leur stratégie lors de la réalisation de la tâche en RV [24] pour prévenir ou réduire le malaise ressenti.

### Conclusion

L'apport majeur de la RV est qu'elle permet d'impliquer l'opérateur au plus tôt dans la conception de son futur poste de travail, à l'aide d'une maquette virtuelle, fonctionnelle et interactive. Les retours de l'opérateur permettent d'ajuster la conception du futur poste et d'itérer plus rapidement vers une

conception adaptée, en identifiant les limites ou les risques avant même la réalisation d'un prototype physique fonctionnel du poste de travail.

Cependant, la RV n'est pas sans limites techniques, et ce, malgré l'innovation rapide de ces dernières années. Ainsi certaines tâches ou interactions fines avec les éléments de l'environnement virtuel restent difficiles à simuler, ou demandent de la part de l'opérateur un apprentissage conséquent du dispositif en lui-même. En pratique, cela conduit les opérateurs à effectuer les tâches manuelles en RV plus lentement ou avec moins de précision. Un retour haptique peut être utilisé afin de rendre les interactions plus réalistes, notamment pour empêcher les opérateurs d'effectuer des gestes qui seraient physiquement impossibles dans l'espace de travail réel. Néanmoins, il convient de garder des modalités d'interaction simples, afin que l'uti-

lisation du système de RV lui-même ne présente pas une charge mentale disproportionnée par rapport à la tâche simulée.

La RV peut accompagner le concepteur dans ses choix de conception et de sécurité du futur poste de travail en concertation avec l'opérateur. Elle est ainsi complémentaire avec la validation du poste vis-à-vis des normes de sécurité propres aux équipements de travail ou au procédé, mais ne s'y substitue pas. Néanmoins, les concepteurs doivent également rester attachés à l'objectif de diminuer les facteurs de risques professionnels dans l'environnement de travail réel et non seulement virtuel. La RV permet de détecter des risques ou dysfonctionnements tôt dans le processus itératif de conception, elle a néanmoins ses limites que seul un travail sur un poste de travail réel permet de dépasser. ●

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] ZELTZER D. – Autonomy, interaction, and presence. *Presence: teleoperators & virtual environments*, 1992, 1(1), pp. 127-132.
- [2] CRUZ-NEIRA C. ET AL. – The CAVE: audio visual experience automatic virtual environment. *Communications of the ACM*, 1992, 35 (6), pp. 64-73.
- [3] MARC J., BELKACEM N., MARSOT J. – Virtual reality: a design tool for enhanced consideration of usability "validation elements". *Safety science*, 2007, 45 (5), pp. 589-601.
- [4] MARC J., MARSOT J. – *Prise en compte de l'utilisateur par l'intermédiaire de la réalité virtuelle. Recherche de validation. In : 42<sup>e</sup> Congrès de la Société d'ergonomie de langue française (SELF). Saint-Malo, 2007.*
- [5] MUÑOZ-SAAVEDRA L. ET AL. – Augmented and virtual reality evolution and future tendency. *Applied sciences*, 2020, 10 (1), p. 322.
- [6] BLAISE J.C. ET AL. – Hommes – robots : collaborer en sécurité. *Hygiène & sécurité du travail*, 2022, 268, DO 38, p. 19. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=DO%2038>
- [7] QUIGLEY M. ET AL. – ROS: an open-source robot operating system. In : *ICRA workshop on open source software*. Kobe (Japon), 2009.
- [8] BABAIAANS E. ET AL. – ROS2Unity3D: high-performance plugin to interface ros with Unity3d engine. In : *9th Conference on artificial intelligence and robotics and 2<sup>nd</sup> Asia-Pacific International Symposium*. IEEE, 2018.
- [9] WHITNEY D. ET AL. – ROS Reality: a virtual reality framework using consumer-grade hardware for ROS-enabled robots. In : *IEEE/RSJ International Conference on intelligent robots and systems (IROS)*. IEEE, 2018.
- [10] RYU J., HASHIMOTO N., SATO M. – Influence of resolution degradation on distance estimation in virtual space displaying static and dynamic image. In : *International Conference on cyberworlds (CW'05)*. IEEE, 2005.
- [11] KELLY J.W., CHEREP L.A., SIEGEL Z.D. – Perceived space in the HTC Vive. *ACM Transactions on applied perception (TAP)*, 2017, 15 (1), pp. 1-16.
- [12] JONES J.A., SWAN J.E., BOLAS M. – Peripheral stimulation and its effect on perceived spatial scale in virtual environments. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 2013, 19 (4), pp. 701-710.
- [13] AHMED F. ET AL. – Influence of tactile feedback and presence on egocentric distance perception in virtual environments. In : *IEEE Virtual reality conference (VR)*. IEEE, 2010.
- [14] NG P.P., DUFFY V.G., YUCEL G. – Impact of dynamic virtual and real robots on perceived safe waiting time and maximum reach of robot arms. *International journal of production research*, 2012, 50 (1), pp. 161-176.
- [15] VAN DAMMEN L. ET AL. – Evoking stress reactivity in virtual reality: a systematic review and meta-analysis. *Neuroscience & biobehavioral reviews*, 2022, 138. Accessible sur : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0149763422001981?via%3Dihub>
- [16] LOUISON C., FERLAY F., MESTRE D.R. – Spatialized vibrotactile feedback contributes to goal-directed movements in cluttered virtual environments. In : *IEEE Symposium on 3D user interfaces (3DUI)*. IEEE, 2017.
- [17] HAMEED A., PERKIS A., MÖLLER S. – Evaluating hand-tracking interaction for performing motor-tasks in VR-learning environments. In : *13<sup>th</sup> International Conference on quality of multimedia experience (QoMEX)*. IEEE, 2021.
- [18] VIOLA E., SOLARI F., CHESSA M. – Small objects manipulation in immersive virtual reality. In : *VISIGRAPP (2: HUCAPP)*. 2022.
- [19] BRUN L. – Cybercinétose en milieu professionnel. *Références en santé au travail*, 2020, 161, TP 40. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=TP%2040>
- [20] DEL CID D.A. ET AL. – Exploratory factor analysis and validity of the virtual reality symptom questionnaire and computer use survey. *Ergonomics*, 2021, 64 (1), pp. 69-77.
- [21] DAVIS, S., NESBITT K., NALIVAICO E. – Comparing the onset of cybersickness using the oculis rift and two virtual roller coasters. In : *Proceedings of the 11th Australasian Conference on interactive entertainment (IE)*, 2015.
- [22] WEECH S., KENNY S., BARNETT-COWAN M. – Presence and cybersickness in virtual reality are negatively related: a review. *Front Psychol*, 2019, 10, p. 158.
- [23] DENIAUD C. ET AL. – The concept of "presence" as a measure of ecological validity in driving simulators. *Journal of interaction science*, 2015, 3 (1).
- [24] WANG G., SUH A. – User adaptation to cybersickness in virtual reality: a qualitative study. In : *27th European Conference on information systems (ECIS): Information systems for a sharing society*. Association for Information Systems (AIS), 2019.



# Études & solutions

## Notes techniques

Exosquelettes d'assistance du dos :  
apports de la technologie robotisée

P.55

Risque biologique dans le secteur  
du compostage : élaboration d'une méthode  
d'aide à son évaluation

P.64

Exposition à l'amiante  
dans la filière de la collecte  
et du traitement des eaux usées :  
état des lieux

P.72

## Étude de cas

Caractérisation des expositions à l'amiante  
dans les activités d'hydrocurage :  
retour d'expérience et préconisations  
de prévention

P.78

## Base de données

Portrait rétrospectif des expositions  
professionnelles à l'ozone  
en France de 2002 à 2022

P.82

## Notes techniques

# EXOSQUELETTES D'ASSISTANCE DU DOS : APPORTS DE LA TECHNOLOGIE ROBOTISÉE

Les exosquelettes d'assistance du dos ont pour objectif d'assister en force les opérateurs lors de tâches physiques de travail et, ainsi, de contribuer à la prévention des lombalgies. L'apport des technologies robotisées reste cependant encore peu étudié. L'INRS a mené une étude en laboratoire, afin d'analyser les conséquences biomécaniques de l'utilisation de deux exosquelettes robotisés d'assistance du dos, dont les résultats sont présentés dans cet article.

MATHILDE  
SCHWARTZ,  
KÉVIN  
DESBROSSES  
INRS,  
département  
Homme  
au travail

Dans un contexte d'évolution technologique, de nouveaux systèmes d'assistance physique, tels que les exosquelettes professionnels, sont déployés dans les entreprises pour prévenir les accidents du travail et les maladies professionnelles. L'objectif annoncé de l'utilisation de ces exosquelettes est de réduire les sollicitations physiques des travailleurs tout en préservant leur expertise de travail (prise de décision, qualité du geste...). En d'autres termes, ils permettraient de limiter localement le niveau de force développé par les opérateurs lors de leurs tâches de travail, réduisant ainsi l'un des facteurs de risque biomécaniques de survenue de troubles musculosquelettiques (TMS) lié à un travail physiquement exigeant. Un exosquelette professionnel est une structure externe portée par un salarié pour l'assister dans ses mouvements : il génère un couple de forces réduisant ou remplaçant la force initialement nécessaire pour accomplir une tâche de travail. Il existe de nombreux types d'exosquelettes, dépendant tout d'abord de la ou des articulations qu'ils assistent : dos, membres supérieurs, membres inférieurs ou ensemble du corps. Ils se divisent également en deux catégories selon la technologie utilisée. Les exosquelettes passifs utilisent des éléments élastiques, des ressorts ou des vérins pour stocker et restituer de l'énergie mécanique. Dans ce cadre, l'utilisateur doit fournir en amont une certaine force pour mettre en tension le système et bénéficier par la suite de l'assistance. Les exosquelettes actifs utilisent quant à eux des moteurs et des capteurs pour fournir une assistance sur demande, sans action de mise en tension préalable par l'opérateur.

De nombreuses études ont examiné les conséquences de l'utilisation d'exosquelettes dans diverses tâches et ont conclu que ces systèmes induisaient une réduction des sollicitations au niveau des muscles assistés [1, 2]. Cependant, des travaux ont également montré que l'efficacité des exosquelettes pouvait dépendre de plusieurs facteurs : leur mode d'assistance (passif ou actif) [3], leur niveau d'assistance (*i.e.*, le couple de forces fourni par l'exosquelette) [4] et leurs caractéristiques



© Gael Kerbaol/INRS/2023

## RÉSUMÉ

Les exosquelettes robotisés d'assistance du dos, tout comme leurs précurseurs passifs, ont pour objectif d'assister en force les opérateurs lors de tâches physiques de travail, et ainsi de contribuer à la prévention des lombalgies. Cependant, l'apport des technologies robotisées est récent et reste encore peu étudié. C'est pourquoi, afin d'analyser les conséquences biomécaniques (cinématique et activité musculaire) de l'utilisation de deux exosquelettes

robotisés d'assistance du dos (EXO1 et EXO2), ceux-ci ont été évalués expérimentalement lors d'une tâche de manutention de charges (5 kg et 15 kg) impliquant une flexion/extension du tronc (dos et hanches), avec deux niveaux d'assistance (24 Nm et 72 Nm). L'utilisation de ces exosquelettes a induit des réductions significatives de l'activité électromyographique des muscles extenseurs du tronc ainsi que des modifications cinématiques.

Ces effets différaient toutefois selon les caractéristiques des exosquelettes (poids, structure et niveau d'assistance) et de celles de la tâche (angle d'inclinaison et charge manipulée). Ces résultats apportent de nouveaux éléments de compréhension sur l'utilisation d'une assistance physique robotisée et sur sa possible intégration en situation réelle de travail.

### BACK-SUPPORT EXOSKELETONS: THE BENEFITS OF ROBOT TECHNOLOGY

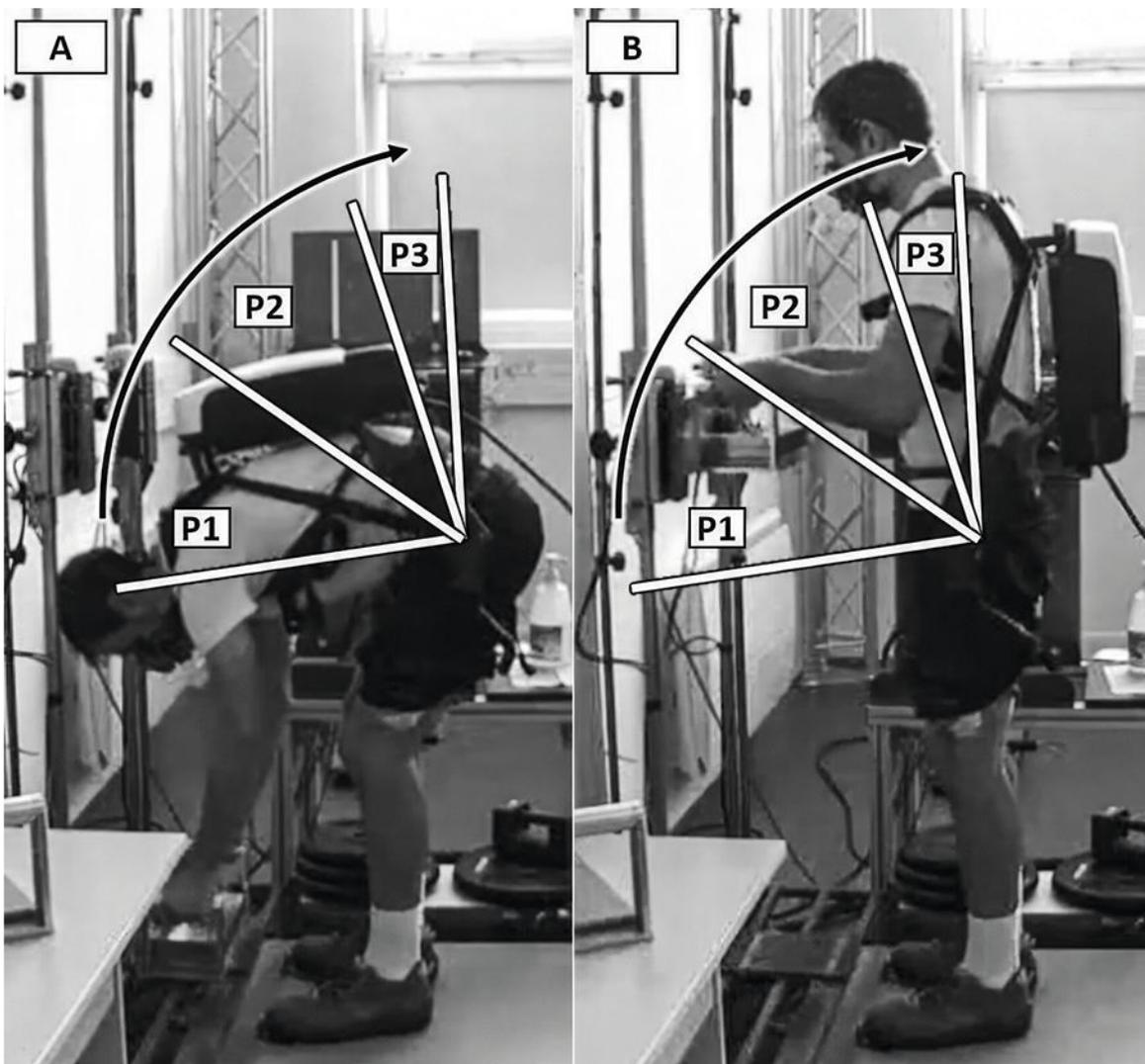
*Active back-support exoskeletons, like their passive predecessors, aim to assist operators with strength during physical work tasks, and thus contribute to preventing lower back pain. However, the benefit of robot technology is recent and has not yet been sufficiently studied. This is why in order to analyse the biomechanical impact (cinematic and muscle activity) of the use of two active back-support exoskeletons*

*(EXO1 and EXO2), these exoskeletons were evaluated experimentally during a load handling task (5kg and 15kg) involving the flexion/extension of the trunk (back and hips), with two support levels (24Nm and 72Nm). The use of these exoskeletons led to significant reductions in the electromyographic activity of trunk extensor muscles as well as cinematic modifications. However, these effects*

*differed based on the characteristics of the exoskeletons (weight, structure and support level) and those of the task (bending angle and load handled). These results provide new understanding of the use of active exoskeletons and about their possible integration in real work situations.*

structurelles [5], ainsi que de la nature de la tâche effectuée (poids manipulé, type de mouvement) [5, 6]. Si les exosquelettes passifs ont été plus largement étudiés, les exosquelettes actifs, dont la technologie robotisée est plus récente, suscitent encore des interrogations quant à leur efficacité en terme de réductions des sollicitations musculaires. En effet, si la plupart des exosquelettes passifs disponibles sur le marché proposent des niveaux d'assistance limités (du fait de leur technologie : ressorts ou élastiques nécessitant d'être mis en tension par l'utilisateur) et souvent non réglables (ou de façon simpliste), les exosquelettes actifs (avec une technologie robotisée) permettent en revanche de fournir des niveaux d'assistance plus élevés et d'être réglés plus finement pour s'adapter aux tâches effectuées (notamment au caractère statique ou dynamique de la tâche ainsi qu'à la charge manutentionnée). Ces caractéristiques techniques doteraient théoriquement les exosquelettes robotisés de meilleures performances d'assistance. Toutefois, en situation réelle de travail, le poids des charges manipulées n'est pas toujours connu des opérateurs et peut varier au cours de l'activité. Cela pose alors des questions quant au réglage du niveau d'assistance de l'exosquelette. Est-il préférable de choisir un

unique niveau d'assistance ou de l'adapter au cours de l'activité en fonction des charges (si elles sont connues) ? Quelle valeur d'assistance choisir ? Un niveau d'assistance élevé apportera-t-il davantage de bénéfices en terme de réduction des sollicitations musculaires qu'un niveau plus faible ? Par ailleurs, les résultats d'études antérieures ont montré que les avantages apportés par les exosquelettes passifs pouvaient être limités, voire inexistant, lors de certaines phases du mouvement imposé par la tâche [5]. En effet, l'assistance générée par les exosquelettes passifs est mécaniquement dépendante de l'angle de l'articulation assistée [7] et n'est donc optimale que sur une plage angulaire déterminée. Les exosquelettes robotisés, en raison de leur capacité à générer un couple de forces motorisé et piloté, pourraient quant à eux offrir une assistance plus adaptée tout au long du mouvement. Au regard de ces éléments et des questions soulevées, l'INRS a conduit une étude en laboratoire pour évaluer les conséquences biomécaniques (sur la cinématique et l'activité musculaire) de l'utilisation de deux exosquelettes robotisés d'assistance du dos, en se focalisant sur l'effet du niveau d'assistance, du poids de la charge manipulée et des différentes phases d'un mouvement d'extension du tronc.



↑ FIGURE 1 Tâche expérimentale de travail et phases d'inclinaison du tronc lors du soulèvement de la caisse.  
 A : début du mouvement avec la caisse positionnée à hauteur des chevilles.  
 B : fin du mouvement avec la caisse positionnée contre la plateforme située en avant et à hauteur des coudes.  
 P1 : correspond à la première moitié de l'extension du tronc.  
 P2 : correspond à la seconde moitié.  
 P3 : correspond, en position redressée, au mouvement permettant de déplacer la charge en avant vers la plateforme.

## Description de l'étude

### Les participants

Quinze hommes volontaires, sans pathologie musculosquelettique, ont participé à cette étude. L'échantillon a été restreint aux hommes car lors d'une étude précédente nous n'avons pas relevé de différences significatives entre les sexes dans les réponses à l'électromyographie de surface (EMG) induites par l'utilisation d'exosquelettes [5], mais également du fait que les hommes apparaissent davantage exposés aux risques physiques liés aux postures et tâches contraignantes [8]. Chaque participant a tout d'abord réalisé cinq séances d'entraînement, d'une durée totale d'environ cinq heures, dans le but de se familiariser à l'utilisation des deux exosquelettes robotisés (Cf. Tableau 1). Les participants ont ensuite réalisé une séance d'expérimentation en laboratoire, au cours de laquelle ils ont effectué

une même tâche simulée de travail avec chacun des deux exosquelettes, réglés selon deux niveaux d'assistance (faible et fort), et sans exosquelette, et ce dans un ordre aléatoire.

### La tâche expérimentale de travail

Pour chacune des conditions, chaque participant devait réaliser une tâche de manutention manuelle standardisée. Celle-ci consistait à soulever une caisse devant soi (dans le plan sagittal), depuis une plateforme positionnée à hauteur des chevilles, jusqu'à une plateforme placée légèrement en avant et à hauteur des coudes, puis à la replacer dans sa position initiale. Dans cette expérimentation, seule la phase de soulèvement de la caisse a été étudiée (Cf. Figure 1). Cette phase est en effet celle pendant laquelle les exosquelettes doivent fournir le plus d'assistance à l'utilisateur. La tâche était répétée cinq fois à un rythme régulier



**FIGURE 2 →**  
Les deux modèles d'exosquelettes étudiés : (A) EXO1 (B) EXO2. Les articulations des exosquelettes et les points de transfert de l'assistance sont représentés respectivement par des cercles blancs et des flèches blanches.



© INRS

	EXO1	EXO2
<b>Modèle</b>	Exoback (V1, 2020) de marque RB3D (France)	CrayX (2019) de marque German Bionic (Allemagne)
<b>Caractéristiques structurelles</b>	Possède un boîtier dorsal contenant la batterie, les cartes électroniques et le moteur. Ce boîtier est légèrement décalé par rapport au dos de l'utilisateur (sans contact). L'exosquelette est également équipé, de chaque côté, de deux articulations, au niveau des hanches et du bas du dos. Les points de transfert de l'assistance à l'utilisateur sont localisés au niveau des cuisses, des fesses et des épaules.	Possède un boîtier dorsal contenant le matériel électronique et la batterie. Ce boîtier dorsal est en contact direct avec le dos de l'utilisateur. Deux moteurs électriques sont placés de part et d'autre des hanches. L'exosquelette dispose d'une seule articulation de chaque côté, située au niveau de l'axe du moteur. Les points de transfert de l'assistance à l'utilisateur sont localisés au niveau des cuisses et de la poitrine.
<b>Poids</b>	8,4 kg	11 kg
<b>Réglages</b>	Permet des ajustements à la morphologie de l'utilisateur et des ajustements de l'assistance. Réglages possibles: niveau de soutien du tronc lors de sa flexion, niveau d'assistance lors de l'extension du tronc, réactivité et souplesse du système (seuils d'enclenchement de l'assistance), niveau d'assistance en fin de mouvement et seuil de maintien de l'assistance.  Le niveau d'assistance lors de l'extension du tronc a été réglé à 33 % (soit 24 Nm) pour l'assistance faible ( <b>EXO1-A24</b> ) et à 100 % (soit 72 Nm) pour l'assistance forte ( <b>EXO1-A72</b> ). Les autres paramètres, la réactivité et la souplesse, ont été fixés à 50 %, et le niveau de soutien, l'assistance de fin de mouvement et le seuil de maintien à 20 % (paramètres par défaut).	Permet des ajustements à la morphologie de l'utilisateur et des ajustements de l'assistance. Réglages possibles: choix entre le mode dynamique et statique, niveau d'assistance fourni lors de l'extension du tronc, sensibilité et réaction du système (seuils d'enclenchement de l'assistance), niveau de soutien du tronc lors de la flexion, appelé <i>counterforce</i> .  Cet exosquelette a été utilisé en mode dynamique avec le niveau d'assistance fourni lors de l'extension du tronc réglé à 20 % (soit 24 Nm) pour l'assistance faible ( <b>EXO2-A24</b> ) et à 60 % (soit 72 Nm) pour l'assistance forte ( <b>EXO2-A72</b> ). Les autres paramètres, tels que la sensibilité, la réaction et le <i>counterforce</i> ont été réglés à 5 (paramètres par défaut sur une échelle de 0 à 10).

**↑ TABLEAU 1**  
Caractéristiques techniques et réglages des deux exosquelettes (EXO1 et EXO2).

imposé par un signal sonore, équivalent à 15 cycles par minute (un cycle comprenant à la fois la montée et la descente de la caisse). Cette tâche simulée de travail a été réalisée pour chaque condition avec deux charges différentes : 5 kg (C5) et 15 kg (C15).

**Les exosquelettes utilisés et leur réglage**

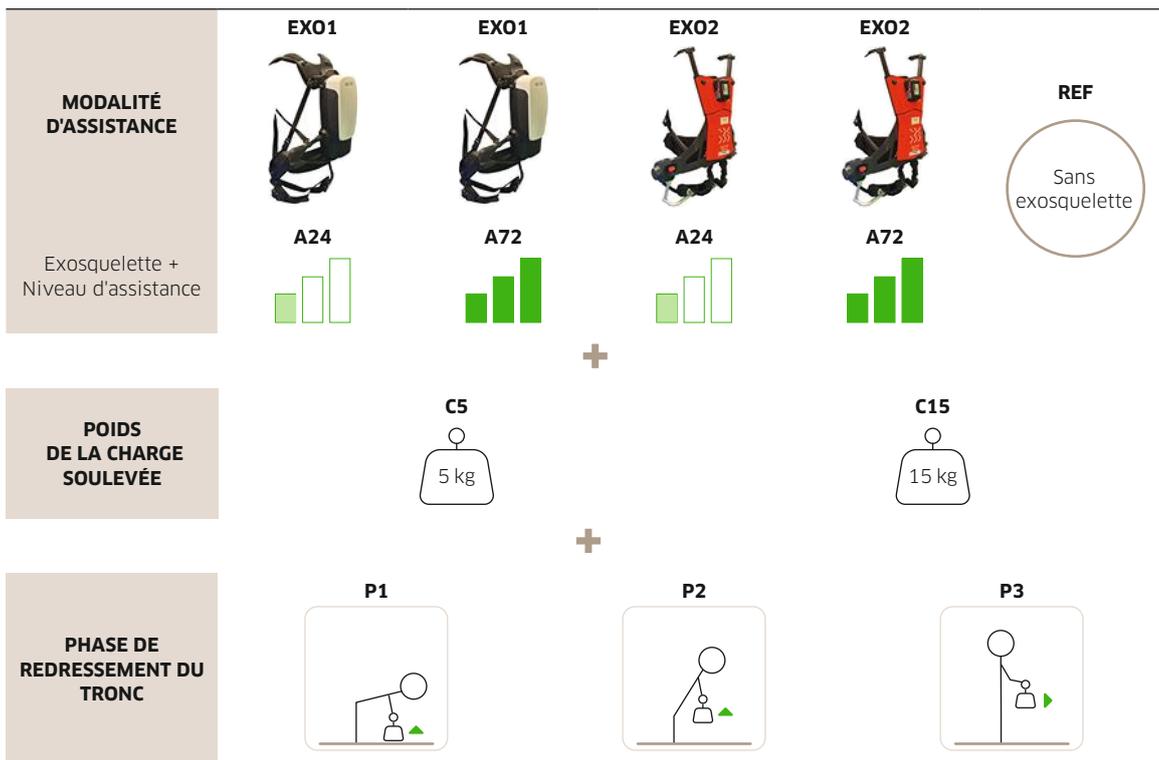
Deux exosquelettes robotisés d'assistance du dos, appelés EXO1 et EXO2 (Cf. Figure 2 et Tableau 1), ont été utilisés, et leurs effets comparés à une condition de référence, sans équipement (REF). Ces exosquelettes ont été choisis au regard de leur possibilité d'assister l'extension du tronc et de leur disponibilité sur le marché français. Chaque exosquelette a été réglé selon deux niveaux d'assistance : faible

(24 Nm) et fort (72 Nm) (Cf. Tableau 1). Ces niveaux d'assistance ont été choisis en fonction des charges manipulées au cours de la tâche expérimentale de travail : 5 kg et 15 kg. L'assistance de 24 Nm était théoriquement (selon les recommandations des concepteurs) adaptée à la charge de 5 kg et celle de 72 Nm à la charge de 15 kg. À noter que la tâche expérimentale de travail a également été réalisée avec le couple « assistance/charge » non optimal (soit 24 Nm pour 15 kg et 72 Nm pour 5 kg).

**Les paramètres évalués**

**→ La cinématique**

Des capteurs inertiels placés au niveau des vertèbres cervicale C7, thoracique T8 et lombaire L5,



← FIGURE 3  
Diagramme du plan expérimental. EXO1 correspond à l'exosquelette Exoback, EXO2 à l'exosquelette CrayX et REF à la condition sans exosquelette. C5 et C15 correspondent respectivement à la charge légère (5 kg) et lourde (15 kg). P1, P2 et P3 représentent les différentes phases du mouvement réalisé lors du soulèvement de la charge et de son déplacement vers l'avant.

ainsi qu'un accéléromètre positionné latéralement sur la cuisse droite ont permis d'évaluer l'angle de flexion des hanches (angle entre la cuisse et L5) de même que la courbure du dos, au travers de l'angle de flexion lombaire (angle entre L5 et T8) et de l'angle de flexion thoracique (angle entre T8 et C7). Le capteur placé au niveau de C7 a également été utilisé afin de déterminer l'inclinaison globale du tronc par rapport à la verticale. Ces données d'inclinaison ont ensuite permis de diviser le mouvement d'élévation de la charge en trois phases successives (Cf. Figure 1) :

- **Phase 1 (P1)** : correspondant à l'initiation du mouvement d'extension du tronc. L'inclinaison de C7 était comprise en moyenne entre 74° et 111°;
- **Phase 2 (P2)** : correspondant à la seconde moitié de la phase d'extension du tronc. L'inclinaison de C7 était comprise en moyenne entre 38° et 74°;
- **Phase 3 (P3)** : correspondant, en position redressée, à l'avancement de la charge vers la plateforme haute : mouvement induisant des contraintes au niveau du bas du dos. Dans cette phase, le tronc était quasi-statique avec une inclinaison de C7 très faible, comprise en moyenne entre 34° et 38°.

#### → L'activité musculaire

Le niveau d'activité des muscles lombaires (ES) et biceps fémoraux (BF) impliqués dans l'extension du dos et des hanches a été évalué en utilisant la technique d'électromyographie de surface (EMG). Les valeurs EMG mesurées au cours de la tâche ont été normalisées par rapport à des contractions de

référence. Elles sont ainsi exprimées en pourcentage de l'activité EMG obtenue lors des contractions de référence (%RMSref).

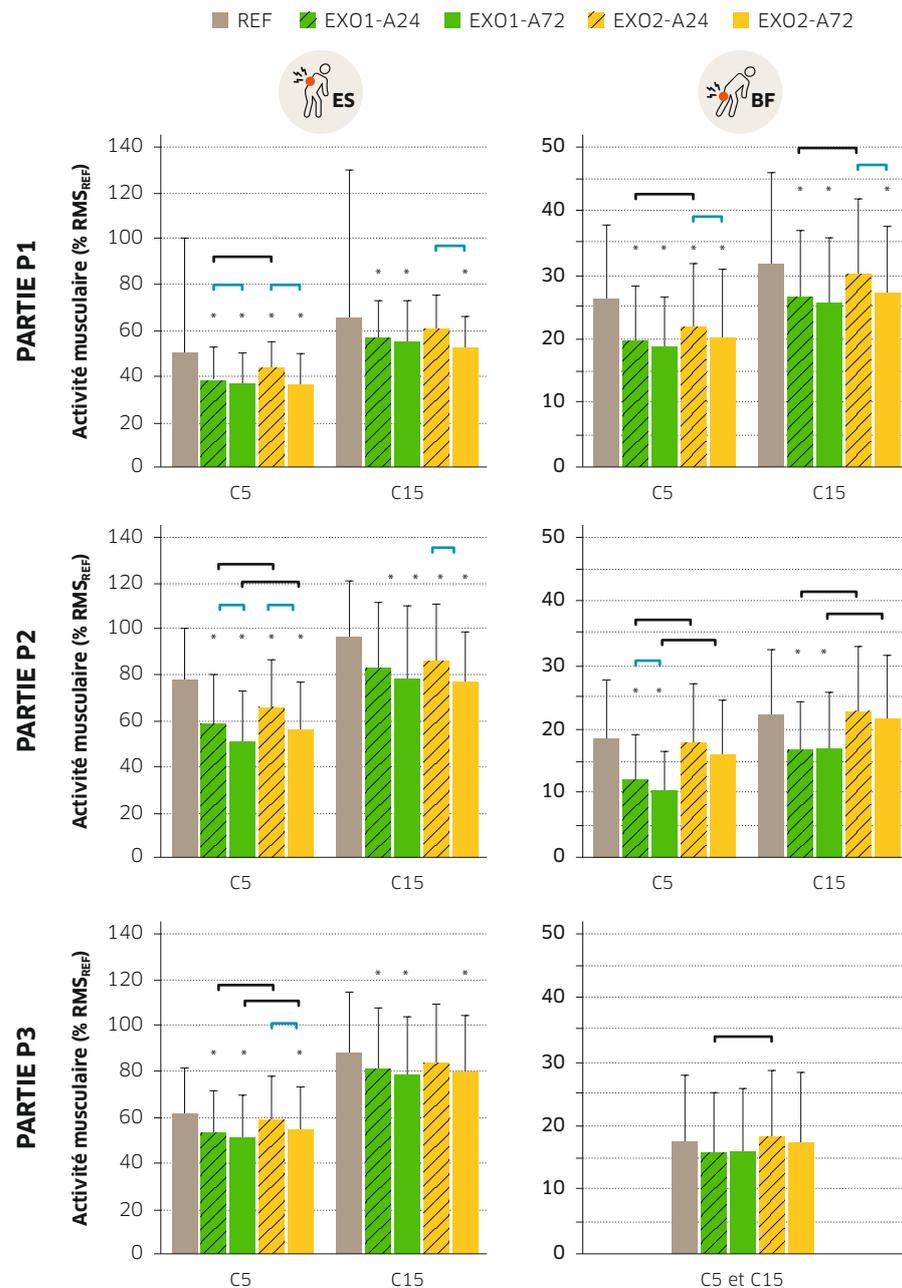
#### Les analyses statistiques

Les données d'activité musculaire et de cinématique ont été analysées pour chaque phase (P1, P2 et P3) au moyen d'un modèle linéaire mixte généralisé, en considérant comme variables explicatives la modalité de l'assistance (EXO1-A24, EXO1-A72, EXO2-A24, EXO2-A72 et REF) ainsi que le poids de la caisse (C5 et C15) (Cf. Figure 3). Le seuil de significativité retenu était de 5%. Les valeurs présentées dans les graphiques et tableaux (Cf. Figure 4 et Tableau 2) sont des moyennes accompagnées de leurs écarts-types.

#### Résultats – Discussion

L'utilisation des deux exosquelettes robotisés, EXO1 et EXO2, a permis des diminutions de l'activité EMG des muscles lombaires (de -9 % à -33 %) et biceps fémoraux (de -15 % à -43 %) par rapport à la condition de référence, sans équipement (Cf. Figure 4). Ces réductions sont cohérentes avec les résultats de travaux antérieurs ayant évalué d'autres systèmes robotisés d'assistance du dos, lors de tâches de manutention manuelle [3, 9, 10]. Des modifications de la cinématique du tronc (dos et hanches) ont également été observées lors de l'utilisation de ces exosquelettes robotisés par rapport à la condition de référence sans équipement (Cf. Tableau 2), soulignant le fait que ces systèmes peuvent modifier l'extension du tronc de l'utilisateur, en induisant notamment





↑ FIGURE 4 Activités musculaires moyennes ± écarts-types des muscles lombaires (ES) et biceps femoraux (BF) lors des trois phases du mouvement (P1, P2 et P3). L'activité musculaire est exprimée en pourcentage de RMS<sub>REF</sub>. L'activité musculaire est représentée pour chaque charge (C5 et C15) dans le cas d'une interaction modalité d'assistance x charge significative et comme moyenne de C5 et C15 en l'absence d'interaction. La condition sans équipement (REF) est représentée en beige, EXO1-A24 en vert hachuré, EXO1-A72 en vert, EXO2-A24 en jaune hachuré et EXO2-A72 en jaune. Une différence significative par rapport à REF est représentée par \*. Les symboles noirs représentent une différence significative entre les deux exosquelettes (EXO1 versus EXO2) pour un même niveau d'assistance (A24 ou A72). Les symboles bleus représentent une différence significative entre les deux niveaux d'assistance (A24 versus A72) pour un même exosquelette.

un angle de flexion des hanches plus élevé. Enfin, il a été mis en évidence que ces effets pouvaient être influencés par plusieurs facteurs, tels que les caractéristiques de conception de l'exosquelette, le niveau de l'assistance ainsi que les différentes phases du mouvement de redressement du tronc. Si les effets observés sont souvent le fait de l'imbrication de ces différents facteurs, les résultats associés à chacun d'eux sont détaillés ci-après afin d'éclairer les potentiels mécanismes pouvant y être associés.

#### Influence des caractéristiques de l'exosquelette

Dans la tâche évaluée, lors de la phase d'extension du tronc (P1 et P2) et lorsque le niveau d'assistance des exosquelettes était réglé en adéquation avec la charge légère manipulée (A24 pour C5), l'utilisation de l'EXO1 a engendré des réductions d'activité EMG des muscles ES et BF plus importantes que l'EXO2 (-26 % versus -11 % en moyenne) (Cf. Figure 4). Lorsque le niveau d'assistance des exosquelettes était réglé en adéquation avec la charge lourde manipulée

	RÉGLAGE	REF		EXO1-A24				EXO1-A72				EXO2-A24				EXO2-A72						
	CHARGE	C5	C15	C5	p	C15	p	C5	p	C15	p	C5	p	C15	p	C5	p	C15	p			
PARTIE P1	Angle thoracique	36 ± 15		34 ± 18				37 ± 17				36 ± 11				37 ± 14						
	Angle lombaire	15 ± 13	15 ± 16	17 ± 16		15 ± 15		10 ± 16	\$	16 ± 20		11 ± 18	#	9 ± 20	*#	11 ± 16		7 ± 13	*#			
	Angle de hanche	73 ± 16	74 ± 13	78 ± 17	*	78 ± 17	*	82 ± 19	*\$	78 ± 17		85 ± 18	*#	86 ± 21	*#	88 ± 18	*#	92 ± 16	*#\$			
PARTIE P2	Angle thoracique	39 ± 8	38 ± 8	38 ± 15		40 ± 13		42 ± 11	\$	39 ± 16		38 ± 8		40 ± 9		37 ± 12	#	41 ± 8				
	Angle lombaire	-1 ± 20	-1 ± 19	0 ± 20		-1 ± 20		-8 ± 27	*\$	0 ± 22		-1 ± 24		-2 ± 29		-2 ± 25		-5 ± 26				
	Angle de hanche	33 ± 22		38 ± 25				*	41 ± 28				*	40 ± 30				*	43 ± 28			
PARTIE P3	Angle thoracique	37 ± 7		37 ± 10				39 ± 11				36 ± 8				37 ± 9						
	Angle lombaire	-11 ± 14	-9 ± 13	-7 ± 17		-7 ± 16		-11 ± 24		-8 ± 16		-7 ± 21		-7 ± 21		-6 ± 23	#	-10 ± 21				
	Angle de hanche	22 ± 23		26 ± 28				28 ± 29				28 ± 27				*	30 ± 29				*	

↑ TABLEAU 2 Angles thoracique, lombaire et de hanche moyens ± écart-type (en °) lors des différentes phases du mouvement (P1, P2 et P3). L'angle moyen est représenté pour chaque charge (C5 et C15) dans le cas d'une interaction modalité d'assistance x charge significative et comme moyenne de C5 et C15 en l'absence d'interaction. Une différence significative (risque d'erreur  $p < 0,05$ ) par rapport à la condition de référence (REF) est représentée par \*. La différence entre deux exosquelettes (EXO1 versus EXO2) pour un même niveau d'assistance (A24 ou A72) est représentée par #. La différence entre les 2 niveaux d'assistance (A24 versus A72) pour un même exosquelette est représentée par \$.

(A72 pour C15), seule l'activité EMG des muscles BF présentait une différence significative entre EXO1 et EXO2, et ce uniquement pour la phase P2. Ces différences observées entre les deux exosquelettes, avec des bénéfices relatifs aux sollicitations musculaires globalement plus prononcés pour l'EXO1 que pour l'EXO2, pourraient être liées à la conception spécifique de chaque système.

En premier lieu, l'EXO1 était plus léger que l'EXO2 : 8,4 kg *versus* 11 kg. Or, lors de l'extension du tronc, l'assistance des exosquelettes aide à soulever le poids du tronc de l'utilisateur et de la charge manipulée, mais également celui de l'exosquelette. Le surplus de poids de l'EXO2, en comparaison de l'EXO1, sans toutefois connaître la répartition du poids de chaque système sur l'utilisateur, pourrait ainsi diminuer son efficacité à compenser la charge manipulée, malgré un niveau d'assistance équivalent. Cette observation était particulièrement marquée pour la charge légère C5 puisque ce surplus de poids (2,6 kg) représentait environ 50 % de la charge à manipuler (5 kg). À l'inverse, dans la condition C15, la différence de poids entre les deux exosquelettes ne représentant plus que 17 % de la charge à manipuler (15 kg), elle ne s'est pas avérée statistiquement discriminante concernant les bénéfices musculaires. Ceci suggère que plus la charge à manipuler est élevée, moins le poids de l'exosquelette aura d'incidence sur la réduction relative d'activité musculaire.

D'autres caractéristiques de conception pourraient également contribuer aux différences observées entre les deux exosquelettes étudiés, tels le nombre d'articulations du système (deux pour l'EXO1, une pour l'EXO2) et l'espacement du boîtier dorsal par rapport au dos de l'utilisateur (avec un espace pour l'EXO1, laissant une certaine liberté de mouvement, et en contact pour l'EXO2, probablement plus contraignant). En effet, il est probable qu'un système plus anthropomorphe, c'est-à-dire qui se rapproche au mieux de la morphologie humaine (comme l'EXO1 avec ses deux articulations et son espace dorsal), permette des mouvements plus naturels de l'utilisateur, en minimisant les contraintes gestuelles et en fournissant une assistance plus adaptée au mouvement humain. Les résultats de cette étude ont donc mis en avant une cinématique du tronc spécifique à chaque exosquelette. En phase P1 (lorsque le tronc du participant est le plus incliné), l'utilisation de l'EXO1 (bi-articulaire) a ainsi induit une flexion des hanches moins prononcée (-8°) et une flexion lombaire plus importante (+7°) par rapport à l'EXO2 (mono-articulaire) (Cf. Tableau 2). Ces données suggèrent que l'EXO1 permettrait de conserver une courbure du dos plus prononcée (i.e. un dos plus rond, comme lors d'un mouvement naturel sans exosquelette [11]), tandis que l'EXO2 induirait une inclinaison du tronc principalement liée à une flexion des hanches (du fait de l'unique articulation du système, localisée au niveau



de l'axe des hanches, et du boîtier dorsal rigide en contact avec le dos). Ces différences de cinématique dans l'extension du tronc pourraient aussi expliquer en partie les différences de réduction d'activités musculaires observées entre les deux exosquelettes. Enfin, il n'est pas à exclure que des différences relatives à d'autres caractéristiques, telles que les lois de commande de l'assistance, aient pu contribuer à moduler les conséquences biomécaniques de l'utilisation de chaque exosquelette. Ces explications restent hypothétiques mais méritent d'être évoquées puisqu'elles concernent une spécificité de ces exosquelettes robotisés, à savoir leur capacité à détecter le mouvement réalisé et à générer l'assistance motrice appropriée. Ainsi, lors de la manipulation de la charge lourde C15 avec l'assistance la plus élevée A72 (adaptée à cette charge), l'EXO1 apportait davantage de bénéfices que l'EXO2, au niveau de l'activité EMG des muscles BF, mais uniquement pour la phase P2 du mouvement. Cette différence n'était pas observée lors de la phase P1, correspondant à la phase d'initiation du mouvement d'extension du tronc, et pendant laquelle les exosquelettes devaient détecter le mouvement de l'utilisateur (au moyen de capteurs embarqués) pour lui fournir l'assistance requise (au moyen de lois de commande). Ces observations laissent penser que durant cette première phase du mouvement, les lois de commande d'activation de l'assistance aient pu être moins adaptées (réactives) pour l'EXO1 que pour l'EXO2. Dans le cadre de l'étude, les seuils d'enclenchement de l'assistance ont été réglés aux valeurs par défaut pour les deux systèmes afin de limiter le nombre de variables à investiguer. Par ailleurs, sans connaissance des algorithmes de calcul régissant les paramètres de détection de début du mouvement, de déclenchement et de montée en puissance de l'assistance, il apparaît nécessaire de poursuivre des recherches pour comprendre les possibles effets de ces paramètres sur l'efficacité de ces exosquelettes.

#### **Influence du niveau d'assistance**

Pour les deux exosquelettes, lors de l'extension du tronc (phases P1 et P2) et pour la plus faible des charges (C5), les résultats indiquent que les réductions de l'activité EMG des muscles ES étaient plus importantes lorsque le niveau d'assistance était réglé au plus fort (A72 *versus* A24). Ces résultats sont cohérents avec la littérature concernant les exosquelettes passifs [12], rapportant des réductions de sollicitations musculaires plus prononcées avec une élévation du niveau d'assistance.

Lors de la manipulation de la charge la plus lourde (C15), les réductions de l'activité EMG des muscles ES étaient également plus importantes avec le niveau d'assistance A72 qu'avec le niveau d'assistance A24 pour l'EXO2, mais pas avec l'EXO1. Lors de l'utilisation de ce dernier, les deux niveaux d'assistance (A24 et A72) ont induit des réductions EMG similaires lors de

la manutention de la charge de 15 kg. Si le caractère polyarticulé de l'EXO1 est apparu comme un facteur pouvant être avantageux pour l'utilisateur sur un plan cinématique (i.e., mouvement plus naturel), il pourrait toutefois atteindre ses limites lors du port de charges lourdes et de forts niveaux d'assistance (i.e., C15 et A72), pour lesquels une partie du couple produit par le moteur ne serait pas transférée efficacement aux segments corporels assistés. Enfin, il est envisageable que cet exosquelette, réglé au maximum de ses possibilités d'assistance (i.e., 72 Nm), n'ait pas pu produire de façon optimale l'assistance attendue lors de la manipulation de la charge lourde (C15). Quoi qu'il en soit, en fonction de l'exosquelette utilisé et de la tâche réalisée (notamment de la charge manutentionnée), un niveau d'assistance plus élevé n'est pas toujours synonyme de gain en termes de réduction des sollicitations musculaires.

#### **Influence des phases du mouvement**

Il a été observé que les réductions d'activités musculaires étaient liées à la phase du mouvement réalisé, c'est-à-dire à la plage angulaire d'inclinaison du tronc. Globalement, la diminution moyenne de l'activité EMG des muscles extenseurs du tronc lors de l'utilisation des exosquelettes par rapport à la condition de référence sans exosquelette était de -20 %, -24 % et -11 % respectivement pour les phases P1, P2 et P3 (Cf. Figure 4). Ces résultats soulignent que les deux exosquelettes robotisés sont capables d'induire des bénéfices en termes de réductions de l'activité musculaire sur l'ensemble du mouvement étudié. À noter que ce résultat n'a pas forcément été observé dans le cas de l'utilisation d'exosquelettes passifs [5]. Les réductions de l'activité musculaire étaient globalement plus faibles lors de la phase P3 que lors des phases P1 et P2. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que l'assistance des exosquelettes robotisés ne devait *a priori* pas être active lorsque les participants étaient en position redressée et quasi statique au niveau du tronc, comme cela est le cas pour cette phase P3. Toutefois, pour cette phase, des réductions d'activité EMG des muscles ES ont été observées par rapport à la condition de référence. Il est alors possible que le simple fait de revêtir ces systèmes puisse générer un effet de gainage, contribuant à réduire les sollicitations des muscles extenseurs du tronc, comme décrit pour d'autres systèmes [13, 14]. Il est aussi possible que les exosquelettes, avec leurs masses localisées à l'arrière de l'utilisateur (i.e., le boîtier dorsal), aient pu agir comme des contrepoids par rapport à la charge manipulée devant l'utilisateur, phénomène précédemment avancé lors de l'utilisation d'exosquelettes d'assistance des membres supérieurs [15]. Ceci aurait ainsi pu permettre de limiter les sollicitations musculaires par rapport à une situation sans exosquelette. Les différences observées entre l'EXO1 et l'EXO2 lors de la phase P3 renforcent cette hypothèse. L'utilisation de l'EXO1 a en effet apporté davantage de bénéfices au niveau des muscles ES par rapport

à l'EXO2, et ceci principalement avec la charge légère C5. Le boîtier dorsal de l'EXO1, plus lourd (car intégrant le moteur) et déporté plus en arrière par rapport au dos de l'utilisateur que celui de l'EXO2, aurait pu créer un équilibre des forces plus favorable lors de l'avancée de la charge légère en avant, réduisant ainsi les niveaux d'activité musculaire. Avec la charge plus lourde (C15), le poids du boîtier dorsal de l'EXO1 n'aurait alors plus été suffisant pour contrebalancer la charge manipulée, rapprochant cet exosquelette de la situation de l'EXO2.

Enfin, il est à noter que même si l'assistance des exosquelettes ne devait théoriquement pas être active pour des positions redressées et statiques du tronc, il est difficile de savoir, sur la seule base de l'inclinaison de C7, si l'assistance agit ou non et avec quelle intensité. Une exploration plus approfondie des modalités techniques d'assistance apparaît nécessaire pour mieux comprendre l'ensemble des mécanismes induits par l'utilisation de ces exosquelettes robotisés.

### Conclusion

L'utilisation d'exosquelettes robotisés d'assistance du dos paraît apporter des bénéfices significatifs sur la réduction de l'activité EMG des muscles extenseurs du tronc lors d'une tâche de manutention de charges. L'importance de ces bénéfices est toutefois influencée par plusieurs facteurs : les caractéristiques des exosquelettes (tels que le poids, la structure et le niveau d'assistance) et celles de la tâche (telles que la phase du mouvement et la charge manipulée). En pratique, au

regard de ces résultats, dans des situations de travail pour lesquelles les salariés doivent manutentionner des objets de poids variable, un exosquelette robotisé réglé à un niveau d'assistance faible contribuera à réduire les sollicitations musculaires, et ce, quelle que soit la phase du mouvement d'extension du tronc. Néanmoins, un niveau d'assistance plus élevé, adapté à la charge maximale habituellement rencontrée, permettrait d'induire des réductions de sollicitations musculaires équivalentes ou plus importantes. Il conviendra cependant d'évaluer, notamment lors d'un fort niveau d'assistance, que l'utilisation d'exosquelettes robotisés ne génère pas d'effets non souhaités sur d'autres groupes musculaires ou n'entraîne pas une perturbation importante de la cinématique ou de l'équilibre de l'utilisateur.

Ainsi, ces technologies robotisées peuvent contribuer à la réduction de la survenue des TMS en réduisant le niveau des sollicitations des muscles assistés. La réduction de ce seul facteur de risque biomécanique nécessite cependant que l'intégration d'un exosquelette en entreprise soit positionnée dans une démarche globale de prévention des TMS, et plus largement des risques professionnels. ●

### Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Gilles Reno, Olivier Morel et Olivier Remy pour l'appui technique, Clarisse Gaudes pour l'assistance médicale, ainsi qu'Isabelle Urmès pour le soutien statistique.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] DE LOOZE M.P. ET AL. – Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics*, 2016, 59 (5), pp. 671-681.
- [2] THEUREL J., DESBROSSES K. – Occupational exoskeletons: Overview of their benefits and limitations in preventing work-related musculoskeletal disorders. *IJSE Transactions on occupational ergonomics & human factors*, 2019, 7 (3-4), pp. 264-280. Accessible sur : <https://hal.science/hal-03066649/document>
- [3] KERMAVNAR T. ET AL. – Effects of industrial back-support exoskeletons on body loading and user experience: an updated systematic review. *Ergonomics*, 2021, 64 (6), pp. 685-711.
- [4] MADINEI S. ET AL. – Biomechanical assessment of two back-support exoskeletons in symmetric and asymmetric repetitive lifting with moderate postural demands. *Appl Ergon*, 2020, 88, pp. 103-156.
- [5] SCHWARTZ M., THEUREL J., DESBROSSES K. – Effectiveness of soft versus rigid back-support exoskeletons during a lifting task. *Int J Environ Res Public Health*, 2021, 18 (15), p. 8062. Accessible sur : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34360352/>
- [6] ABDOLI E.M., AGNEW M.J., STEVENSON J.M. – An on-body personal lift augmentation device (PLAD) reduces EMG amplitude of erector spinae during lifting tasks. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2006, 21 (5), pp. 456-465.
- [7] KOOPMAN A.S. ET AL. – Effects of a passive exoskeleton on the mechanical loading of the low back in static holding tasks. *J Biomech*, 2019, 83, pp. 97-103.
- [8] CASSE C., DE TROYER M. – *Genre, conditions de travail et santé : qu'est-ce qui a changé ?* European trade union institute (ETUI), 2020. Accessible sur : <https://www.etui.org>
- [9] HUYSAMEN K. ET AL. – Assessment of an active industrial exoskeleton to aid dynamic lifting and lowering manual handling tasks. *Appl Ergon*, 2018, 68, pp. 125-131.
- [10] WEI W. ET AL. – A hip active assisted exoskeleton that assists the semi-squat lifting. *Applied Sciences-Basel*, 2020, 10 (7).
- [11] PAN F. ET AL. – Sex-dependent differences in lumbo-pelvic coordination for different lifting tasks: A study on asymptomatic adults. *J Biomech*, 2020, 102, pp. 109505.
- [12] FROST D.M., ABDOLI E.M., STEVENSON J.M. – PLAD (personal lift assistive device) stiffness affects the lumbar flexion/extension moment and the posterior chain EMG during symmetrical lifting tasks. *J Electromyogr Kinesiol*, 2009, 19 (6), pp. 403-412.
- [13] ABDOLI E.M., STEVENSON J.M. – The effect of on-body lift assistive device on the lumbar 3D dynamic moments and EMG during asymmetric freestyle lifting. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2008, 23 (3), pp. 372-380.
- [14] KIM S. ET AL. – Assessing the potential for «undesired» effects of passive back-support exoskeleton use during a simulated manual assembly task: Muscle activity, posture, balance, discomfort, and usability. *Appl Ergon*, 2020, 89, pp. 103194.
- [15] DESBROSSES K., SCHWARTZ M., THEUREL J. – Evaluation of two upper-limb exoskeletons during overhead work: influence of exoskeleton design and load on muscular adaptations and balance regulation. *Eur J Appl Physiol*, 2021, 121 (10), pp. 2811-2823.

## Notes techniques

# RISQUE BIOLOGIQUE DANS LE SECTEUR DU COMPOSTAGE : ÉLABORATION D'UNE MÉTHODE D'AIDE À SON ÉVALUATION

Dans le cadre de la prévention des risques biologiques, l'INRS a mené une étude sur l'évaluation du risque biologique appliquée au secteur du compostage.

À partir de l'analyse des méthodes existantes, une méthode a été conçue, puis validée sur le terrain. Elle s'appuie sur la gestion graduée des risques et intègre des descripteurs permettant d'évaluer le risque par inhalation et par contact cutané.

---

SARAH BURZONI  
INRS,  
département  
Métrologie  
des polluants

---

### Contexte de l'étude

En France, les employeurs ont l'obligation légale d'évaluer les risques<sup>1</sup>, y compris le risque biologique. La démarche d'évaluation du risque biologique (EvRB) implique l'identification des lieux où des agents biologiques (AB) pourraient se développer, la connaissance de leur dangerosité et l'analyse des activités exposantes pour les salariés. Cette démarche permet aux entreprises de définir les priorités d'action pour assurer la santé et la sécurité des salariés.

Les lieux où peuvent s'accumuler ou se développer des AB sont définis comme des réservoirs. Il peut s'agir d'organismes vivants tels que des humains, des animaux ou des végétaux, mais aussi le sol, l'eau, des objets contaminés ou des déchets. Dans certaines situations professionnelles, le réservoir est identifiable, car il contient un agent biologique spécifique à l'activité. Par exemple, cela peut être le cas lors de la production industrielle de champignons microscopiques comme la levure, ou lorsqu'un salarié contracte une maladie bactérienne particulière, comme la légionellose due à la bactérie *Legionella pneumophila*<sup>2</sup>. Dans la plupart des situations, le salarié approche des réservoirs au cours de son activité, par exemple dans les métiers de la santé. Il peut également opérer dans un environnement favorable à la survie et la croissance des AB, par exemple lors du traitement de l'eau ou des déchets.

Après avoir identifié les réservoirs, il convient de rechercher la dangerosité des AB susceptibles de s'y trouver, d'étudier les tâches effectuées par le travailleur pour identifier les différentes voies d'exposition : l'inhalation, le contact avec la peau ou

les muqueuses, l'inoculation ou l'ingestion (contact main – bouche). Cette analyse consiste à observer les conditions de travail et à prendre en compte plusieurs éléments, tels que les conditions de mise en œuvre ou d'utilisation des réservoirs (procédé, température...), les moyens de prévention, etc.

Actuellement, le risque biologique est plus particulièrement pris en compte dans les secteurs où les réservoirs et les AB sont clairement identifiés, et leur dangerosité est établie. Cependant, il demeure de nombreux secteurs où ce risque est insuffisamment considéré, principalement en raison de l'absence de méthode adaptée, et de la difficulté à connaître précisément les AB présents dans les réservoirs et à évaluer leur niveau de dangerosité. Des connaissances ont été acquises sur l'EvRB [1]. Néanmoins, il n'existe aujourd'hui pas d'équivalent des méthodes qualitatives disponibles pour évaluer le risque chimique ou les risques liés à la manipulation des nanomatériaux, qui sont reconnues comme des méthodes de référence. L'INRS a donc mené une étude visant à élaborer une nouvelle méthode d'évaluation qualitative du risque biologique spécifique au compostage, pour accompagner les entreprises du secteur dans la définition de mesures préventives adaptées.

Ce travail s'est décliné en trois étapes :

- recensement et analyse des méthodes traitant de l'EvRB ;
- conception d'une méthode en s'appuyant sur l'approche de gestion graduée du risque<sup>3</sup> ;
- validation sur le terrain et en comparant les niveaux de risque obtenus avec la méthode avec les niveaux d'exposition provenant de la base Colchic.

## RÉSUMÉ

Cette note technique propose une méthode d'aide à l'évaluation du risque biologique dans le secteur du compostage. Celle-ci est le résultat d'une étude de l'INRS qui s'appuie sur un recensement et une analyse approfondie des démarches traitant d'évaluation du risque biologique en milieu professionnel. Il en résulte l'identification des descripteurs de risque permettant de réaliser une évaluation la plus

exhaustive possible : détermination de la dangerosité des réservoirs d'agents biologiques identifiés et détermination des descripteurs de l'exposition tels que le procédé de travail, les équipements de protection... Sur cette base, une méthode a été conçue, appliquée et validée dans plusieurs entreprises du secteur du compostage et une vingtaine de situations de travail ont été évaluées.

Une comparaison entre cette nouvelle méthode et d'autres démarches montre qu'elle est plus préventive. Elle constitue une aide supplémentaire pour les préventeurs intervenant dans le secteur du compostage, à mieux estimer les risques et améliorer les conditions de travail des salariés exposés.

### **BIOLOGICAL RISK IN THE COMPOSTING SECTOR: DEVELOPMENT OF A METHOD TO SUPPORT ITS ASSESSMENT**

*This technical note proposes a method for supporting biological risk assessment in the composting sector. It is the result of an INRS study that draws on a census and extensive analysis of approaches to biological risk assessment in the workplace. It helps to identify risk descriptors allowing for the most comprehensive assessment possible: determination of the danger of tanks*

*containing biological agents and determination of exposure descriptors such as the work process, protective equipment, etc. On this basis, a method was designed, applied and validated in several companies in the composting sector and about 20 work situations were assessed. A comparison between this new method and other approaches shows that it is more preventive. It helps*

*OSH practitioners operating in the composting sector to better assess risks and improve the working conditions of employees exposed.*

## Recensement et analyse des méthodes existantes Démarche

La première étape a consisté à recenser et à analyser les EvRB existantes, afin de définir les déterminants de risque que devrait comporter une méthode pour être la plus complète possible. Cet inventaire a été réalisé en étudiant différentes sources relatives à la prévention des risques professionnels, des articles scientifiques spécialisés dans les domaines de la biologie et de la médecine, des sources multimédias et des outils informatiques, notamment en consultant des fournisseurs de logiciels de sécurité. Pour être incluses dans cette analyse, les EvRB des sources devaient suivre une approche qualitative seule ou combinée qualitative et quantitative, prendre en compte les conditions de travail, comporter une évaluation des situations susceptibles d'induire une exposition aux AB sur le lieu de travail, et enfin estimer les risques professionnels pour les salariés. Aucune restriction n'a été imposée en ce qui concerne le secteur d'activité, les AB ou le type de risque identifié (infectieux, toxinique, allergique ou cancérogène).

L'analyse et la caractérisation des méthodes d'EvRB ont été effectuées en utilisant une grille de critères inspirée des travaux d'analyse de méthodes d'évaluation du risque chimique [2]. Les principaux critères d'analyse retenus sont le type d'approche

de l'EvRB, la nature des sources, le type de risque des AB et les voies d'exposition.

Ensuite, l'analyse a été approfondie en étudiant, parmi les méthodes d'EvRB recensées, celles qui adoptaient une approche similaire pour estimer le niveau de risque biologique. Pour cela, les éléments suivants ont été étudiés :

- les différentes étapes proposées par ces méthodes ;
- les facteurs indépendants associés au niveau de risque, également appelés « descripteurs de risque » (DR), par exemple le danger, le type de procédé... ;
- la manière dont elles évaluaient le niveau de risque biologique.

### Résultats

Lors de cette première étape, 32 méthodes ont été analysées. Aucune d'entre elles ne prend en compte suffisamment de critères pour réaliser une évaluation complète du risque biologique. Cependant, en combinant les points forts de chacune d'entre elles, comme de celles qui considèrent le plus grand nombre de critères ou de celles qui ne négligent aucun danger lié aux agents biologiques, il a été possible d'identifier les caractéristiques essentielles qu'une méthode d'EvRB devrait comporter. Finalement, ces résultats ont conduit à l'élaboration d'une méthode d'EvRB qui repose sur l'analyse du poste de travail combinée à la gestion graduée des risques.





Site de traitement et de recyclage de déchets végétaux.

© Fabrice Dimier pour l'INRS/2016

Cela présente l'avantage d'être peu subjectif et d'évaluer le risque au plus près des conditions réelles de travail. Dans ce contexte, l'identification des dangers doit être réalisée à partir d'un inventaire des principaux AB retrouvés sur les lieux de travail en tenant compte de l'ensemble des risques. Les DR doivent prendre en considération l'ensemble des voies d'exposition (inhalation, cutanée, inoculation, ingestion) ainsi que les mesures de prévention techniques et organisationnelles mises en place. Les niveaux de danger et d'exposition doivent être définis objectivement afin d'être compris et correctement interprétés. Par exemple, pour le procédé de travail, il faut préciser si le procédé est émissif/dispersif avec la possibilité d'émission de polluants ou si le procédé est totalement fermé/clos avec des polluants mis en œuvre dans un processus fermé. En dernier lieu, le danger et les descripteurs d'exposition (DE) doivent permettre d'estimer un niveau de risque.

### Conception de la méthode d'aide à l'évaluation du risque appliquée au secteur du compostage

Le risque est la probabilité d'effets néfastes sur la santé d'un travailleur en cas d'exposition à un danger. Le danger associé au polluant est décrit par une seule variable. En revanche, l'exposition est caractérisée par plusieurs variables, que l'on appelle les DE,

par exemple : la durée, la fréquence de l'exposition, le procédé de travail... La démarche engagée pour définir ces deux paramètres est différente et est présentée dans les paragraphes suivants.

#### Démarche

##### → Le danger

Le compostage est un secteur qui est bien documenté dans la littérature. Néanmoins, les risques associés à cette activité peuvent être mésestimés. Un travail a donc été réalisé, afin :

- d'identifier les principaux AB potentiellement présents dans l'ensemble des réservoirs, à savoir les matières dites entrantes, en cours de compostage et les matières dites sortantes, à l'issue du compostage ;
- de rechercher le danger de ces AB ;
- de déterminer la dangerosité des réservoirs ;
- d'attribuer la bande de danger<sup>3</sup> aux réservoirs, selon l'approche de la gestion graduée du risque, à l'aide d'une matrice de hiérarchisation des dangers des AB et des substances qu'ils sont susceptibles d'émettre (toxines).

Tout d'abord, les AB présents dans les aérosols constituent un reflet des communautés microbiennes présentes dans ces réservoirs, à savoir les matières premières et les composts [3]. L'inventaire des AB potentiellement présents dans les réservoirs,

à savoir les matières premières et les composts, a été réalisé en croisant des données issues de la littérature. On peut notamment citer une revue de la littérature qui synthétise la diversité bactérienne et fongique identifiée dans les aérosols au sein des plateformes de compostage, analysée par les techniques de culture et de séquençage des gènes codant pour les ARN ribosomiaux ARNr 16S et ARNr 18S [4]. La dangerosité des différents AB a ensuite été établie en se basant d'une part sur le Code du travail<sup>4</sup> français, qui propose une classification en quatre groupes selon la gravité croissante du risque d'infection pour l'homme, du danger pour les travailleurs, des possibilités de propagation dans la collectivité et de l'existence d'une prophylaxie ou d'un traitement. L'arrêté du 16 novembre 2021 fixe la liste des agents biologiques pathogènes (bactéries, champignons, virus et parasites) des groupes 2, 3 et 4 [5], sans définir d'AB dans le groupe 1. D'autre part, la classification allemande propose une liste pour le groupe 1, constituée d'AB peu susceptibles de causer des maladies. Dans ce contexte, il est apparu pertinent de compiler les deux classifications.

Une matrice de hiérarchisation des dangers des AB a été construite pour permettre d'attribuer un niveau de danger à un réservoir. Cette matrice hiérarchise les niveaux de dangers des AB par bandes, du moins pathogène au plus pathogène. Cette matrice, qui intègre tous les dangers que peuvent présenter les AB et leurs produits, a été élaborée en s'inspirant du modèle de Brooke [6] et repose sur :

- la classification franco-allemande ;
- la classification du Centre international de recherche sur le cancer (Circ) pour les AB présentant des risques de cancérogénicité.

Finalement, l'attribution d'une bande de danger à un réservoir est effectuée en se référant à la matrice de hiérarchisation des dangers des AB. Étant donné que le réservoir est un mélange d'AB et dans un objectif de prévention, la classification la plus élevée parmi tous les AB répertoriés dans la base franco-allemande est utilisée pour attribuer une dangerosité du réservoir.

#### → Les descripteurs d'exposition

Les DE doivent être recueillis par les utilisateurs de la méthode lors de l'analyse des tâches et des conditions de travail. Ces données doivent donc leur être accessibles. Pour cela, le personnel des plateformes de compostage a été impliqué dans l'identification des descripteurs.

Tout d'abord, une liste de DE a été créée en se basant sur une revue de la littérature. Ensuite, un questionnaire a été envoyé à 499 destinataires, tels que des exploitants ou des maîtres d'ouvrage, afin de recueillir des informations sur leur connaissance des DE proposés. En parallèle, quatre visites d'entreprises ont été réalisées pour évaluer directement

le niveau de connaissance des exploitants concernant ces descripteurs. Pour sélectionner les DE, les réponses de l'enquête, les informations recueillies lors des visites et l'avis d'experts de l'INRS ont été pris en compte.

Les bandes des descripteurs<sup>3</sup>, le nombre de bandes et l'attribution d'un score à chaque bande ont été définis en consultant la littérature. La définition des bandes associées de certains descripteurs ont été détaillées. Par exemple, pour le descripteur de l'aspect physique du matériau mis en œuvre, la première bande concerne les solides peu friables, avec comme exemples proposés les déchets verts ou les composts non criblés. Ces indications supplémentaires prennent ainsi en compte les spécificités de l'activité de compostage. Pour déterminer les scores à attribuer à chaque bande de risque et statuer sur leur cohérence, plusieurs tests ont été effectués. Ces tests ont consisté à sélectionner des situations de travail, à calculer et à comparer les scores de risque issus de la méthode, afin de s'assurer de la cohérence des scores obtenus. Pour calculer le niveau de risque, le choix s'est porté sur la multiplication des scores<sup>3</sup> [7].

#### Résultats

L'analyse des données de la littérature a permis de déterminer la communauté d'AB de sept matières entrantes rencontrées dans le compostage [3, 4, 8] à savoir :

- les boues de stations d'épuration ;
- les déchets d'élevage de bétail ;
- les effluents d'élevage ;
- les ordures ménagères ;
- les coproduits (déchets verts, écorces, palettes broyées, sciure, copeaux de bois) ;
- les biodéchets ;
- les résidus agricoles et de l'industrie agroalimentaire.

Pour ces réservoirs, il a été dénombré six types d'AB (bactéries, virus, protozoaires, helminthes, champignons et levures) comptabilisant 114 espèces. Concernant les AB présents dans différents produits issus des différentes phases du compostage, mésophile, thermophile, de refroidissement et de maturation, il a été comptabilisé entre 129 et 2435 espèces. Ces résultats ont été obtenus en comptabilisant l'ensemble des espèces d'une famille d'AB lorsque seule cette donnée était mentionnée dans la littérature.

Le regroupement des classifications française et allemande des dangers des AB a par ailleurs permis de créer une base comptabilisant 18388 classifications d'espèces et de sous-espèces de bactéries, virus, protozoaires, helminthes, champignons et levures réparties dans les quatre groupes de danger. La matrice de hiérarchisation des dangers intègre tous les types de dangers des AB et de leurs



BANDES DE DANGER (Da)	DESCRIPTION
Da1	Pas de classification / Pas de connaissance actuelle
	Groupe 1, sans mention T, ni mention A
Da2	Groupe 1, affecté d'une mention T ou d'une mention A
	Groupe 2 sans mention T, ni mention A
	Cancérogènes de catégorie 3 *
Da3	Groupe 2, affecté d'une mention T ou d'une mention A
	Groupe 3, sans mention T, ni mention A
	Cancérogènes de catégorie 2A et 2B *
Da4	Groupe 3, affecté d'une mention T ou d'une mention A
	Cancérogènes de catégorie 1 *
Da5	Groupe 4

\* selon le Circ

↑ **TABLEAU 1**  
Matrice de hiérarchisation des dangers des agents biologiques (AB).  
T : agent susceptible de produire des toxines ;  
A : agent pouvant avoir des effets allergisants.

produits : l'infectiosité, la toxicité, l'immunoallergie et la cancérogénicité. Ce classement intègre l'hypothèse de l'additivité des dangers. C'est-à-dire qu'un agent infectieux d'un groupe de risque, susceptible en plus de produire des toxines (T) ou qui peut avoir des effets allergisants (A), présente plus de risque qu'un agent infectieux du même groupe sans ces autres effets. La matrice simplifiée est présentée dans le *Tableau 1*.

En compilant les données de la littérature [3, 4, 8] et en se reposant sur les principes d'attribution d'une bande de danger aux réservoirs, on arrive à la conclusion que, dans l'état des connaissances actuelles, les matières entrantes et les différents composts présentent la même bande de danger. En conséquence, la dangerosité du réservoir n'est pas discriminante dans ce contexte.

Concernant les DE, à l'issue de l'analyse de la littérature [1], des visites d'entreprises et de l'enquête auprès des exploitants, les DE retenus sont :

- la quantité journalière de matière mise en œuvre lors d'une tâche de travail ;
- l'état physique de la matière ;
- la durée de l'exposition lors d'une tâche donnée ;

↓ **FIGURE 1**  
Descripteurs de risque pour évaluer les expositions aux risques biologiques.



- la fréquence de la tâche ;
  - le type de procédé de travail ;
  - la ventilation au poste de travail et le type de captage (protection collective) ;
  - le scénario d'exposition cutanée/oculaire ;
  - la surface de la peau en contact avec les polluants.
- La méthode propose ainsi sept DR permettant d'évaluer le risque par inhalation et six pour évaluer le risque par contact cutané, dont quatre sont communs aux deux voies d'exposition : le danger, la quantité journalière, la fréquence de la tâche et la durée de l'exposition (Cf. *Figure 1*).

Ensuite, à partir des références exploitées, il est proposé de décliner les DR entre trois ou cinq bandes associées à différents scores [1].

Les scores de risque par inhalation et par contact cutané sont obtenus par la multiplication des scores des DR qui leur sont associés. Les scores calculés pour chaque tâche de travail correspondent à un niveau de risque en trois classes, du moins élevé (modéré) au plus élevé (sérieux) et à un plan d'action à mettre en œuvre (Cf. *Tableau 2*).

La déclinaison des DR par bandes, leurs scores, ainsi que les niveaux de risque sont présentés en détail dans la fiche MétroPol de l'INRS (« Guide d'évaluation du risque biologique dans le secteur du compostage » [9]).

### Validation de la méthode

#### Démarche

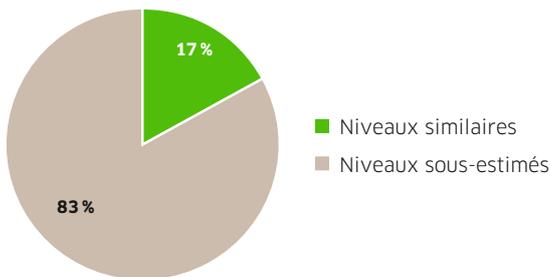
La validation de la méthode a reposé sur trois étapes. La première a consisté à accompagner les exploitants de trois sites de compostage différents dans la mise en application de la méthode d'EvRB, afin d'évaluer des situations de travail.

La deuxième a concerné l'évaluation des situations de travail par la méthode proposée et, simultanément, avec deux autres démarches nommées  $D_{EvRB1}$  et  $D_{EvRB2}$  (dans le cadre de cette étude). Elles ont été choisies à l'issue de l'analyse des démarches d'EvRB, car considérées comme les plus abouties parmi celles qui utilisent également un modèle gradué de gestion des risques. Elles incluent des DR communs à la méthode proposée, avec des bandes et des scores différents. Par ailleurs, la définition des bandes de certains DR est considérée comme étant peu objective par rapport à la définition des bandes de la méthode proposée. Par exemple, pour

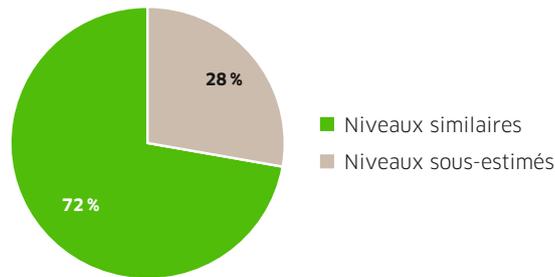
NIVEAU DE RISQUE	MODÉRÉ	PRÉOCCUPANT	SÉRIEUX
Caractérisation du risque et plan d'action	Des mesures correctives ne sont pas à mettre en place de manière prioritaire.	La situation nécessite la mise en place de mesures correctives.	Des mesures correctives sont à mettre en place rapidement.

← TABLEAU 2  
Grille de caractérisation du risque et plan d'action à mettre en œuvre.

Comparaison des niveaux de risque de  $D_{EVRB1}$  par rapport à la méthode développée



Comparaison des niveaux de risque de  $D_{EVRB2}$  par rapport à la méthode développée



← FIGURES 2a ET 2b  
Comparaison des niveaux de risque obtenus selon les situations de travail en appliquant la méthode proposée et les démarches comparatives  $D_{EVRB1}$  et  $D_{EVRB2}$ .

la fréquence de l'exposition,  $D_{EVRB1}$  propose quatre bandes : annuelle, mensuelle, hebdomadaire et journalière sans précision comparativement à la fréquence définie par la méthode proposée.

La dernière étape a consisté à valider les résultats de la méthode avec les données de la base Colchic en comparant les scores obtenus avec la méthode proposée et les mesures de concentrations observées dans Colchic, dont 83 % concernent des mesures d'ambiance. La médiane de ces concentrations a été comparée à des valeurs guides à ne pas dépasser pour quatre AB : les bactéries cultivables à 25 °C [10], les moisissures cultivables à 25 °C [11], les bactéries cultivables à 47 °C [12] et les endotoxines [13]. Tout comme dans le cas des produits chimiques, le niveau d'exposition observé a été considéré comme :

- modéré : si la concentration médiane est en dessous de 10 % de la valeur guide à ne pas dépasser ;
- préoccupant : lorsque la concentration médiane se situe entre 10 % et 100 % de la valeur guide à ne pas dépasser ;
- sérieux : si la concentration médiane dépasse la valeur guide à ne pas dépasser.

## Résultats

L'application de la méthode développée a permis d'évaluer une vingtaine de situations de travail différentes, telles que le retournement d'andain, le criblage de compost, etc. Les niveaux d'exposition obtenus avec la méthode sont en cohérence avec les circonstances d'exposition. Les sources d'émissions d'aérosols, par exemple lors d'un retournement d'andain ou le criblage, engendrent des situations comportant un risque par inhalation non négligeable. L'étude comparative des risques obtenus avec la méthode proposée et les deux autres démarches  $D_{EVRB1}$  et  $D_{EVRB2}$  indique que la méthode proposée est plus protectrice des situations de travail étudiées

dans 56 % des cas, que ce soit par inhalation ou par contact cutané, et que, pour les 44 % restantes, elle est au moins aussi protectrice (Cf. Figures 2a et 2b). Après avoir extrait les mesures de concentrations en agents biologiques (AB) réalisées dans le secteur du compostage de la base de données Colchic, un niveau de risque a été calculé à partir des valeurs guides des AB et comparé au niveau de risque obtenu par la méthode développée. Dans 57 % des situations,

Plateforme extérieure de stockage d'une usine de compostage. →



© Fabrice Dimier pour l'INRS/2016

les niveaux de risque évalués par la méthode et ceux déterminés à l'aide de Colchic sont similaires, et, dans 43 % des situations, la méthode évalue plus sévèrement le niveau du risque biologique que ce qui peut être déduit des données de Colchic.

### Conclusion

La méthode d'EvRB proposée constitue une première ébauche limitée à un seul secteur spécifique pour évaluer le risque biologique. Cependant, de nombreux autres secteurs sont également concernés et devraient pouvoir bénéficier d'une méthode similaire. Ce travail a permis, après une analyse des démarches existantes dans le domaine du risque biologique en milieu de travail, de concevoir, d'appliquer et de valider une méthode d'évaluation qualitative du risque biologique applicable au compostage. L'application de cette méthode a révélé qu'elle évaluait le niveau de risque biologique de manière plus protectrice dans certaines situations que d'autres méthodes, y compris à partir de l'exploitation des données de Colchic. Cela peut être lié au fait que les descripteurs utilisés pour évaluer les situations de travail dans les deux méthodes testées en comparaison sont des paramètres subjectifs et donc interprétables selon les utilisateurs. De plus, les niveaux d'exposition de Colchic se basent sur des mesures d'ambiance plutôt que sur des mesures individuelles, sous-estimant généralement l'exposition. Des pistes d'améliorations ont été identifiées, telles que :

- l'apport de connaissances en matière de biodiversité et de concentration des différents AB qui permettrait d'améliorer l'estimation de la dangerosité des réservoirs ;
- l'inclusion, en amont de l'évaluation du risque par inhalation ou par contact cutané, d'une étape intermédiaire qui permettrait de hiérarchiser et de prioriser les situations de travail à évaluer [14] ;
- l'introduction d'un niveau de risque pondéré qui prendrait en compte le port d'équipements de protection individuelle (EPI), tels que les appareils de protection respiratoires (APR) et les gants de protection, qui permettrait d'affiner le risque correspondant. Finalement, l'ensemble de ce travail a abouti à l'élaboration d'une nouvelle fiche qui vient compléter le guide méthodologique de la base de données MétroPol (INRS) [9]. Les acteurs engagés dans la prévention des risques biologiques disposent ainsi d'un nouvel outil d'aide à l'évaluation. ●

1. Cf. Articles L. 4121-1 et L. 4121-2 du Code du travail.
2. Mieux connue sous le nom de « légionnelle », l'exposition à cette bactérie peut entraîner des affections de gravités variables (légionellose), allant d'une atteinte fébrile bénigne à des formes parfois mortelles de pneumonie.
3. La gestion graduée de risque (ou dite de Control Banding - CB) est une approche qui consiste à attribuer des scores aux niveaux de danger hiérarchisés en fonction des effets sur la santé, et aux niveaux d'exposition hiérarchisés du moins exposant au plus exposant. Ces niveaux de danger et d'exposition sont également classés par bandes. Le niveau de risque est estimé en fonction du résultat obtenu à la suite d'une opération mathématique simple (somme, multiplication...) des scores de danger et d'exposition retenus.
4. Cf. Article R. 4421-3 du Code du travail.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] BURZONI S., DUQUENNE P., MATER G., FERRARI L. – Workplace biological risk assessment: review of existing and description of a comprehensive approach. *Atmosphere*, 2020, 11 (7), p. 741.
- [2] TRIOLET J., HÉRY M. – Les méthodes d'évaluation des risques chimiques : une analyse critique. *Hygiène & sécurité du travail*, 2009, 216, pp. 11-24.
- [3] SCHLOSSER O., HUYARD A. – Bioaerosols in composting plants: occupational exposure and health. *Environnement, risques & santé*, 2008, 7 (1), pp. 37-45.
- [4] WÉRY N. – Bioaerosols from composting facilities: a review. *Frontiers in cellular and infection microbiology*, 2014, 4, p. 42.
- [5] ARRÊTÉ DU 16 NOVEMBRE 2021 fixant la liste des agents biologiques pathogènes. Accessible sur : <http://www.legifrance.gouv.fr>
- [6] BROOKE I. – A UK scheme to help small firms control health risks from chemicals: toxicological considerations. *The annals of occupational hygiene*, 1998, 42 (6), pp. 377-390.
- [7] MARQUART H. ET AL. – 'Stoffenmanager', a web-based control banding tool using an exposure process model. *The annals of occupational hygiene*, 2008, 52 (6), pp. 429-441. doi:10.1093/annhyg/men032
- [8] DE GUARDIA A. – *Compostage et composts. Avancées scientifiques et techniques*. Lavoisier, coll. Techniques & documentation, 2018.
- [9] INRS – *Guide d'évaluation du risque biologique dans le secteur du compostage*. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/publications/bdd/metropol/guide-methodologique-metropol.html>
- [10] SUVA – *Valeurs limites d'exposition aux postes de travail*. Édition 2015. Accessible sur : <http://www.suva.ch>
- [11] BAU A. – *Anlagen zur Behandlung und Verwertung von Abfällen, in Technische Regeln für Biologische Arbeitsstoffe*. Dortmund (Allemagne), Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, TRBA 214, 2018, p. 29.
- [12] FRACCHIA L. ET AL. – The assessment of airborne bacterial contamination in three composting plants revealed site-related biological hazard and seasonal variations. *Journal of applied microbiology*, 2006, 100 (5), pp. 973-984.
- [13] BALTU I. 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>
- [14] VINCENT R., BONTHOUX F. ET AL. – Méthodologie d'évaluation simplifiée du risque chimique : un outil d'aide à la décision. *Cahiers de notes documentaires – Hygiène & sécurité du travail (INRS)*, 2005, 200, pp. 39-62.



Dans la nouvelle version  
de la base de données  
**Baobab**, recherchez des  
informations par :

- agent biologique
- maladie
- réservoir
- mode de transmission
- zone géographique...

# **BAOBAB,** la base de données sur **les agents biologiques infectieux au travail**

[www.inrs.fr/baobab](http://www.inrs.fr/baobab)

## Notes techniques

# EXPOSITION À L'AMIANTE DANS LA FILIÈRE DE LA COLLECTE ET DU TRAITEMENT DES EAUX USÉES : ÉTAT DES LIEUX

Malgré l'interdiction d'usage de l'amiante depuis 1997, le risque lié à l'exposition en milieu professionnel reste une problématique d'actualité.

Cet article a pour objectif de décrire la filière du traitement des eaux usées, d'identifier les postes de travail susceptibles d'exposer à des fibres d'amiante mises en suspension dans l'air ou émises dans les aérosols, et de proposer des actions visant à prévenir ce risque chez les travailleurs de la filière.

JEAN-FRANÇOIS SAUVÉ, GAUTIER MATER  
INRS, département Métrologie des polluants

ANITA ROMERO-HARIOT  
INRS, département Expertise et conseil technique

MARC CHAROY  
Cramif

L'amiante est un agent cancérigène dont l'usage est interdit en France depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1997. Pour autant, l'exposition à cette substance en milieu professionnel reste une problématique d'actualité, encadrée cependant par une réglementation spécifique (*Cf. Encadré dans l'Étude de cas, p. 80*). Les processus<sup>1</sup> font notamment l'objet de mesurages dans l'air des lieux de travail [1] lors de leur mise en œuvre liée aux activités de retrait ou d'encapsulage de matériaux contenant de l'amiante (« sous-section 3 ») ; ou lorsque ces processus concernent les interventions de maintenance, de réparation ou d'entretien impliquant ces matériaux (« sous-section 4 »). Les niveaux d'empoussièrement en résultant sont variables. Suite à une alerte de l'Agence régionale de santé (ARS) de Nouvelle-Aquitaine et de l'INRS auprès de la Direction générale de la santé (DGS) relative aux risques liés à l'ingestion d'amiante, notamment due à la présence de fibres dans l'eau de consommation humaine, l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) a été saisie le 31 mai 2017. Elle a conclu, dans une note publiée le 7 novembre

2017, à la présence d'amiante dans l'eau potable [2]. Une revue de la littérature, publiée subséquemment par l'Anses, indique que les données sont inadéquates pour conclure formellement à l'existence d'associations entre l'ingestion d'amiante et la survenue de cancers digestifs [3]. Néanmoins, cette alerte a conduit à s'interroger : si l'amiante peut être présent dans l'eau potable, il pourrait également être retrouvé en aval dans les eaux usées et, ainsi, représenter une source d'exposition des travailleurs de la filière de la collecte et du traitement des eaux usées.

Afin de mieux cibler le risque lié à l'amiante dans ce secteur, une étude a été menée pour dresser un portrait de la filière du traitement des eaux usées et identifier les métiers susceptibles d'exposer les travailleurs à des fibres d'amiante mises en suspension dans l'air. En parallèle, la FNSA (dorénavant Maïage<sup>2</sup>) a signé en 2017 une convention avec la Carsat Normandie et la Cramif, qui visait à documenter l'exposition à l'amiante lors de tâches d'hydrocurage et à proposer des actions de prévention. Les résultats des travaux spécifiques à l'activité d'hydrocurage sont détaillés dans l'étude de cas publiée dans ce même numéro (*Cf. pp. 78-81*).

*Un biais d'interprétation est susceptible d'être introduit lors de l'exploitation des bases de données nationales d'exposition professionnelle telles que Colchic et Scola. 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.*

## Portrait de la filière de traitement des eaux usées

En 2020, 124 000 emplois directs et indirects étaient rattachés à la filière de l'eau en France [4] et plus d'un million de kilomètres de réseaux d'eau et d'assainissement permettaient de distribuer l'eau potable et de collecter les eaux usées. La collecte des eaux usées s'effectue de façon gravitaire par des canalisations, qui ont souvent une faible pente (de l'ordre de 2 %). Les eaux usées sont ensuite acheminées jusqu'à l'une des 21 400 stations d'épuration des eaux usées (notées Step) réparties sur tout le territoire national [5].

Les activités liées à la collecte, au transport et au traitement des eaux usées sont diversifiées et interviennent à plusieurs étapes du réseau, allant de l'entretien des conduites (curage, maintenance des réseaux) jusqu'à l'opération de traitement des eaux en Step, avant leur rejet dans la nature. Cette multiplicité d'activités est également associée à des conditions et postes de travail divers :

- environnements confinés – égoutiers : travail dans des canalisations visitables, bassins de stockage des eaux pluviales ;
- milieu extérieur urbain, périurbain ou rural – hydrocureurs : entretien et curage des conduites d'eaux usées ;
- travail sédentaire sur un lieu spécifique en installation fixe – opérateurs de Step ;
- chantiers mobiles – agents de maintenance et de réfection des égouts, avaloirs, ouvrages de rétention....

L'étude des postes de travail réalisée lors de visites de Step et lors d'interventions d'entretien de conduites a permis de relever cinq situations de travail principales exposant à des aérosols mis ou remis en suspension dans l'air par l'activité.

• **La première situation de travail** est l'entretien des conduites, et plus précisément l'activité d'hydrocurage, pour des actions préventives permettant de conserver un écoulement régulier des eaux ou pour des actions curatives en cas d'obstruction. Une succession d'interventions ponctuelles est réalisée entre deux regards d'un même réseau par des équipes de deux travailleurs au minimum, avec un camion hydrocureur. La technique d'hydrocurage consiste à faire circuler une fusée métallique introduite depuis un regard dans un tronçon de canalisation. Cette fusée avance dans la canalisation grâce à ses buses inclinées qui projettent de l'eau sous pression sur les parois de la canalisation. La fusée est reliée par des flexibles au véhicule qui dispose d'une réserve d'eau et d'un surpresseur. L'équipement du véhicule permet aussi de pomper l'eau chargée des boues résiduelles. Lors de l'hydrocurage, un travailleur reste près du camion pour réaliser le curage en deux étapes séquentielles, le curage proprement dit et l'aspiration des déchets. Lors du curage, le travailleur utilise

## RÉSUMÉ

Des études ont montré la présence de fibres d'amiante dans l'eau de consommation humaine. Or, si l'amiante peut être présent dans les réseaux d'eau potable, il pourrait également être retrouvé en aval dans les eaux usées et, ainsi, représenter une source d'exposition des travailleurs de la filière de la collecte et du traitement des eaux usées, tels les égoutiers, les salariés affectés au curage des canalisations, et les opérateurs de station d'épuration. Cette note technique a pour objectif de décrire cette filière, d'identifier les postes de travail susceptibles d'exposer les travailleurs à des fibres d'amiante mises en suspension dans l'air ou dans des aérosols, et de proposer des actions de prévention appropriées.

## ASBESTOS EXPOSURE IN THE WASTEWATER COLLECTION AND TREATMENT SECTOR: AN ANALYSIS OF THE CURRENT SITUATION

*Studies have shown the presence of asbestos fibres in water for human consumption. But, while asbestos can be present in drinking water systems, it could also be found downstream in sewage water and therefore represent a source of exposure for workers in the wastewater collection and treatment sector, such as sewer workers, drain cleaners, and wastewater facility operators. This technical note will describe this sector, identify the workstations that may expose workers to airborne asbestos fibres or fibres in aerosols, and will propose suitable prevention actions.*



© Gaël Kerbaol/INRS/2015

un système de commande à distance pour contrôler la fusée et vérifie périodiquement le déroulement des opérations directement au dessus du regard. Lors de cette tâche, de nombreux aérosols sont mis en suspension dans l'air au niveau des regards et peuvent exposer les travailleurs à des fibres d'amiante, tel que cela est documenté dans la campagne de prélèvements de l'étude de cas présentée dans ce même numéro (Cf. pp. 78-81).

• **La deuxième situation de travail** est la maintenance et l'entretien des égouts visitables. Durant ce travail, les égoutiers peuvent se retrouver en contact non seulement avec de l'eau contaminée, mais également avec des conduites en fibrociment et des mastics contenant de l'amiante provenant d'anciens travaux de maintenance. Bien qu'il existe des cartes du réseau des égouts, elles ne recensent que très rarement la localisation des conduites en amiante-ciment. Cette carence de localisation concerne principalement celles de diamètre inférieur à 300 mm et qui ont été fabriquées avant l'interdiction de l'amiante, en janvier 1997.

Outre le contact avec des conduites potentiellement en amiante-ciment, les égoutiers peuvent être soumis à d'autres risques de nature biologique et chimique et amenés à utiliser des équipements de protection adaptés, comme des combinaisons à usage unique étanches aux poussières et aux liquides, des bottes de sécurité étanches, des gants et des appareils de protection respiratoire. Pour autant, ces équipements

ne sont pas nécessairement appropriés à l'exposition à l'amiante.

• **La troisième situation de travail** concerne le dépotage en Step des effluents contenus dans la citerne des camions en charge de l'hydrocurage. Lors de son déversement, le flux d'effluents est recueilli dans une fosse avant de rejoindre le circuit des eaux usées du réseau de collecte. Cette opération, réalisée par des hydrocureurs, égoutiers ou techniciens en assainissement présents tout le long du dépotage, peut remettre en suspension dans l'air des effluents contenus dans la citerne du camion.

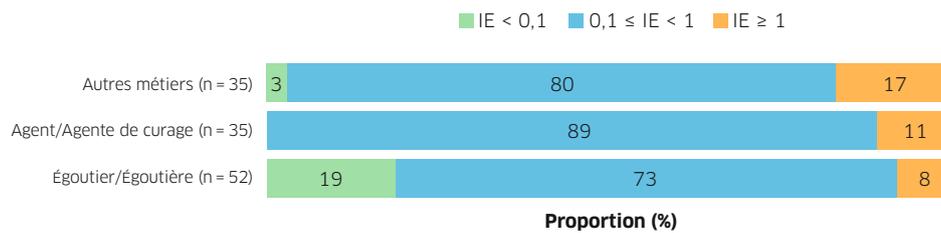
• **La quatrième situation de travail** porte sur les activités de maintenance des installations de Step et notamment le curage des cellules et des bassins lors des phases de nettoyage. Ces interventions ponctuelles, qui peuvent nécessiter de descendre dans l'ouvrage afin d'utiliser des jets haute pression et d'aspirer des boues à l'aide de raclettes, mettent en suspension des aérosols.

• **La cinquième et dernière situation de travail** susceptible d'émettre des aérosols dans l'air des lieux de travail concerne la gestion des boues issues de Step. À l'état pâteux, ces boues, appelées boues déshydratées biologiques, peuvent être valorisées soit en épandage soit en compostage. Une fois séchées à l'état de poudre (siccité de 85 % – 90 %), elles sont appelées « boues séchées biologiques » et ont également vocation à être valorisées en épandage ou en compostage. Elles sont généralement acheminées par

Prélèvements d'effluents en bassin de station d'épuration.



© Fabrice Dimier pour l'INRS/2023



← **FIGURE 1**  
Distribution des indices d'exposition (IE) par métier sur la période 2014–2022.

camions sur des plateformes spécifiques à l'extérieur de la station d'épuration. Dans un premier temps, elles sont stockées dans une zone à part et font l'objet d'une surveillance de 10 jours, qui prévoit notamment des analyses physicochimiques et biologiques régulières pour évaluer leur conformité relativement aux critères réglementaires (par exemple : teneurs limites en métaux lourds, valeur agronomique des boues)<sup>3</sup>. La réglementation relative à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées ne spécifie toutefois pas l'analyse de caractérisation de la présence d'amiante. Après cette période de surveillance, les boues sont mélangées aux boues déjà présentes sur la plateforme et stockées pendant plusieurs mois avant d'être épandues par les agriculteurs selon un plan d'épandage. En cas de non-conformité des boues, elles sont soit incinérées, soit expédiées en cimenterie ou en installation de stockage des déchets non dangereux ou dangereux. Des études menées aux États-Unis dans les années 1990 ont montré la présence de fibres d'amiante dans les boues de Step issues de plusieurs municipalités [6, 7]. Il n'existe toutefois pas de données plus récentes, ni spécifiques à la France.

### Niveaux d'exposition mesurés

Certaines études épidémiologiques ont permis d'observer des associations entre des emplois de cette filière et la survenue de cancers de l'appareil respiratoire (poumons, trachée, bronches, larynx) [8-13]. Toutefois, très peu de données d'exposition collectées dans cette filière ont pu être identifiées dans la littérature.

Des mesures de fibres d'amiante ont été réalisées au printemps 2014 dans les égouts de la Ville de Paris, à la suite d'une étude montrant une augmentation du risque de mortalité chez les égoutiers atteints par certains cancers. Les résultats de cette étude d'exposition ont montré des concentrations de fibres d'amiante supérieures à la limite de détection, mais inférieures à la limite de quantification, sur deux des cinq sites ayant fait l'objet de mesures sur opérateurs [14]. Par ailleurs, les prélèvements d'ambiance dans les locaux techniques n'ont pas montré de concentrations détectables en fibres d'amiante.

Afin de pallier ce manque de données d'exposition, une exploitation des bases Colchic et Scola a été réalisée, en ciblant des métiers pouvant être associés

à des activités du domaine de la collecte et du traitement des eaux usées. La base Colchic regroupe l'ensemble des mesures d'exposition effectuées depuis 1987 sur les lieux de travail par les huit laboratoires interrégionaux de chimie (LIC) des Carsat/Cramif et les laboratoires de l'INRS, tandis que la base Scola regroupe l'ensemble des mesures d'exposition effectuées sur les lieux de travail depuis 2007 par des laboratoires accrédités dans le cadre des contrôles réglementaires.

Seules les mesures atmosphériques effectuées à proximité des voies respiratoires des travailleurs et analysées par microscopie électronique à transmission analytique (Meta) ont été conservées. Les données ont ensuite été restreintes à une liste de titres d'emploi associés au secteur de la collecte et du traitement des eaux usées (par exemple : agent de curage, égoutier, technicien de Step...). Par convention, les concentrations sous la limite de quantification (LQ) ont été fixées à LQ/2 [15].

Au total, 122 mesures prélevées entre 2014 et 2022 ont été identifiées, toutes provenant de la base Scola. La *Figure 1* présente la distribution des indices d'exposition (IE : ratio entre les concentrations et la VLEP-8h réglementaire contraignante de 10 fibres/L) pour les fibres d'amiante en fonction du titre d'emploi. Les métiers ayant fait l'objet de moins de 10 mesures ont été regroupés dans la catégorie « Autre ». Pour les trois catégories représentées, la majorité des concentrations mesurées se situaient entre 10 % et 100 % de la VLEP-8h. Dans le cas de la catégorie « Autre », les métiers présentant au moins une mesure dépassant la VLEP-8h incluent les chefs égoutiers, les nettoyeurs de réseau d'assainissement, les opérateurs de gestion de réseaux, les ouvriers d'assainissement et les techniciens de contrôle de réseau d'assainissement.

### Conclusion

Les études de poste et les mesures identifiées dans les bases de données mettent en évidence que plusieurs activités reliées à la collecte et au traitement des eaux usées peuvent exposer les travailleurs à des aérosols en suspension dans l'air pouvant contenir des fibres d'amiante. Les mesurages réalisés dans le cadre de travaux de curage et chez les égoutiers montrent des dépassements de la VLEP-8h.



Bien que très peu de données d'exposition quantitatives aient pu être identifiées dans les Step, les résultats observés pour les agents de curage et les égoutiers montrent un potentiel de contamination des eaux usées collectées dans les Step, que cette contamination provienne des eaux acheminées par les canalisations ou des eaux dépotées par les camions d'hydrocurage. Ainsi, il serait important de mieux caractériser l'exposition potentielle à l'amiante des travailleurs de ces installations, qu'elle soit due aux eaux usées, à des travaux impliquant des matériaux amiantés (conduites, joints, etc.) ou à des activités impliquant les boues.

En ce qui concerne les actions de prévention, le repérage de l'amiante est un préalable crucial avant d'entamer des travaux. La connaissance de la présence d'amiante dans les matériaux permet d'orienter les méthodes de travail et de mettre en œuvre l'intervention en appliquant le mode opératoire amiante « sous-section 4 » et en prévoyant les moyens de protection collective et individuelle appropriés [16]. Pour ce qui est de l'hydrocurage, l'utilisation

de tampons pour réduire les projections d'aérosols provenant des regards a été évaluée par la profession et est discutée plus en détail dans l'étude de cas (Cf. pp. 78-81). Finalement, des pratiques de décontamination du matériel et des opérateurs, ainsi que le port d'un appareil de protection respiratoire approprié demeurent essentiels pour prévenir les risques de développer des pathologies d'origine professionnelle liés à des expositions à l'amiante. ●

1. Un processus se qualifie par : un matériau amianté, une technique employée pour le traiter et les moyens de protection collective mis en place (travail à l'humide et captage à la source).

2. FNSA : Fédération nationale des syndicats de l'assainissement et de maintenance industrielle ; Maïage : Maintenance industrielle, assainissement, gestion environnementale. Cette fédération regroupe 1500 entreprises et établissements, représentant 15000 travailleurs du secteur.

3. Cf. Arrêté du 8 janvier 1998 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles pris en application du décret n°97-1133 du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées. <https://www.legifrance.gouv.fr/>

## BIBLIOGRAPHIE

[1] INRS – Scola – Rapport d'activité META pour la période 2012 à 2022. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/publications/hst/bases-de-donnees.html>

[2] ANSES – Note d'appui scientifique et technique de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relative à l'analyse de deux articles : Di Ciaula (2017) « Asbestos ingestion and gastrointestinal cancer : a possible underestimated hazard » ; Di Ciaula, Gennaro (2016) « Possible health risks from asbestos in drinking water ». 2017. Accessible sur : <https://www.anses.fr/fr/system/files/EAUX2017SA0138.pdf>

[3] ANSES – Caractérisation du danger lié à l'ingestion d'amiante. État des lieux des connaissances actuelles. 2021. Accessible sur : <https://www.anses.fr/fr/system/files/EAUX2018SA0001Ra.pdf>

[4] MINISTÈRE DU TRAVAIL, DU PLEIN EMPLOI ET DE L'INSERTION – La Filière de l'eau publique pour la première fois une étude « Emploi, Compétences et Formations ». 2021. Accessible sur : <https://travail-emploi.gouv.fr/actualites/l-actualite-du-ministere/article/la-filiere-de-l-eau-publique-pour-la-premiere-fois-une-etude-emploi-competences#:~:text=Le%20mardi%209%20mars%202021,la%20formation%20%3A0%20horizon%202025>

[5] CENTRE D'INFORMATION SUR L'EAU – Les eaux usées, une réalité méconnue... Mais essentielle. 2023. Accessible sur :

<https://www.cieau.com/les-eaux-usees-une-realite-meconnue-mais-essentielle-2/>

[6] MANOS C.G. ET AL. – Prevalence of asbestos in sewage sludges from 51 large and small cities in the United States. *Chemosphere*, 1991, 22 (9-10), pp. 963-973. Accessible sur : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/004565359190255C>

[7] PATEL-MANDLIK K.J. ET AL. – Prevalence of asbestos in sludges from 16 sewage plants in large American cities in 1993. *Chemosphere*, 1994, 29 (6), pp. 1369-1372. Accessible sur : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0045653594902682>.

[8] BOURGKARD E., COLIN R., GRZEBYK M., CLERC-URMES I. – Étude de la mortalité des égoutiers de la ville de Paris. *Archives des maladies professionnelles et de l'environnement*, 2015, 76 (4), p. 401. Accessible sur : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1775878515001320>

[9] FRIIS L. ET AL. – Cancer incidence in a cohort of Swedish sewage workers: extended follow up. *Occupational and environmental medicine*, 1999, 56 (10), pp. 672-673. Accessible sur : <https://oem.bmj.com/content/oemed/56/10/672.full.pdf>

[10] HANSEN E.S. ET AL. – Wastewater exposure and health: a comparative study of two occupational groups. *Occupational and environmental medicine*, 2003, 60 (8), p. 595. Accessible sur : <http://oem.bmj.com/content/60/8/595.abstract>

[11] LAFLEUR J., VENA J.E. – Retrospective cohort mortality study of cancer among sewage plant workers. *American journal of industrial medicine*, 1991, 19 (1), pp. 75-86. Accessible sur : <https://doi.org/10.1002/ajim.4700190110>

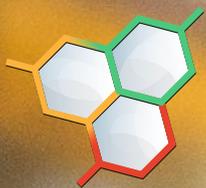
[12] NASTERLACK M. ET AL. – Cancer incidence in the wastewater treatment plant of a large chemical company. *International archives of occupational and environmental health*, 2009, 82 (7), pp. 851-856. Accessible sur : <https://doi.org/10.1007/s00420-009-0397-6>

[13] WILD P. ET AL. – Mortality among Paris sewage workers. *Occupational and environmental medicine*, 2006, 63 (3), pp. 168-172. Accessible sur : <https://oem.bmj.com/content/oemed/63/3/168.full.pdf>

[14] ANSES – Facteurs de risques professionnels éventuellement en lien avec la surmortalité des égoutiers. 2016. Accessible sur : <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2010SA0196Ra.pdf>

[15] EYPERT-BLAISON C., ROMERO-HARIOT A., VINCENT R. – Amiante. Recommandations pour vérifier le respect de la VLEP. *Hygiène & sécurité du travail*, 2013, 231, NT 1, pp. 40-45. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=NT%201>

[16] INRS – Interventions d'entretien et de maintenance susceptibles d'émettre des fibres d'amiante. Guide de prévention. ED 6262, 2016. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206262>



# SEIRICH

Évaluer le risque chimique



“L’outil pratique  
et évolutif pour  
prévenir les  
risques chimiques  
en entreprise”

Éric L.  
Chef d’entreprise

Télécharger librement sur  
[www.seirich.fr](http://www.seirich.fr)



FRANCE  
CHIMIE



EN PARTENARIAT AVEC  
ms  
santé  
famille  
retraite  
services

## Étude de cas

# CARACTÉRISATION DES EXPOSITIONS À L'AMIANTE DANS LES ACTIVITÉS D'HYDROCURATION : RETOUR D'EXPÉRIENCE ET PRÉCONISATIONS DE PRÉVENTION

---

MARC  
CHAROY  
Cramif

---

ANITA  
ROMERO-  
HARIOT  
INRS,  
département  
Expertise  
et conseil  
technique

---

JEAN-  
FRANÇOIS  
SAUVÉ,  
GAUTIER  
MATER  
INRS,  
département  
Métrologie  
des polluants

---

→ **LA PROBLÉMATIQUE :** En 2017, peu de données permettaient de connaître les niveaux d'empoussièrement en amiante générés par la technique d'hydrocurage, bien que des expositions à l'amiante soient envisagées du fait du très grand nombre d'installations d'assainissement comportant des parties réalisées en amiante-ciment. Les professionnels, représentés par La Fédération nationale des syndicats de l'assainissement et de la maintenance industrielle (FNSA, devenue Maïage) et des donneurs d'ordres, notamment en Normandie, ont souhaité documenter les expositions et se sont rapprochés de la Carsat Normandie et de la Cramif. Une convention de partenariat a été signée pour mener une campagne de mesurages financée par la FNSA, sous la supervision des agents du réseau de l'Assurance Maladie – Risques professionnels, avec la collaboration d'entreprises et de collectivités locales.

→ **LA RÉPONSE DE LA CARSAT NORMANDIE, DE LA CRAMIF ET DE L'INRS**

**Description de la campagne de prélèvements**

Le protocole de mesurage établi incluait des prélèvements d'air sur opérateurs qui intervenaient en routine, des prélèvements d'air en ambiance de travail, des prélèvements de matériaux (pour vérifier que les canalisations étaient bien amiantées) et des prélèvements surfaciques sur les vêtements et sur les équipements d'hydrocurage (buses, camion...). Des prélèvements d'eau réalisés sur un même site avant, pendant et après les travaux étaient également prévus pour évaluer si le procédé d'hydrocurage pouvait générer

une contamination des eaux usées par les fibres d'amiante. Au total, onze interventions ont fait l'objet de prélèvements entre juin 2016 et juillet 2020, dans plusieurs départements français : deux en Ille-et-Vilaine, deux en Loire-Atlantique, une dans le Var, deux en Seine-Maritime et quatre en région Île-de-France. Quelques sites complémentaires ont fait l'objet de mesurages en dehors de la convention.

Il est à noter que les prélèvements surfaciques et d'eaux usées ne sont ni réglementaires, ni normalisés, mais visaient à informer sur les sources potentielles d'exposition des opérateurs. Concernant les mesurages d'ambiance, les conditions analytiques n'ont pas toujours été réunies pour obtenir la sensibilité analytique requise en environnement général au titre du Code de la santé publique, notamment en raison de durées de prélèvement trop courtes. Pour cette raison, la valeur de la borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95 % a été prise en compte pour l'exploitation des résultats.

**Résultats de la campagne de prélèvements**

Au total, la campagne capitalise 11 prélèvements de matériaux, 61 prélèvements en zone respiratoire des travailleurs, 34 prélèvements en ambiance de travail, 45 prélèvements surfaciques et 5 prélèvements d'eaux usées.

Sur les 11 prélèvements de matériaux, la présence d'amiante a été identifiée dans 10 échantillons. Les prélèvements en zone respiratoire des travailleurs ont montré que 75 % des concentrations mesurées étaient inférieures à 10 f/L<sup>1</sup>.

NIVEAU RÉGLEMENTAIRE	POURCENTAGE DE RÉSULTATS
Niveau 1 : < 100 f/L	96 %
Niveau 2 : [100 f/L - 6 000 f/L[	4 %
Niveau 3 : [6 000 f/L - 25 000 f/L[	0 %
Supérieur au niveau 3 : ≥ 25 000 f/L	0 %

← **TABLEAU 1**  
Distribution des résultats de niveaux d'empoussièrement réglementaire mesurés lors de la campagne.

L'étendue des concentrations mesurées au poste de travail était très variable, allant de : inférieure à 3 f/L jusqu'à 1 305 f/L. Trois variétés d'amiante ont par ailleurs été détectées (chrysotile, amosite et crocidolite) sur les prélèvements atmosphériques lors de cette campagne. Le *Tableau 1* présente la distribution des résultats par niveau d'empoussièrement réglementaire.

Ces résultats montrent une exposition des travailleurs aux niveaux 1 et 2 d'empoussièrement réglementaires. Tout doit être mis en œuvre pour choisir les modes opératoires d'hydrocurage les moins émissifs.

Les prélèvements en ambiance ont également montré des concentrations très variables : 62 % des résultats sont en dessous de la valeur de gestion fixée à 5 f/L dans les immeubles bâtis (Cf. *Article R. 1334-28 du Code de la santé publique*), avec des concentrations variant cependant de : inférieure à 4,5 f/L à 572 f/L. Ces résultats mettent en évidence une contamination possible de l'air dans la zone de travail lors de l'intervention. Ce constat doit être pris en compte par les entreprises pour organiser l'intervention dans une zone intégrant un périmètre de sécurité dans lequel les tiers ne sont pas autorisés à pénétrer. La surface de cette zone devra être protégée si elle n'est pas décontaminable.

Parmi les 45 prélèvements surfaciques réalisés, 32 étaient positifs à l'amiante. Les variétés détectées sont le chrysotile et la crocidolite. Des contaminations en fibres d'amiante ont ainsi été détectées dans chacune des localisations ayant fait l'objet de prélèvement, tant au niveau des équipements de protection individuelle (EPI) (gants, vêtements) que des équipements de travail (tuyaux, plaques de regard, buse ou tête haute pression, camion) (Cf. *Figure 1*). Ce constat doit alerter les entreprises sur la nécessité de mettre en œuvre des mesures de gestion appropriées du matériel au regard de sa décontamination, son transfert et son stockage, et la prise en compte dans leur évaluation des risques de la possible contamination du personnel.

Seulement cinq prélèvements d'eau ont finalement été réalisés : trois en région parisienne et deux en Ille-et-Vilaine, limitant l'interprétation qui

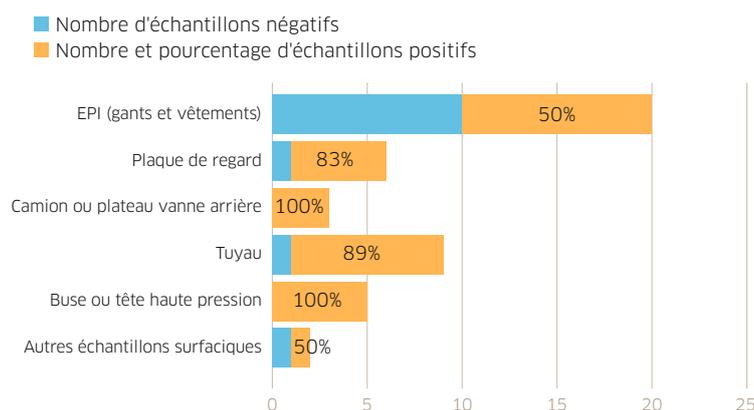
peut être faite de ces résultats. Cependant, tous les prélèvements ont montré la présence d'amiante dans les eaux (le chrysotile et la crocidolite sont les deux variétés détectées), et cela permet de supposer un transfert des fibres d'amiante et une contamination possible du réseau en aval et des boues dans les stations d'épuration.

### Quelques enseignements

Cette campagne a permis de montrer une grande variabilité des expositions à l'amiante lors de tâches d'hydrocurage. Dans certaines situations, le niveau d'empoussièrement de processus en lien avec l'activité d'hydrocurage a mis en évidence des concentrations allant jusqu'au niveau 2 réglementaire, soit entre 100 et 6 000 f/L. Le risque professionnel d'inhalation de fibres d'amiante est donc avéré lors des opérations d'hydrocurage, et des moyens de prévention (protection collective et EPI) sont à mettre en œuvre de façon systématique [1]. Par ailleurs, il a également été observé que les équipements de travail utilisés sont contaminés ; leur transfert peut provoquer la contamination du camion entre chaque déplacement. Parmi les mesures de prévention à mettre en place, il convient d'organiser leur décontamination entre chaque intervention ou de les considérer et de les gérer comme des déchets amiantés [2].

Ces résultats ne peuvent cependant pas être généralisés. En effet, chaque entreprise et chaque

↓ **FIGURE 1**  
Proportion d'échantillons contaminés par de l'amiante dans les prélèvements surfaciques.



équipe intervient selon son propre savoir-faire. Elle met en œuvre des équipements et des modes opératoires spécifiques (plaques de regards, diamètre des buses, débit de haute pression variable), et ajuste certains paramètres techniques au cas par cas en fonction des besoins et de la tâche. Plusieurs paramètres techniques peuvent avoir un impact sur l'exposition des travailleurs : la longueur des tronçons traités (espacement variable des regards d'accès sur un même tronçon), les profondeurs et les diamètres des canalisations, les débits d'eaux usées rencontrés pendant les interventions, les pressions exercées sur les canalisations, les caractéristiques des fusées utilisées (buses de nettoyage/curage

permettant la propulsion de l'eau à haute pression dans les conduits). L'état de conservation des conduits et les conditions météorologiques sont également des variables pouvant impacter le niveau d'exposition (humidité, vitesse et sens du vent par rapport à la position du ou des travailleurs...). Au bout du compte, la diversité des conditions lors des prélèvements et le faible nombre de mesures réalisées pour certains paramètres ne permettent pas de mettre en relation les concentrations dans les matériaux ou les eaux avec les niveaux d'exposition dans la zone respiratoire des travailleurs, dans l'environnement ambiant ou sur les surfaces.

#### ENCADRÉ

### RÉGLEMENTATION APPLICABLE LORS D'INTERVENTIONS DANS LES INSTALLATIONS D'ASSAINISSEMENT DES EAUX ET D'HYDROCURAGE PRÉSENTANT UN RISQUE D'EXPOSITION À L'AMIANTE

Les opérations d'hydrocurage des conduits amiantés relèvent des activités de la sous-section 4 définies à l'article R. 4412-94/ 2° du Code du travail, c'est-à-dire les « interventions sur des matériaux, des équipements, des matériels ou des articles susceptibles de provoquer l'émission de fibres d'amiante ».

Au préalable, cela implique pour le donneur d'ordres l'obligation de transmettre à l'entreprise intervenante les informations relatives à la recherche de l'amiante dans les matériaux, c'est-à-dire soit le repérage avant travaux prévu à l'article R. 4412-97 du Code du travail, soit la communication de toute autre information fiable relative à la présence d'amiante (Dossier d'intervention ultérieure sur l'ouvrage-DIUO, par exemple). Ces repérages ou informations sont adaptés à la nature, au périmètre et au niveau de risque que présente l'opération.

Ensuite, l'entreprise intervenante doit confier les interventions d'hydrocurage à du personnel ayant suivi la formation à la prévention des risques liés à l'amiante en sous-section 4 et obtenu son attestation de formation, dans les conditions fixées par l'arrêté du 23 février 2012 modifié, et bénéficiant d'un suivi individuel renforcé de son état de santé en médecine du travail. L'encadrant

technique doit rédiger le mode opératoire « amiante », en précisant notamment le processus mis en œuvre et son niveau d'empoussièrement. Ce mode opératoire doit être transmis à l'Inspection du travail, au service prévention de la Carsat, Cramif ou CGSS, et le cas échéant à l'OPPBT du lieu du siège de l'entreprise et du lieu de l'intervention lors de sa première mise en œuvre. Dès lors que l'opération dure plus de cinq jours, le mode opératoire est à nouveau transmis aux instances précitées du lieu de l'intervention. Il doit être porté à la connaissance des opérateurs chargés de sa mise en œuvre. Si l'entreprise ne dispose pas déjà d'un retour d'expérience sur le niveau d'empoussièrement du processus à partir de mesurages conduits sur opérateurs, elle doit l'estimer *a priori* en interrogeant l'outil Scol@miante. Le niveau estimé permet à l'entreprise de choisir les moyens de protection collective et les équipements de protection individuelle requis pour réduire aussi bas que possible l'exposition des travailleurs à l'inhalation de fibres d'amiante, et ne pas contaminer l'environnement en dehors de la zone d'intervention. Selon le niveau d'empoussièrement du processus, les catégories d'appareils de protection respiratoire à utiliser

sont définies dans l'arrêté du 7 mars 2013 relatif au choix, à l'entretien et à la vérification des équipements de protection individuelle utilisés lors d'opérations comportant un risque d'exposition à l'amiante. Le niveau d'empoussièrement du processus doit ensuite être mesuré par un organisme accrédité par le Cofrac ou un organisme équivalent lors de sa première mise en œuvre. En outre, il convient de vérifier le respect de la valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP) fixée à 10 fibres/L sur 8 heures en prenant en compte l'ensemble des phases opérationnelles de l'intervention, et de transcrire les résultats de ces contrôles dans la fiche individuelle d'exposition des salariés. Les moyens de décontamination du personnel et du matériel doivent être prévus en tenant compte des niveaux d'empoussièrement des processus conformément aux dispositions de l'arrêté du 8 avril 2013 modifié, relatif aux règles techniques, aux mesures de prévention et aux moyens de protection collective à mettre en œuvre par les entreprises lors d'opérations comportant un risque d'exposition à l'amiante, et les déchets amiantés doivent être gérés conformément aux dispositions du Code de l'environnement.

### → La démarche de prévention à mettre en œuvre

La formation du personnel (encadrants et travailleurs) s'impose pour les entreprises, ainsi que le choix de moyens de protection collective et le port d'EPI. La formation en sous-section 4 est obligatoire et doit intégrer la spécificité de l'activité et la décontamination du matériel et du personnel (cf. Encadré).

En dehors des risques connus inhérents aux activités d'hydrocurage, comme le risque lié à la circulation, le risque de chutes de hauteur et de plain-pied, le risque de troubles musculosquelettiques (TMS), le risque biologique et le risque chimique (sulfure d'hydrogène, ammoniac...), la possible inhalation de fibres d'amiante par les travailleurs impose une analyse spécifique partagée entre l'entreprise intervenante et son donneur d'ordres. En effet, ce dernier est particulièrement concerné par le repérage préalable de l'amiante. À défaut de renseignements précis, l'entreprise doit considérer que les canalisations contiennent de l'amiante et doit en conséquence mettre en œuvre les mesures de protection appropriées. Pour cela, les modes opératoires<sup>2</sup> préalables à l'intervention doivent être établis en considérant :

- le matériau : canalisation en fibrociment ;
- la technique : hydrocurage avec débit, pression et caractéristiques de la fusée ;
- le moyen de protection collective associé à la technique : le tampon obturateur.

Les tampons obturateurs mis en place lors des opérations d'hydrocurage constituent la meilleure protection collective observée à ce stade. En effet, ils permettent de contenir l'émission de brouillards d'eaux chargés de fibres d'amiante, et donc de limiter l'exposition des travailleurs. Cependant, il subsiste des interrogations sur leur réelle utilisation en routine, car ils présentent l'inconvénient d'obstruer la visibilité nécessaire aux opérateurs pour contrôler l'opération d'hydrocurage. Par ailleurs, les conditions d'une décontamination du matériel en sécurité ne semblent pas systématiquement réunies.

Au-delà, la mutualisation des paramètres techniques concourant au niveau d'empoussièrement le plus faible devrait être organisée par les professionnels pour harmoniser les bonnes pratiques sur l'ensemble du territoire.

### → Le port d'EPI est préconisé

En l'état actuel des connaissances sur les niveaux d'empoussièrement mesurés, le port d'un appareil de protection respiratoire adapté est préconisé [3], ainsi que le port d'un vêtement de protection à usage unique de type 5, de bottes décontaminables ou surchaussures à usage unique et de gants. La décontamination du personnel est nécessaire. Des contrôles des niveaux d'empoussièrement

## POUR EN SAVOIR +

- Application Scol@miente. Accessible sur : <https://scolamiente.inrs.fr>
- Rapport META et annexe 2012-2022 : <https://www.inrs.fr/publications/hst/bases-de-donnees>
- Amiante. S'informer pour agir. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%204704>

dans l'habitacle des camions devraient être organisés périodiquement pour vérifier l'absence de fibres d'amiante et la bonne qualité de l'air dans la cabine. ●

1. Il ne s'agit pas de mesures faites dans le cadre de la vérification du respect de la valeur limite d'exposition professionnelle (pas de pondération sur 8 h), mais du niveau d'empoussièrement lors de la mise en œuvre du processus. La valeur de 10 f/L peut être considérée ici comme un « repère » de la profession pour l'utilisation des EPI (comme les masques FFP3, notamment admis en sous-section 4).

2. La fédération professionnelle a élaboré un document d'aide à la rédaction d'un mode opératoire : <https://maiage.fr/wp-content/uploads/2022/10/FNSAPreconisation-techniques-Reseaux-EU-EP-Amiante-ciment-VF-2021-1.pdf>

## Remerciements

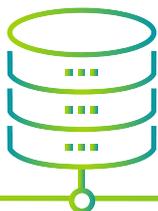
Les auteurs tiennent à remercier Daniel Leroy et Laurent Lecoindre (Carsat Normandie) ainsi que Laurent Poulain (Cramif), pour leur contribution aux discussions et aux travaux présentés dans cet article, ainsi que la FNSA/Maiage et ses adhérents pour la mise en œuvre des chantiers tests.

## BIBLIOGRAPHIE

[1] INRS – Interventions d'entretien et de maintenance susceptibles d'émettre des fibres d'amiante. Guide de prévention. ED 6262, 2016. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206262>

[2] INRS – Exposition à l'amiante lors du traitement des déchets. Guide de prévention. ED 6028, 2019. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206028>

[3] SAUVÉ J.F., MATER G., ROMERO-HARIOT A. ET AL. – Exposition à l'amiante dans la filière de la collecte et du traitement des eaux usées : état des lieux. Hygiène & sécurité du travail, 2024, 275, pp. 72-76. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/publications/hst/notes-techniques.html>



## 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 À L'OZONE EN FRANCE DE 2002 À 2022

L'ozone, gaz incolore instable et très oxydant, est utilisé dans de nombreuses applications industrielles. L'exposition professionnelle à l'ozone peut être source de lésions irritantes, dont l'aggravation peut conduire à des formes d'asthme, à des infections respiratoires, à une diminution de la fonction pulmonaire, voire à un risque accru de maladies cardiovasculaires. La surveillance des concentrations en ozone dans l'air des lieux de travail s'avère donc essentielle pour préserver la santé des opérateurs. Cet article fait le point sur les données d'exposition disponibles, notamment celles contenues dans la base de données Colchic, et sur les moyens d'évaluer plus finement les expositions en vue de mieux prévenir les risques.

ANDREA  
EMILI,  
SARAH  
BURZONI  
INRS,  
département  
Métrologie  
des polluants

### Définition, propriétés et effets sur la santé

L'ozone (O<sub>3</sub>; n°CAS 10028-15-6) est un gaz incolore, présent naturellement dans l'atmosphère terrestre, à l'odeur piquante et irritante. Il est produit à partir de l'oxygène en présence de radiations ultraviolettes, d'énergie ou de décharges électriques, par exemple en haute altitude ou par l'action de la foudre. C'est un allotrope de l'oxygène à qui la structure moléculaire triatomique confère des propriétés chimiques et physiques particulières.

Puissant oxydant et comburant, l'ozone peut réagir avec les huiles pour former des ozonides, sources potentielles d'explosion. De faibles concentrations

peuvent présenter un effet sur les textiles, les tissus, les colorants organiques, les métaux, les plastiques et les peintures, et provoquent un craquelage caractéristique du caoutchouc. Quelques matériaux, comme le verre et certains types d'acier inoxydable, résistent cependant à ses effets oxydants. Substance instable, dont le taux de décomposition varie en fonction de la température et de l'humidité, l'ozone ne peut pas être stocké ou transporté dans des récipients, car il se décompose spontanément en présence d'impuretés oxydables, d'humidité et au contact de surfaces solides. Il est toujours généré *in situ*, pour une utilisation immédiate.

*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.*

L'exposition à l'ozone provoque des altérations des muqueuses respiratoires (bronchopathies, emphysème, fibrose), ainsi que des muqueuses oculaires [1]. Les effets sont l'irritation des yeux, du nez et de la gorge, la toux et les difficultés respiratoires, l'aggravation des symptômes de l'asthme et d'autres maladies pulmonaires, la diminution de la fonction pulmonaire, un risque accru de maladies cardiovasculaires et d'infections respiratoires. Quelques effets rénaux ou neurologiques rares ont été rapportés. Il n'y a pas de données suffisantes permettant de conclure à un risque cancérogène ou à des effets sur la reproduction.

Actuellement, l'ozone ne fait pas l'objet d'une classification européenne selon le règlement CE 1272/2008 (CLP). Toutefois, les données de classification et d'étiquetage de l'ozone ont été soumises à l'ECHA dans le cadre d'une inscription en vertu du Règlement Reach<sup>1</sup>. Selon la classification fournie par les entreprises à l'Echa, cette substance est « mortelle par inhalation, provoque de graves brûlures cutanées et des lésions oculaires, entraîne des dommages aux organes par exposition

prolongée ou répétée, avec des effets à long terme, peut provoquer ou intensifier un incendie (oxydant) ».

### L'ozone sur les lieux de travail

Selon l'enquête Sumer 2017 [2], 47 400 salariés en France (soit 0,2 % de l'ensemble des salariés) seraient exposés à l'ozone, dont 20 % pour une durée supérieure à 10 heures pendant la semaine ; 23 % des salariés concernés révèlent une absence de protection collective et 17 % aucune protection individuelle mise à disposition. Les résultats de l'enquête indiquent aussi que l'activité économique employant la plus grande proportion de salariés exposés est le « Travail du bois, industries du papier et imprimerie » (7,1 % des salariés exposés). L'ozone est produit en transformant l'oxygène présent dans l'air ambiant par irradiation UV ou à l'aide d'une décharge électrique haute tension. De par ses propriétés oxydantes, bactéricides, virucides et fongicides, l'ozone est notamment utilisé pour la désinfection des environnements et des surfaces dans divers domaines comme l'agro-alimentaire, l'industrie et le traitement des eaux.

Opération de soudage à l'aide d'une torche MIG.



Parmi les applications industrielles de l’ozone, sont relevées :

- le traitement de l’air dans les bureaux et la désodorisation des chambres d’hôtel, des cuisines commerciales et cafétérias, des usines de transformation alimentaire et de poisson, des usines de mélange de caoutchouc, des usines chimiques, des stations d’épuration et des chambres froides ;
- la désinfection de l’eau potable et son traitement pour régler des problèmes de goût, d’odeur et de couleur ;
- la désinfection des piscines et des systèmes d’eau chaude et froide ;
- l’élimination des pesticides présents dans l’eau ;
- la stérilisation des aliments ;
- la stérilisation de matériel chirurgical ;
- le prétraitement dans les applications de revêtement – y compris les encres, la finition du bois, la décoration métallique et la finition industrielle générale ;
- le traitement de surface des matières plastiques notamment avant impression (sacs imprimés en polyéthylène) ;
- le blanchiment dans les industries textile, alimentaire et papetière ;
- l’initiation de réaction dans l’industrie chimique.

Salle d’ozonisation dans un laboratoire de biologie médicale.



© Fabrice Dimier pour l'INRS/2018

Suite à la pandémie de Covid-19, l’ozone a été déployé pour la décontamination de l’air, des surfaces, des matériaux et des environnements intérieurs [3]. Dans ce contexte, les techniques d’ozonation aqueuse ont été déployées de préférence à l’ozonation gazeuse qui a été plutôt utilisée pour la désinfection des équipements de protection individuelle (EPI) et des dispositifs médicaux. En septembre 2023, l’INRS a mis en garde contre l’utilisation de l’eau ozonée dans le nettoyage et la désinfection [4], cette pratique pouvant être dangereuse pour la santé des travailleurs exposés.

Une étude conduite par l’INRS sur trois épurateurs d’air intérieur faisant appel à des technologies différentes [5] visait à évaluer l’efficacité de ces appareils vis-à-vis des aérosols inertes sur le plan biologique et leur émission de polluants gazeux dans l’air. Les tests réalisés en laboratoire ont permis de mettre en évidence une émission d’ozone importante dans le cas d’un dispositif associant média filtrant, photocatalyse, plasma froid et lampe UV-C.

L’ozone est également généré comme sous-produit accidentel de nombreuses activités professionnelles, particulièrement en lien avec l’utilisation de radiations UV et d’équipements électriques haute tension. Il est également produit, à plus faible concentration, par les photocopieuses, les imprimantes laser et les machines à rayons X.

Lors des opérations de soudage [6-7] à l’arc électrique (techniques *Tungsten Inert Gas* (TIG) et *Metal Inert Gas/Metal Active Gas* (MIG/MAG) spécifiquement), les radiations UV de l’arc produisent des quantités significatives d’ozone; les risques d’exposition à ce gaz sont particulièrement importants lors du soudage de l’aluminium et de l’acier inoxydable. L’ozone est également produit à proximité de plusieurs types de lampes qui émettent des radiations UV. De telles lampes sont utilisées par exemple pour fixer certains encres ou vernis qui polymérisent sous radiation UV.

L’ozone est également produit autour des précipitateurs électrostatiques utilisés pour éliminer la poussière et certains contaminants aériens de l’air. Ce gaz peut aussi être produit par les dispositifs utilisés dans l’industrie pour éliminer l’électricité statique des articles en plastique fraîchement moulés ; dans ce cas, le principal facteur qui détermine la quantité d’ozone générée est la tension aux bornes des plaques collectrices : plus la tension est élevée, plus l’ozone est produit.

### Méthodes d’évaluation de l’exposition professionnelle à l’ozone

La présence d’ozone sur les lieux de travail rend nécessaire sa surveillance, afin de s’assurer que les concentrations n’atteignent pas des niveaux dangereux pour la santé. Toutefois, la mesure de l’ozone

reste compliquée, avec des difficultés qui vont au-delà de la détermination de faibles concentrations et de la présence d'interférents [8]. La mesure de l'ozone est incompatible avec de nombreux matériaux, en raison de sa réactivité ; le Teflon et le verre sont les matériaux les plus indiqués. Des pertes d'ozone, liées à sa grande réactivité, peuvent aussi se produire lorsque le gaz passe dans des conduits ou tuyaux faits de différentes substances plastiques et métalliques (y compris l'acier inoxydable, l'aluminium, le polyéthylène et les tuyaux en polyvinyle). Les capteurs de mesure d'ozone peuvent être à lecture directe (mesure en continu) ou indirecte et se distinguent par des coûts et des dimensions qui sont sensiblement plus avantageux pour les méthodes indirectes. Différentes techniques analytiques sont utilisées pour la mesure directe de l'ozone : la spectroscopie d'absorption UV, l'absorption dans l'infrarouge moyen (MIR) et la spectroscopie photoacoustique sont les plus répandues. Les méthodes indirectes peuvent utiliser des capteurs à base de semi-conducteurs métalliques, des capteurs ampérométriques, des matériaux poreux ou des capteurs passifs classiques comme des tubes ou des badges qui utilisent des réactifs de piégeage tels que les nitrites, l'indigo, le DPE (1,2-di[4-pyridyl]-éthylène) et le DBA (10,10-diméthyl-9,9-biacridylidène). Pour les méthodes indirectes, la lecture du signal produit par l'interaction du gaz avec la surface active se fait par fluorescence, spectrophotométrie, ampérométrie, voltampérométrie, mesure de la conductivité ou analyse d'images numériques.

Les instruments à lecture directe basés sur l'absorption UV ou MIR présentent une sensibilité, une sélectivité et une fiabilité élevées et ils sont utilisés comme analyseurs de référence certifiés, installés dans les unités de qualité de l'air pour surveiller en temps réel les niveaux d'ozone dans l'environnement. Cependant, la taille, le coût, la consommation d'énergie et les besoins réguliers en étalonnage réduisent leur utilisation lorsque la portabilité de l'équipement est requise.

Les méthodologies colorimétriques indirectes sont peu coûteuses et simples à utiliser, mais elles nécessitent l'analyse d'échantillons dans des laboratoires chimiques. Par ailleurs, elles sont inadaptées au suivi des expositions individuelles. De plus, les résultats obtenus sont des concentrations moyennes sur une période de temps prolongée qui ne permettent pas la détection de pics d'exposition. Par conséquent, ces méthodes ne peuvent pas être utilisées pour alerter en temps réel en cas d'exposition élevée.

Des capteurs à faible coût à base d'oxydes métalliques sont également de plus en plus utilisés pour la surveillance de l'ozone, avec une limite de détection de l'ordre du ppb (partie par milliard). Toutefois,

ces capteurs souffrent encore d'un manque de validation pour un fonctionnement à différents niveaux d'humidité. Enfin, les détecteurs à base de matériaux poreux offrent une opportunité intéressante en raison de leur spécificité élevée dans le piégeage des molécules gazeuses, même si leur application pour la détection de l'ozone n'a pas encore été pleinement explorée.

Auparavant, l'INRS proposait une méthode permettant de doser l'ozone dans l'air (méthode MetroPol 060). Elle a été abandonnée, et l'INRS a travaillé au développement d'un nouveau capteur pour la mesure en temps réel des expositions professionnelles individuelles à l'ozone, permettant d'obtenir un signal stable, ainsi qu'une sensibilité et une sélectivité élevées<sup>2</sup> [9].

### Valeurs limites d'exposition professionnelle

En France, des valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) indicatives de 0,2 mg/m<sup>3</sup> sur 8 heures (VLEP-8h) et de 0,4 mg/m<sup>3</sup> sur 15 minutes (VLEP-CT) ont été établies pour l'ozone depuis 1982. Une valeur 8 heures de 0,1 mg/m<sup>3</sup> est en vigueur dans plusieurs pays européens (Gestis : base de données des valeurs limites internationales)<sup>3</sup>. Une valeur court terme de 0,2 mg/m<sup>3</sup> est aussi en vigueur dans plusieurs pays européens ; cependant, il s'agit souvent d'une valeur plafond à ne pas dépasser plutôt que d'une valeur moyenne sur 15 minutes.

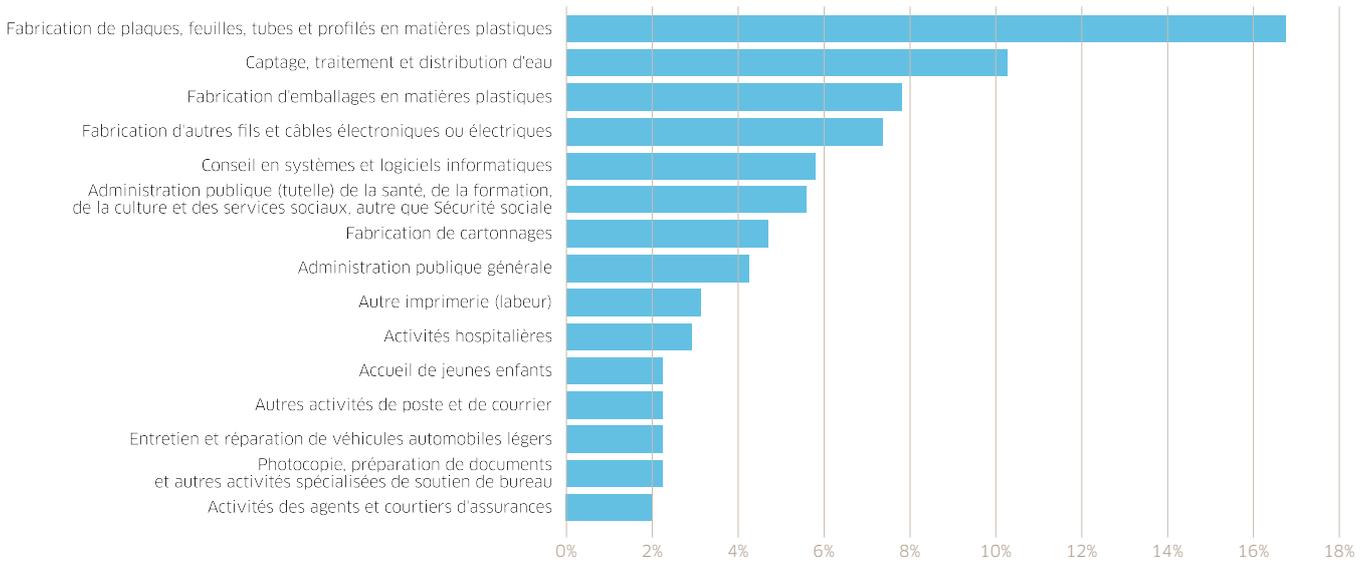
### Niveaux d'exposition professionnelle à l'ozone

Bien que de nombreuses études se soient intéressées à l'ozone et à ses effets sur la santé humaine [10], l'exposition professionnelle à ce gaz a été investiguée dans un nombre limité de situations de travail, et plus particulièrement dans les bureaux à cause de la présence de photocopieuses et d'imprimantes laser [11], pendant les opérations de soudage à l'arc électrique [12] et en lien avec l'utilisation de ce gaz pour la désinfection de l'eau potable [13] et des piscines.

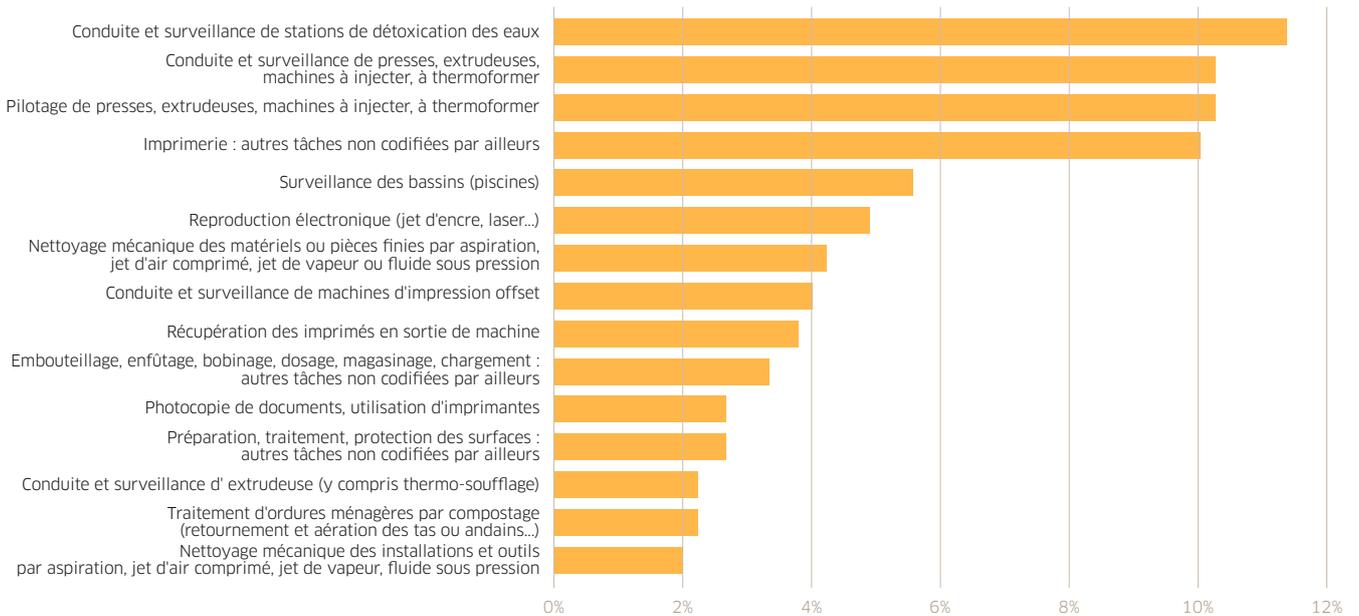
La plupart des photocopieuses et imprimantes laser modernes utilisent des technologies à très faible émission ou sont équipées de filtres qui limitent la quantité d'ozone rejetée dans l'atmosphère ; elles sont généralement placées dans des locaux dédiés, séparés des bureaux pour limiter l'exposition.

À titre d'exemple, une étude conduite en 2018 dans cinq bâtiments universitaires en Malaisie a montré que la concentration d'ozone dans l'air des bureaux pendant les heures de travail (de 8 h à 17 h) pouvait atteindre au maximum 0,06 mg/m<sup>3</sup> avec une moyenne de 0,02 ± 0,01 mg/m<sup>3</sup> sur 9 heures [14], soit des valeurs largement inférieures aux valeurs limites. Tous les bâtiments étaient ventilés mécaniquement avec une climatisation centralisée et temporisée (de 7h30 à 17h30) ; l'ouverture des fenêtres n'était pas autorisée.





↑ FIGURE 1 Distribution des mesures d'ozone par secteur d'activité, en pourcentage (≥ 2 %).



↑ FIGURE 2 Distribution des mesures d'ozone par tâche, en pourcentage (≥ 2 %).

Dans une étude [15] conduite sur des soudeurs TIG et MIG au Canada, les concentrations atmosphériques d'ozone mesurées à la source par le biais d'un analyseur portable variaient de 0,8 mg/m<sup>3</sup> à 1,2 mg/m<sup>3</sup> près de la pièce soudée, mais n'étaient pas détectables dans la zone respiratoire des soudeurs. Une étude plus récente, conduite sur 43 soudeurs de l'acier en Iran [16], a mis en évidence que, pendant les opérations de soudage TIG et MIG, les soudeurs étaient exposés à des concentrations d'ozone de 0,41 ± 0,24 mg/m<sup>3</sup> (nombre de mesures = 20) et 0,73 ± 0,43 mg/m<sup>3</sup> (nombre de mesures = 23), respectivement, pour des prélèvements individuels

d'une durée de 3 heures, collectés sur des filtres en fibre de verre imprégnés de nitrite (IGFF) et analysés en HPLC-UV (chromatographie liquide haute performance – ultraviolet).

La désinfection de l'eau potable et des eaux usées nécessite des concentrations d'ozone comprises entre 1 mg/L et 10 mg/L, avec des doses plus élevées pour les rejets industriels [17]. Pour les piscines, la concentration d'ozone requise est généralement comprise entre 0,8 mg/L et 1,2 mg/L. Pendant les opérations de traitement, l'intervention humaine peut être très variable et entraîner des expositions des opérateurs à l'ozone.

**DURÉE DE PRÉLÈVEMENT : ≤ 15 min**

OBJECTIF DE LA MESURE	NB DE MESURES	% < LQ	MIN	25 <sup>E</sup> CENTILE	MÉDIANE	75 <sup>E</sup> CENTILE	95 <sup>E</sup> CENTILE	MAX	MOYENNE	ÉCART TYPE	VLEP-CT	UNITÉ DE MESURE
individuel	2	100%	-	-	-	-	-	-	-	-	0,4	mg/m <sup>3</sup>
ambiance	12	83%	0,02	0,22	0,35	0,42	0,55	0,63	0,32	0,17		

**DURÉE DE PRÉLÈVEMENT : > 15 min mais < 8h**

OBJECTIF DE LA MESURE	NB DE MESURES	% < LQ	MIN	25 <sup>E</sup> CENTILE	MÉDIANE	75 <sup>E</sup> CENTILE	95 <sup>E</sup> CENTILE	MAX	MOYENNE	ÉCART TYPE	VLEP8h	UNITÉ DE MESURE
individuel	7	71%	0,01	-	-	-	-	0,06	-	-	0,2	mg/m <sup>3</sup>
ambiance	36	11%	0,001	0,09	0,19	0,31	0,63	0,82	0,23	0,20		

↑ **TABLEAU 1** Indicateurs statistiques pour les 57 mesures d'ozone, stratifiées par la durée de prélèvement et l'objectif de la mesure. Les mesures d'une durée de prélèvement inférieure ou égale à 15 minutes ont été réalisées pour une comparaison avec la VLEP-CT ; les mesures d'une durée de prélèvement supérieure à 15 minutes mais inférieure à 8 heures ont été réalisées pour caractériser l'exposition pendant la durée de la tâche.

Cependant, un manque de données de littérature ne permet pas une caractérisation précise de cette exposition.

**Données de la base Colchic**

La base Colchic a été interrogée sur la période 2002-2022 afin d'obtenir des informations sur les niveaux d'exposition atmosphérique à l'ozone mesurés en France, ainsi que les secteurs d'activité et les tâches associées. Sur cette période, la base contient 448 mesures dont 430 mesures d'ambiance et 18 mesures individuelles. La distribution de ces mesures est détaillée par secteur d'activité sur la *Figure 1* et par tâche sur la *Figure 2*.

Les secteurs de la « Fabrication de plaques, feuilles, tubes et profilés en matières plastiques » (NAF 2221Z) et le « Captage, traitement et distribution d'eau » (NAF 3600Z) représentent les deux principaux secteurs dans lesquels des mesures de concentrations d'ozone ont été réalisées (Cf. *Figure 1*). De même, la « Conduite et surveillance de stations de détoxification des eaux » est la tâche la plus investiguée, suivie par des tâches liées au thermoformage des plastiques et à l'imprimerie (Cf. *Figure 2*).

Après application des critères métrologiques (représentativité de la mesure, durée de prélèvement, méthodes de prélèvement et d'analyse), l'éventail de données se réduit à 57 mesures, ainsi réparties : 48 mesures d'ambiance et 9 mesures individuelles. Les mesures individuelles d'ozone, réalisées pour comparaison avec la VLEP-CT ou pour caractériser la tâche (Cf. *Tableau 1*), sont inférieures aux VLEP de 0,4 mg/m<sup>3</sup> sur 15 minutes (VLEP-CT) et de 0,2 mg/m<sup>3</sup> sur 8 heures (VLEP-8h). Les mesures d'ambiance, qui ne sont pourtant pas adaptées à une comparaison avec les VLEP, permettent néanmoins une mise en perspective. Ainsi, au moins 25 % des prélèvements d'ambiance réalisés sur une durée inférieure ou égale à 15 minutes sont supérieurs

à la VLEP-CT. Pour des prélèvements d'une durée supérieure à 15 minutes mais inférieure à 8 heures, la proportion de mesures supérieures à la VLEP-8h s'élève à environ 50 %.

La « Conduite et surveillance de stations de détoxification des eaux » dans le secteur du « Captage, traitement et distribution d'eau » représente 68 % des mesures, suivie par le « Traitement d'ordures ménagères par compostage (retournement et aération des tas ou andains...) » dans l'administration publique générale (9 % des mesures) et l'impression offset dans le secteur « Autre imprimerie (labeur) » (NAF 1812Z) qui compte 7 % des mesures. Les mesures d'ambiance réalisées pour caractériser la présence d'ozone dans l'atmosphère des lieux de travail, en lien avec la détoxification des eaux, varient entre 0,04 mg/m<sup>3</sup> et 0,82 mg/m<sup>3</sup> avec une médiane de 0,29 mg/m<sup>3</sup> et une moyenne arithmétique de 0,29 ± 0,18 mg/m<sup>3</sup> ; 36 % de ces mesures sont supérieures à 0,2 mg/m<sup>3</sup> (valeur de la VLEP-8h).

**Limites, conclusions et recommandations**

Cette analyse a mis en évidence un manque de données concernant l'exposition professionnelle à l'ozone dans la base Colchic, ainsi que dans la littérature scientifique, notamment en ce qui concerne les mesures individuelles. Cette lacune est en partie attribuable à l'absence de méthodes de prélèvement individuel de référence, compte tenu de la forte réactivité de l'ozone à la fois sur les supports adsorbants mais également avec d'autres polluants de l'air. Par ailleurs, la quantification de l'ozone reste problématique en raison de divers facteurs, notamment la présence d'espèces potentiellement interférentes et la réactivité de ce gaz avec les matériaux, ce qui peut compromettre la compatibilité des équipements.

En l'absence de méthodes de prélèvement et d'analyse qui respectent toutes les conditions de sélectivité et de précision nécessaires et dont



les performances correspondent aux exigences générales de mesure des agents chimiques, des solutions plus ou moins satisfaisantes sont actuellement proposées, notamment l'utilisation d'analyseurs d'ozone à lecture directe, basés sur l'absorption de la lumière UV, et l'utilisation de capteurs électrochimiques, à semi-conducteurs ou optiques. Le développement de nouveaux dispositifs de mesurage, comme celui proposé par l'INRS [9], devrait permettre de surmonter ces problèmes et de garantir une caractérisation plus précise des

niveaux d'exposition professionnelle à l'ozone. Le capteur développé par l'INRS utilise la spectroscopie visible pour la détermination des concentrations d'ozone. Le matériau sensible développé est un film de silice mésoporeuse déposé sur un verre transparent et imprégné de bleu de méthylène. Ce capteur donne une bonne reproductibilité des mesures, il est stable pendant au moins 50 jours et sensible à 10 ppb d'ozone (0,02 mg/m<sup>3</sup>) avec une plage de mesure testée jusqu'à 500 ppb (1 mg/m<sup>3</sup>) ; il est insensible au dioxyde d'azote et à une grande variation d'humidité relative.

Lors de l'évaluation de l'exposition, il est important de prendre en compte l'exposition simultanée à plusieurs substances chimiques. L'outil Mixie France de l'INRS aide à évaluer les effets sur la santé des polyexpositions chimiques. Les classes toxicologiques associées à l'ozone sont les atteintes des voies respiratoires supérieures et inférieures et les atteintes oculaires<sup>4</sup>. Selon l'outil n° 110 de l'INRS<sup>5</sup>, les substances les plus mesurées dans la base Colchic ayant une ou plusieurs classes d'effets toxiques communes avec l'ozone sont le nickel, la butanone, l'acétone, le cuivre, la silice cristalline, le manganèse et ses composés, les poussières alvéolaires (locaux à pollution spécifique), les poussières totales (locaux à pollution spécifique), le styrène et les poussières de bois. Une attention particulière doit donc être portée à la présence potentielle de ces substances lors d'une exposition à l'ozone.

Bien que l'analyse qualitative des données de la base Colchic, réalisée avant application des critères métrologiques, mette en évidence la présence potentielle de ce gaz dans plusieurs secteurs d'activité en France, le manque de données limite la caractérisation de l'exposition individuelle à l'ozone. De même, les mesures d'ambiance permettent d'esquisser la présence du gaz dans un nombre limité d'atmosphères de travail et notamment dans la « Conduite et surveillance de stations de détoxification des eaux ».

Pour protéger la santé des travailleurs, il est essentiel de mettre en œuvre des mesures de prévention efficaces. Pour l'ozone, cela peut inclure la mise en place de systèmes de ventilation adéquats pour éliminer le gaz des zones de travail, ainsi que la formation des travailleurs sur les risques associés à l'exposition à l'ozone et sur les mesures de sécurité à prendre. ●

1. Voir : <https://echa.europa.eu/fr/substance-information/-/substanceinfo/100.030.051>

2. Ce dispositif est actuellement en cours de transfert technologique par l'INRS. Voir : <https://www.inrs.fr/publications/hst/participez-a-la-recherche.html>

3. Voir : <https://ilv.ifa.dguv.de/substances>

4. Voir : [https://www.inrs.fr/publications/outils/mixie/substance.html?refINRS=MIXIE\\_Substance\\_115](https://www.inrs.fr/publications/outils/mixie/substance.html?refINRS=MIXIE_Substance_115)

5. Voir : <https://outil-expo-rch-rb.inrs.fr>

## BIBLIOGRAPHIE

[1] INRS – Fiche Toxicologique n° FT 43, 2020. Accessible sur : [https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX\\_43](https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_43)

[2] DARES – Les expositions aux risques professionnels : les produits chimiques. Résultats de l'enquête Sumer 2017. *Synthèse-Stat'* n° 32, juillet 2020.

[3] GRIGNANI E. ET AL. – Safe and effective use of ozone as air and surface disinfectant in the conjuncture of Covid-19. *Gases*, 2021, 1 (1), pp. 19-32.

[4] INRS – Opérations de nettoyage et de désinfection : l'INRS met en garde contre les procédés utilisant l'eau ozonée. Communiqué de presse, 14 septembre 2023. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/header/presse/cp-operations-nettoyage-desinfection.html>

[5] BEMER D., GÉRARDIN F. – Évaluation des performances de filtration d'aérosols de trois technologies d'épurateurs d'air intérieur. *Hygiène & sécurité du travail*, 2022, 269, Note technique NT 103. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=NT%20103>

[6] INRS – Soudage de métaux. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/metiers/soudage-metal.html>

[7] ANSES – Travaux exposant aux fumées de soudage à inscrire à la liste des substances, mélanges et procédés cancérigènes. Avis de l'Anses, Rapport d'expertise collective, février 2022. Accessible sur : <https://www.anses.fr/fr/system/files/VSR2017SA0237Ra-2.pdf>

[8] DA SILVEIRA PETRUCI J.F. ET AL. – Analytical methods applied for ozone gas detection: a review. *Trends in analytical chemistry*, 2022, 149, p. 116552.

[9] GHAZALY C. ET AL. – Real-time ozone sensor based on selective oxidation of methylene blue in mesoporous silica films. *Sensors*, 2019, 19 (16), p. 3508.

[10] LIPPMANN M. – Health effects of ozone a critical review. *JAPCA*, 1989, 39 (5), pp. 672-695.

[11] TUOMI T. ET AL. – Emission of ozone and organic volatiles from a selection of laser printers and photocopiers. *Applied occupational and environmental hygiene*, 2000, 15 (8), pp. 629-634.

[12] VAN DER WAL J. – Exposure of welders to fumes and gases in Dutch industries: summary of results. *The Annals of occupational hygiene*, 1990, 34 (1), pp. 45-54.

[13] RICE R.G. ET AL. – Uses of ozone in drinking water treatment. *Journal of the American water works association*, 1981, 73 (1), pp. 44-57.

[14] OTHMAN M. ET AL. – PM2.5 and ozone in office environments and their potential impact on human health. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2020, 194, p. 110432.

[15] KORCZYNSKI R. – Occupational health concerns in the welding industry. *Applied occupational and environmental hygiene*, 2000, 15 (12), pp. 936-945.

[16] AZARI M.R. ET AL. – Monitoring of occupational exposure of mild steel welders to ozone and nitrogen oxides. *TANAFOS*, 2011, 10 (4), p. 54.

[17] EPELLE E.I. ET AL. – Ozone application in different industries: a review of recent developments. *Chemical engineering journal*, 2023, 454, pp. 140188.

# 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 septembre 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](mailto:pascal.lamy@inrs.fr)



# Agenda & services

## Congrès

Du conteneur au commerce :  
quel risque chimique pour les salariés ?

P.91

## Formation

Devenir formateur certifié  
en échafaudages fixes (R 408)  
et/ou roulants (R 457)

P.96

Agenda / Formations

P.100

## Sélection bibliographique

À lire, à voir

P.102

## Congrès

# DU CONTENEUR AU COMMERCE : QUEL RISQUE CHIMIQUE POUR LES SALARIÉS ?

Compte rendu de la journée technique organisée (à distance) par l'INRS le 14 novembre 2023.

L'INRS a organisé le 14 novembre dernier une journée technique intitulée : « Du conteneur au commerce : quel risque chimique pour les salariés ? », avec l'objectif de sensibiliser les différents acteurs de cette filière mais aussi les services de prévention sur un risque assez peu identifié dans ce secteur. Cette manifestation, qui s'est déroulée exclusivement à distance, a réuni plus de 460 participants. À travers une quinzaine d'exposés, les échanges ont permis d'aborder divers aspects de l'exposition chimique, allant des émissions en composés organiques volatils (COV) des biens de consommation courante jusqu'au déballage de marchandises et à son impact sur l'exposition des salariés dans les commerces de détail, en passant par la problématique des conteneurs maritimes et de la qualité de l'air dans les entrepôts de logistique.

---

LAURENCE  
ROBERT\*  
INRS,  
département  
Ingénierie  
des Procédés

---

\*Sur la base des  
contributions  
des

intervenants :  
V. Govaere,  
B. Savary  
(INRS),  
F. Saltron  
(Service  
commun des  
laboratoires),  
C. Dubois  
(Anses),  
J. Klingler  
(INRS),  
A. Cherifi  
(EWS), F. Cartel  
(Douanes),  
L. Fina (Carsat  
Sud-Est),  
L. Elie  
(APST 41),  
F.-X. Keller  
(INRS),  
C. Bougie  
(Dreets 77),  
V. Jusseaume  
(Prévy), C. Kutek  
(EnSanté),  
R. Guichard et  
J. Triolet (INRS).

---

## FROM THE CONTAINER TO THE RETAIL STORE: WHAT CHEMICAL RISKS ARE EMPLOYEES EXPOSED TO? – Report on the seminar organised on line by INRS –

*On 14 November 2023, INRS held a seminar to raise the awareness of not only the different stakeholders in this sector but also prevention services about a risk that is poorly identified in the sector. This event, which took place exclusively on line, brought together 460 participants. The discussions centred on the roughly 15 presentations addressed several aspects of chemical exposure including volatile organic compound emissions from everyday consumer products, the unboxing of merchandise and its impact on employee exposure in retail stores and the matter of shipping containers and air quality in logistics warehouses.*

### Contexte de la journée

Les produits manufacturés neufs stockés peuvent avoir de forts pouvoirs émissifs en composés organiques volatils (COV) à la fois de par leur fabrication récente ou parce qu'ils ont dû être fumigés avant un transport par bateau. Or, tout au long de leur chaîne de distribution, du conteneur aux commerces en passant par les plateformes logistiques ou leur transport, de nombreux salariés sont à leur contact : travailleurs portuaires, transporteurs, commerçants, douaniers ou inspecteurs des fraudes, agents « logistique », etc. Cependant, entre le début de la chaîne logistique, c'est-à-dire l'ouverture du conteneur, et sa fin, soit la mise en rayon dans les commerces de détail, les problématiques d'exposi-

tion sont très variées tant en termes de nature des agents chimiques rencontrés que de concentrations. En outre, les tâches réalisées par les salariés en fonction de leurs métiers et activités, comme le dépotage, l'ouverture des cartons ou la préparation de commande, n'auront pas du tout le même impact sur leur exposition. **Virginie Govaere (INRS)** a précisé que seules 0,5 % des maladies professionnelles déclarées dans ce secteur étaient en lien avec l'exposition chimique et que par conséquent, ce risque restait encore très peu identifié. L'objet de cette journée technique de l'INRS était de sensibiliser les acteurs de cette filière aux risques liés à l'exposition chimique des salariés de la logistique et de la distribution, à des fins de prévention.



La filière logistique, de quoi s'agit-il ? D'un ensemble de métiers qui assurent à la fois la gestion des flux de marchandises, leur stockage, leur emballage mais aussi leur transport jusqu'aux commerces de détail. Avec plus de 1,8 millions de salariés en France, soit 10 % de la population de travailleurs, et 150 métiers différents, comme le détaille Virginie Govaere, les situations d'exposition sont diverses et parfois spécifiques. Aussi, le choix qui a guidé l'élaboration du programme a été de suivre les produits de consommation tout au long de leur acheminement, depuis leur arrivée par porte-conteneur jusqu'à leur point de consommation. Des focus sur des secteurs particuliers de la logistique, des exemples d'expositions professionnelles ou encore des moyens de prévention ont été présentés tout au long de cette journée d'échanges.

Avant l'ouverture d'un conteneur, mesure, à l'aide d'un détecteur, de l'éventuelle présence de gaz toxiques.



© Vincent Nguyen pour l'INRS/2024

Avant de s'intéresser aux différents composés chimiques émis par les biens de consommation courante et de se focaliser sur certains secteurs ou métiers, **Barbara Savary (INRS)** a présenté un point des connaissances sur l'exposition chimique, grâce à l'exploitation de bases de données. En effet, dans le cas du risque chimique, l'INRS administre deux bases : Colchic (qui regroupe les mesures collectées par les laboratoires interrégionaux de chimie des Carsat et de la Cramif et ceux de l'INRS) et Scola (qui collecte les mesures réalisées lors de contrôles réglementaires par des laboratoires accrédités). Ces bases représentent d'importantes sources d'informations relatives à la caractérisation de l'exposition en milieu de travail. Barbara Savary a indiqué qu'entre 2012 et 2022, tous secteurs confondus (transport, stockage et commerce), ces bases de données regroupaient plus de 27 000 mesures associées aux risques chimiques, dont presque 80 % concernaient les COV, particulièrement les benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes (BTEX) et le formaldéhyde. Si les concentrations mesurées pour ces composés restent en dessous de leur valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP), il n'en est pas de même pour les poussières inhalables ou alvéolaires. Celles-ci peuvent être présentes à des valeurs supérieures aux concentrations moyennes à ne pas dépasser, exprimant une exposition spécifique dans ces secteurs logistiques. Parmi les COV mesurés, plus de 118 substances ont été identifiées. De ce fait, l'importance de la polyexposition dans ce secteur a été soulignée. L'outil Mixie France peut permettre, à partir de données de mesure, d'évaluer le potentiel additif des substances chimiques et de situer les niveaux d'exposition cumulés par rapport aux VLEP.

### Émissions des produits de consommation

La plupart des produits de consommation renferment des composés chimiques entrant dans leur fabrication, soit à travers les matières premières utilisées et leur préparation, soit par l'ajout d'additifs, soit encore par exemple par l'utilisation de produits de conservation. Ces composés chimiques vont avoir la possibilité, sous certaines conditions de température, d'humidité, de contact avec l'air, de migrer et d'être libérés dans l'air respiré par les salariés. Dans cette seconde session centrée sur les émissions de produits, deux organismes ont présenté leurs travaux permettant de mieux comprendre la relation implicite entre les composés chimiques renfermés dans un produit et leur « passage » dans l'air respiré ou sur la peau par contact direct. **Frédéric Saltron (Service commun des laboratoires)**, mandaté principalement par la DGCCRF<sup>1</sup> et la DGDDI<sup>2</sup>, a présenté la stratégie de contrôle réglementaire des produits non alimentaires, en insistant sur le risque chimique. De nombreuses molécules réglementées au sens du règlement Reach<sup>3</sup>, associées à un type de bien de consommation spécifique, sont recherchées et

contrôlées par le service commun des laboratoires. On peut citer entre autres le chrome VI dans les cuirs, les colorants azoïques dans les textiles, les phtalates dans les emballages, ou encore le bisphénol A dans les jouets. Dans la même optique, **Céline Dubois (Anses<sup>4</sup>)** a évoqué des travaux menés par un comité d'experts, mettant en exergue la présence de nombreuses substances irritantes et sensibilisantes dans les textiles et éléments chaussants. Ces composés chimiques ne vont être libérés dans l'air que sous certaines conditions et en certaines quantités ; on parle de taux d'émission qui correspond à la quantité d'un composé chimique émise par unité de surface d'objet et par unité de temps. **Jennifer Klingler et Laurence Robert (INRS)** ont présenté un exposé sur les taux d'émission de certains composés cibles émis par des chaussures. Dans un panel de neuf paires de chaussures, elles ont mis en évidence la diversité des composés émis, tant en termes de nature que de taux d'émission. Dans ce panel, le diméthylformamide, composé reprotoxique, est très fortement émis par les chaussures en cuir synthétique, contrairement à d'autres types de chaussures, de sport par exemple. Mais un taux d'émission ne présage pas un risque. En effet, le taux d'émission représente la contribution d'une source à la concentration dans l'air d'un ou plusieurs composés chimiques. L'équilibre qui s'établit entre l'objet et l'air qui l'entoure dépend de nombreux facteurs tels que la température, le renouvellement de l'air, la concentration initiale de produit dans l'objet, le *ratio* entre la surface de l'objet et le volume du local, etc. Si, à l'échelle de l'objet, il est nécessaire de caractériser un taux d'émission pour quantifier son impact sur les émissions de composés chimiques (COV ou autres), à l'échelle d'un local de travail, il sera utile, pour protéger les salariés, de caractériser la concentration dans l'air d'un composé cible. Il s'agit de la quantité de ce composé par rapport au volume d'air, qui pourra être comparée aux VLEP ou aux VGAI (valeurs guides de qualité d'air intérieur).

Qu'en est-il de l'exposition dans cette filière ? Comme cela a été évoqué, les problématiques d'exposition entre le secteur de la logistique et celui de la distribution sont différentes et présentent des caractéristiques propres, traitées dans deux sessions distinctes de cette journée technique.

### Exposition chimique et secteur logistique

Même si l'INRS s'est emparé de la problématique de l'exposition à l'ouverture des conteneurs maritimes dès 2011<sup>5</sup>, et que de nombreux travaux ont été menés sur ce sujet, **Aziz Cherifi (groupe EWS)** a rappelé quelles sont, encore aujourd'hui, les problématiques des conteneurs et le risque chimique potentiel pour les salariés qui procèdent à leur dépotage. En effet, chiffres à l'appui, il a précisé que sur plus de 500 000 conteneurs contrôlés à travers l'Europe,

plus de 11 % présentaient des teneurs en gaz dangereux supérieures aux VLEP. Près d'un autre quart des conteneurs sont, quant à eux, classés à risque, c'est-à-dire qu'ils présentent des concentrations en gaz nocifs entre 50 % et 100 % de la VLEP. Ces gaz proviennent soit d'une fumigation du conteneur dans son pays de provenance pour éliminer les organismes nuisibles avant transport (avec l'emploi, par exemple, de gaz tels que la chloropicrine, l'oxyde d'éthylène, la phosphine...), soit du dégazage des produits transportés. En complément, **Frank Cartel (Douanes, port du Havre)** a évoqué le risque d'exposition pour les agents douaniers lors du contrôle des conteneurs et les précautions mises en œuvre pour réaliser ces contrôles le plus en sécurité possible. Dans les entrepôts logistiques, vers lesquels les conteneurs sont acheminés pour leur dépotage, la problématique est différente. **Laurent Fina (Carsat Sud-Est)** a présenté une étude, menée en collaboration avec l'INRS, visant à améliorer la connaissance des situations d'exposition dans les plateformes logistiques. Les spécificités de ces locaux de travail sont liées à leur configuration et aux activités qui s'y déroulent : arrivage quotidien de conteneurs, manipulation et stockage de produits neufs emballés ou non, taille imposante des locaux de stockage, grande variabilité des postes de travail (dépoteurs, préparateurs de commandes, agents administratifs...). Elles ont un impact direct sur l'exposition potentielle des salariés. Il ressort que les produits non emballés, comme les pneumatiques, ont un impact nettement plus significatif sur les concentrations mesurées en COV totaux que les produits stockés emballés et filmés. De la même façon, Laurent Fina a relaté l'étude de deux postes de travail dans un même entrepôt logistique occupés par un dépoteur et un préparateur de commandes. Le dépoteur travaille exclusivement à charger ou décharger un conteneur, alors que le préparateur évolue dans l'intégralité de l'entrepôt. L'impact de la tâche de travail sur les concentrations en COV est sans aucun doute un élément essentiel à considérer dans ces types de locaux de travail. Le conteneur étant un espace confiné au regard de l'entrepôt, la concentration en COV totaux y est très significativement plus élevée, ce qui conduit à une différence d'exposition notable pour les deux salariés qui ont participé à l'étude. En outre, pour le dépoteur, l'étude révèle une exposition aux poussières qui n'apparaît pas pour le préparateur. **Laëtitia Elie (APST 41)** a complété ces résultats de mesures et observations de terrain par un éclairage médical spécifique à cette filière logistique. En ce qui concerne les conteneurs, elle a d'abord rappelé que, malheureusement, l'étiquette « obligatoire » permettant de savoir qu'un conteneur est « sous gaz », c'est-à-dire qu'il a été fumigé, était trop souvent non apposée. Ce geste simple est pourtant, rappelle-t-elle, le premier maillon d'une prévention efficace.



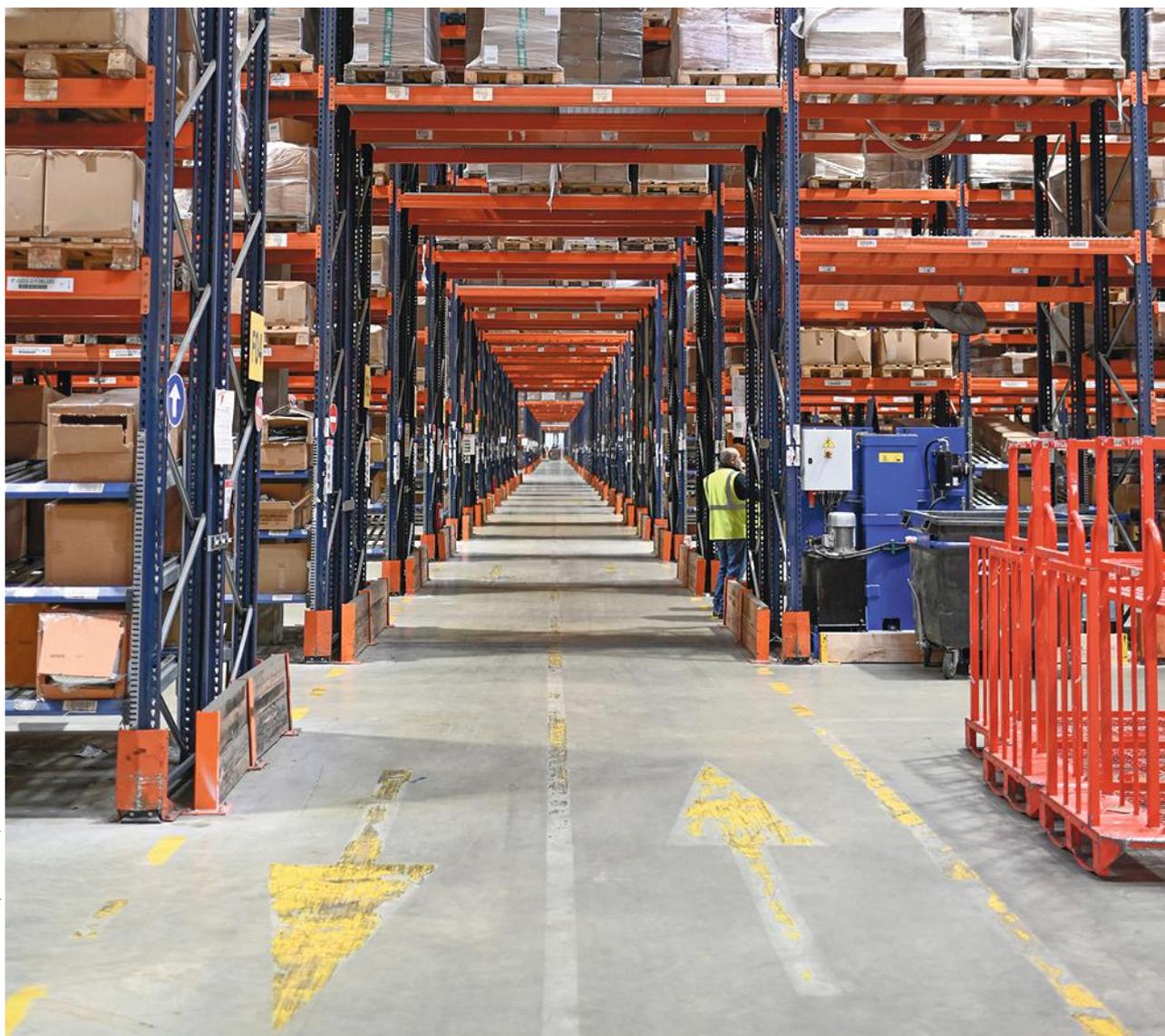
En ce qui concerne la fumigation, les gaz utilisés peuvent être extrêmement dangereux : ils vont principalement agir par pénétration dans les voies respiratoires et, selon le cas, endommager différents organes. Certains d'entre eux sont des CMR avérés. Ces propos ont été illustrés de cas d'expositions à la phosphine, gaz de fumigation parmi les plus retrouvés dans les conteneurs. Une autre source de présence de gaz à l'ouverture des conteneurs est le dégazage de composés volatils par les produits transportés. Laëtitia Elie a également rapporté le cas d'une aggravation de l'asthme d'un salarié travaillant en entrepôt logistique. En effet, ce salarié subissait une altération de sa fonction respiratoire les jours travaillés et, de ce fait, devait renforcer son traitement lorsqu'il était amené à travailler au cœur de l'entrepôt, zone la moins ventilée. Précisément, la ventilation est une solution de prévention efficace dans ces situations d'ouverture de conteneurs, comme l'a rappelé **François-Xavier Keller (INRS)**.

Plusieurs systèmes de ventilation existent et ont été présentés : les systèmes entrebâilleurs ou ventilant à travers le joint de porte, les demi-portes soufflantes, ou encore les portiques souffleur/extracteur. Bien évidemment, les caractéristiques de soufflage (débit et localisation de l'apport de l'air) sont des paramètres primordiaux pour la bonne efficacité de ces systèmes. Ces travaux ont fait l'objet de nombreuses brochures d'information pour l'aide au dépotage des conteneurs en toute sécurité<sup>6</sup>.

### Exposition chimique et secteur de la distribution

Dans le premier exposé de cette dernière session, **Laurence Robert (INRS) et Catherine Bougie (Dreets<sup>7</sup> des Yvelines)** ont rappelé que, pour les commerces, la problématique d'exposition était différente et que la sensibilisation des salariés joue un rôle important pour la prévention. Les commerces sont des endroits où il existe une forte concentration de produits neufs,

Entrepôt logistique : le travail réel est un élément essentiel à considérer dans le cadre de mesures d'expositions chimiques.



© Guillaume J. Plisson pour l'INRS / 2023

qui présentent encore de forts pouvoirs émissifs en COV. Dans ces espaces, la quantité de produits stockés au regard du volume disponible est maximisée, ce qui confère à ces locaux des taux de charge importants. De plus, les produits y sont renouvelés quotidiennement. Enfin, c'est à cette étape, en fin de chaîne, que les produits vont être déballés et manipulés par les salariés. **Céline Kutek (EnSanté) et Valérie Jusseume (Prévy)** ont présenté un travail commun sur l'impact du déballage de biens de consommation sur l'exposition des salariés dans plusieurs enseignes de commerces de détail. En effet, les emballages, cartons ou films plastique ont un rôle de barrière sur l'émission des composés chimiques issus des produits emballés. Dès lors que les emballages sont ouverts, les salariés amenés à se pencher au-dessus des cartons, à manipuler les produits, à retirer les sachets, ou encore à placer les produits sur cintres ou en rayon, sont exposés à des pics brefs, mais très significatifs de pollution aux COV. Ce constat a été objectivé par Laurence Robert et Jennifer Klingler, qui ont montré un exemple de pic d'émission observé lors de l'ouverture d'une boîte de chaussures. Ces intervenantes ont constaté en particulier que les encres apposées sur certains emballages pouvaient être à l'origine d'émissions de composés spécifiques. L'étude menée par l'INRS dans une dizaine de commerces de détail non alimentaires proposant des articles variés (vêtements, chaussures, livres, articles de sport, de bricolage, électroménager, mobilier...) révèle que chaque type de biens commercialisés a une signature chimique propre : par exemple, les articles d'équipements automobiles sont à l'origine de fortes émissions d'hydrocarbures, les articles de mobilier et de décoration, ou de bricolage avec une forte présence de bois, colle et peinture, sont émetteurs de composés terpéniques et d'aldéhydes (comme le formaldéhyde). Cette étude indique également que certains composés, comme le toluène ou encore le formaldéhyde, sont toujours présents dans ce type d'environnement. Enfin, l'étude pointe la grande disparité de l'exposition aux COV entre les espaces de vente, très souvent ventilés et agencés de façon à laisser une libre circulation d'air, et les espaces de réserves, surchargés en produits et rarement ventilés. **Romain Guichard (INRS)** a expliqué quels étaient les déterminants impactant ces concentrations en composés chimiques dans les commerces et, surtout, a proposé des pistes pour les abaisser. Dans ce cas aussi, le renouvellement d'air par la ventilation est une solution efficace pour réduire les concentrations en COV. L'apport d'air neuf par une ventilation bien répartie sur l'ensemble du local permet de diluer sensiblement les COV et d'en abaisser les concentrations. Romain Guichard a néanmoins indiqué que le formaldéhyde pouvait présenter un comportement singulier vis-à-vis de la ventilation, en comparaison d'autres COV ; sa concentration

diminue avec la mise en œuvre de la ventilation, mais pas dans les mêmes proportions que les autres COV. Un autre levier possible pour réduire les émissions de COV est aussi de limiter la température des locaux, sans toutefois dégrader le confort thermique des occupants.

### Conclusion

Comme l'a rappelé **Jérôme Triolet (INRS)** lors de la clôture, cette journée a proposé des exemples et des situations très contrastés. D'un côté, la problématique de l'ouverture des conteneurs avec des situations pouvant présenter un risque aigu, lorsque les concentrations des gaz fumigants ou de ceux émanant des produits sont bien supérieures aux VLEP, soulève des questions spécifiques. Ce risque doit être plus clairement identifié par les employeurs en vue de protéger les salariés, et des solutions efficaces de ventilation de ces conteneurs avant dépotage doivent être déployées. D'un autre côté, dans le reste de la filière logistique, entrepôts ou commerces, les expositions sont en dessous des VLEP ; les risques y apparaissent comme faibles. Néanmoins, la présence de multiples composés, dont certains sont des CMR, est relevée. Même si les concentrations de ces composés sont en général peu inquiétantes, cela n'interdit nullement de mettre en œuvre des démarches de prévention pour réduire l'exposition des salariés au niveau le plus faible possible, en mettant en place une ventilation adaptée des locaux de travail, comme le prévoit la réglementation. ●

1. Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes.
2. Direction générale des douanes et droits indirects.
3. Voir : <https://echa.europa.eu/fr/regulations/reach/understanding-reach>
4. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.
5. Voir notamment les études menées par l'INRS sur ce sujet : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=EC%2037> ; et <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=DC%204>
6. Voir en particulier : INRS ED 6249 – Ouvrir et dépoter un conteneur en sécurité. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206249> ; ED 6421 – Dépoter un conteneur. Comment éliminer les résidus de fumigation (dépliant). Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206421> ; ED 6194 – Dépoter un conteneur : les 4 étapes pour intervenir en sécurité (dépliant). Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206194>
7. Direction régionale de l'économie, de l'emploi, du travail et des solidarités.

### POUR EN SAVOIR +

- Rediffusion de la journée technique. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/footer/actes-evenements/journee-technique-produits-consommation.html>
- Dossier Web INRS. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/risques/chimiques/exemples-exposition-risques.html>

## Formation

# DEVENIR FORMATEUR CERTIFIÉ EN ÉCHAFAUDAGES FIXES (R 408) ET/OU ROULANTS (R 457)

Les échafaudages sont des équipements de travail très répandus dans de nombreux secteurs d'activité. Ils permettent de répondre à un objectif de sécurité lorsqu'il s'agit d'effectuer un travail en hauteur. Mais il existe des risques lors du montage, du démontage ou de l'utilisation, qui peuvent être accrus selon la technicité ou la particularité des matériels. Des obligations et des règles d'utilisation en sécurité sont alors à respecter. La réglementation impose une formation au montage et démontage d'échafaudages de pied ou roulants, afin de satisfaire aux exigences de sécurité. Des formateurs peuvent engager une démarche de certification en échafaudages fixes (R 408) et/ou roulants (R 457). Celle-ci vise à reconnaître leur expérience et leurs compétences, afin de dispenser des formations pour le compte d'entreprises ou d'organismes de formation habilités. Cet article propose un tour d'horizon d'un parcours de certification articulant connaissances techniques, prévention des risques professionnels et pédagogie.

**BECOME A CERTIFIED TRAINER FOR FIXED AND/OR ROLLING SCAFFOLDS –**  
*Scaffolds are work equipment used very commonly in many sectors. Their purpose is to provide safety to workers when they are working at heights. But there are risks involved during the erecting, dismantling and use of scaffolds, which could be heightened by the technical features or the particularity of the materials. There is therefore a need for compliance with obligations and rules for their safe use. Regulations call for training in the erecting and dismantling of fixed and rolling scaffolds in order to meet safety requirements. Trainers can undertake a process for fixed and or rolling scaffold certification. This process aims to recognise their experience and competence so that they can provide training on behalf of companies or authorised training bodies. This article reviews the certification process combining technical knowledge, occupational risk prevention and teaching practices.*

AURÉLIE  
PÉRISSE  
INRS,  
département  
Formation

**Q**u'il soit temporaire ou régulier, le travail en hauteur est une activité à risques. Les chutes de hauteur constituent, toutes branches d'activité confondues, le troisième risque à l'origine d'accidents du travail, et la deuxième cause de décès liés au travail, derrière le risque routier. De nombreux travailleurs sont amenés à utiliser des échafaudages fixes ou roulants. Ces équipements de travail permettent de répondre à un besoin lorsqu'il s'agit de travailler en hauteur.

C'est pourquoi les échafaudages sont soumis à certaines règles de conception (stabilité, charge admissible, garde-corps, planchers, moyens d'accès...) ou de mise en œuvre, qui prévoient notamment la formation des utilisateurs, monteurs et vérificateurs.

À ce titre, le Code du travail (article R. 4323-69) précise que « les échafaudages ne peuvent être montés, démontés ou sensiblement modifiés que sous la direction d'une personne compétente et par des travailleurs qui ont reçu une formation adéquate

et spécifique aux opérations envisagées ». La recommandation R 408<sup>1</sup> pour les échafaudages de pied (parue en 2004) et la recommandation R 457<sup>2</sup> pour les échafaudages roulants (parue en 2011) définissent des référentiels de compétences pour les responsables du montage, de la vérification et de la maintenance des échafaudages, ainsi que pour ceux qui les utilisent. La recommandation R 408 inclut également les exigences liées à la conception.

### Une certification des formateurs articulée autour de la démarche d'habilitation

Depuis 2017, l'INRS, en partenariat avec l'Assurance maladie – Risques professionnels (AM – RP) et le Syndicat français de l'échafaudage, du coffrage et de l'étalement (SFECE), développe des formations à destination des salariés utilisant des échafaudages dans le cadre de leur activité. Deux dispositifs dédiés aux différentes activités ont été déployés, pour les échafaudages de pied, d'une part, et pour les échafaudages roulants, d'autre part. Ces référentiels de formation ont été construits en s'appuyant sur les recommandations R 408 et R 457 de la Caisse nationale de l'assurance maladie (Cnam). Ces formations intègrent la prévention de l'ensemble des risques liés aux activités sur différents types d'échafaudages (cadre

et multidirectionnel). Elles mettent l'accent sur une approche pratique, avec 50 % à 70 % du temps dédié à des mises en situation, au plus proche de la réalité de terrain. Ces formations sont déployées par des organismes de formation ou par des entreprises ayant obtenu les habilitations échafaudage de pied ou échafaudage roulant auprès de l'INRS et du réseau de l'AM – RP.

« À ce jour, on dénombre 63 organismes de formation habilités sur les échafaudages de pied, 44 organismes de formation sur les échafaudages roulants, ainsi qu'une centaine de plateformes pédagogiques, réparties sur le territoire national », précise Anthony Benhora, en charge des dispositifs échafaudages à l'INRS.

### Une démarche de validation des compétences des formateurs

En parallèle du processus d'habilitation et dans le but de renforcer la qualité des formations dispensées par les organismes habilités, une démarche de certification vise la validation des compétences des formateurs à animer des stages échafaudages au nom du réseau de l'AM – RP et de l'INRS. Celle-ci est obtenue notamment après vérification de l'expérience du formateur et passage d'un test d'évaluation des connaissances.



© Grégoire Maisonneuve pour l'INRS/2022



### S'INFORMER SUR LE DISPOSITIF

- Pour tout renseignement sur le dispositif de certification : consulter le document « Référentiel de certification formateur échafaudages » détaillant l'ensemble des étapes. Il est disponible sur le site de l'INRS : <https://www.inrs.fr/services/formation/demultiplication.html>
- Pour tout renseignement sur les dates de sessions des épreuves certificatives, consulter le site Internet de l'INRS : [www.inrs.fr](http://www.inrs.fr) et renseigner le code du stage : FF1540
- Épreuve certificative pour les formateurs des dispositifs échafaudages R 408 et/ou R 457 - Calendrier des stages de l'INRS. Accessible sur : [https://www.inrs.fr/services/formation/doc/stages.html?refINRS=FF1540\\_2024](https://www.inrs.fr/services/formation/doc/stages.html?refINRS=FF1540_2024)

selon les recommandations de la Cnam. Fin 2023, une centaine de formateurs ont obtenu la certification. À ce jour, ils composent un réseau national agissant pour le compte d'entreprises ou d'organismes habilités et forment des professionnels au montage, à l'utilisation, à la vérification et au démontage des échafaudages, tels que la réglementation le recommande. Ainsi, depuis 2017, plus quinze mille personnes ont été formées.

### Prévention et pédagogie au cœur de la certification du formateur échafaudage

Quatre étapes successives jalonnent le parcours de certification du formateur par l'INRS et les Carsat/Cramif/CGSS : un dossier de candidature pour attester des prérequis nécessaires et entrer dans le parcours, une session de présentation des dispositifs incluant une évaluation des connaissances en prévention des risques, un test d'évaluation des compétences techniques, et enfin, l'animation d'une séquence de formation devant un jury (Cf. Figure 1).

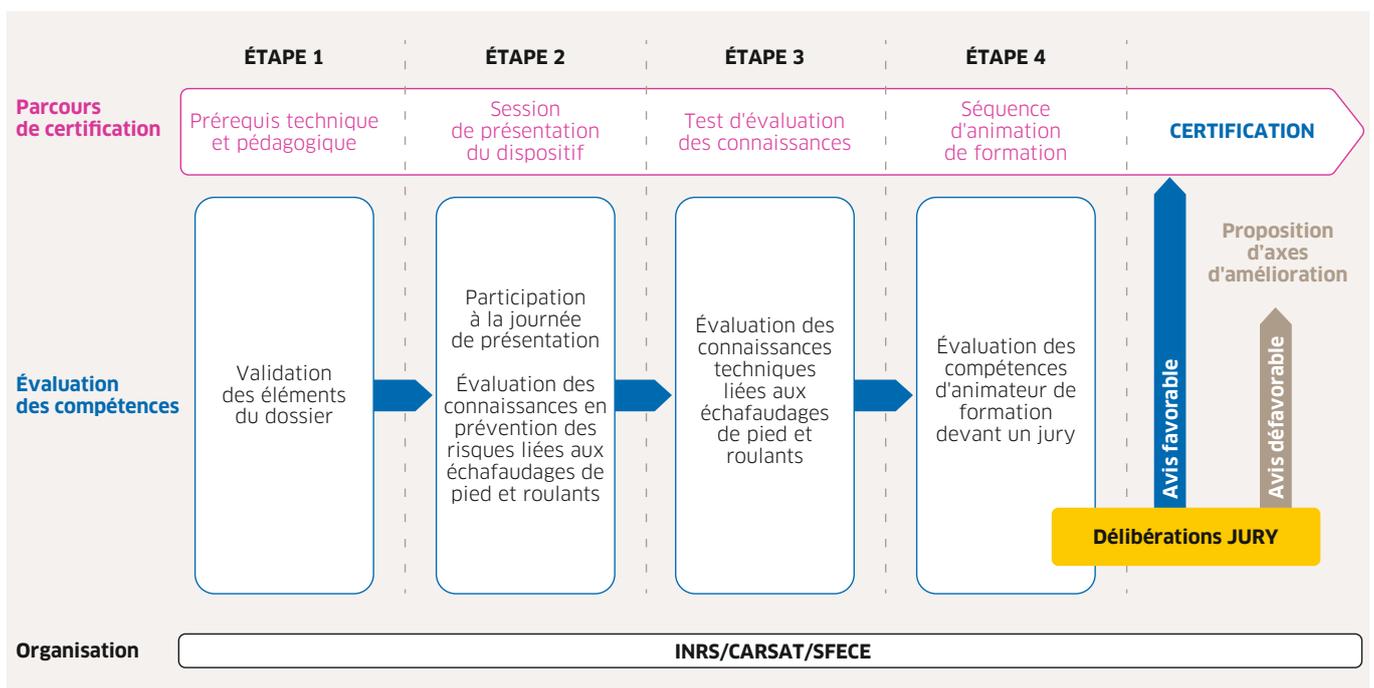
Ce processus vise à confirmer les savoir-faire techniques et pédagogiques dans le domaine des échafaudages, indispensables pour assurer des formations de qualité.

« Les attendus de la certification se situent bien entendu autour de la capacité des candidats à mobiliser leurs compétences et connaissances techniques, qui sont des prérequis incontournables », indique Frédéric Nordera, contrôleur de sécurité à la Carsat Bourgogne-Franche-Comté et membre du jury de certification. « De nombreux candidats sont des professionnels aguerris, mais ce qui va les

« Pour un formateur, s'engager dans une démarche de certification repose sur un double intérêt : valoriser ses compétences professionnelles et bénéficier d'une reconnaissance nationale », ajoute Anthony Benhora.

La certification de formateurs répartis sur tout le territoire représente un enjeu fort pour pouvoir dispenser les formations échafaudages de pied ou roulants auprès des professionnels de terrain,

↓ FIGURE 1  
Formation FF1540 : Étapes du parcours de certification. Extrait du référentiel de certification formateur échafaudages.



distinguer lors de l'épreuve finale, c'est leur capacité à animer la formation en intégrant la prévention des risques professionnels », ajoute-t-il.

Les dimensions techniques, pédagogiques et la mobilisation des connaissances en prévention des risques professionnels constituent ainsi les éléments clés de l'obtention de la certification de formateur échafaudage. Franck Henry, chargé de projet formation à l'INRS et membre du jury de certification sur la partie pédagogique, précise à ce propos que « le jury observe comment les principes de prévention sont articulés avec les techniques pédagogiques mises en œuvre, de manière à s'assurer que l'animation de la formation n'est pas seulement orientée autour des gestes techniques de montage ou démontage d'échafaudages ».

### Une opportunité de montée en compétences pour les formateurs

L'obtention de la certification échafaudages fixes ou roulants peut permettre aux formateurs de valoriser des compétences.

Pour Cyril Vanier, formateur à l'Agence nationale pour la formation professionnelle des adultes (Afp), la démarche entreprise et la certification achevée en 2019 lui ont permis de monter en compétences et de former l'ensemble de ses collègues sur des actions de formation du BTP, ainsi que de répondre à des demandes de formation de la part d'entreprises. « Obtenir la certification de formateur représente à mes yeux un gage de qualité, de reconnaissance au sein du réseau et m'a permis de devenir référent échafaudages pour l'Afp au niveau national », déclare-t-il.

C'est également dans cette perspective que Kelly Patras, 28 ans, titulaire d'un baccalauréat professionnel de peintre en bâtiment, s'est lancée dans cette démarche sur les conseils de sa responsable, alors qu'elle exerçait depuis quelques années seulement. Elle est ainsi devenue l'une des rares formatrices certifiées échafaudages et occupe aujourd'hui de nombreuses responsabilités à BR-Consult, un organisme de formation habilité, situé dans la région parisienne. Dans sa pratique, la prévention tient une place centrale : « Au cours de mes interventions, je m'appuie beaucoup sur des situations concrètes du quotidien afin que les stagiaires identifient les aspects de prévention des risques qu'ils mettent en œuvre sans s'en rendre compte », précise-t-elle.

Depuis qu'ils ont obtenu leur certification, tous deux déclarent avoir pu évoluer dans leur carrière, davantage réfléchir à leurs pratiques professionnelles et avoir pu diversifier leurs activités. Une démarche que tous deux recommandent à leurs homologues, pour qu'ils fassent certifier leurs compétences selon les référentiels nationaux de l'AM – RP et de l'INRS.



© Philippe Castano pour l'INRS/2019

Chaque année, une quinzaine de sessions de certification sont proposées par le département Formation de l'INRS. ●

1. Recommandation R 408 du CTN des industries du BTP, du 10 juin 2004 – Montage, utilisation et démontage des échafaudages de pied. Accessible sur : [https://www.ameli.fr/sites/default/files/Documents/5338/document/recommandation-r408\\_assurance-maladie.pdf](https://www.ameli.fr/sites/default/files/Documents/5338/document/recommandation-r408_assurance-maladie.pdf)
2. Recommandation R 457 du CTN des industries du BTP, du 10 mai 2011 – Prévention des risques liés au montage, au démontage et à l'utilisation des échafaudages roulants. Accessible sur : [https://www.ameli.fr/sites/default/files/Documents/5350/document/recommandation-r457\\_assurance-maladie.pdf](https://www.ameli.fr/sites/default/files/Documents/5350/document/recommandation-r457_assurance-maladie.pdf)

### POUR EN SAVOIR +

- Extrait du dossier Web de l'INRS/Risques/Chutes de hauteur. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/risques/chutes-hauteur/echafaudages-plates-formes-individuelles.html>

# AGENDA / FORMATIONS

## Évaluer et prévenir les risques liés aux agents chimiques (C@1503)

Sessions : du 02/09/2024 au 14/11/2024

### → PUBLIC

Ingénieurs, techniciens, fonctionnels « sécurité et santé au travail », autres préventeurs d'entreprise.

### → OBJECTIFS

Conduire la démarche d'évaluation et de prévention des risques chimiques.

#### Objectifs pédagogiques :

- identifier le cadre réglementaire de la prévention des risques chimiques ;
- lire et utiliser les sources d'information sur les produits chimiques ;
- détecter, évaluer et hiérarchiser les risques liés aux agents chimiques ;
- construire un plan d'actions de prévention du risque chimique.

### → CONTENU

- enjeux de la démarche de prévention des risques chimiques ;
- propriétés physicochimiques et toxicologiques des produits chimiques ;
- étiquette et fiche de données de sécurité (FDS) ;
- réglementation en matière de risques chimiques ;
- analyse d'une activité de travail et évaluation du risque chimique ;
- surveillance des atmosphères de travail ;
- choix des mesures préventives et élaboration d'un plan d'actions.

### → RENSEIGNEMENTS PRATIQUES

**Durée :** 32 heures

**Lieu :** à distance et à Paris

**Responsable pédagogique :** Gaëlle AVON

**Secrétariat, renseignements, inscriptions :**

INRS, Département Formation

65, boulevard Richard-Lenoir

75011 Paris

E-mail : [secretariat.forp@inrs.fr](mailto:secretariat.forp@inrs.fr)

Coût : 727 € nets (exonération de TVA).

## Évaluer les risques liés aux agents chimiques (C@1502)

Sessions accompagnées :

du 02/09/2024 au 11/10/2024

### → PUBLIC

Ingénieurs, techniciens, fonctionnels « sécurité et santé au travail », autres préventeurs d'entreprise.

#### Prérequis :

Pour s'inscrire à cette formation en ligne, il est nécessaire :

- d'avoir suivi avec succès l'autoformation en ligne C@1501 « Acquérir les notions de base sur les produits chimiques » ;
- de produire un justificatif attestant de la capacité à utiliser le logiciel Seirich.

### → OBJECTIFS

Conduire une démarche d'évaluation des risques chimiques en entreprise.

#### Objectifs pédagogiques :

- détecter les risques liés aux agents chimiques ;
- évaluer et hiérarchiser les risques liés aux agents chimiques ;
- intégrer la surveillance d'atmosphère dans la démarche d'évaluation du risque chimique.

### → CONTENU

- enjeux de l'évaluation des risques chimiques ;
- analyse d'une activité de travail au regard du risque chimique ;
- évaluation du risque chimique : cotation des dangers, hiérarchisation et évaluation des risques chimiques, notamment avec le logiciel Seirich ;
- surveillance des atmosphères de travail.

### → RENSEIGNEMENTS PRATIQUES

**Durée :** 14 heures

**Lieu :** à distance

**Responsable pédagogique :** Gaëlle AVON

**Secrétariat, renseignements, inscriptions :**

INRS, Département Formation

65, boulevard Richard-Lenoir

75011 Paris

E-mail : [secretariat.forp@inrs.fr](mailto:secretariat.forp@inrs.fr)

Coût : 90 € nets (exonération de TVA).

## Évaluer et prévenir les nuisances sonores en milieu industriel (J@0508)

Sessions : du 07/10/2024 au 27/11/2024

### → PUBLIC

Acteurs des services de prévention et de santé au travail (médecins, infirmiers et intervenants en prévention des risques professionnels), fonctionnels « sécurité et santé au travail », ingénieurs et techniciens de bureaux d'études et méthodes, ingénieurs-conseils et contrôleurs de sécurité des services de prévention des Carsat, Cramif et CGSS.

### → OBJECTIFS

Préconiser les solutions de prévention (collectives et individuelles) des nuisances sonores en milieu industriel.

#### Objectifs pédagogiques :

- 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.

### → CONTENU

- notions essentielles en acoustique : généralités, définitions, grandeurs physiques et unités ;
- effets sur la santé : éléments d'anatomie et de physiopathologie, effets du bruit ;
- contexte réglementaire ;
- démarche de prévention : méthodologie d'évaluation du risque en entreprise (principes, approches et stratégies) ;
- mesures de prévention : protection collective, protection individuelle.

### → RENSEIGNEMENTS PRATIQUES

**Durée :** 28 heures

**Lieu :** à distance et à Vandœuvre-lès-Nancy

**Responsable pédagogique :** Amine FATMI

**Secrétariat, renseignements, inscriptions :**

INRS, Département Formation

65, boulevard Richard-Lenoir

75011 Paris

E-mail : [secretariat.forp@inrs.fr](mailto:secretariat.forp@inrs.fr)

Coût : 942 € nets (exonération de TVA).

## Évaluer et améliorer l'environnement sonore dans les open spaces (J@0540)

Sessions : du 22/10/2024 au 11/12/2024

### → PUBLIC

Acteurs des services de prévention et de santé au travail (médecins, infirmiers et intervenants en prévention des risques professionnels), fonctionnels « sécurité et santé au travail », ingénieurs-conseils et contrôleurs de sécurité des services de prévention des Carsat, Cramif et CGSS.

### → OBJECTIFS

Améliorer l'environnement sonore dans les *open spaces*.

#### Objectifs pédagogiques :

- identifier les spécificités des *open spaces* ;
- évaluer la gêne auditive dans les *open spaces* ;
- proposer des solutions d'amélioration de l'environnement sonore.

### → CONTENU

- spécificités des *open spaces* : définition, contexte réglementaire, règles générales d'acoustique ;
- méthodologie d'évaluation de la gêne auditive en *open space* : analyse de l'activité, qualifier un local *open space* ;
- mesures d'amélioration.

### → RENSEIGNEMENTS PRATIQUES

**Durée :** 24 heures

**Lieu :** à distance et à Vandœuvre-lès-Nancy

**Responsable pédagogique :** Amine FATMI

**Secrétariat, renseignements, inscriptions :**

INRS, Département Formation

65, boulevard Richard-Lenoir

75011 Paris

E-mail : [secretariat.forp@inrs.fr](mailto:secretariat.forp@inrs.fr)

Coût : 805 € nets (exonération de TVA).

---

### POUR EN SAVOIR

- Retrouvez toute l'offre de formation de l'INRS sur : [www.inrs.fr/services/formation.html](http://www.inrs.fr/services/formation.html)

## Sélection bibliographique

# À LIRE, À VOIR

Les publications de l'INRS sont consultables et téléchargeables sur : [www.inrs.fr/Rubriques](http://www.inrs.fr/Rubriques) « Publications et outils/Brochures et dépliants » ou « Affiches et autocollants » (papier/Web) et « Vidéos ».



### Cabinet dentaire. Prévenir les risques professionnels

INRS, 2024, dossier Web (*Web uniquement*) ; outil n° 126 (*Web uniquement*) ; dépliant ED 6530, coll. TPE-PME (*nouveautés*).

Les salariés des cabinets dentaires sont exposés à des risques professionnels de diverses natures : chutes de plain-pied, douleurs au dos et aux articulations, expositions à des produits dangereux, risques de contamination par des agents biologiques, blessures lors de l'utilisation des instruments chirurgicaux...

- Le dossier Web apporte un ensemble de ressources pour mieux comprendre et prévenir ces risques et aider à réaliser le document unique d'évaluation des risques.
- L'outil Web, élaboré par l'INRS et l'Assurance Maladie – Risques professionnels, permet aux cabinets 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.
- Le dépliant de sensibilisation présente les principaux risques professionnels rencontrés dans cette activité, ainsi que les chiffres clés en matière d'accidents du travail et de maladies professionnelles. Il présente également des solutions de prévention.



### Prévention du risque légionelle dans les installations sanitaires provisoires de chantier

INRS, 2024, brochure ED 6526, coll. Démarche de prévention (*nouveauté*).

Après un rappel sur le contexte réglementaire, ce document propose une description des mesures de prévention du risque lié aux légionelles lors de la conception de nouveaux modules, de l'entreposage, de la mise en service et de l'utilisation des installations sanitaires de chantier. Il s'adresse aux différents acteurs concernés : propriétaire des installations sanitaires provisoires, entreprise responsable des travaux, titulaire du marché de la base vie, employeur du personnel des entreprises utilisatrices des installations, prestataire en charge de la mise en service et de la maintenance des installations, préventeurs.



### Démarche de prévention des troubles musculo-squelettiques (TMS)

INRS, 2024, brochure ED 6518, coll. Démarche de prévention (*nouveauté*).

Ce guide propose une démarche pour prévenir les TMS au travers d'un processus d'amélioration continue et d'une approche de type conduite de projet. Elle est structurée autour des quatre étapes que sont l'engagement dans la démarche, l'état des lieux, l'analyse approfondie et la transformation des situations de travail. Au fil de ces étapes, trois actions continues et transverses conditionnent la réussite de la démarche : mobiliser, communiquer et évaluer. L'intégration de cette démarche à l'organisation habituelle de l'entreprise concourt à une prévention durable et efficace des TMS.

# 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 87 dB(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](mailto:thomas.venet@inrs.fr) ou [benoit.pouyatos@inrs.fr](mailto: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.



# Veille & prospective

## **Prospective**

Les modifications épigénétiques :  
potentiels biomarqueurs d'effet  
d'une exposition professionnelle ?

P. 105

# LES MODIFICATIONS ÉPIGÉNÉTIQUES : POTENTIELS BIOMARQUEURS D'EFFET D'UNE EXPOSITION PROFESSIONNELLE ?

Le maintien en bonne santé d'un individu est le fruit de l'orchestration de l'expression de gènes et de l'activité des protéines qui en découle. L'expression des gènes est finement régulée au niveau de chaque cellule de l'organisme, de manière à ce que chacune d'elles puisse remplir des fonctions spécifiques (neurons, cellules hépatiques ou du système immunitaire par exemple). Ces différentes cellules sont pourtant toutes issues d'une cellule unique provenant de la rencontre de cellules spécialisées pour la reproduction, les gamètes mâle et femelle. Le développement du fœtus et la création de cellules spécialisées vont être permis par la capacité des cellules à activer ou inactiver certains gènes en fonction des besoins. Ces processus font intervenir des mécanismes appelés épigénétiques. L'épigénétique, au-delà de jouer un rôle crucial dans la physiologie humaine, peut aussi être impliquée dans la réponse de l'organisme lors d'une exposition à des agents chimiques, physiques ou biologiques. Une perturbation dans la régulation de l'expression des gènes peut être à l'origine de pathologies invalidantes pour les salariés. Cet article décrit ce qu'est l'épigénétique et donne quelques exemples de perturbations épigénétiques associées à des expositions professionnelles et leurs effets sur la santé, et propose des perspectives en matière de prévention.

**EPIGENETIC MODIFICATIONS: POTENTIAL BIOMARKERS OF OCCUPATIONAL EXPOSURE?** – *The development of the foetus and the creation of specialised cells are made possible by cells' ability to activate or deactivate the expression of certain genes based on needs. These processes use specific mechanisms called epigenetic mechanisms. Epigenetics, apart from playing a crucial role in human physiology, can also be involved in the body's response to occupational exposure to chemical, physical or biological agents. A disruption in the regulation of gene expression can cause debilitating pathologies for employees. This article describes epigenetics and gives a few examples of epigenetic disruptions related to occupational exposure and their health effects, and proposes some prevention prospects.*

CHRISTIAN  
DARNE,  
CAROLE  
SEIDEL,  
LAURENT  
GATÉ  
INRS,  
département  
Toxicologie et  
biométrie

Toutes les cellules d'un organisme contiennent la même information, le même patrimoine génétique, les mêmes gènes, portés par l'ADN\* (Cf. *Glossaire p. 111*)<sup>1</sup>. Elles sont pourtant bien différentes. Pourquoi des cellules ayant le même ADN ne sont-elles pas identiques en termes de formes et de fonctions ? Comment, à partir de deux organismes parents possédant des cellules clairement différenciées et spécialisées, peut-on produire une cellule unique indifférenciée « qui sait tout faire » mais

qui donnera à son tour un organisme complexe ? Autant de questions qui trouvent une partie de leurs réponses dans l'épigénétique, ou l'étude de l'épigénome, c'est-à-dire l'étude des modifications épigénétiques d'une cellule.

Quel intérêt apporte cette discipline dans le contexte de la prévention des risques en milieu de travail ? Pourquoi s'intéresser à l'épigénétique ? Les « marques » épigénétiques, ces petites modifications biochimiques ajoutées sur l'ADN ou sur les protéines qui interagissent avec, pourraient-elles être



des biomarqueurs\* d'effet/d'exposition suffisamment précoces et fiables pour une prévention efficace en milieu professionnel ?

Cet article propose des éléments de compréhension du rôle de l'épigénétique et de réflexion sur ses possibles applications pour la prévention des maladies professionnelles.

### L'épigénétique

L'épigénétique consiste à comprendre comment les gènes\* vont être, ou ne pas être, utilisés par la cellule, c'est-à-dire comprendre comment l'information qu'ils contiennent va pouvoir être exprimée ou non. C'est l'étude des changements dans l'utilisation des gènes, pouvant, pour certains, être propagés sur plusieurs générations, alors qu'il n'y a pas de modification de la séquence\* ADN. De fait, la séquence ADN n'étant pas modifiée, le phénomène peut être réversible.

Ces changements peuvent être induits par l'environnement. Il s'agit d'une adaptation « rapide » de la cellule. Cet environnement doit être compris comme étant le contexte cellulaire à la fois proche (signaux chimiques de cellules adjacentes...) mais également beaucoup plus large, en y intégrant les *stimuli* de l'environnement extérieur (stress, alimentation, hygiène de vie, exposition à des substances chimiques...).

Dans un cadre « normal », ces adaptations épigénétiques sont indispensables au développement des organismes, à leur bon fonctionnement et à l'équilibre cellulaire (l'homéostasie). Mais les perturbations induites par l'environnement peuvent engendrer un déséquilibre de cette fine régulation et conduire à des effets délétères pour la santé.

Si les recherches dans ce domaine ne sont pas nouvelles, les connaissances acquises aujourd'hui et

les techniques désormais à disposition permettent d'entrevoir les pistes que pourrait emprunter la recherche au service de la prévention des maladies professionnelles. Appréhender et détecter ces marques, c'est rechercher de potentiels indicateurs d'effets précoces d'une exposition en milieu professionnel.

Il convient cependant de rester prudent : si certains effets sont identifiés, ils ne sont pas toujours interprétables ; et entre cause et conséquence, la frontière est parfois floue.

### L'expression des gènes

Dans une cellule, la molécule d'ADN, porteuse de l'information nécessaire à son fonctionnement, est contenue dans le noyau (Cf. Figure 1). Cette molécule est un enchaînement de nucléotides\* sous forme de deux brins formant une double hélice. L'ordre dans lequel s'enchaînent les nucléotides constitue des séquences, et certaines de ces séquences (les gènes) portent l'information (le message).

Ces séquences sont reconnues par des complexes de protéines\* qui vont pouvoir lire et retranscrire le message sous forme d'un ARN messenger\*. Celui-ci est véhiculé en dehors du noyau pour être traduit en protéines qui sont dotées d'une capacité fonctionnelle (par exemple : enzymes, récepteurs hormonaux) ou structurelle (exemple : collagène).

Le génome humain a pu être entièrement séquencé\* (lecture de l'enchaînement des nucléotides) dans les années 2000. Il comporte environ 3 milliards de nucléotides, mais on estime que seuls 1 à 5 % d'entre eux correspondent à des gènes (soit entre 20000 et 30000 gènes).

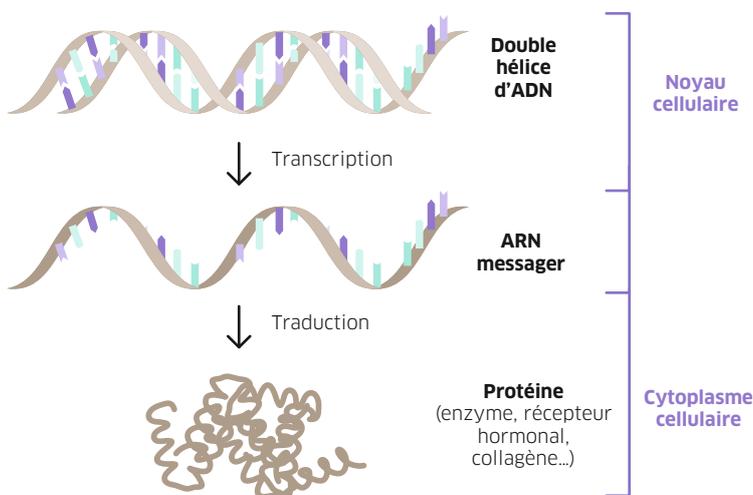
Si cette description linéaire est juste, elle n'en reste pas moins trop simpliste et parcellaire. En effet, les protéines actives ne résultent pas uniquement du seul message contenu dans la molécule d'ADN – ce dernier n'étant pas suffisant – mais d'un ensemble de facteurs environnants. Le parallèle peut être fait avec le rendu final du texte d'une pièce de théâtre qui dépend de la lecture et de l'interprétation qu'en font les acteurs, des interactions qu'ils peuvent avoir, mais aussi du décor, de la mise en scène.

### Les mécanismes épigénétiques

Le champ de l'épigénétique est vaste, puisqu'il concerne tout ce qui n'est pas modification de la séquence de l'ADN, mais qui en influence sa lecture. Ne seront abordés ici que les mécanismes les plus étudiés et les mieux connus, qui interviennent dans le remodelage\* de la chromatine\*.

### Le remodelage de la chromatine, de quoi parle-t-on ?

Au sein du noyau, la molécule d'ADN n'est pas libre, elle se présente sous une forme plus ou moins compacte : la chromatine\*. La forme la plus connue



↑ FIGURE 1 Représentation simplifiée de l'expression génique. La séquence d'ADN est transcrite dans le noyau de la cellule pour donner un ARN messenger (ARNm) qui sera exporté du noyau vers le cytoplasme cellulaire. L'ARNm est alors traduit en protéine (constituée d'acides aminés) avec une structure et une fonction précises. Ces différentes étapes sont réalisées par des protéines qui associent également des ARN dans des complexes macromoléculaires. (Sources : Servier Medical Art ; UCL Mathematical & Physical Sciences).

de la chromatine est la figure typique du chromosome\* qui se manifeste lors de la division cellulaire (Cf. Figure 2).

Les états chromatinien sont multiples : la structure de l'ADN n'est donc pas figée, mais dynamique (remodelage). On distingue classiquement l'euchromatine (décondensée, accessible) et l'hétérochromatine (condensée, peu accessible). L'hétérochromatine peut être facultative ou temporaire (état condensé, réversible vers un état décondensé) ou constitutive (régions normalement inaccessibles en permanence). Cette dynamique de la chromatine joue un rôle dans l'expression des gènes, en rendant certaines zones de l'ADN lisibles ou non par les molécules impliquées dans la transcription\* (protéines, enzymes, ARN...) ou en faisant se rencontrer des régions d'ADN non contiguës, par exemple. Cette dynamique est orchestrée par des marques épigénétiques apposées sur l'ADN ou sur les molécules (protéines, ARN) qui l'environnent.

**Pourquoi cette dynamique et son contrôle par les marques épigénétiques sont-ils essentiels ?**

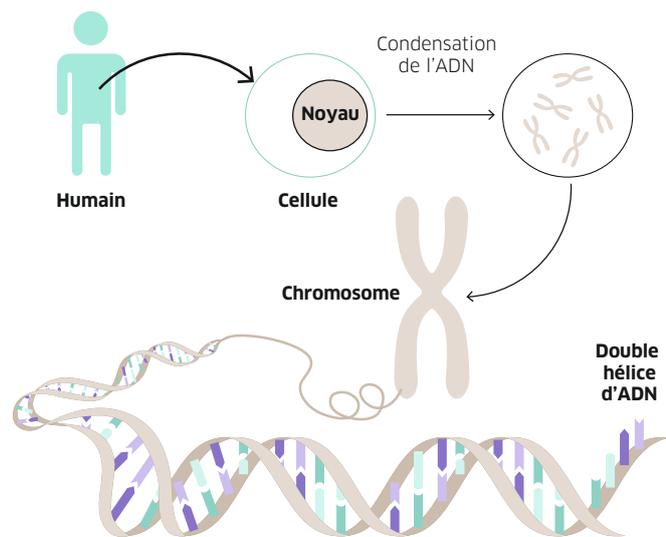
Trois particularités des marques épigénétiques illustrent leur importance :

- Les marques épigénétiques sont réversibles ; cependant, elles sont transmissibles au cours des divisions cellulaires. Cette transmission est essentielle, car ce sont ces marques qui conditionnent l'expression ou non de tel ou tel gène, ce qui a pour conséquence qu'un type cellulaire donné reste ce qu'il est au cours des divisions cellulaires successives. Une cellule musculaire qui se divise doit donner des cellules musculaires et non pas des cellules rénales, par exemple.
- Le maintien ou non de ces marques est également primordial pour la reproduction et le développement. De façon simplifiée, les gamètes (ovule et spermatozoïde), cellules spécialisées pour la reproduction, doivent être dépourvus de marques de spécialisation, afin d'être en mesure de produire une cellule unique pluripotente\* ou indifférenciée, après fusion lors de la reproduction. Par la suite, lors des divisions, les cellules reçoivent des signaux environnementaux, qui vont générer à nouveau des marques épigénétiques et les conduire à exprimer de façon différente certains de leurs gènes, afin qu'elles se spécialisent pour une fonction donnée (cellules du cerveau, des muscles, du foie, gamètes...).
- Le génome humain est constitué d'un grand nombre de séquences répétées (plusieurs fois la même séquence) qui sont, pour leur grande majorité, non codantes, c'est-à-dire qu'elles ne correspondent pas à des gènes (on estime qu'elles représentent environ 50 % de notre génome). On les retrouve dans l'hétérochromatine constitutive. Si ces séquences sont utiles pour les cellules (même si toutes leurs fonc-

tions ne sont pas à ce jour clairement identifiées), elles sont le plus souvent porteuses de marques épigénétiques empêchant leur lecture/expression. Ce marquage assure que ces séquences ne seront pas utilisées et permet le maintien des structures chromatinien et l'intégrité du génome, car ces séquences répétées ont une forte propension à la mobilité et à aller s'insérer aléatoirement dans l'ADN, ce qui en modifie la séquence et engendre parfois une activation ou une inactivation de gènes néfaste pour le fonctionnement cellulaire.

**Les marques épigénétiques et l'exposition professionnelle**

Aujourd'hui, de nombreux tests de toxicologie expérimentale ou utilisés en biosurveillance sont basés sur l'identification des atteintes à l'ADN. En effet, les xénobiotiques\*, les rayonnements (ionisants ou non), peuvent affecter directement la molécule d'ADN. Ils peuvent induire des cassures de l'ADN ou en modifier les bases\* et donc, changer l'information stockée dans l'ADN. Ils sont alors appelés agents génotoxiques. Cependant, il ne s'agit pas du seul mode d'action existant et certaines molécules affectent l'expression/la régulation génique sans pouvoir être mise en évidence par ces tests. Aussi, pour la prévention en milieu professionnel, il est important de pouvoir disposer d'autres indicateurs d'effet que ceux évoqués ci-dessus. L'obtention de biomarqueurs d'effet\*, basés sur les marques épigénétiques, pourrait constituer une des solutions et est une piste en cours d'exploration.



↑ FIGURE 2 La chromatine. Les cellules de l'organisme comportent un noyau contenant la molécule d'ADN. Cette molécule porte toute l'information génétique à la base de la constitution et du fonctionnement de l'organisme. L'ADN est compacté à l'aide de multiples familles de protéines, mais sa structure est dynamique et plusieurs états de l'ADN peuvent exister et co-exister au sein du noyau. L'état de l'ADN sous forme de chromosome ne se retrouve que lorsque les cellules entament leur division. En dehors de cette période de division, l'ADN apparaît sous une forme moins structurée ; on parle alors de chromatine.



À plus long terme, au-delà de leur intérêt en tant que biomarqueurs « signal d'alarme », des chercheurs et des préventeurs y voient la perspective de pouvoir annuler les effets potentiellement délétères des modifications épigénétiques, en agissant sur les voies qui les font varier, puisque ces marques sont réversibles. Les effets sur la santé pourraient alors disparaître ou, mieux, ne pas apparaître. Un autre intérêt serait également d'éviter la transmission intergénérationnelle de ces modifications qui peut exister, comme cela a été démontré pour certains agents [1].

### **Méthylation\* et acétylation des histones\*, méthylation de l'ADN et pathologies**

Les changements de méthylation de l'ADN ou les modifications des histones ont été associés au cancer, à l'infertilité, à des pathologies cardiovasculaires, respiratoires, métaboliques, immunologiques et neurodégénératives [2, 3].

Dans les cellules cancéreuses, il existe souvent une hypométhylation globale de l'ADN, accompagnée cependant d'une hyperméthylation au niveau des régions promotrices de certains gènes (séquences activatrices/régulatrices), notamment les gènes suppresseurs de tumeurs\*, qui inhibe ainsi leur expression.

Un axe de recherche important aujourd'hui est le développement d'« épidrogues » qui vont lutter contre les effets/phénomènes épigénétiques – notamment pour le traitement de cancers. Certaines de ces molécules sont dès à présent utilisées en thérapeutique, par exemple l'azacitidine, inhibitrice des DNMT (enzymes impliquées dans la méthylation de l'ADN) ou la romidepsine, inhibitrice des HDAC (impliquées dans la désacétylation des histones).

### **Exposition professionnelle et variation des marques épigénétiques**

En 2007, le Centre international de recherche sur le cancer (Circ) classait le travail de nuit posté comme cancérogène probable pour l'humain (groupe 2A), pour le cancer du sein. Les travaux réalisés à partir de prélèvements buccaux ou sanguins, portant notamment sur les gènes impliqués dans le cycle circadien, montrent des relations entre les niveaux de méthylation de l'ADN (hyper- ou hypométhylation selon les gènes observés), le travail de nuit posté et le cancer du sein, suggérant une implication de phénomènes épigénétiques dans l'apparition de la pathologie [4, 5].

Aujourd'hui, un nombre croissant d'études de bio-surveillance humaine, effectuées le plus souvent à partir de prélèvements sanguins, urinaires ou buccaux, montrent des variations significatives au niveau des marques épigénétiques. Et si les données épidémiologiques commencent à s'enrichir, les travaux expérimentaux, notamment *in vivo*, sont

également plus nombreux. Plusieurs exemples d'intérêt peuvent être soulignés :

- L'arsenic peut induire des altérations épigénétiques, notamment des variations dans la méthylation de l'ADN, mais également des modifications d'acétylation des histones [6]. Au Bangladesh, l'exposition à l'arsenic au travers de la consommation d'eau de boisson polluée a été corrélée à une hypométhylation d'îlots CpG\* au niveau ou à proximité de gènes de voies de signalisation impliqués dans des processus cancéreux ou liés à l'âge [7].
- Il a été montré qu'une exposition de cellules en culture au chrome VI affectait les méthyltransférases et les déméthylases, qui sont des enzymes impliquées dans la méthylation ou la déméthylation de l'ADN. On observe alors que les niveaux de méthylation de certains résidus sont augmentés alors que d'autres diminuent avec notamment pour conséquence une inhibition de l'expression d'un gène connu comme suppresseur de tumeur\* [8].
- Il a été observé auprès d'agents de circulation et de salariés de stations-service de Milan (Italie), exposés à de faibles concentrations de benzène, des niveaux de méthylation de l'ADN plus faibles au niveau de séquences répétées, alors qu'ils sont plus élevés au niveau du promoteur du gène suppresseur de tumeur *P15* [9].
- L'exposition maternelle au bisphénol A durant la gestation et la lactation conduit à une modification de la régulation du glucose chez le rat à la deuxième génération. Ces animaux montrent une intolérance au glucose et une sous-expression du gène codant la glucokinase, enzyme fortement impliquée dans la régulation de la glycémie. Cette sous-expression est due à une hyperméthylation du promoteur de ce gène [10]. Par ailleurs, en 2015, Mao *et al.* [11] montraient que l'exposition des mères au bisphénol A conduisait à une hyperméthylation du gène de l'IGF-2 (*insulin-like growth factor 2* – hormone peptidique ayant entre autres des propriétés hypoglycémiantes) au niveau des cellules germinales des mâles de la descendance de première génération, entraînant un dysfonctionnement hépatique à la génération suivante.
- Chez des rats mâles exposés au DBP (dibutyl phthalate), une dérégulation des cellules de Leydig adultes produisant la testostérone a pu être observée. Cette dérégulation peut être en partie expliquée par une hyperméthylation d'histones au niveau des promoteurs de gènes codant des protéines de la régulation de la stéroïdogénèse testiculaire [12].
- Le plomb, le cadmium et le sélénium sont des métaux qui induisent des perturbations de la méthylation de l'ADN [13]. C'est également le cas des fumées de soudage, de l'amiante, des composés aromatiques polycycliques, du formaldéhyde,



© Séverin Millet pour l'INRS / 2024

de la pollution de l'air (éléments carbonés), du phtalate de bis (2-éthylhexyle) qui provoquent aussi des modifications d'histones [14, 15].

Au travers de ces quelques exemples, les modifications épigénétiques consécutives à une exposition aux composés chimiques apparaissent de plus en plus évidentes ; la méthylation de l'ADN ou l'acétylation des histones pourraient constituer de bons biomarqueurs d'effet.

Si ces travaux s'intéressent et décrivent des variations de méthylation de l'ADN et des modifications des histones, ce ne sont pas les seules marques épigénétiques connues. D'autres acteurs de l'épigénétique et du remodelage chromatinien interviennent et influent sur l'expression des gènes. Ils constituent autant de pistes à creuser. Il s'agit des autres modifications des histones (phosphorylation\*, désamination\*, sumoylation\*, adénosine-phosphate (ADP)-ribosylation\*, crotonylation\*...), des ARN non codants\*, des complexes de facteurs transcriptionnels et leurs interactions, sans parler du microbiote\*, qu'il soit buccal ou intestinal, dont on sait que ses modifications peuvent influencer sur le fonctionnement des organismes et des cellules humaines et qu'il est sensible aux expositions à des agents chimiques.

### Conclusion et enjeux de prévention

Aujourd'hui, l'étude des marques épigénétiques reste confinée au domaine expérimental et est en cours de développement dans les études épidémiologiques. Ces approches restent lourdes (tant les méthodologies sont pointues et relativement onéreuses) et demeurent une « affaire de spécialistes ». L'analyse des variations des marques épigénétiques est complexe. Une revue parue en 2023, analysant plus d'une centaine d'articles d'études concernant des expositions professionnelles, montre qu'actuellement, si des modifications épigénétiques sont observées, leur corrélation avec l'exposition reste encore difficile à mettre en évidence [16].

Dans le cas de la méthylation de l'ADN, il existe des spécificités tissulaires et probablement autant de profils de méthylation que de types cellulaires. Par ailleurs, ces modifications dans la méthylation peuvent se propager à travers les générations, rendant l'imputabilité de leur apparition délicate [17]. Elles sont également réversibles, donc potentiellement transitoires, rendant leur détection compliquée. Enfin, les facteurs pouvant biaiser les analyses sont également nombreux : hygiène de vie (tabac, alcool...), nutrition, traitements médicaux, etc.



À présent, il est nécessaire, pour aller plus loin, de recueillir davantage de données, d'élaborer et de disposer de bases de données suffisamment développées pour « intercomparer » les résultats de différentes études, et réaliser une analyse non biaisée des données.

Il n'en reste pas moins que, même si le chemin à parcourir est encore long, la recherche de ces marques épigénétiques, la compréhension de leur rôle, l'analyse de leurs variations, revêtent une importance considérable en prévention, puisqu'elles peuvent être modifiées par une exposition professionnelle. Des travaux de synthèse et de premières compilations de données indiquent déjà que cette piste est à poursuivre.

Pour l'étude des cancérogènes non génotoxiques, Thomson *et al.* [18] considèrent que, puisqu'aujourd'hui l'analyse d'un génome entier est réalisable, la méthylation de l'ADN peut constituer un bon marqueur pour montrer une exposition à des xénobiotiques, et que cette approche devrait être utilisée dans les tests de toxicologie expérimentale. Greally & Jacobs [19] empruntent le même chemin en mentionnant que si des travaux sont encore nécessaires, les marques épigénétiques pourraient être utilisées pour l'évaluation des effets des perturbateurs endocriniens.

Enfin, le groupe d'experts de l'OCDE travaillant sur les améliorations à apporter aux lignes directrices et guides pour la détection des cancérogènes non génotoxiques propose que les recherches intègrent la composante épigénétique dans la conduite des études [20].

Cantonnée principalement aujourd'hui dans les laboratoires de recherche fondamentale, l'épigénétique, avec le développement des techniques et des connaissances, pourrait devenir progressivement une composante de l'évaluation de la toxicité des xénobiotiques et donc de l'évaluation du danger des substances/agents rencontrés en milieu professionnel. Nous en avons décrit quelques prémices.

Le plus grand enjeu sera par la suite de pouvoir faire de ces marques épigénétiques des biomarqueurs d'effet fiables, un outil de diagnostic. Cela suppose encore beaucoup de recherche fondamentale et de développement de techniques, mais ce champ d'investigation est prometteur. La recherche au service de la prévention des maladies professionnelles a donc tout intérêt à poursuivre son investissement dans cette voie. ●

1. Les mots marqués d'un astérisque trouvent leur définition dans le Glossaire p. 111.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] NILSSON E.E. *ET AL.* – Environmentally induced epigenetic transgenerational inheritance of disease. *Environmental epigenetics*, 2018, 4 (2).
- [2] PORTELA A., ESTELLER M. – Epigenetic modifications and human disease. *Nature biotechnology*, 2010, 28 (10), pp. 1057-1068.
- [3] HEYN H.M., ESTELLER M. – DNA methylation profiling in the clinic: applications and challenges. *Nature reviews. Genetics*, 2012, 13 (10), pp. 679-692.
- [4] WHITE A.J. *ET AL.* – Shift work, DNA methylation and epigenetic age. *International journal of epidemiology*, 2019, pp. 1536-1544.
- [5] ERDEM J.S. *ET AL.* – Mechanisms of breast cancer in shift workers: DNA methylation in five core circadian genes in nurses working night shifts. *Cancer*, 2017, 15, pp. 2876-2884.
- [6] BAILEY K.A., FRY R.C. – Arsenic-associated changes to the epigenome: what are the functional consequences?. *Curr. Environ. Health Rep.*, 2014, 1 (1), pp. 22-34.
- [7] DEMANELIS K. *ET AL.* – Association of arsenic exposure with whole blood DNA methylation: an epigenome-wide study of Bangladeshi adults. *Environ. Health Perspect.*, 2019, 127 (5).
- [8] SUN H. *ET AL.* – Modulation of histone methylation and MLH1 gene silencing by hexavalent chromium. *Toxicol. Appl. Pharmacol.*, 2009, 237 (3), pp. 258-266.
- [9] BOLLATI V. *ET AL.* – Changes in DNA methylation patterns in subjects exposed to low-dose benzene. *Cancer Res.*, 2007, 67 (3), pp. 876-880.
- [10] LI G. *ET AL.* – F0 maternal BPA exposure induced glucose intolerance of F2 generation through DNA methylation change in Gck. *Toxicology letters*, 2014, 228, pp. 192-199.
- [11] MAO Z. *ET AL.* – Paternal BPA exposure in early life alters Igf2 epigenetic status in sperm and induces pancreatic impairment in rat offspring. *Toxicology letters*, 2015, 238 (3), pp. 30-38.
- [12] KILCOYNE K.R. *ET AL.* – Fetal programming of adult Leydig cell function by androgenic effects on stem/progenitor cells. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2014, 111 (18), pp. E1924-1932.
- [13] SALEMI R. *ET AL.* – Epigenetic alterations and occupational exposure to benzene, fibers, and heavy metals associated with tumor development. *Molec. Med. Reports*, 2017, 15 (5), pp. 3366-3371.
- [14] LESO V. *ET AL.* – Welding fume exposure and epigenetic alterations: a systematic review. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2019, 16 (10), p. 1745.
- [15] MARCZYLO E.L. *ET AL.* – Environmentally induced epigenetic toxicity: potential public health concerns. *Crit. Rev. Toxicol.*, 2016, 46 (8), pp. 676-700.
- [16] JIMÉNEZ-GARZA O. *ET AL.* – Toxicomethylomics revisited: A state-of-the-science review about DNA methylation modifications in blood cells from workers exposed to toxic agents. *Frontiers in Public Health*, 2023, 11, 1073658. Accessible sur : doi: 10.3389/fpubh.2023.1073658.
- [17] MCBIRNEY M. *ET AL.* – Atrazine-induced epigenetic transgenerational inheritance of disease, lean phenotype and sperm epimutation pathology biomarkers. *PLoS One*, 2017, 12 (9), p. e0184306.
- [18] THOMSON J.P. *ET AL.* – Epigenetic profiles as defined signatures of xenobiotic exposure. *Mutat. Res. Genet. Toxicol. Environ. Mutagen.*, 2014, 764-765, pp. 3-9.
- [19] GREALLY J.M., JACOBS M.N. – *In vitro* and *in vivo* testing methods of epigenomic endpoints for evaluating endocrine disruptors. *ALTEX*, 2013, 30 (4), pp. 445-471.
- [20] JACOBS M.N. *ET AL.* – Chemical carcinogen safety testing: OECD expert group international consensus on the development of an integrated approach for the testing and assessment of chemical non-genotoxic carcinogens. *Arch. Toxicol.*, 2020, 94 (8), pp. 2899-2923.

# GLOSSAIRE

## Définitions des termes utilisés en épigénétique (marqués d'un astérisque dans l'article)

**ADN** : Acide désoxyribonucléique, acide nucléique constitué de deux brins enroulés en double hélice, porteur de l'information génétique.

**Adénosine phosphate (ADP)-ribosylation** : Ajout d'un groupe ADP ribose sur certains acides aminés.

**ARN** : Acide ribonucléique, produit par la transcription\* de l'ADN.

**ARN messager (ARN m)** : Issu de la transcription d'un gène. C'est une copie transitoire de l'ADN qui sera utilisée lors de la traduction pour synthétiser une ou des protéines.

**ARN non codant** : ARN issu de la transcription de l'ADN mais qui n'est pas traduit en protéine.

**Bases de l'ADN** : Composés organiques azotés. Les bases de l'ADN sont l'adénine, la thymine, la guanine ou la cytosine.

**Biomarqueur** : Toute substance, structure ou processus pouvant être mesuré(e) dans le corps humain ou les matrices biologiques, utilisé(e) notamment comme indicateur d'un processus biologique normal ou pathologique.

**Biomarqueur d'effet** : Altération biochimique, physiologique, comportementale ou autre, mesurable dans un organisme, qui, selon son ampleur, peut être reconnue comme étant associée à une atteinte confirmée ou possible de l'état de santé ou à une maladie.

**Biosurveillance** : Discipline scientifique ayant comme principal objectif l'évaluation du risque chimique et qui, en milieu professionnel, cherche à objectiver l'imprégnation de salariés ayant été exposés à des substances chimiques, ou biologiques (endotoxines, mycotoxines) au moyen de mesures de concentration de substances ciblées, ou de leurs métabolites, dans des matrices biologiques (urine, sang, condensat de l'air exhalé).

**Chromatine** : Association d'ADN, d'ARN et de protéines au sein du noyau sous une forme non structurée, plus ou moins compactée.

**Chromosome** : Constitué d'une molécule d'ADN et de protéines (histones et non histones). Correspond à une structure condensée de l'ADN caractéristique en forme de X, de Y ou de bâtonnet.

**Crotonylation** : Ajout d'un groupement crotonyl à la lysine.

**Désamination (ou citrullisation de l'arginine)** : Transformation de l'acide aminé arginine en acide aminé citrulline par la perte d'un groupement azoté.

**Éléments transposables ou transposons** : Séquences d'ADN capables de se déplacer dans le génome. Ce sont des séquences mobiles de l'ADN.

**Exon** : Fragment d'un gène conservé lors de la transcription en ARN.

**Facteur de transcription** : Protéine nécessaire à l'initiation ou la régulation de la transcription d'un gène.

**Gène** : Segment d'ADN, qui, après lecture, permet la synthèse d'une ou de plusieurs protéines. Élément porteur d'une information héréditaire nécessaire au fonctionnement des cellules. Les gènes sont constitués d'une suite de segments d'ADN nommés introns et exons selon qu'ils sont transcrits ou non en ARN messager (ARNm).

**Gènes suppresseurs de tumeurs (ou anti-oncogènes)** : Gènes le plus souvent identifiés comme ayant une action de régulateurs négatifs dans la prolifération cellulaire. Les protéines codées par ces gènes régulent le cycle cellulaire et/ou déclenchent la mort

cellulaire programmée. Ils sont souvent mutés et non fonctionnels dans les cancers.

**Histone** : Protéine du noyau se liant à l'ADN, indispensable pour former les différentes structures de l'ADN. L'acétylation des histones, qui consiste en la liaison d'un groupement acétyle sur un acide aminé (lysine), modifie la conformation de la structure de la chromatine dans le noyau en relaxant la chromatine et en permettant l'activation de la transcription.

**Îlot CpG** : Région de l'ADN où le dinucléotide CpG (voir nucléotide) est fortement représenté. Les îlots CpG correspondent fréquemment au promoteur et au premier exon des gènes.

**Méthylation de l'ADN** : Ajout d'un groupe méthyle (CH<sub>3</sub>) principalement au niveau des cytosines et adénines de l'ADN.

**Microbiote** : Ensemble des microorganismes présents dans un écosystème donné. Ici, le microbiote buccal est constitué des microorganismes présents dans la bouche. Au niveau intestinal on parle couramment de flore intestinale humaine.

**Nucléotide** : Les nucléotides sont constitués par l'association d'un sucre, de groupements phosphates et d'une base azotée (adénine A ou cytosine C ou guanine G ou thymine T).

**Phosphorylation** : Ajout d'un groupement phosphate. Sur les histones, cette phosphorylation intervient lors de la condensation de l'ADN en chromosome, au moment de la division cellulaire et aussi lors de la réparation de l'ADN.

**Pluripotentes (cellules pluripotentes)** : Cellules ayant la capacité de se différencier en plusieurs types cellulaires. Ce sont des cellules souches rencontrées précocement lors du développement, elles ne sont en revanche pas capables de se différencier en n'importe quel type cellulaire (on parle alors de cellules totipotentes).

**Promoteur (région promotrice)** : Région, séquence d'ADN située près d'un gène et indispensable à sa transcription et à sa régulation.

**Protéine** : Macromolécule biologique formée d'une ou plusieurs chaînes d'acides aminés.

**Remodelage chromatinien** : Changement de conformation de la chromatine.

**Séquence** : Enchaînement, succession de nucléotides.

**Séquençage** : Lecture des nucléotides et de l'ordre de leur enchaînement.

**Séquences répétées** : Séquences d'ADN retrouvées de nombreuses fois. Composantes majoritaires du génome humain, on en trouve de plusieurs types, nommées ADN satellites, transposons, rétro-transposons suivant leurs caractéristiques. Elles sont le plus souvent non codantes.

**Sumoylation** : Ajout d'une protéine SUMO sur une lysine.

**Transcription** : Synthèse d'ARN à partir d'ADN.

**Xénobiotique** : Se dit d'une molécule étrangère à un organisme vivant et considérée comme toxique.



## ACTUALITÉS

### INFOS À RETENIR

- Personnes se déclarant électrohypersensibles : repères pour la pratique médicale
- La souffrance psychique en lien avec le travail à partir du programme de surveillance des maladies à caractère professionnel

### NOUVEAUTÉS DE L'INRS

- Affiches, 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

### VU DU TERRAIN

- Déterminants organisationnels des accidents du travail : une analyse longitudinale du point de vue de l'employeur
- Dispositifs médicaux en atmosphère explosive

### PRATIQUES ET MÉTIERS

- Épilepsie et travail: recommandations sur la conduite à tenir dans le cadre d'une décision concernant l'adéquation entre l'état de santé et le poste de travail

### SUIVI POUR VOUS

- Les fins de vies actives à l'épreuve des conditions de travail. Séminaire annuel du CREAPT. Paris, 15-16 mai 2023
- Travailleurs intérimaires et santé - Journée de l'Institut de médecine du travail de Lorraine. Nancy, 3 octobre 2023

- Charge de travail et chronobiologie: la nécessité de concilier les organisations de travail et la santé. Journée ISTNF. En distanciel, 16 novembre 2023
- Prévenir les troubles musculo-squelettiques ou concevoir le travail futur? Et si on tenait les deux? Séminaire équipe Ergonomie du CNAM. Paris, 23-24 novembre 2023

## OUTILS REPÈRES

### VOS QUESTIONS/NOS RÉPONSES

- Exposition aux poussières de coquilles de noix: quel suivi médical et quelles mesures de prévention?

### ALLERGOLOGIE PROFESSIONNELLE

- Dermatitis de contact professionnelles aux fluides de coupe

### RADIOPROTECTION: SECTEUR RECHERCHES

- Appareils électriques émettant des rayons X

## À VOTRE SERVICE

### AGENDA-FORMATION 2024-2025

Retrouvez la revue et abonnez-vous gratuitement sur :

[www.inrs.fr/rst](http://www.inrs.fr/rst)



## **HYGIÈNE & 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 :  
2<sup>e</sup> trimestre 2024  
n°24010060  
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**

Service Magasin, gestion,  
diffusion, édition et  
reproduction (MGDER)  
Hygiène & sécurité du travail  
Rue du Morvan, CS 60027  
Tél.: 03 83 50 20 08 /  
03 83 50 98 61  
[abo.revues@inrs.fr](mailto:abo.revues@inrs.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](http://www.hst.fr)**