



« PRÉVENTION ASSISTÉE PAR ORDINATEUR » : MAÎTRISER LES RISQUES À L'AIDE D'OUTILS NUMÉRIQUES

❶ Apports des modèles numériques et des logiciels de calcul à la prévention
P. 26

❷ Bruit: prévoir le niveau sonore dans un local
P. 33

❸ Champs magnétiques: évaluer les perturbations électriques à l'intérieur du corps humain
P. 39

❹ Risque chimique: prédire l'impact du vent sur les systèmes de ventilation
P. 44

❺ Poussières: simuler pour mieux respirer
P. 48

Un certain nombre de questions techniques posées aux spécialistes de la prévention des risques professionnels nécessitent parfois des calculs complexes pour y répondre. Par exemple: comment évaluer les effets des bruits de plusieurs machines qui seront installées dans un local en construction ou en projet? Quels seront les courants électriques induits à l'intérieur des bras des soudeurs par les champs électromagnétiques émis au poste de travail? Comment le vent ou les circulations d'air extérieur peuvent-ils perturber, sur un chantier clos, un système de ventilation essentiel pour préserver la santé des travailleurs? Ou encore, quelles seront les émissions de poussières à la base d'une trémie lors de sa vidange...? L'INRS a mis au point, testé ou enrichi plusieurs outils - Rayplus pour le bruit, Catrayon pour les rayonnements optiques... D'autres existent sur le marché. Si certains dispositifs numériques sont depuis longtemps testés et mis en œuvre (bruit, circulation de l'air), d'autres (évaluation du champ magnétique par exemple) méritent d'être encore améliorés par de futurs travaux. Ce dossier présente plusieurs travaux, menés par l'INRS et d'autres organismes de recherche ou de prévention, destinés à aider les spécialistes de la prévention des risques professionnels dans leurs missions, ainsi que leurs états d'avancements ou de stabilisation des résultats obtenus.

“COMPUTER-ASSISTED PREVENTION”: CONTROLLING RISKS WITH DIGITAL TOOLS – *A certain number of technical questions put to occupational risk prevention specialists sometimes require complex calculations. How to assess the noise effects of several machines that will be set up in an area under construction or being designed? What electrical currents will be generated inside welders' arms by electromagnetic fields emitted at the workstation? How can wind or outside air circulation disrupt, at an isolated worksite, the ventilation system essential for protecting the health of workers...? Etc. All complex issues to which simulation tools - digital models, software, etc. - can provide answers. INRS has developed, tested or enhanced several such tools - Rayplus for noise, Catrayon for optical radiation, etc.*

APPORTS DES MODÈLES NUMÉRIQUES ET DES LOGICIELS DE CALCUL À LA PRÉVENTION

Les simulations numériques profitent de la puissance toujours accrue des ordinateurs et calculateurs. Les modèles et les calculs numériques permettent d'obtenir des résultats intéressants la prévention des risques professionnels à plusieurs niveaux : évaluation des risques, validation de solutions, formation et sensibilisation. Réservées autrefois aux spécialistes (les numériciens), les simulations se sont aujourd'hui démocratisées et sont utilisables parfois, quand elles sont bien validées, par des préventeurs de terrain.

JACQUES
CHATILLON
INRS,
département
Ingénierie des
équipements
de travail

Simulations, modèles, calculs : de quoi parle-t-on ?

La prévention des risques professionnels s'appuie sur des études et recherches qui permettent de développer de nouvelles connaissances. Les actions de prévention s'appliquent ensuite à des situations de travail déjà en place mais ayant besoin d'être améliorées, ou à des projets nécessitant d'être évalués *a priori*. Dans les deux cas, des simulations, utilisant un modèle, mises en œuvre grâce à des ordinateurs ou calculateurs, sont couramment utilisées.

Le modèle est une représentation souvent très simplifiée d'une entité ou d'un système plus complexe, d'un phénomène naturel ou d'un processus artificiel. La première qualité d'un modèle, c'est de donner une représentation de la réalité, même si souvent cela n'est possible que pour certaines gammes de paramètres. Sur la base d'un modèle établi et connaissant ou supposant des paramètres d'entrée, les logiciels de calcul permettent aisément d'obtenir des résultats qui seraient très difficiles à appréhender par d'autres moyens.

Les champs d'application de la simulation numérique sont aujourd'hui très larges, puisqu'il s'agit de tirer profit de la puissance actuelle des ordinateurs et calculateurs pour obtenir des résultats exploitables, sans avoir besoin d'effectuer une expérimentation. Les simulations mettent en œuvre toutes les disciplines : physique et mécanique (des solides ou des fluides), chimie, biologie..., et les sciences et techniques s'intéressant aux systèmes complexes naturels (météorologie) ou artificiels (machines, systèmes de production). La prévention des risques physiques et mécaniques, comme celle du risque chimique, entrent donc tout naturellement dans le champ des possibles de la simulation numérique. Des ordinateurs aux capacités toujours accrues per-

mettent aussi, aujourd'hui, d'effectuer des simulations en temps réel interagissant, comme les jeux vidéo, avec des situations de travail complètement ou partiellement simulées (simulateurs de conduite, jeux sérieux...).

Intérêts et limites de la simulation

L'utilisation des modèles numériques est aujourd'hui incontournable, car les intérêts que présentent ces outils sont multiples.

Simplicité : quelques paramètres d'entrée bien choisis appliqués à un modèle du commerce (ou en licence libre), déjà validé par une communauté scientifique, permettent d'obtenir des premiers résultats en toute confiance.

Souplesse : il est possible de faire varier facilement les valeurs des données d'entrée du modèle et de relancer un calcul comparatif.

Faible coût et rapidité : comparés à ceux provenant d'une expérimentation en laboratoire ou de la construction d'un prototype physique, utilisant du matériel coûteux (sans parler des coûts salariaux), les résultats apportés par la plupart des simulateurs (hormis ceux qui utilisent des super-ordinateurs) sont peu coûteux et rapides à obtenir.

Disponibilité : certaines expériences nécessitent d'obtenir des paramètres spécifiques qui peuvent être quasiment impossibles à obtenir (comme au cœur d'un réacteur nucléaire ou à l'intérieur du corps humain) ou de réunir des conditions expérimentales indisponibles sur de longues périodes (travaux, conditions météorologiques, par exemple). Dans ces cas, remplacer complètement les expé-

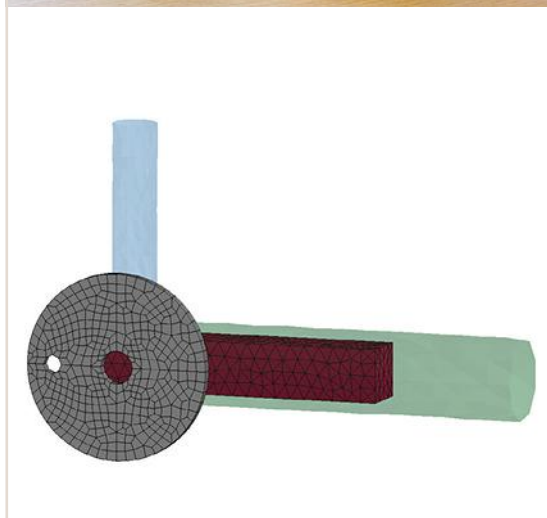
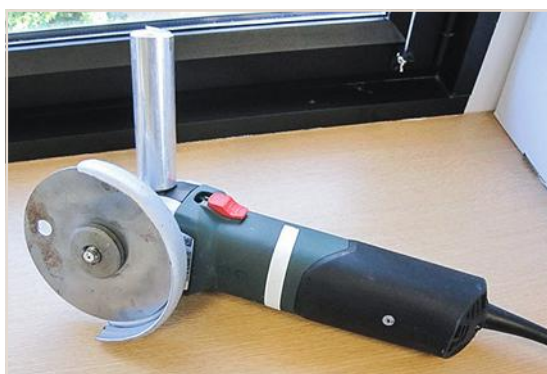
riences par des simulations permet d'obtenir quand même des résultats.

Puissance: les supercalculateurs d'aujourd'hui digèrent des quantités considérables de données qui ne pourraient être digérées par des opérateurs humains, ni réalisées par des expériences (prévisions météorologiques par exemple).

Visibilité des résultats: la plupart des simulateurs sont directement couplés à des logiciels de visualisation et d'analyse des résultats, qui permettent de les exploiter très rapidement et facilement.

Cette grande liste d'avantages doit évidemment se lire en considérant également toutes les limites et inconvénients de ces outils de calcul.

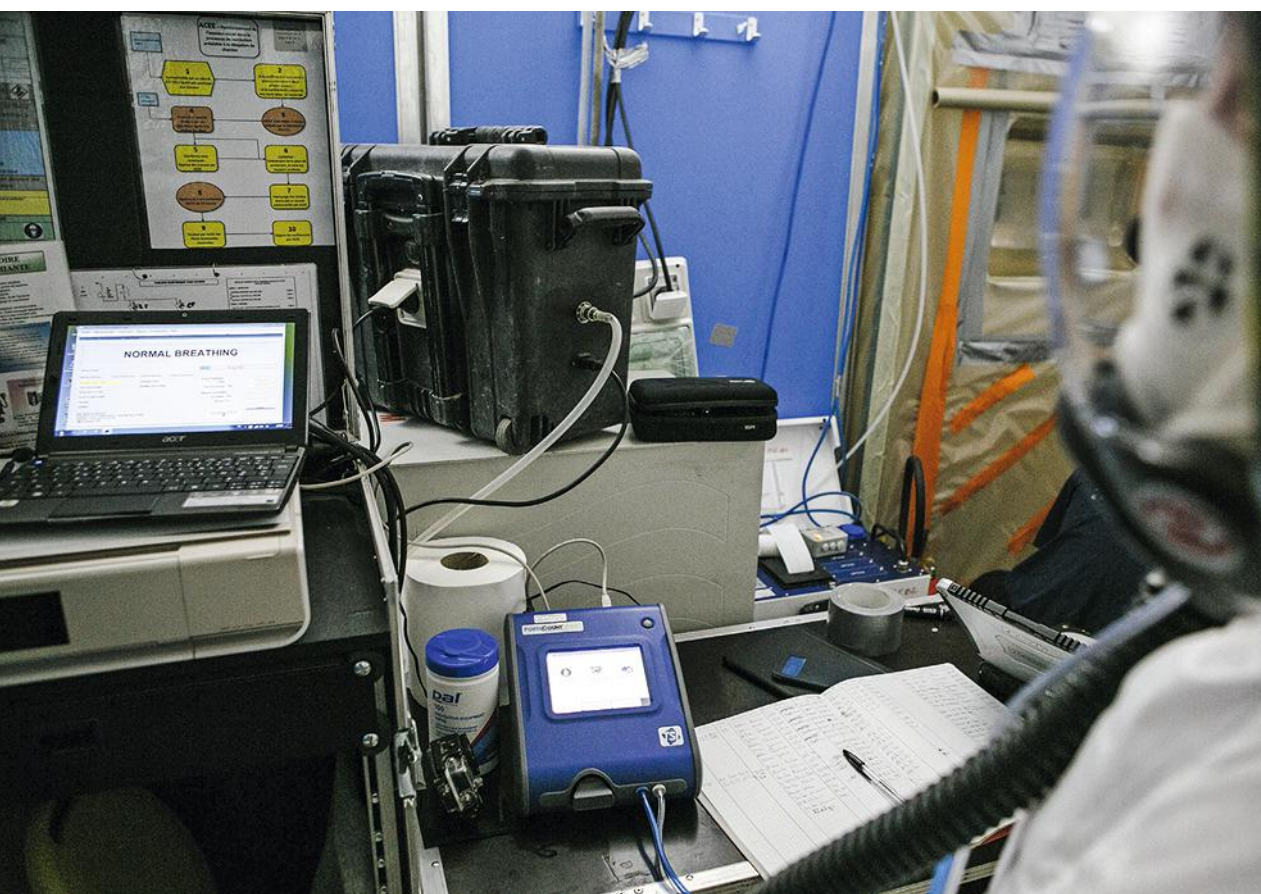
Validation: avant d'être validé, un modèle doit être confronté à des expériences ou des observations afin d'évaluer sa capacité à représenter des situations réelles. Un modèle complètement nouveau est souvent très difficile à développer et valider complètement tandis que l'usage, ou même l'amélioration, de simulateurs déjà éprouvés par d'autres utilisateurs est moins risquée. Une autre pratique consiste à comparer des modèles numériques entre eux (à l'image des essais inter-laboratoires).



© INRS

© INRS

← FIGURE 1
Photo d'une meuleuse et dessin de son modèle numérique (éléments finis). Les parties de la meuleuse essentielles pour les calculs sont distribuées sur une multitude de petits éléments physiques obéissant aux équations de la mécanique.



© Vincent Nguyen pour l'INRS/2014

Tout ne peut pas être facilement simulé. Ici, Fit test (essais d'ajustement par mesures) d'un masque de protection respiratoire pour un chantier de désamiantage.





FIGURE 2 →
Modèle de local
et de sources
sonores en
entrée de calcul
d'acoustique
prévisionnelle.

© INRS

Limites: les hypothèses de construction et le champ d'application du modèle doivent toujours être gardés en mémoire. La simplification du réel, imposée par le modèle, est souvent une source de discussion de la validité ou de l'applicabilité des résultats.

Perte du sens critique: c'est un risque d'erreur auquel est soumis un utilisateur, un peu trop confiant en son modèle. Les résultats doivent toujours être analysés avec un esprit critique, celui qui les interprète doit garder en mémoire les limites du modèle, la validité des ordres de grandeurs (1, 10, 100...) et l'infailibilité de la règle de trois.

D'autre part, pour la prévention des risques professionnels, la prise en compte du facteur humain demeure un problème très mal résolu par la modélisation (Cf. Photo page précédente), même si des comportements collectifs (circulation des foules par exemple) sont modélisables. La charge cognitive liée aux exigences de la tâche, au traitement complexe d'informations, de même que les exigences psychologiques liées aux impératifs de rapidité, de qualité, de respect des consignes sont très variables d'une situation de travail à une autre et d'une personne à une autre. De nombreux facteurs (compétence, expérience, histoire personnelle, état de santé, qualité des relations interpersonnelles) interviennent. Difficilement modélisables ou quantifiables, ces facteurs contribuent à la variabilité des situations de

travail. Or, toutes ces sources de variabilité liées à l'intervention humaine sont imparfaitement modélisées - ou ignorées - par les modèles mathématiques. L'interprétation des résultats des simulations doit donc toujours être effectuée à la lumière des limites et des imperfections du modèle utilisé.

Ingénierie de prévention des risques professionnels: du modèle mathématique aux outils appliqués

L'ingénierie de prévention, développée pour réduire l'exposition des salariés aux facteurs de risques, utilise quotidiennement la simulation, les modèles, les calculs. Si certains outils ne sont dédiés qu'à la recherche ou à la validation de solutions techniques, d'autres peuvent aussi être développés pour être utilisés directement par des préventeurs d'entreprise. Par exemple, pour les calculs mécaniques, les méthodes numériques classiquement utilisées en recherche et développement permettent de tester la résistance d'une équerre d'arrimage [1] ou de vérifier la pertinence d'une méthode d'arrimage de bouteilles de gaz [2].

D'autres calculs permettent d'optimiser la performance de butées de sièges antivibratiles [3], de prédire le renversement d'un chariot élévateur [4], le comportement dangereux d'une meuleuse qui se bloque [5] (Cf. Figure 1) ou les vibrations émises par un burineur [6].

ENCADRÉ 1

DES SECTEURS INDUSTRIELS PRÉCURSEURS: L'AÉRONAUTIQUE, LE NUCLÉAIRE

Dans l'aéronautique, la simulation a été, dès les prémices de l'aviation, développée pour l'apprentissage des personnels navigants puis des contrôleurs aériens. Le simulateur de vol est aujourd'hui capable de reproduire fidèlement l'environnement du pilote: cabine de pilotage et environnement extérieur comme l'avion lui-même: systèmes avioniques et mécanique du vol [19]. Le simulateur réduit les coûts (carburant, usure des appareils), il est disponible même en cas de mauvais temps, et il est sans risque en cas d'erreur. On connaît bien l'importance de commettre des erreurs dans les processus d'apprentissage, d'où l'intérêt de cette caractéristique. Le simulateur permet d'assimiler les procédures standard mais aussi d'affronter des situations rarement rencontrées dans la réalité, mais très dangereuses. Historiquement, c'est dans l'industrie nucléaire [20] que s'est ensuite diffusée la simulation des situations de travail pour ces caractéristiques d'absence de risque pour les apprenants et leur environnement, tout autant que pour la possibilité d'apprendre à se confronter à des situations extrêmement peu probables mais très risquées. Plus tard, pour les mêmes raisons, dans l'industrie chimique [21] et dans le domaine médical (chirurgie, médecine d'urgence [22]) des simulateurs se sont répandus.

Dans le domaine des nuisances physiques ou chimiques, l'exposition des salariés peut être déduite d'une prévision du transport ou de la propagation, depuis une source et jusqu'au poste de travail, de nuisances tels que le bruit, les ondes électromagnétiques ou les rayonnements optiques, ou bien encore des polluants atmosphériques. De nombreux logiciels de simulation sont utilisés pour ces estimations, d'abord pour comprendre les tenants et aboutissants de situations réelles complexes, quand la mesure devient difficile. Dans un deuxième temps, alors qu'on a compris quels sont les paramètres influents, les calculs permettent d'évaluer des solutions d'améliorations de ces situations de travail.

En ce qui concerne le bruit, l'INRS a développé dès les années 1980 le logiciel d'acoustique prévisionnelle Rayplus [7], qui permet d'optimiser la conception acoustique et l'aménagement d'un local de travail bruyant (Cf. Figure 2). Ce logiciel a été sans cesse amélioré pour prendre en compte aujourd'hui les spécificités du tertiaire: sources multiples et diffraction des ondes sonores par le mobilier [8]. Il est distribué aux préventeurs ayant des connaissances suffisantes en acoustique. Un article sur l'acoustique prévisionnelle (Cf. p. 33) détaille les possibilités et les utilisations phares de ce modèle.

L'exposition aux rayonnements optiques est, quant à elle, évaluable simplement par un outil déve-

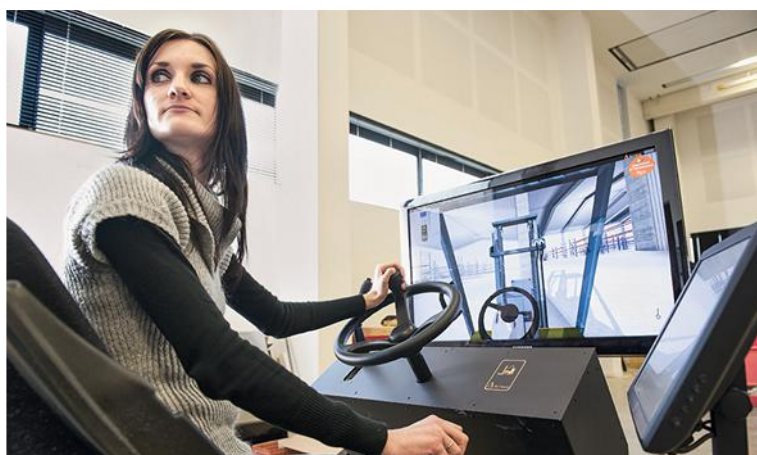


Tube à chocs dans la chambre anéchoïque de l'INRS: ce type d'expérience aide à valider les modèles.

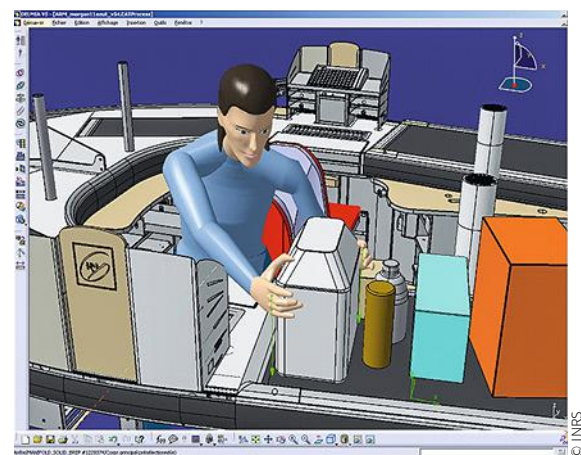
© Serge Morillon/INRS/2019



FIGURE 3A →
Écran de
visualisation
du logiciel
MavImplant.



↑ FIGURE 3B Simulateur de conduite de chariot élévateur Simchar développé par l'INRS et commercialisé par Acréos.



↑ FIGURE 3C Mannequin numérique pour l'optimisation de l'ergonomie d'un poste de travail.

loppé et distribué aussi par l'INRS, Catrayon [9], amélioré au fil des années pour prendre en compte des environnements plus complexes et des moyens de protection.

Pour les champs électromagnétiques, alors que l'exposition des salariés doit, dans certaines conditions, être évaluée à l'intérieur du corps humain, seuls des logiciels de simulation permettent d'obtenir des grandeurs (champ électrique, champ magnétique) inaccessibles à la métrologie directe [10]. Un article (Cf. p. 39) détaille les problématiques actuelles liées à ces évaluations.

Pour ce qui concerne les effets des vibrations sur la santé des travailleurs, certaines méthodes de mesure de l'exposition vibratoire sont aujourd'hui en partie remises en cause. C'est le cas des courbes de pondération en fréquence de l'amplitude vibratoire exposant le système main-bras. Des recherches utilisant largement de nombreux modèles numé-

riques de biomécanique sont développées pour améliorer les connaissances à ce sujet [11].

Dans le domaine de la ventilation, l'avènement de calculateurs puissants a permis progressivement de simuler les ambiances thermiques ou les concentrations en polluants en régime permanent dans des locaux de géométrie complexe et de grandes dimensions [12, 13]. Depuis peu, il est devenu possible de traiter également des phénomènes transitoires tels que les écoulements d'air et de polluants induits par les outils ou les objets mobiles (meuleuses, scies circulaires, ouverture - fermeture de sorbonnes de laboratoire, passage de personnes), ou les effets intermittents du vent à l'extérieur des bâtiments sur les réseaux de ventilation. Un article (Cf. p. 44) montre ainsi l'intérêt de tels modèles pour prévenir, dans les grands immeubles, la dégradation des performances des systèmes de confinement aéroulque par le vent extérieur.

Les polluants peuvent aussi être émis dans des conditions complexes, difficiles à étudier expérimentalement. Par exemple des poussières sont émises quand des matériaux pulvérulents sont manipulés ou empaquetés, il est alors fréquent qu'une partie soit dispersée dans l'air des lieux de travail. Un article (Cf. p. 48) montre tout l'intérêt de la simulation pour de tels calculs.

Pour finir, la compréhension de la formation et du comportement des trichloramines en fonction des paramètres de fonctionnement d'une piscine est aujourd'hui accessible grâce à des modèles réalistes à la portée du préventeur [14].

L'intégration des postes de travail

Toutes les qualités de la simulation peuvent depuis quelques années bénéficier à l'intégration des postes de travail dans d'autres secteurs que ceux dans lesquels elle a d'abord été expérimentée - en particulier, l'aéronautique ou le nucléaire (Cf. Encadré 1). La baisse des coûts du calcul numérique, l'amélioration des interfaces graphiques (grand réalisme, temps réel) tout autant que l'augmentation de la puissance de calcul ont contribué à la « démocratisation » des simulateurs de postes de travail dans d'autres secteurs. En matière de prévention des risques professionnels, les simulateurs sont par exemple utilisés pour la conception sûre d'un local, comme par exemple MavImplant, développé par l'INRS [15] (Cf. Figure 3-a). Tout autant, ils permettent la conception du poste de travail et son optimisation sous contraintes, en production comme pour d'autres phases de vie des équipements (maintenance par exemple). Certains utilisent la réalité virtuelle, et d'autres la réalité augmentée (intégrant un modèle numérique dans un environnement réel filmé), par exemple pour sensibiliser sur les risques de troubles musculosquelettiques [16]. Enfin, ils sont très utiles pour l'apprentissage des nouveaux opérateurs devant se confronter avec la situation de travail comme lors de l'apprentissage de la conduite d'un chariot élévateur, en tenant compte de sa propre sécurité et de celle d'autrui [17] (Cf. Figure 3-b). Les plus récents utilisent des mannequins numériques qui, à l'instar des personnages des jeux vidéo, se déplacent dans un environnement modélisant le poste [18] (Cf. Figure 3-c). On peut également citer tous les supports de simulation de type « jeux sérieux » qui présentent un intérêt pour la prévention (Cf. Encadré 2).

Conclusion

Il serait aujourd'hui difficile de se passer des outils numériques tant ils sont accessibles, rapides, peu coûteux et surtout, tant ils donnent des résultats intéressants à exploiter. Il est d'ailleurs prévisible qu'ils ne cesseront de s'améliorer en termes de puissance et de réalisme. Néanmoins, l'utilisateur

ENCADRÉ 2 JEUX VIDÉO, SERIOUS GAMES

Un jeu sérieux (de l'anglais *serious game*) est une activité qui combine une intention « sérieuse » – pédagogique, d'information ou de communication, etc. – avec des ressorts ludiques. Tous les jeux de société, jeux de rôle et jeux vidéo qui s'écartent du seul divertissement peuvent être qualifiés de jeux sérieux. La vocation d'un jeu sérieux est donc de rendre attrayante la dimension sérieuse par une forme, une interactivité, des règles et éventuellement des objectifs ludiques (récompenses...).

- « Intérim mission 3D » (INRS, retiré du catalogue) : un jeu vidéo avait été conçu et promu par l'INRS en 2003. Le jeu vidéo Intérim mission 3D avait reçu le prix de la catégorie Prévention et sécurité. Il s'agissait d'un jeu vidéo interactif destiné aux trois acteurs du travail temporaire (intérimaires, agences et entreprises utilisatrices), qu'il sensibilisait à l'importance du dialogue entre les acteurs pour éviter les accidents.
- « Attention ! Plancher glissant » (IRSST, Québec - site web et jeu interactif) est un outil de sensibilisation et de formation pour les jeunes travailleurs exposés au risque de glissades et de chutes de plain-pied dans leur milieu de travail, particulièrement dans le secteur de la restauration.
- Des sociétés éditent régulièrement ce genre de supports pédagogiques, standard ou à la demande (Cf. Figure 4).



↑ FIGURE 4 Serious game commercial.

doit rester vigilant quant aux limites des modèles sur lesquels reposent ces outils et aux hypothèses simplificatrices utilisées.

En dehors des voies classiques, comme celles par exemple du calcul mécanique des ingénieurs modélisant le comportement d'un équipement de travail, c'est sur trois grandes applications pour la prévention des risques professionnels que les modèles numériques pourront être encore plus utiles :

- **dans des étapes d'évaluation du risque:** la prévision des expositions dans des cas où leur évaluation par la mesure est difficile ou impossible;

- **dans des étapes de réduction des risques:** la conception des équipements, locaux, lieux et postes de travail, pour lesquels l'aide aux utilisateurs de ces outils peut être extrêmement efficace par l'inté-

gration de règles, de bibliothèques de solutions ou de bases de données;

- **dans des étapes de formation ou de sensibilisation des salariés** avec des outils permettant de rencontrer des situations concrètes scénarisées, tout en évitant de se retrouver dans des situations réellement risquées. ●

Remerciements

L'auteur remercie la société 2J Process pour les images des « jeux sérieux » tirées de ces produits logiciels.

BIBLIOGRAPHIE

[1] FLEURY G. – Des aménagements intérieurs de camionnettes plus sûrs en cas d'accident de la route. *Hygiène et sécurité du travail*, décembre 2013, 233, NT 6, pp. 42-47. www.hst.fr

[2] LEMERLE P. – Validation de moyens d'arrimage pour le transport des paniers et cadres de bouteille de gaz. *Hygiène et sécurité du travail*, 2012, 228, ND 2362, pp. 15-25. www.hst.fr

[3] REBELLE J. – Optimisation des caractéristiques de butées de fin de course de sièges à suspension. *Hygiène et sécurité du travail – Cahiers de notes documentaires*, 2004, 194, ND 2204, pp. 23-38. www.hst.fr

[4] REBELLE J., MISTROT P., POIROT R. – Développement et validation d'un modèle numérique de chariot automoteur afin de prédire son renversement. *Hygiène et sécurité du travail – Cahiers de notes documentaires*, 2007, 207, ND 2268, pp. 13-30. www.hst.fr

[5] FLEURY G. – Numerical model to predict kickback for angle grinders. In: *Proceedings 11th European LS-DYNA Conference 2017*, Salzburg (Autriche), 10 p.

[6] FLEURY G. – Numerical modeling of vibration emitted by pneumatic chipping hammers. In: *Proceedings of the 14th International Conference on Hand- Arm Vibration*, Bonn (Allemagne), 21-24 mai 2019, 978-3-86423-228-2, pp. 71-72.

[7] TROMPETTE N., CHATILLON J. – La prévention de l'exposition au bruit. *Hygiène et sécurité du travail*, juin 2011, 223, pp. 153-158. www.hst.fr

[8] CHEVRET P., CHATILLON J. – Prise en compte de la diffraction dans un code de rayon acoustique. In: *Actes du 10^e Congrès Français d'Acoustique*, CFA 20100, Lyon, 12-16 avril 2010.

[9] BARLIER-SALSI A. – Mesurer et évaluer l'exposition professionnelle aux rayonnements optiques artificiels (hors laser) Guide méthodologique. INRS, Note scientifique et technique NS 347, 2016, 51 p. Accessible sur: www.inrs.fr

[10] BOULDI M. – Évaluation de l'exposition EM des travailleurs pendant les processus de soudage 50 Hz. In: *Proceedings of the BioEM 2018 Congress*, Slovenia, 25-29 juin 2018, pp. 105-108.

[11] NOËL C. – Une approche multi-échelles pour la prédiction de certains effets aigus et chroniques des vibrations mécaniques sur le réseau vasculaire digital. In: *Actes de congrès de la 7^e conférence américaine sur les vibrations humaines*, Seattle (USA), 13-15 juillet 2018, pp. 93-94.

[12] BRACONNIER R. – Centres de contrôle technique poids lourds: ventilation des fosses de visite. *Hygiène et sécurité du travail*, septembre 2018, 253, NT 69, pp. 62-70. www.hst.fr

[13] BRACONNIER R., FONTAINE J.R., COURTOIS B. – Chantiers de curage et de démolition intérieure: quelle ventilation installer? *Hygiène et sécurité du travail*, septembre 2017, 249, NT 55, pp. 44-50. www.hst.fr

[14] GERARDIN F. – Trichloramine: de l'émergence d'un risque aux solutions de prévention. *Hygiène et sécurité du travail*, décembre 2016, 245, NT 44, pp. 58-65. www.hst.fr

[15] CANETTO P., MARSOT J. – Conception des espaces de travail: la prévention en amont. *Hygiène et sécurité du travail*, mars 2016, 242, NT 35, pp. 42-45. www.hst.fr

[16] DENIS D., LARUE C. – Voir l'invisible: l'utilisation d'avatars. In: *Colloque IRSST 2017*. Accessible sur: https://medias.irsst.qc.ca/videos/1711_et_co_HD_avatars_fr_pdf.pdf

[17] En bref – Chariots élévateurs. Simuler pour mieux former. *Travail et sécurité* n° 726, octobre 2012, p. 11. Accessible sur: www.travail-et-securite.fr

[18] MARSOT J. – Apports et limites des mannequins virtuels pour la conception des postes de travail. *Hygiène et sécurité du travail*, juin 2015, 239, CC 9, pp. 76-79. www.hst.fr

[19] ALBAN M. – Les simulateurs de vol: de l'histoire à la pratique. Accessible sur: [www.aerospi.fr/Documents/Presentations/Conferences/Marc ALBAN - Simulateurs.pdf](http://www.aerospi.fr/Documents/Presentations/Conferences/Marc%20ALBAN%20-%20Simulateurs.pdf) (consulté le 21/08/2019).

[20] PERKINS T. – Technologie de la simulation et formation de l'exploitant. *AEIA Bulletin*, Automne 1985. Accessible sur: www.iaea.org/sites/default/files/27305291824_fr.pdf (consulté le 21/08/2019).

[21] CONJARD P. – Formation et simulation de situations de travail: développer des compétences à partir d'un simulateur de conduite, premiers retours d'expérience. Lavoisier, coll. Distances et savoirs, 2003/3, Vol. 1, pp. 361-374.

[22] VITIELLO L. ET AL. – Apport de la simulation dans la formation aux évacuations aéromédicales. *Médecine et armées*, 2017, 45, 5, pp. 563-572.

BRUIT: PRÉVOIR LE NIVEAU SONORE DANS UN LOCAL

Les modèles d'acoustique prévisionnelle reposent sur des formulations mathématiques qui visent à représenter le plus fidèlement possible, mais souvent de façon simplifiée, la propagation des ondes sonores dans un local. Comme tous les modèles, ils nécessitent aussi de décrire précisément les paramètres d'entrée (forme du local, sources, etc.) pour obtenir un résultat fiable. Ils présentent des limites mais restent incontournables pour prévenir les risques liés au bruit dans le cas de la création ou du réaménagement d'un local de travail.

PATRICK CHEVRET, JACQUES CHATILLON, LUCAS LENNE
INRS, département Ingénierie des équipements de travail

Modèles d'acoustique prévisionnelle

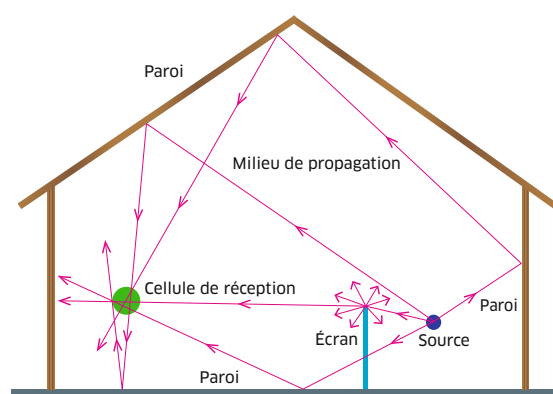
Pour prédire la propagation du bruit dans un local de travail, les modèles doivent prendre en compte les interactions des ondes sonores avec les éléments physiques qui composent le local (les murs, le plafond, le sol) et son aménagement. Les phénomènes physiques que doit s'attacher à décrire le modèle sont, de façon très schématique, la réflexion, l'absorption, la transmission, la diffusion des ondes sonores par les parois, et même leur diffraction par des arêtes (Cf. Figure 1).

Ces phénomènes sont plus ou moins complexes à modéliser selon la bande de fréquences considérée. Dans le cas de l'acoustique prévisionnelle en situation industrielle ou dans un bureau, les fréquences d'intérêt se situent dans le spectre audible humain, soit de 20 Hz à 20 kHz environ. Cependant, la pondération A^1 , qui est d'usage systématique dans ce domaine, donne de l'importance à une bande de fréquences plus étroite, comportant 21 tiers d'octave et allant de 100 Hz à 10 kHz.

Il existe deux grandes approches de modélisation: une approche ondulatoire, qui consiste à résoudre directement ou indirectement l'équation des ondes (formule de Helmholtz) et une approche discrète et souvent stochastique (aléatoire: méthodes des tirs de rayons, cône de rayons, tir de particules). La première est en général précise, mais complexe et consommatrice en temps de calcul. Son utilisation se prête assez peu à la résolution de cas pratiques comme ceux rencontrés en entreprise. La seconde, est, à l'inverse, moins précise, surtout en basses fréquences, mais elle permet de traiter aisément et dans des temps courts des situations complexes. Pour ces deux approches, on trouve dans la littérature scientifique une multitude de variantes, ainsi que des méthodes qui combinent ces variantes [1]. La plupart des logiciels utilisés à des fins de concep-

tion ou d'aménagement de situations réelles, qu'ils soient proposés dans le commerce ou par des instituts de recherche, font partie de la deuxième approche: CATT-Acoustic, AcouS PROPA, CadnaR, Rayplus, etc. Le premier déterminant de la fiabilité des résultats d'un modèle d'acoustique réside dans le choix des hypothèses faites pour établir le modèle. Cependant, la qualité des données d'entrée du modèle, comme la géométrie du local, des matériaux qui le constituent (ou le constitueront) et de ses aménagements intérieurs déterminent grandement la précision des résultats. Au moins trois difficultés se présentent en cas d'utilisation de ce type d'outils.

Du point de vue de la géométrie, une première difficulté réside dans le choix de l'étendue de l'espace à prendre en compte dans le modèle. Par exemple, si seule une partie d'une entreprise est concernée par une évaluation du bruit, comme un atelier, mais que cet atelier est ouvert sur un hall de livraison beaucoup plus grand, dans quelle mesure doit-on prendre en compte le hall dans le calcul? Une autre difficulté dans la définition de la géométrie concerne



↑ FIGURE 1 Principe de calcul de propagation acoustique par « lancer de rayons ».



ENCADRÉ 1

OBJECTIFS DU LOGICIEL RAYPLUS DÉVELOPPÉ PAR L'INRS

Le logiciel d'acoustique prévisionnelle Rayplus a été développé à l'INRS dès les années 1980 [2] afin de disposer d'un outil de calcul utile pour la prévention des expositions sonores en entreprise. Le logiciel répond à deux objectifs.

- Le premier objectif est d'application générale: le logiciel peut être utilisé pour fixer:
 - soit un cadre pour une nouvelle méthodologie de mesure,
 - soit des limites à des grandeurs acoustiques caractéristiques du local.

Ce cadre et ces limites, qui sont souvent établis à des fins de propositions aux groupes de travail élaborant les normes, sont obtenus par des études paramétriques. L'utilisateur fait varier plusieurs fois les données d'entrée du modèle dans des plages fixées, lance de nombreux calculs, analyse ensuite les résultats, afin d'en déduire les valeurs que pourraient raisonnablement atteindre certaines grandeurs sur le terrain.

- Le second niveau est d'application particulière: il s'agit d'étudier un cas concret de local dès la conception ou bien à l'exploitation, si le traitement acoustique est insuffisant. Que ce soit pour la conception de locaux neufs, ou bien pour la rénovation, l'aménagement ou le réaménagement de locaux existants, le logiciel permet de calculer simplement et rapidement les niveaux de bruit dans un local donné, qu'il soit industriel ou du tertiaire. Le logiciel permet donc de proposer un ou plusieurs scénarios d'amélioration, chacun d'entre eux avec un gain, en terme de bruit, et un coût, en terme d'investissement matériel. Les résultats permettent d'engager un dialogue concret avec les décideurs qui doivent améliorer la situation (en termes de conditions de travail: chefs d'entreprises, préventeurs, méthodes, achats, etc.).

le degré de précision à prendre en compte pour en décrire les détails comme par exemple les reliefs des surfaces du local: poutrelles métalliques sous un toit, fenêtres encastrées, etc.

Le choix des paramètres des matériaux pose un problème plus critique encore. L'utilisateur du logiciel peut avoir à sa disposition des bases de données de matériaux ou des mesures réalisées par les fabricants ou des organismes de contrôle. Or, ces données sont inadaptées et incomplètes pour les modèles de simulation: inadaptées, car réalisées dans des conditions de laboratoire différentes des conditions de terrain; et incomplètes, car moyennées sur de larges bandes de fréquences. Par exemple, pour l'absorption acoustique d'un matériau, on ne trouvera sur catalogue que des valeurs du coefficient α_w mesurées² par bandes d'octave en chambre réverbérante (champ diffus). La performance du modèle dépend de la précision de ces données et de la finesse souhaitée sur l'analyse en fréquence.

Troisième difficulté et non des moindres, **la modélisation de l'encombrement dans le local**. Dans la majorité des situations, excepté le cas de la conception non détaillée d'un projet, le local de travail n'est pas vide. Un nombre important « d'objets » (stock de matière, produits finis ou machines dans un hall industriel, mobilier dans un espace ouvert de bureau) perturbe de façon non négligeable la propagation sonore dans un tel environnement. Ils sont responsables de phénomènes complexes de réflexion, d'absorption, de diffraction, de diffusion des ondes sonores, etc. Dans ce cas, la description précise du projet est irréalisable, si bien que des approches plus globales doivent être intégrées au modèle de calcul. Citons le cas du modèle d'encombrement imaginé par l'INRS [2] et intégré au logiciel Rayplus (Cf. Encadré 1). À partir d'un modèle stochastique basé sur deux paramètres (fréquence de diffusion et absorption), il est possible de définir des zones d'encombrement au lieu de prendre en compte précisément tous les objets dans le local. Le gain de temps pour l'utilisateur expérimenté est considérable pour une même précision des résultats de calcul. On le comprend donc aisément: autant que les hypothèses inhérentes aux méthodes, les données disponibles pour nourrir les modèles constituent des limites à la démarche de simulation prévisionnelle. Partant de ce constat et forts de l'expérience acquise en plus de trente ans d'expérimentations, les experts de l'INRS considèrent qu'il est difficile d'atteindre une précision inférieure à quelques décibels (2 ou 3 dB) en fonction de la complexité du local à simuler. Il est donc inutile de chercher à prédire un niveau de bruit trop précis au poste de travail dans un local « complexe »³. Cependant, cette faiblesse pour l'estimation précise du niveau sonore en un point donné du local, est moins marquée pour le calcul de valeurs moyennées en plusieurs points du local.

Aide à l'application de la réglementation ou aux recommandations générales

L'exemple de l'arrêté du 30 août 1990

L'arrêté du 30 août 1990 [3] est une spécificité française. Il a été mis en place, il y a trente ans, afin d'inciter les concepteurs de locaux, les aménageurs et les utilisateurs à réduire le bruit, en agissant sur l'acoustique du local industriel. Il s'applique dans les locaux « où doivent être installés des machines et appareils susceptibles d'exposer les travailleurs à un niveau d'exposition sonore quotidienne supérieur à 85 dB(A) ».

L'arrêté évoque des « machines et appareils » suffisamment bruyants pour provoquer une exposition sonore lésionnelle aux travailleurs. Réduire le bruit de ces machines, achetées à l'extérieur et difficilement modifiables, est souvent plus compliqué qu'améliorer l'acoustique du local qui, lui, peut appartenir à l'exploitant. L'arrêté cite explicitement l'acoustique prévisionnelle comme outil de calcul

permettant de déduire que l'exposition des salariés risque d'être supérieure à 85 dB(A). Il fixe des limites à la décroissance spatiale des sons par doublement de distance (DL_2 ⁴). En conditions de champ libre, en l'absence de local ou de tout obstacle, cette décroissance, due au simple éloignement vis-à-vis de la source de bruit, atteint 6 dB. En revanche, dans un local industriel sans aucun traitement acoustique, les réflexions sur les murs font que la DL_2 peut être faible et atteindre 1 ou 2 dB. Ceci signifie que le local amplifie les bruits (par rapport au champ libre) et que des salariés éloignés des machines bruyantes ont une exposition sonore bien supérieure à celle qu'ils auraient subie si tout se passait à l'extérieur du local. Corriger la situation consiste à traiter acoustiquement le local pour augmenter la DL_2 afin qu'elle passe au-dessus de 2 dB (petits locaux) et même au-dessus de 4 dB (grands locaux). Différentes valeurs cibles, précisées dans l'arrêté (local vide, local encombré, tout cela étant fonction de sa surface) ont été obtenues, dans les années 1980, par des études mixant des mesurages sur le terrain à des calculs d'acoustique prévisionnelle.

Les normes pour les bureaux

Les normes d'acoustique s'attachant à aider les concepteurs et les aménageurs de bureaux dans le tertiaire [4 à 6] citent, comme l'arrêté précédent, beaucoup de grandeurs acoustiques caractéristiques du local ainsi que les valeurs cibles à atteindre pour ces grandeurs, afin d'obtenir un local de travail dans lequel le bruit sera réduit de manière notable pour les salariés.

La norme NF S 31-199 [6], dédiée aux espaces de bureaux ouverts, par exemple, s'attache à des paramètres physiques mesurables par un acousticien :

- Le niveau de bruit moyen pondéré A ($L_{Aeq,T}$) mesuré en activité sur une période représentative (T) du taux d'occupation habituel du bureau ouvert. Il est fonction de la densité d'occupation, de la puissance acoustique des sources, mais aussi de la qualité acoustique du local et de son aménagement.
- La décroissance du son en fonction :
 - du temps : c'est le temps de réverbération du local (T_{60});
 - de l'espace : c'est la décroissance spatiale (D_{25}) par doublement de la distance⁵.



Après des simulations ou des améliorations, la mesure de bruit dans un atelier industriel peut permettre de recalibrer les prévisions sur les conditions réelles.

© Fabrice Dimier pour l'INRS/2016



Ces deux grandeurs dépendent du traitement acoustique du local. Comme dans l'industrie, un local du tertiaire avec de bonnes qualités acoustiques (local assourdi) permettra de réduire le niveau de bruit global. Les sources les plus éloignées sont moins influentes grâce à l'atténuation du local.

Quelles valeurs cibles sont à atteindre pour ces différentes grandeurs? La norme acoustique d'aménagement des espaces ouverts NF S 31-199 considère

les valeurs cibles en fonction de l'activité du bureau ouvert. Plusieurs types de locaux, correspondant à plusieurs activités ou organisations, y sont identifiés, différenciant ainsi les qualités acoustiques nécessaires au local. Comme pour celles de l'arrêté du 30 août 1990 [3], les valeurs cibles pour chacun des indicateurs et pour l'un ou l'autre des types de locaux, ont été définies par des études utilisant des grandeurs trouvées sur le terrain (campagnes de mesurages) et des expériences en laboratoire, enrichies avec des calculs d'acoustique prévisionnelle.

Aide à la conception ou à la correction de locaux moins bruyants

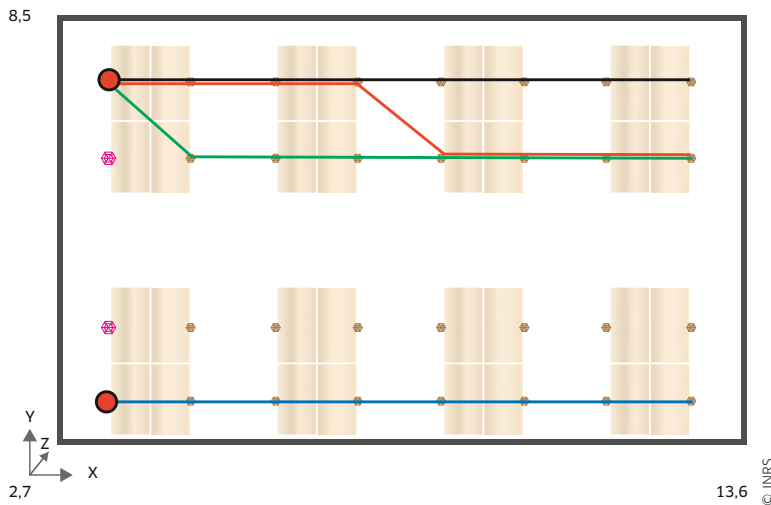
Un local industriel ou tertiaire, dans lequel le bruit est gênant ou même dangereux pour la santé des salariés, peut souvent être amélioré par un traitement acoustique des parois. Il est possible aussi de l'aménager autrement, par exemple en déplaçant certaines machines bruyantes ou en les encoffrant.

Quels gains et coûts? Limites et intérêts?

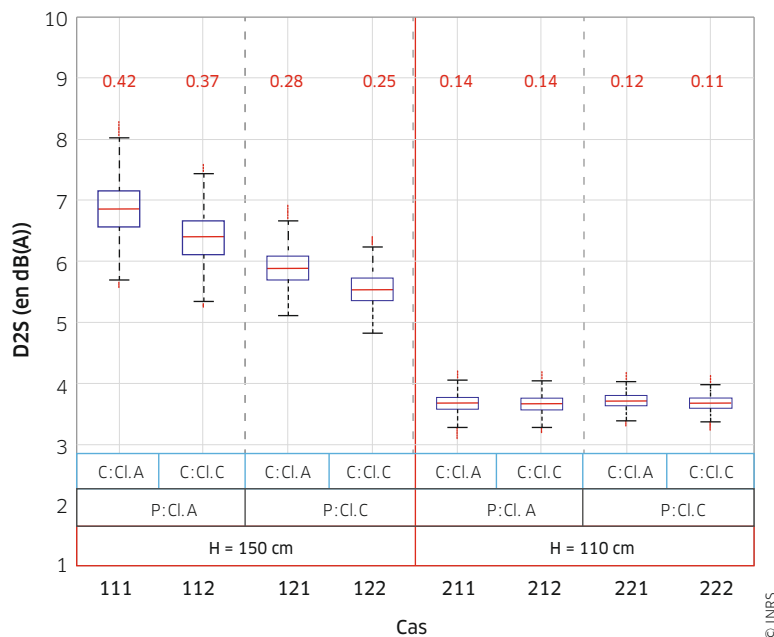
Évidemment, un traitement acoustique représente un coût et l'ingénierie de prévention à déployer pour réduire le risque d'exposition au bruit est à mettre en regard du gain envisageable en termes de sécurité ou de conditions de travail. Cette démarche peut aisément se construire avec un logiciel de simulation. En effet, même si les modèles reposent sur des hypothèses qui limitent leur champ d'application, les imprécisions de calcul proviennent principalement du manque d'information sur les données d'entrée des modèles (dimensions du local, détails architecturaux, matériaux composant les parois, réelle puissance et spectre des sources, etc.). Ainsi, les résultats des modèles sont à interpréter avec prudence dans l'absolu, mais restent d'une très grande utilité pour comparer plusieurs configurations. Le calcul prévisionnel permet donc, dans une démarche qui peut être itérative, de proposer plusieurs scénarios d'amélioration comparables entre eux.

Outil de dialogue avec le chef d'entreprise

Dans ces conditions, les résultats calculés par le logiciel deviennent un outil de dialogue avec le chef d'entreprise, le préventeur ou l'ensemble des acteurs devant partager un constat sur la situation à améliorer, et surtout, sur les objectifs chiffrés d'amélioration. Alors que les échelles des décibels sont compliquées à appréhender, la simulation peut fournir des résultats facilement comparables entre eux, avec des « cartes de gain », qui proviennent de la soustraction de deux cartographies sonores, calculées indépendamment pour deux scénarios différents. Considérant le coût estimé de l'une ou de l'autre solution, il est facile alors de cibler un scénario satisfaisant en termes de diminution du risque et d'acceptation économique pour l'entreprise.



↑ FIGURE 2 Open space: ensemble de postes de travail vus de dessus (quatre postes par îlot) et lignes de décroissance spatiale à calculer.



↑ FIGURE 3 Résultats calculés par le modèle pour estimer la D₂₅.

Qualités de plafonds (P: Cl.A: plafond de classe A; P: Cl.C: plafond de classe C). Qualités de cloisonnettes (C: Cl.A: cloisonnettes de classe A; C: Cl.C: cloisonnettes de classe C). Sur les boîtes de Tuckey, le trait rouge représente la médiane, et la boîte bleue regroupe 50% des valeurs (entre le premier et le troisième quartile). Les valeurs en rouge correspondent aux valeurs d'incertitude estimées.

Amélioration d'une norme d'acoustique pour les locaux du tertiaire

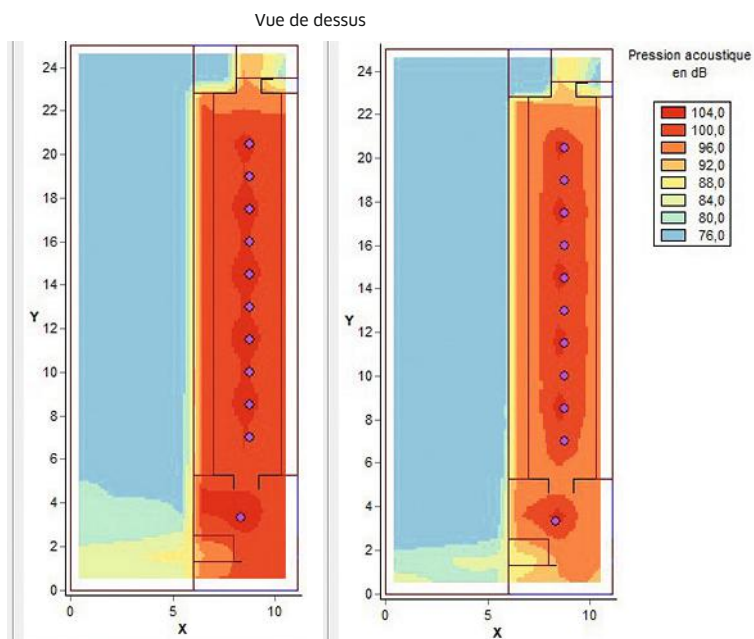
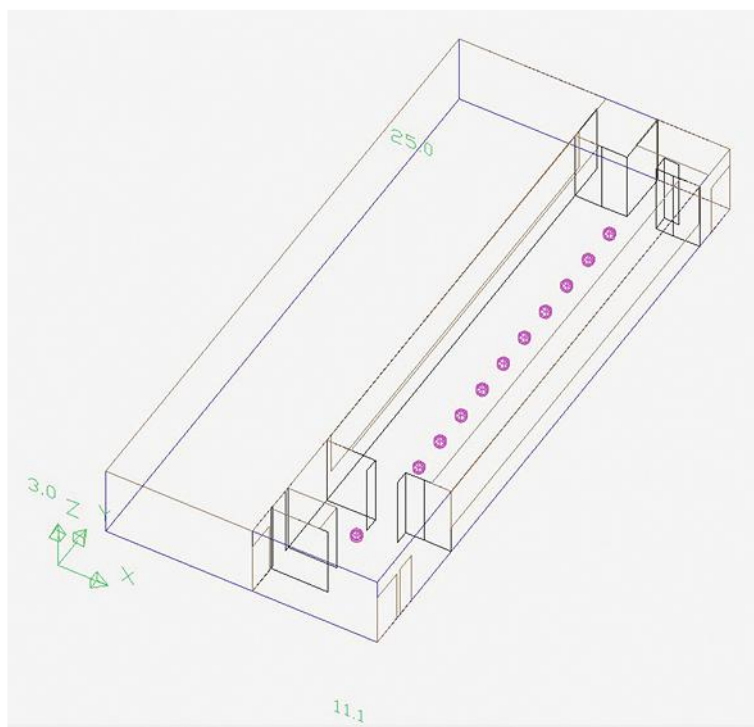
L'ensemble des acteurs responsables de la qualité acoustique des locaux de travail (dirigeants d'entreprise, architectes, aménageurs, bureaux d'étude, préventeurs) ont besoin de s'appuyer sur des données tangibles, disponibles dans des guides, des normes ou des réglementations. Ces données sont par exemple, une méthodologie de mesure, une valeur cible pour un indicateur, une plage d'incertitudes, etc. Un logiciel prévisionnel comme Rayplus permet de simuler une multitude de situations qui serviront aux experts en charge de la réalisation de ces guides, normes ou réglementations. Le cas de la norme NF EN ISO 3382-3 [4] pour les bureaux ouverts illustre ce propos. Cette norme donne des recommandations pour la mesure de la décroissance spatiale D_{25} dans les espaces de bureaux ouverts. Pour cette mesure, il convient de définir une ligne fictive au travers de postes de travail, de mesurer pour chaque poste, le long de cette ligne, le niveau de bruit émis par une source calibrée et de déterminer la valeur de la décroissance par doublement de la distance. On en déduit alors quelle est l'atténuation d'un bruit de parole apportée par le local et son aménagement.

Lors de la mise en œuvre de la norme, plusieurs questions se sont posées aux experts :

- Quelles recommandations donner pour le choix des positions le long d'une ligne fictive ?
- Quelles sont les incertitudes de mesure attendues (reproductibilité, répétabilité) ?
- Quelle méthodologie mettre en place à partir de plusieurs valeurs de D_{25} dans un même plateau pour définir une valeur unique caractéristique du plateau ?

La Figure 3 montre un exemple d'analyse de la D_{25} pour un ensemble de simulations réalisées avec Rayplus dans le cas du plateau illustré sur la Figure 2. Il s'agit de deux alignements de bureaux constitués de quatre postes de travail, configuration typique d'un aménagement de centre d'appels téléphoniques. Les postes en vis-à-vis sont séparés par des cloisonnettes. Plusieurs lignes de mesures ont été représentées sur la Figure 2. Deux phénomènes sont étudiés. D'abord, en multipliant les simulations pour une ligne en faisant varier certains paramètres (position des points de la ligne, encombrement du local...), on étudie les incertitudes en terme de répétabilité et de reproductibilité. Ensuite, en comparant les valeurs de D_{25} pour les lignes noire, rouge et verte, on vérifie la possibilité d'obtenir une valeur unique.

Sur la Figure 3, sont montrées les répartitions statistiques des valeurs de décroissance D_{25} de l'ensemble des lignes de la figure 2 sous la forme de boîtes de Tukey pour différentes qualités de plafonds et de cloisonnettes, et pour deux hauteurs (1,10 m et 1,50 m à partir du sol).



On note sur la Figure 3 qu'il existe des écarts significatifs entre les cas simulés, ce qui permet de fixer des valeurs cibles réalistes et discriminantes de D_{25} . Les meilleures performances acoustiques (plafond de classe A et cloisonnettes de classe A et de hauteur 1,50 m) pour ce plateau permettent d'atteindre une D_{25} d'environ 7dB(A). Cette valeur peut donc être retenue comme valeur cible pour ce type de bureau (c'est d'ailleurs cette valeur qui est fixée par la norme NF S 31-199 pour les centres d'appels). Notons également sur cette même figure, que les valeurs de D_{25} pour chaque aménagement sont très regroupées autour de la valeur moyenne (par

↑ FIGURE 4 Représentation du local par le logiciel Rayplus et cartographies calculées avant et après traitement acoustique des plafonds de la partie machines.

© INRS

© INRS



exemple, 50% des valeurs sont comprises entre 6,6 et 7,2 dB(A) dans le cas d'une cloisonnette de classe A de 1,50 m en présence d'un plafond de classe A). Ceci permet de valider la possibilité de définir une valeur unique pour le plateau.

Application à l'amélioration d'un abattoir industriel

L'agroalimentaire est un secteur industriel souvent extrêmement bruyant (cité au Tableau 42 des maladies: abattage et éviscération des volailles, porcs et bovins, plumage des volailles, emboîtement des conserves, etc.). Les expositions sonores peuvent atteindre 85 à 100 dB(A) sur les postes de travail des abattoirs, charcuteries industrielles, conserveries, plats cuisinés, etc. Les locaux, sous de fortes contraintes d'hygiène et de nettoyabilité, sont souvent carrelés et les équipements comportent souvent des parois en inox. La réverbération des bruits dans ces locaux est généralement très importante, en raison de ces matériaux. Pourtant des solutions existent [7], qui consistent à mieux organiser l'espace de travail, mettre en place des silencieux d'échappement d'air ou des encoffrements, et surtout, globalement, réaliser un traitement acoustique des locaux avec des produits absorbants spécifiques (lavables). La Figure 4 montre un exemple de cartographie acoustique calculée dans un abattoir à volailles. Les sources de bruits prépondérantes sont des plumeuses extrêmement bruyantes (104 dB(A) à proximité). Le local est séparé en deux parties: la partie éviscération (assez silencieuse) bien séparée, malgré la continuité du convoyeur à volailles, du local où se trouvent les plumeuses et quelques salariés (moins nombreux que dans le local calme). Un calcul prévisionnel, qui peut être recalé par quelques mesurages de pression acoustique sur place, montre la cartographie du bruit avant traitement acoustique. Un traitement acoustique de plafond, dans le local des machines, permet de diminuer le bruit global. On remarque qu'en champ proche de ces machines, où le local est peu influent, le bruit n'est évidemment pas diminué; il faudrait, pour aller plus loin, encoffrer ces machines.

Conclusion

Pour prévenir les risques liés au bruit, les méthodes de calcul d'acoustique prévisionnelle, comme le logiciel Rayplus, sont efficaces. Contrairement à l'idée commune selon laquelle la principale limite d'utilisation d'un modèle d'acoustique pratique réside dans ses hypothèses sous-jacentes, c'est surtout la qualité des données d'entrée du modèle, comme la géométrie du local, les matériaux qui le constituent et les aménagements intérieurs, qui permettent la précision des résultats *in fine*.

La principale utilisation pour laquelle le modèle prend tout son sens est celle d'une démarche de comparaisons entre plusieurs situations pour un même local

(matériaux différents, aménagements intérieurs différents, suppression ou ajout de cloisons, etc.). Dans ce cas, ce sont les différences entre les résultats que l'on regarde, si bien que les faiblesses du logiciel sont atténuées si l'on considère que ces faiblesses résident dans les données d'entrée manquantes. Utilisée aussi dans le cadre d'études paramétriques pour affiner les valeurs cibles d'une recommandation, l'acoustique prévisionnelle a montré, depuis plusieurs décennies, tout son intérêt. ●

1. La pondération 'A' est la pondération standard des fréquences audibles; elle a été conçue pour se rapprocher de la sensibilité de l'oreille humaine au bruit.

2. Le coefficient d'absorption acoustique α_w représente la capacité d'un revêtement à absorber l'énergie d'une onde sonore. Ce chiffre varie de 0 à 1.

3. Ce résultat n'est finalement pas une faiblesse du modèle ou du calcul, puisque la mesure elle-même, par exemple avec un sonomètre, est entachée d'une incertitude du même ordre de grandeur. De plus, le bruit dans un local de travail fluctue généralement de manière considérable d'un jour à l'autre, à cause des changements dans l'occupation, la production, etc.

4. Cette décroissance spatiale est réalisée sur une ligne droite (norme NF EN ISO 14257). Utilisée pour les locaux industriels, elle est calculée ou mesurée avec une source de bruit dont le niveau décroît avec la fréquence (bruit dit « rose »). Elle est toujours inférieure à 6 dB.

5. Cette décroissance spatiale est réalisée sur une ligne parfois brisée reliant les postes de travail entre eux (norme NF EN ISO 3382-3). Utilisée pour les bureaux ouverts, elle est calculée ou mesurée avec une source de bruit de parole. Elle peut être très supérieure à 6 dB car on considère qu'elle peut traverser des écrans, cloisonnettes, mobilier...

BIBLIOGRAPHIE

[1] SAVIOJA L, XIANG N – Introduction to the special issue on room acoustic modeling and auralization. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2019, 145, 2597. Accessible sur: <https://doi.org/10.1121/1.5099017>

[2] ONDET A-M, BARBRY J-L – Modeling of sound propagation in fitted workshops using ray tracing. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1989, 85, pp. 787-796.

[3] ARRÊTÉ DU 30 AOÛT 1990 pris pour l'application de l'article R. 235-11 du code du travail et relatif à la correction acoustique des locaux de travail. Accessible sur: www.legifrance.gouv.fr

[4] NORME NF EN ISO 3382-3 – ACOUSTIQUE. Mesurage des paramètres acoustiques des salles. Partie 3: bureaux ouverts. Afnor, 2013.

[5] NORME NF S 31-080 – ACOUSTIQUE. Bureaux et espaces associés - Niveaux et critères de performances acoustiques par type d'espace. Afnor, janvier 2006.

[6] NORME NF S 31-199 – ACOUSTIQUE. Performances acoustiques des espaces ouverts de bureaux. Afnor, mars 2016.

[7] LEGAL L – Traitement acoustique dans les locaux agroalimentaires. In: Colloque INRS Bruit et vibrations au travail, 2 au 4 mars 2011, Paris. Accessible sur: http://webistem.com/bvt2011/output_directory/cd1/data/articles/000100.pdf

CHAMPS MAGNÉTIQUES: ÉVALUER LES PERTURBATIONS ÉLECTRIQUES À L'INTÉRIEUR DU CORPS HUMAIN

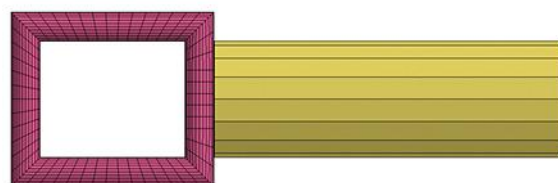
Tout champ magnétique variable dans le temps est à l'origine d'un champ électrique associé de même fréquence. Lorsqu'un objet conducteur est exposé à ce champ, il est parcouru par des courants électriques. Cette loi physique s'applique en particulier au corps humain faiblement conducteur. Elle concerne donc les opérateurs de soudeuses par point qui sont sources d'un champ magnétique variable dans le temps. Une réglementation relativement récente définit des valeurs limites d'exposition pour protéger les travailleurs du risque lié à l'exposition aux champs électromagnétiques. Cet article fait le point sur la capacité des modèles numériques à estimer les grandeurs pertinentes et nécessaires à l'évaluation de l'exposition des soudeurs.

GÉRARD
FLEURY,
LUCIEN
HAMMEN
INRS,
département
Ingénierie des
équipements
de travail

La fabrication de produits utilisés quotidiennement nécessite l'assemblage de tôles métalliques. Nous pensons bien évidemment aux carrosseries de nos voitures sans oublier les armoires métalliques de nos bureaux ou encore l'ascenseur que nous empruntons chaque jour. Parmi les différents procédés d'assemblage de tôles existant (soudage, rivetage, emboutissage), le soudage par point s'avère être fiable, facile à mettre en œuvre et suffisamment efficace pour être compatible avec des cadences élevées de production. C'est ainsi une technique très répandue dans l'industrie.

Le soudage par point est basé sur le principe de soudure par résistance. Deux électrodes de cuivre non fusible faisant également office de mâchoires compriment ponctuellement l'une contre l'autre les deux tôles à assembler (Cf. Figure 1). Un courant de très forte intensité délivré par un transformateur parcourt alors la pince et provoque au point de contact des deux tôles la fusion du métal par effet Joule. Après le passage très bref du courant électrique, le point de fusion se refroidit pour se transformer en un point de jonction solide. Le procédé est alors répété point par point pour générer une ligne de soudure.

Plusieurs variantes de ce procédé existent, la plus couramment rencontrée étant celle où le courant de soudage est alternatif à 50 Hz. En parcourant la boucle formée par la pince (bobinage secondaire du transformateur, porte-électrodes et électrodes), ce courant de forte intensité génère un champ magné-



↑ FIGURE 1 Soudeuse ARO et modèle numérique; seule la boucle rectangulaire rose est active.

tique environnant à 50 Hz, dont les variations temporelles sont à l'origine d'un champ électrique de même fréquence.

À cette fréquence relativement basse, le corps humain n'interfère pas avec les champs magnétiques: le champ émis par la soudeuse n'est donc pas perturbé par la présence de l'opérateur. En revanche, parce qu'il est exposé au champ électrique résultant des variations temporelles du champ magnétique, le corps humain légèrement conducteur est parcouru par des courants électriques. Les effets sur l'orga-



nisme sont connus et varient depuis des effets qualifiés de « sensoriels » (vertiges, phosphènes) pour de faibles intensités de ces courants, jusqu'à des effets qualifiés de « sanitaires » (douleurs, contractions musculaires) pour des intensités de courant beaucoup plus élevées.

D'un point de vue réglementaire, le décret n° 2016-1074 du 3 août 2016 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux champs électromagnétiques a transposé en droit français la directive européenne 2013/35/UE [1]. Il indique que le champ électrique interne est la grandeur pertinente caractéristique d'une exposition électromagnétique basses fréquences. Le décret fixe des valeurs limites d'exposition (VLE) pour protéger les travailleurs des effets cités ci-dessus. A 50 Hz, les VLE réglementaires sont de 1,1 V/m pour les effets sanitaires sur l'ensemble du corps et de 0,14 V/m au niveau de la tête pour les effets sensoriels.

Pour savoir si la VLE est dépassée, il faudrait mesurer le champ électrique à l'intérieur du corps humain, ce qui n'est pas envisageable. Pour contourner cette impossibilité, la réglementation définit le champ magnétique environnant comme la seconde grandeur caractéristique de l'exposition puisque c'est lui qui provoque le champ électrique interne au corps humain. Pour protéger les salariés contre les risques à 50 Hz, le même décret définit trois valeurs

d'actions (VA en milliteslas) associées au champ magnétique, en dessous desquelles la protection des salariés est assurée:

- 1 mT pour éviter l'apparition de phosphènes rétinien lors d'une exposition localisée de la tête,
- 6 mT pour garantir l'absence d'effets sanitaires dans le corps entier,
- 18 mT pour garantir l'absence d'effets sanitaires dans les membres.

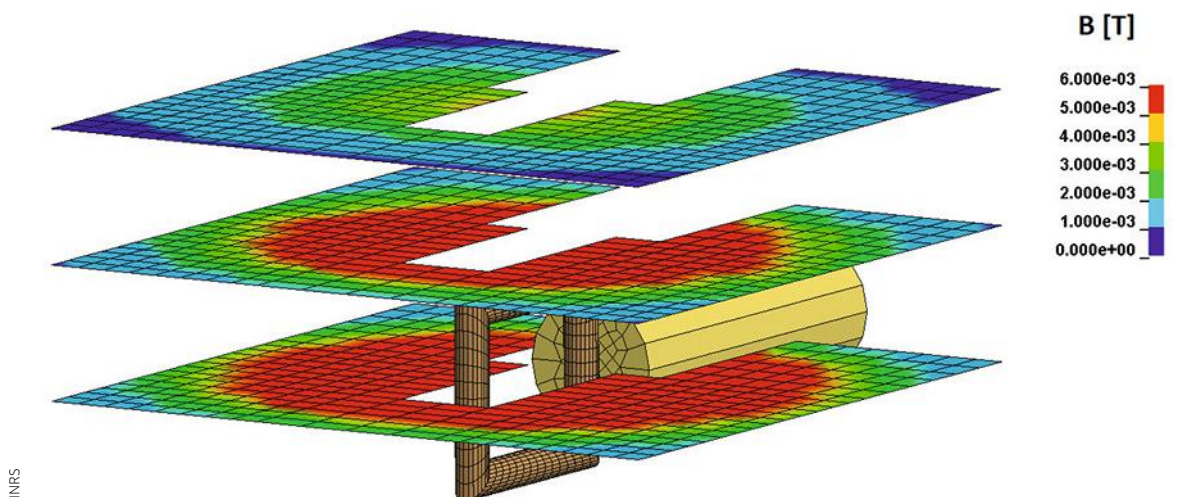
Selon la réglementation, le respect de ces VA implique nécessairement le respect des VLE correspondantes. A l'inverse, le dépassement des VA n'implique pas nécessairement un dépassement des VLE. Ainsi, dans ce cas, le champ électrique intracorporel doit être calculé pour vérifier si la VLE n'est pas dépassée.

Cet article présente les deux étapes de calculs nécessaires à l'évaluation du risque électromagnétique pour une soudeuse par point installée à l'INRS. La première étape a consisté à calculer le champ magnétique rayonné par la soudeuse, la seconde à évaluer le champ électrique intracorporel au moyen d'un modèle simplifié de corps humain proposé dans la série de normes NF EN IEC 62822 [2].

Les autres procédés de soudage émettent aussi des champs électromagnétiques; ici, soudage à l'arc et mesures de champ effectuées par le Cimpo (Centre interrégional de mesures physiques de l'Ouest).

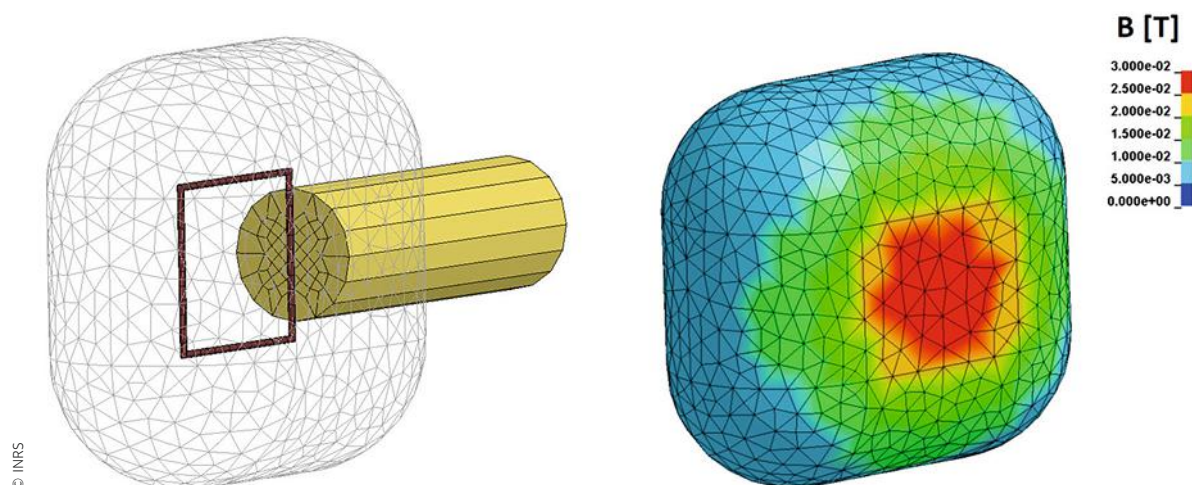


© Fabrice Dimier pour l'INRS/2015



© INRS

← FIGURE 2
Cartographies
de champ
magnétique
calculé sur
trois portions
de plans
horizontaux.



© INRS

← FIGURE 3
Enveloppe des
points situés à
20 cm de la pince
(en gris à gauche)
et répartition
du champ
magnétique sur
cette enveloppe
variant jusqu'à
30 mT.

Modèle numérique de rayonnement magnétique émis par la soudeuse

La soudeuse par point ayant servi à cette étude est installée dans un laboratoire de l'INRS. C'est une soudeuse à commande manuelle Ergoline de marque ARO (Cf. Figure 1). Adaptée à des petites séries, elle est largement répandue dans l'industrie française. De conception compacte, avec transformateur intégré, cette soudeuse propose plusieurs gammes de soudage avec une intensité maximale de 34 kA. La pince a une profondeur de 30 cm et la distance entre les deux porte-électrodes est de 25 cm.

Afin de développer le modèle de champ magnétique émis par la soudeuse, il a été au préalable nécessaire d'identifier le chemin emprunté par les courants de soudage à l'intérieur de la machine. Pour cela, les courants traversant les différents éléments de la soudeuse ont été mesurés à l'aide d'un capteur dédié (appelé boucle de Rogowski).

Ces mesures ont montré que seule la pince à souder et le circuit secondaire du transformateur sont parcourus par des courants de forte intensité

(jusqu'à 34 kA) alors que les intensités en amont du transformateur ne sont que de quelques dizaines d'ampères. Le modèle construit se limite donc à une représentation géométrique simplifiée de la pince à souder, c'est-à-dire à une boucle rectangulaire de dimensions 25 par 30 cm parcourue par un courant sinusoïdal à 50 Hz d'amplitude maximale égale à 34 kA. Ce modèle a été construit dans un environnement logiciel nommé LS-DYNA3D [3], lequel dispose, entre autres, des fonctionnalités de calculs de champ magnétique basses fréquences à partir de la loi de Biot et Savard¹.

Au préalable, a été construit un second modèle de pince carrée de 50 cm de côté, pour laquelle les valeurs du champ magnétique en certains points de l'espace sont données par la norme NF EN IEC 62822 [2]. Nous avons réalisé les calculs et comparé les résultats aux valeurs références de la norme. L'obtention de différences inférieures à 2% nous a ainsi permis de valider les options de calculs que nous avons choisies parmi toutes celles que le logiciel LS-DYNA3D propose [3].



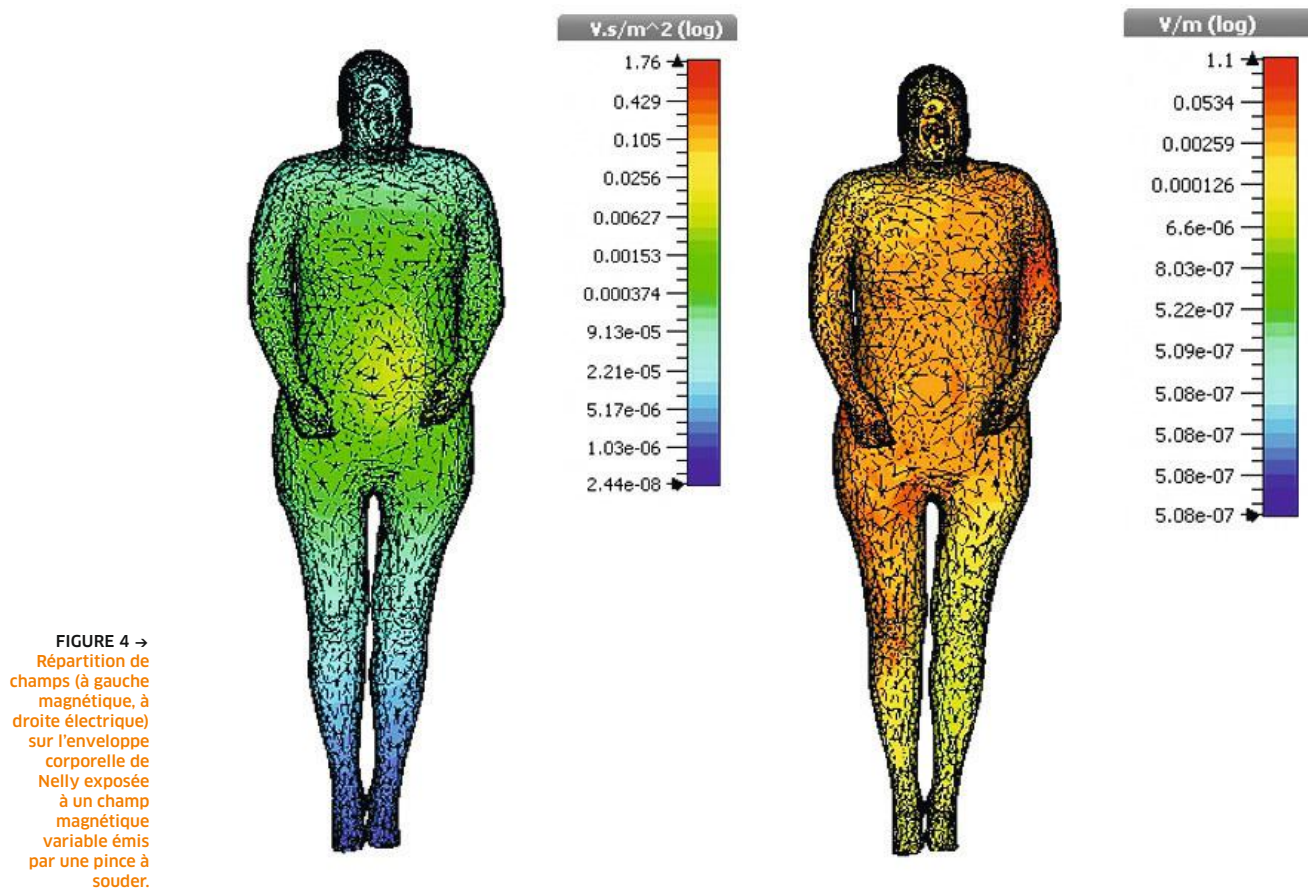


FIGURE 4 → Répartition de champs (à gauche magnétique, à droite électrique) sur l'enveloppe corporelle de Nelly exposée à un champ magnétique variable émis par une pince à souder.

La figure 2 illustre les résultats calculés pour la pince à souder de l'INRS. Les cartographies du champ magnétique sont présentées sur trois portions de plans horizontaux. Le plan inférieur passe par le centre de la boucle et la distance entre chaque plan est de 20 cm. Sur cette figure, les zones rouges sont celles où le champ magnétique est supérieur à 6 mT (valeur d'action VA pour protéger l'ensemble du corps des effets sanitaires). Ces zones sont concentrées autour de la pince. Alors que pour le plan supérieur, la valeur de 6 mT n'est jamais atteinte, elle l'est sur le plan inférieur pour des points situés à moins de 40 cm du centre de la pince, zone où le soudeur est susceptible de se trouver. La VA étant dépassée à proximité de la machine, il est nécessaire de procéder à la seconde étape de l'évaluation du risque en estimant par calcul le champ électrique induit dans le corps du soudeur.

Évaluation de la valeur maximale du champ électrique intracorporel

Le champ électrique intracorporel ne peut être évalué qu'au moyen d'un modèle numérique de corps humain exposé aux variations temporelles du champ magnétique émis par la source. La réglementation n'imposant pas l'utilisation d'un modèle spécifique de corps humain, nous présentons tout d'abord dans cette partie un calcul simplifié.

Dans le cadre des normes NF EN IEC 62822, le corps humain est représenté par un simple disque de 20 cm de rayon. Pour la soudeuse par point, la norme considère que ce disque est situé au plus près à 20 cm de la source et exposé à un champ magnétique uniforme. La première étape de notre évaluation a ainsi consisté à estimer la valeur maximale du champ magnétique sur l'ensemble des points de l'espace situés à 20 cm de la pince à souder. Cette évaluation a été réalisée en calculant la cartographie du champ magnétique émis par la soudeuse sur une enveloppe virtuelle regroupant l'ensemble des points situés à 20 cm de la pince. La figure 3 présente d'une part à gauche cette enveloppe virtuelle et d'autre part à droite la cartographie obtenue sur cette même enveloppe. La cartographie montre que la valeur maximale du champ est égale à 30 mT et que ce maximum est obtenu aux centres des deux faces planes latérales de l'enveloppe parallèles au plan de la pince.

Lorsqu'un disque homogène est exposé à un champ magnétique uniforme, la valeur maximale du champ électrique induit se calcule par la formule: $E = \pi R f B$ où: $f = 50$ Hz est la fréquence fondamentale du champ; $R = 0,2$ m est le rayon normalisé du disque (ici modèle de corps humain); et $B = 0,03$ T est la valeur maximale du champ source précédemment calculée. En appliquant cette formule, nous obtenons

une valeur de champ électrique égale à 0,94 V/m, valeur qui reste inférieure à la VLE égale à 1,1 V/m. Les hypothèses précédentes (champ B uniforme au maximum d'amplitude à 20 cm de la source) conduisent à une évaluation du risque protectrice pour le salarié exposé. Néanmoins, ce modèle simplifié ne reproduit pas la réalité des phénomènes électromagnétiques induits dans un corps humain lorsqu'il est exposé à un champ magnétique variable dans le temps. Pour modéliser ces phénomènes et mieux les comprendre, il est par conséquent nécessaire d'avoir recours à une simulation utilisant un modèle numérique de corps humain beaucoup plus complexe².

Plusieurs laboratoires [4 à 6] poursuivent des recherches pour rendre ces modèles de corps humain toujours plus précis et réalistes tout en optimisant les méthodes de résolution numérique afin de maintenir des temps de calculs acceptables. Dans une étude, l'INRS a commencé à étudier la faisabilité de ce type de simulations. Des calculs ont en effet été effectués avec le mannequin numérique Nelly [7] exposé à un champ magnétique caractéristique d'une soudeuse par point. La *figure 4* présente un exemple des résultats obtenus [8]. Ces recherches en cours doivent être poursuivies pour avoir suffisamment de confiance dans les résultats dans l'objectif final de les exploiter à des fins d'évaluation du risque.

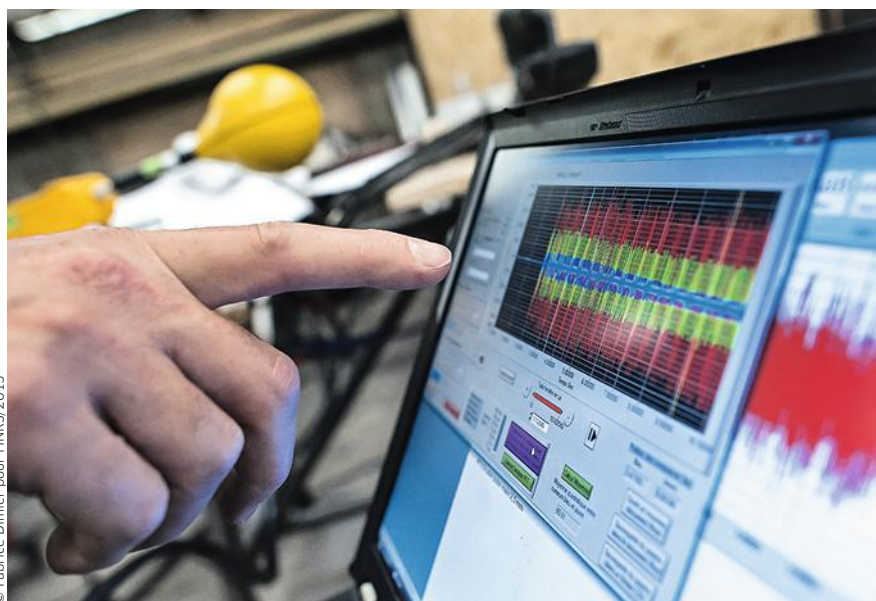
Conclusion

Comment réaliser l'évaluation du risque électromagnétique à 50 Hz encourus par les opérateurs de soudeuse par point ?

Par la mesure ou par le calcul en ce qui concerne l'évaluation du champ magnétique émis par la soudeuse. Les modèles de calculs utilisent ici des données d'entrées faciles à obtenir, ils sont robustes et conduisent à des résultats fiables qui permettent de délimiter la zone autour de la soudeuse à l'intérieur de laquelle les VA ne sont pas respectées.

Pour évaluer le champ électrique à l'intérieur du corps humain et délimiter la zone où les VLE sont respectées, le préventeur n'a plus le choix. Il doit avoir recours à des modèles numériques de corps humain. La série de normes NF EN IEC 62822 propose des méthodes d'évaluation basées sur des modèles de corps simplifiés mais non réalistes.

À l'avenir, ces modèles doivent être améliorés pour évaluer plus précisément les effets d'un champ électromagnétique basse fréquence sur le corps humain. La simulation électromagnétique est largement utilisée dans l'industrie pour concevoir, analyser et optimiser des composants et systèmes électromagnétiques (moteurs électriques, téléphones portables...). Le champ d'application de ces méthodes



© Fabrice Dimier pour l'INRS/2015

continue à s'élargir notamment grâce à l'apparition de nouvelles générations de processeurs offrant toujours plus de puissance de calculs. De nouveaux horizons s'ouvrent donc chaque jour, horizons dont l'évaluation de l'exposition professionnelle aux champs électromagnétiques ne saurait se passer. ●

Mesures de l'exposition aux champs lors d'opérations de soudage à l'arc.

1. Cette loi de l'électromagnétisme permet de calculer le champ magnétique induit par le passage d'un courant électrique dans un circuit quelconque.
2. Le champ électrique à l'intérieur du corps humain est calculé à partir des équations de Maxwell couplées à la loi d'Ohm. Le corps humain entre dans le calcul à travers sa forme et sa résistivité, qui est inhomogène.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] DIRECTIVE N° 2013/35/UE DU 16 JUIN 2013 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques).
- [2] NORME NF EN IEC 62822-3 - Matériels de soudage électrique - Évaluation des restrictions relatives à l'exposition humaine aux champs électromagnétiques (0 Hz à 300 GHz) - Partie 3: matériels de soudage par résistance. Paris, Afnor, 2018.
- [3] LS-DYNA3D. Accessible sur: www.lstc.com/applications/em
- [4] CHEN X.L. - Analysis of human brain exposure to low-frequency magnetic fields: A numerical assessment of spatially averaged electric fields and exposure limits. *Bioelectromagnetics*, 2013, 34, pp. 375-384.
- [5] SCORRETTI R. - Caractérisation numérique et expérimentale du champ magnétique B.F. généré par des systèmes électrotechniques en vue de la modélisation des courants induits dans le corps. Lyon, École centrale, Thèse, 2003.
- [6] BENCNIK M., BOWTELL R., BOWLEY R. - Electric fields induced in the human body by time-varying magnetic field gradients in MRI: numerical calculations and correlation analysis. *Phys. Med. Biol.*, 2007, 52, pp. 2337-2353.
- [7] VIRTUAL HUMAN PROJECT. Accessible sur: www.nlm.nih.gov/research/visible/visible_human.html
- [8] BOULDI M. - Experimental and simulation study of welder's electromagnetic exposure. In: BioEM2017, Hangzhou (Chine), 2017, pp. 158-162.

RISQUE CHIMIQUE: PRÉDIRE L'IMPACT DU VENT SUR LES SYSTÈMES DE VENTILATION

Le vent peut perturber le fonctionnement des installations de ventilation en modifiant, voire en inversant les flux d'air prévus initialement. La simulation numérique permet à la fois de prédire les conséquences de cette perturbation et d'évaluer l'efficacité des différentes solutions envisagées pour les prévenir. L'exemple du confinement des chantiers de désamiantage exposés au vent illustre la méthodologie développée.

ROMAIN GUICHARD
INRS,
département
Ingénierie
des procédés

La ventilation est l'un des moyens de prévention privilégiés du risque chimique. Les systèmes de ventilation sont généralement dimensionnés en régime permanent, c'est-à-dire en l'absence de toute perturbation externe. Cependant, le vent peut causer des inversions temporaires des flux d'air aboutissant à l'inefficacité du dispositif de protection collective. Cette situation est particulièrement critique pour certaines applications, comme le confinement dynamique des chantiers de désamiantage [1]. Il est donc essentiel de comprendre et de quantifier ces effets, pour ensuite pouvoir limiter leurs conséquences et garantir un niveau de protection élevé. Dans ce contexte, la simulation numérique présente deux avantages majeurs : elle permet de prédire une situation qui n'existe pas encore, par exemple un chantier qui est planifié dans une zone fortement exposée au vent, et elle permet, pour une situation existante, d'accéder à des quantités qui ne sont pas mesurables sur site.

Fonctionnement aérodynamique d'un chantier de désamiantage

La zone de travail dans laquelle les processus de retrait d'amiante doivent être appliqués est d'abord confinée de façon statique, le plus souvent à l'aide d'une bâche étanche à l'air et de bande adhésive. Le confinement dynamique est ensuite mis en œuvre grâce à un système de ventilation qui a deux objectifs principaux :

- le renouvellement de l'air dans la zone de travail, afin de diluer la concentration de fibres en suspension,
 - la mise en dépression de la zone, imposée à une valeur minimale de 10 Pa par rapport à l'extérieur.
- Ces objectifs sont atteints en pratique par l'installation d'extracteurs équipés de filtres, d'installations

de décontamination pour le personnel et le matériel, d'entrées d'air de compensation, ainsi que d'entrées d'air de réglage [2]. Du fait de la dépression de la zone, des fuites d'air « entrantes » existent toujours à travers l'enveloppe du confinement statique. La *figure 1* présente le principe général de l'aérodynamique d'un chantier de désamiantage. On note que dans cet exemple, les installations de décontamination ne sont pas en communication directe avec l'environnement extérieur.



© Dominique Leroux pour l'INRS/2013

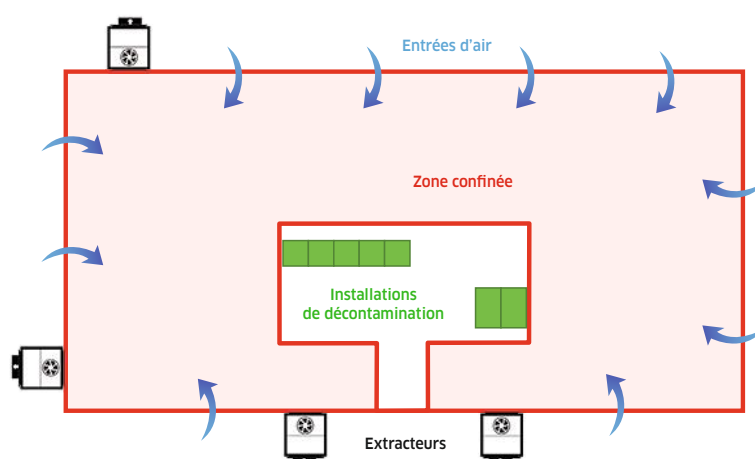
Mesure de la vitesse des rejets d'air dans des conduits de ventilation par un technicien de la Carsat Bretagne.

En cas de vent, la dépression externe exercée sur les parois du confinement peut être supérieure à la dépression interne de la zone de travail. Dans ce cas, les flux d'air à travers les entrées d'air de compensation ainsi que les fuites pourraient s'inverser. C'est cette situation qu'il est nécessaire de prédire en utilisant le concept de ventilation prévisionnelle, c'est-à-dire en exploitant des outils de simulation numérique permettant de décrire virtuellement l'écoulement d'air.

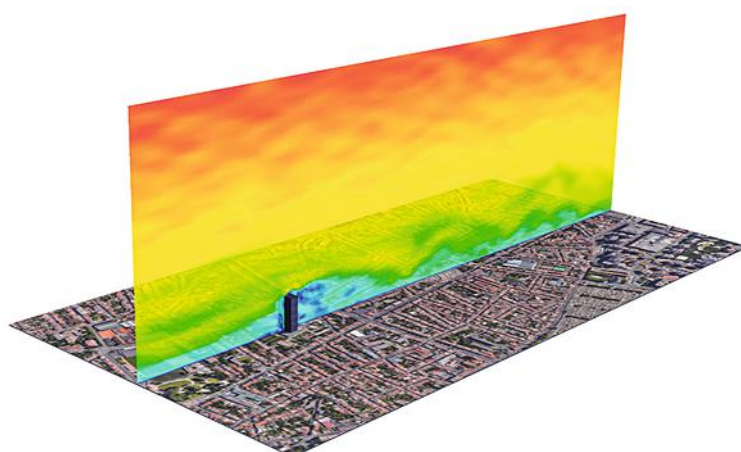
Simulation du vent autour du bâtiment

La première étape consiste à étudier l'écoulement d'air externe généré par le vent autour du bâtiment considéré. Cet écoulement dépend principalement des caractéristiques du vent, de l'environnement du bâtiment et de sa géométrie. L'approche est basée sur la résolution numérique des équations de Navier-Stokes décrivant la dynamique des fluides¹. Les grandes échelles de la turbulence de l'écoulement sont résolues directement, alors que les plus petites échelles sont modélisées, ce qui a donné son nom à la méthode: « *simulation des grandes échelles* » [3]. Un cliché instantané de la vitesse de l'air est représenté sur la *Figure 2*, dans le plan de coupe d'un immeuble de grande hauteur situé dans un environnement urbain. La couleur bleue représente une vitesse d'air nulle et la couleur rouge la vitesse d'air maximale. La simulation est dite instationnaire, ce qui signifie que la résolution s'effectue pour chaque pas de temps, inférieur à la seconde, ce qui est nécessaire pour représenter de manière réaliste la turbulence du vent, comme les rafales, les bourrasques et les tourbillons. La pression et la vitesse de l'air sont alors disponibles en chaque point de l'espace et à chaque instant simulé. Il est ensuite possible d'extraire l'historique de la pression exercée par le vent par exemple sur une entrée d'air de compensation, sur un extracteur ou même sur l'ensemble d'une façade. La *Figure 3* fournit un exemple de pression obtenue en un point de la façade du bâtiment. Ce point est situé dans une zone tourbillonnaire, très perturbée, ce qui implique des fluctuations importantes de la pression. Même lorsqu'un chantier est déjà opérationnel depuis quelque temps, cette information est très difficile, voire impossible à mesurer sur site, pour diverses raisons:

- La période de temps dans laquelle les mesures peuvent être réalisées est très réduite: il faut le faire lorsque l'ensemble du système de ventilation est opérationnel, mais que les processus de retrait de l'amiante n'ont pas encore démarré.
- Les mesures sont ponctuelles et nécessitent une traversée de la paroi pour y faire passer un tube.
- Certains chantiers ou points de mesure intéressants peuvent être difficilement accessibles (cage d'escalier à l'intérieur, nécessité d'une nacelle à l'extérieur, etc.).



↑ FIGURE 1 Schéma de principe de l'aérodynamique d'un chantier de désamiantage (vue de dessus).



© R. Guichard/INRS

↑ FIGURE 2 Cliché instantané de la vitesse du vent dans un plan de symétrie d'un immeuble de grande hauteur situé dans un environnement urbain.

- La qualité des mesures est directement liée aux conditions météorologiques, idéalement en l'absence de pluie, de gel, mais avec un vent directionnel dans la plage de mesure de l'instrumentation. Une alternative aux mesures sur site est l'utilisation d'une soufflerie, mais elle présente également divers inconvénients par rapport aux simulations numériques, les mesures restant ponctuelles et la mise en œuvre de la technique fastidieuse et coûteuse. Elle servira principalement de validation, afin de contrôler la justesse des simulations réalisées dans une situation contrôlée.

Simulation du système de ventilation

Afin d'observer et de comprendre l'impact du vent sur l'aérodynamique du chantier de désamiantage, un couplage est effectué entre la simulation externe du vent et la simulation interne de la ventilation [4].



FIGURE 3 → Historique de la pression statique relative en un point P de la façade du bâtiment.

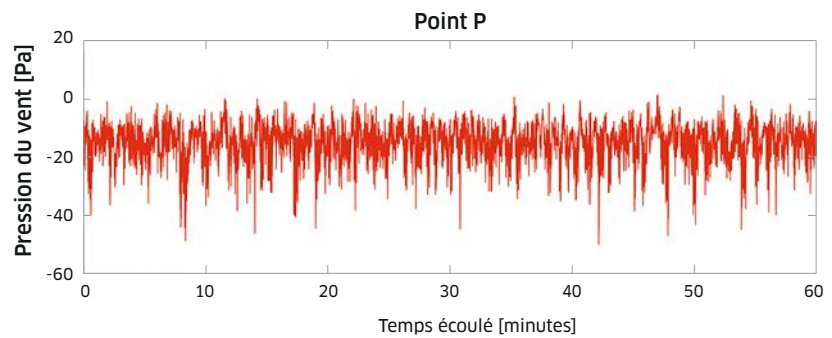
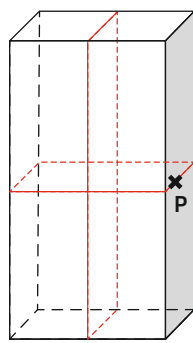
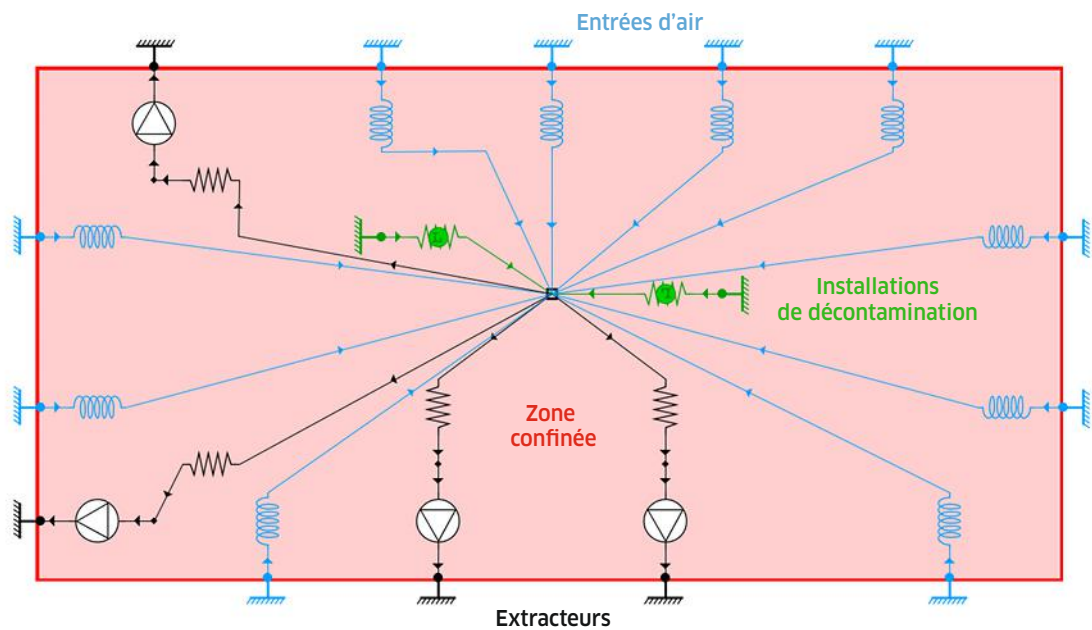


FIGURE 4 → Représentation graphique du réseau de ventilation d'un chantier de désamiantage avec le logiciel Sylvia (IRSN).

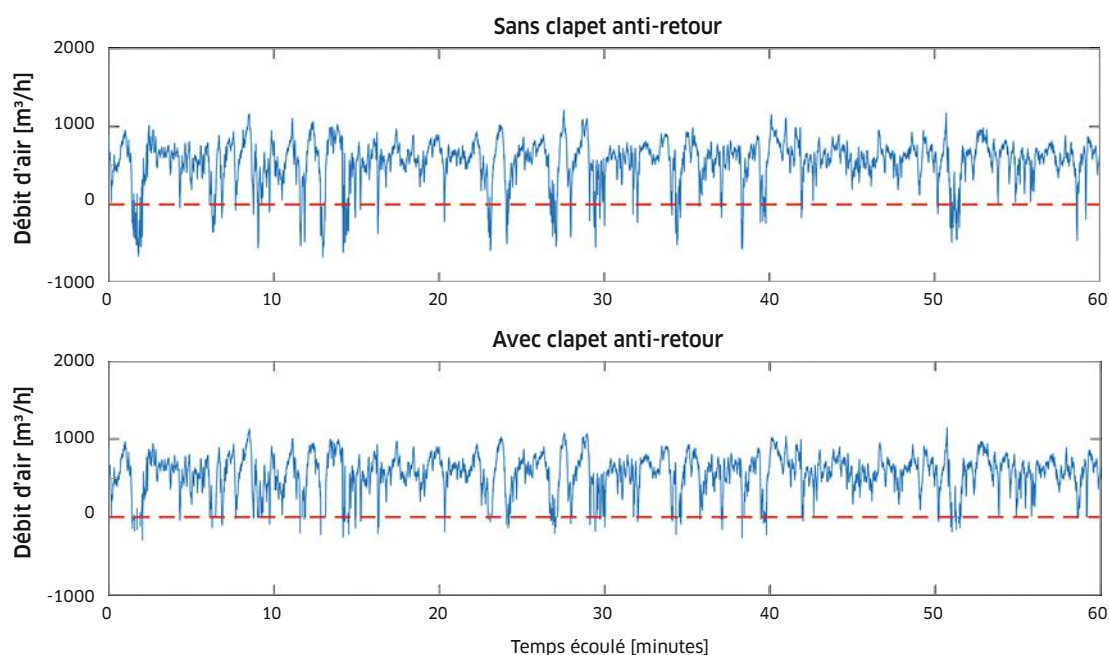


Ce couplage consiste à utiliser les pressions du vent comme donnée d'entrée pour chaque extrémité du réseau de ventilation, appelée « condition aux limites ». Un réseau de ventilation peut être assimilé à un réseau électrique, avec des éléments générateurs (les ventilateurs), des éléments résistifs (les conduites, filtres, vannes, etc.), la notion de potentiel (la pression) et de courant (le débit). C'est le principe du logiciel Sylvia, développé par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), qui caractérise chaque composant d'un réseau de ventilation par une relation entre le débit transitant dans le composant et la différence de pression à ses bornes. Ainsi, des bilans de masse peuvent être résolus aux nœuds et aux branches du réseau. La simulation est également « instationnaire », de manière à conserver l'impact de toutes les caractéristiques turbulentes du vent. Une représentation graphique du réseau de ventilation d'un chantier de désamiantage composé de dix entrées d'air de compensation, quatre extracteurs équipés de filtres et deux installations de décontamination, est présentée sur la Figure 4. Les installations de décontamina-

tion étant à l'abri du vent, la pression imposée en conditions aux limites est la pression atmosphérique supposée constante sur la durée de la simulation. Une fois cette simulation réalisée, on dispose d'une représentation complète de l'aéroulque du chantier exposé au vent. Il est alors aisément possible d'analyser les différences de pression entre l'intérieur et l'extérieur de la zone à chaque instant pour s'assurer qu'elles sont en accord avec la réglementation, de modifier les caractéristiques du vent (direction et vitesse) pour prédire une autre situation, ou l'installation de ventilation afin d'améliorer sa robustesse vis-à-vis des perturbations externes comme le vent. La Figure 5 met en évidence l'influence d'un clapet anti-retour sur les inversions de flux qui peuvent survenir au niveau d'une entrée d'air de compensation exposée au vent.

Des outils d'aide à la prévention des risques

La combinaison de plusieurs outils de simulation numérique, l'un adapté à la simulation du vent, l'autre adapté à la simulation d'un réseau de ventilation, offre de nombreuses opportunités pour la



← FIGURE 5
Influence de
la présence ou
non d'un clapet
anti-retour sur
une entrée d'air
de compensation
exposée au vent.

prévention du risque chimique, et cela à différentes étapes d'investigation d'une situation de travail. Il est ainsi possible de prévoir le comportement dynamique d'un système de ventilation dès sa conception, afin de vérifier qu'il répondra bien à ses objectifs de protection collective et ce, même en cas de perturbation externe et temporaire. Au-delà des chantiers de désamiantage, la méthodologie peut également être appliquée à un dispositif de captage localisé, par exemple une hotte aspirante industrielle, afin de vérifier la sensibilité de ses performances lorsqu'elle est soumise à différentes conditions atmosphériques. Ces outils peuvent également servir lors d'un diagnostic. En effet, si des fluctuations anormales des débits de ventilation ou des différences de pression entre locaux sont constatées, il est possible de modéliser le réseau de ventilation existant afin d'identifier la cause des fluctuations, et discriminer le vent des autres sources de perturbations. Enfin, un intérêt majeur est de prédire une situation de travail exposante avant qu'elle ne se produise, et de mettre en place les mesures nécessaires pour la prévenir. Dans l'exemple de l'aérodynamique d'un chantier de désamiantage, il s'agit notamment de renforcer la solidité et l'étanchéité du confinement, d'augmenter la dépression au-delà de la dépression minimale réglementaire, de rendre systématique l'utilisation de clapets anti-retour sur les entrées d'air de compensation, voire même d'éviter de procéder au retrait de l'amiante, lors d'un épisode de vent violent s'il n'est pas possible de garantir un confinement robuste avec le matériel disponible. La simulation numérique représente donc un atout majeur pour la prévention des risques basée sur la

ventilation, en apportant une très bonne compréhension des phénomènes physiques et en évitant de constater des erreurs *a posteriori*, ce qui est impossible avec des techniques uniquement basées sur la métrologie, qui nécessitent de disposer de l'ensemble du matériel en situation de fonctionnement. ●

1. L'équation de Navier-Stokes permet de décrire le champ de vitesse d'un fluide. Voir par exemple: <https://sciencetonnante.wordpress.com/2014/03/03/la-mysterieuse-equation-de-navier-stokes/>

BIBLIOGRAPHIE

- [1] PAPADOPOULOS A., GUICHARD R., VAN HOOF T., FONTAINE J.R., BLOCKEN B. - Measurements of wind effects on the efficacy of asbestos containment in a high-rise Building. In: Proceedings for the Roomvent & Ventilation Conference, 2018.
- [2] DUBERNET F., GUICHARD R., ROMERO-HARIOT A. - Amiante. Aérodynamique des chantiers d'amiante sous confinement. INRS, 2018, coll. Guide pratique de ventilation n° 23, ED 6307. Accessible sur: www.inrs.fr
- [3] GUICHARD R. - Assessment of an improved random flow generation method to predict unsteady wind pressures on an isolated building using large-Eddy simulation. *J. Wind Eng. & Ind. Aerodynamics*, avril 2019, 189.
- [4] GUICHARD R. - Simulation of the unsteady dispersion of asbestos fibers from a containment zone due to wind effects using a coupled CFD-network approach. In: Proceedings for the International Conference on Multiphase Flows, 2019.

POUSSIÈRES: SIMULER POUR MIEUX RESPIRER

La simulation numérique peut également servir la prévention des risques professionnels, en éclairant les mécanismes à l'origine de la dispersion de poussières lors de l'emploi de matériaux pulvérulents. Cet article illustre le cas de la vidange d'une trémie de poudre. La simulation permet d'obtenir des pistes pour agir à la source, en adaptant le procédé de manière à prévenir les émissions de polluants, ou de dimensionner correctement des dispositifs de captage des poussières.

EMMANUEL
BELUT, JEAN-
RAYMOND
FONTAINE
INRS,
département
Ingénierie
des procédés

FRANÇOIS
AUDARD,
PASCAL FEDE,
OLIVIER
SIMONIN
Institut de
mécanique
des fluides
de Toulouse
(IMFT)

Expositions professionnelles aux poussières

De nombreux procédés industriels utilisent ou produisent des matériaux sous forme de poudres dans divers secteurs (agroalimentaire, métallurgie, pharmacie, meunerie/boulangerie, chimie fine, industrie minérale...). Quand ces matériaux pulvérulents sont manipulés ou emballés, il est fréquent qu'une partie soit dispersée sous forme de poussières dans l'air des lieux de travail.

Les conséquences en termes de risques professionnels de cette dispersion de poussières sont variées et toujours néfastes: risque d'exposition par inhalation, risques d'incendie et d'explosion, dépôts sur les surfaces occasionnant un risque par contact cutané ou par ingestion, etc. Le Code du travail prescrit d'ailleurs explicitement de prévenir les risques liés aux poussières, qui sont considérées comme des agents chimiques dangereux. Certaines poussières sont concernées par des valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP), certaines sont classées CMR (cancérogènes, mutagènes ou toxiques pour la reproduction). C'est en particulier le cas des poussières de silice cristalline, de bois, de plomb ou d'amiante. La réglementation concernant l'aération et l'assainissement des locaux de travail prend également en compte les poussières dites sans effets spécifiques, notamment en fixant des concentrations à ne pas dépasser.

Afin d'évaluer et de prévenir le risque associé au déversement intentionnel voire accidentel d'une poudre, il est primordial de pouvoir prévoir précisément les quantités de matière mises en suspension puis transportées dans l'air, ainsi que la taille de ces poussières, pour un scénario de travail donné.

Simulation de l'écoulement d'une poudre en sortie d'une trémie

Dans ce contexte, la simulation par ordinateur constitue un outil à fort potentiel; une fois validée,

elle offre la versatilité nécessaire pour représenter de nombreuses situations de travail avec un investissement en temps et en matériel bien plus réduit qu'une campagne de mesures. Recourir à la simulation laisse entrevoir la possibilité d'atteindre une plus grande efficacité dans la prévention des risques, en touchant un plus grand nombre de situations à risque.

Parmi les opérations usuelles qui font intervenir des matériaux pulvérulents, le déversement et le vidage ou le remplissage de silos ou de trémies sont les manipulations qui génèrent le plus de poussières. Étant donné les impacts en prévention, l'INRS s'est associé à l'Institut de mécanique des fluides de Toulouse (IMFT) pour rendre opérationnel un outil de modélisation de la dispersion des poussières provoquée par la manipulation de poudre. Une phase importante du projet a consisté à étudier par simulation la manière dont la poussière se disperse en sortie de trémie et les mécanismes physiques à l'origine de cette dispersion. La connaissance de ces mécanismes permet en effet d'agir « à la source », c'est-à-dire au niveau du procédé, afin de limiter l'émission de poussière dans l'air (Cf. Encadré 1).

Lorsqu'une poudre chute par l'extrémité inférieure d'une trémie, on observe le comportement suivant (Cf. Figure 1): la poudre commence par former en apparence un jet tubulaire qui se contracte au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la sortie de trémie: la poudre est en phase d'accélération compacte. Un peu plus loin, le jet de poudre se déstabilise: sur les côtés du jet principal, on observe la formation de paquets de poussières qui se dispersent latéralement: le jet de poussière s'aère et se dilate, occupant une section de plus en plus importante: des battements latéraux apparaissent et la vitesse de chute diminue globalement. Enfin, au moment où le jet atteint le récipient de destination ou le sol, la poudre se tasse brutalement en chassant l'air interstitiel entraîné par la poudre au cours de sa chute

(air entraîné qui accompagne l'expansion latérale du jet de poudre). Cette chasse d'air est susceptible de transporter une fraction très importante de particules fines, qui vont ainsi être mises en suspension dans l'air à proximité du procédé.

Du point de vue de la prévention, il est évident qu'il convient en premier lieu d'éviter tout entrainement d'air dans le jet de poudre pour éviter que cet air soit à terme réémis dans l'atmosphère de travail en entraînant des poussières. Si cela n'est pas possible, il faudra limiter cette induction d'air en réduisant autant que possible la hauteur de chute. Enfin, il conviendra d'utiliser un captage de poussière dont le débit d'aspiration correspond au volume d'air pollué induit dans le jet de poussières.

Dans ce contexte, l'apport de la simulation est donc dans un premier temps, d'explicititer le mécanisme d'induction d'air pour chercher à le prévenir et dans un second temps, de prédire le débit d'air pollué entraîné par la poudre, afin de dimensionner les débits d'aspiration des captages.

Origine de la dispersion latérale de la poudre et simulation

La vidange d'une trémie ne s'effectue pas comme celle d'un réservoir de liquide: en particulier, une propriété bien connue, est que le débit de matière ne dépend généralement pas de la hauteur du remplissage du réservoir au-dessus de la trémie. Comme on peut l'observer dans le cas usuel du sablier, le débit est donc constant, indépendamment du niveau du réservoir amont. Ceci s'explique car le débit de matière est principalement limité par les difficultés d'écoulement au niveau de l'orifice de sortie, en raison des frottements entre les grains de matière et avec les parois.

Le caractère constant de ce débit de matière est donc connu, et des lois semi-empiriques permettent de le déterminer dans de nombreuses situations (loi de

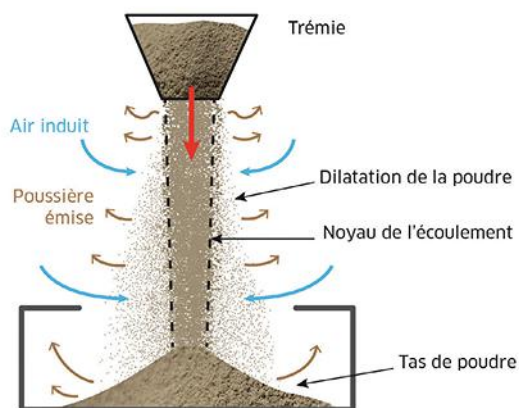
ENCADRÉ 1 PRÉVENIR PAR L'IMAGE

Un des atouts de la simulation numérique pour la prévention est son pouvoir illustratif. Présenter aux acteurs de la prévention, aux salariés et aux chefs d'entreprise des simulations de leurs situations de travail permet de les convaincre plus aisément de la réalité du risque et de l'efficacité des moyens de prévention. En effet les transports de polluants sont rendus identifiables par des cartes de couleurs et par des animations réalistes. D'après Audard [3].

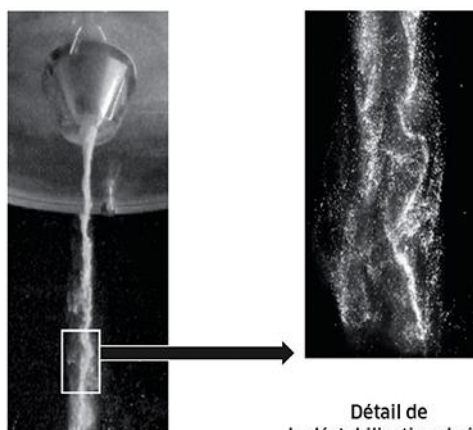


Beverloo [6] et apparentées). En revanche, les propriétés de l'écoulement lui-même en sortie de trémie restent mal connues de nos jours: à quelle vitesse et à quelle concentration sortent les particules? L'écoulement qui visuellement semble continu est-il en réalité intermittent à une fréquence indécélable à l'œil nu? Ces informations sont en effet difficilement accessibles par la mesure, étant données l'opacité du milieu granulaire et son agressivité pour les instruments, sans parler de la difficulté de réaliser des mesures non-intrusives, c'est-à-dire qui ne modifient pas le phénomène observé.

Un point important concerne la vitesse des particules et leur concentration en sortie de trémie: en effet, comme il s'agit d'un écoulement dispersé (c'est-à-dire un mélange d'air et de particules solides, entre lesquelles la distance moyenne est variable



Description de la vidange d'une trémie de poudre

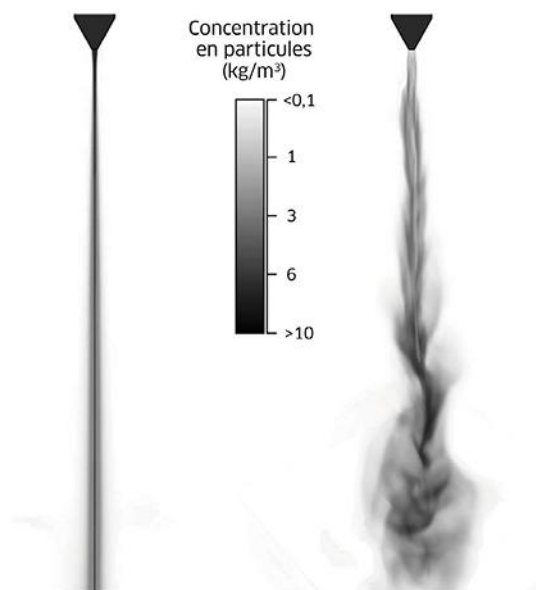


Reconstitution en laboratoire

Détail de la déstabilisation du jet et de la dispersion latérale de poussières

← FIGURE 1
Phénoménologie de la dispersion de poussière lors de la vidange d'une trémie (d'après Ansart [1]).





↑ **FIGURE 2** Simulation de la dispersion de poussières en sortie d'une trémie pour un même débit de matière, mais deux régimes d'écoulement différents en sortie de trémie (d'après Audard [3]) :
à gauche, écoulement lent et compact de la poudre et à droite, écoulement rapide et dilué. Si la compacité de la matière n'est pas maintenue au niveau de la sortie de trémie (cas de droite), une importante dispersion de poussière, associée à un élargissement du jet de matière, se produit inévitablement

suivant la concentration en particules), il ne suffit pas de connaître le débit de matière pour connaître la vitesse et la concentration des particules. Pour un débit de matière donné, il existe de nombreuses possibilités d'écoulement, entre l'écoulement lent et concentré en particules et l'écoulement rapide mais dilué. Dans ce contexte, la simulation permet d'étudier aisément l'effet de la concentration en particules en sortie de trémie pour un débit de matière donné.

La Figure 2 illustre ainsi la différence de comportement entre une même poudre sortant d'une trémie en écoulement compact (concentration proche de celle existant dans le silo amont) et en écoulement dispersé (faible concentration mais vitesse de sortie plus élevée). Les simulations indiquent que l'élargissement du jet de poudre occasionnant une dispersion de poussière ne se produit pas si la matière sort de la trémie en conservant sa compacité.

Ainsi, si la concentration en particules en sortie de trémie était proche de celle existant dans le silo, c'est-à-dire proche de l'état de compaction maximale (situation où tous les grains se touchent), le jet de poudre tomberait en bloc sans se disperser et sans entraîner d'importantes quantités d'air avec lui. En impactant au sol, la poudre déjà très compacte n'aurait que peu de possibilité de se tasser davantage et la chasse d'air interstitiel chargé en poussière serait minime. Cette situation serait idéale pour prévenir la dispersion des poussières dans l'air.

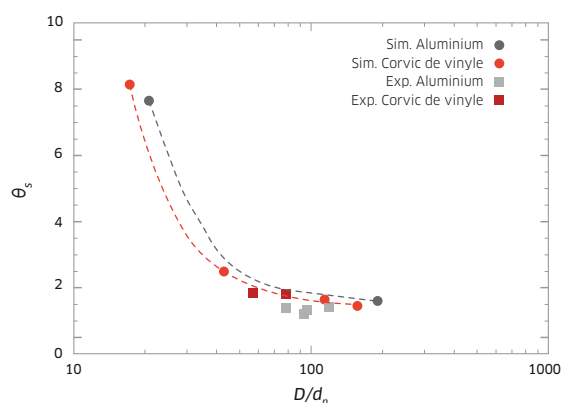
Dans la pratique, l'écoulement de poudres en sortie de trémie est rarement compact. À cause des frottements entre particules et avec les parois de la trémie, les particules ont tendance à former des voûtes, qui s'arc-boutent sur les parois de la trémie. Ces voûtes retiennent l'écoulement puis s'écroulent en permanence au niveau de l'orifice de sortie, pour se reconstituer aussitôt grâce à l'apport de nouvelles particules venues du réservoir amont qui se vide. À chaque écroulement d'une voûte, les particules qui la constituaient tombent dans un milieu relativement vide en particules sur une distance comparable au rayon de l'orifice de sortie, qui correspond au rayon des voûtes de particules. En chute libre sur une telle distance, les particules accélèrent notablement. En sortie de trémie, on rencontre donc un écoulement de particules plutôt rapide et dilué, incorporant dès l'origine une fraction importante d'air. La simulation numérique montre que c'est cet état initialement assez dispersé du jet de particules qui explique sa dispersion latérale ultérieure, de plus en plus importante au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la sortie de trémie, avec à la clé, un important entraînement d'air qui se charge en poussières.

La simulation numérique permet déjà de formuler une première piste de prévention au niveau du procédé lui-même, c'est-à-dire à la source. Pour prévenir la dispersion de poussières lors de la vidange d'un réservoir de matière pulvérulente, il faut agir sur le procédé de vidange de manière à conserver la compacité de la matière au niveau de l'orifice de sortie. Tout dispositif facilitateur permettant de solliciter la matière « en bloc » permettra d'éviter la dispersion ultérieure de poussière.

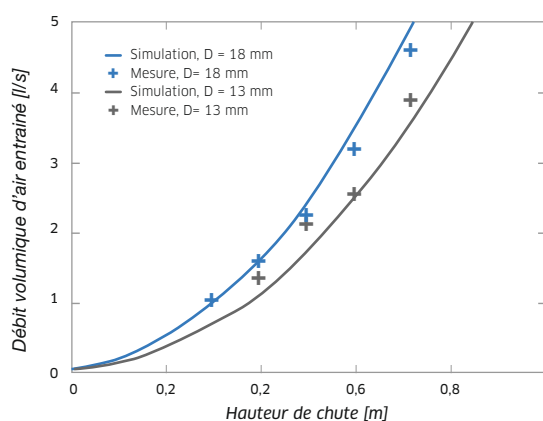
En revanche, la vidange d'un réservoir de matière pulvérulente sous son propre poids via un orifice simple non spécifiquement étudié pour permettre un écoulement dense de la matière, conduira inévitablement à une dispersion de poussière.

Influence du diamètre de sortie de la trémie sur la dispersion du jet de poudre

Pour illustrer l'importance de faciliter au maximum l'écoulement de la poudre en sortie de trémie de manière à limiter la dispersion latérale ultérieure de poudre, il est également possible d'étudier par simulation l'influence du rapport entre le diamètre de l'orifice D et le diamètre des particules d_p . Si le diamètre de cet orifice se réduit pour se rapprocher de celui des particules, l'écoulement de la poudre devient de plus en plus difficile. Les simulations indiquent que cela impacte directement la structure du jet de poudre et sa dispersion latérale (Cf. Figure 3). Ainsi, les simulations montrent que l'angle du jet de poudre en sortie de trémie est constant et faible si le jet tombe en masse (ce qui se produit pour des ratios D/d_p élevé), mais que lorsque le



↑ FIGURE 3 Évolution de l'angle d'ouverture du jet de poudre en fonction du rapport D/d_p , pour des poudres de différente granulométrie et composition (d'après Audard [3]).



↑ FIGURE 4 Débit d'air entraîné en fonction de la hauteur de chute, pour des particules présentant un diamètre médian de $120 \mu\text{m}$, (d'après Audard [3]). Comparaison entre simulation numérique et expérience pour différents diamètres de sortie de trémie D.

ratio D/d_p est faible l'angle augmente de manière drastique, ce qui traduit une importante dispersion latérale de la poudre. Ces résultats sont en accord quantitatif avec les données expérimentales disponibles.

Détermination du débit d'air entraîné

Un autre apport de la simulation dans ce cadre est l'aide à la détermination des débits d'aspiration des captages de poussière. La simulation numérique permet en effet de calculer le débit d'air entraîné par la poudre au cours de sa chute. Ce débit d'air, qui pénètre dans le jet de poudre et donc se charge en poussière, sera libéré dans l'atmosphère après impact au sol de la poudre: il convient donc de le capter par aspiration pour prévenir les expositions. La Figure 4 propose une comparaison des débits d'air entraînés obtenus par le modèle et mesurés

expérimentalement, dans le cas des particules de diamètre médian de $120 \mu\text{m}$. Le modèle numérique reproduit correctement l'augmentation du débit d'air entraîné avec la hauteur de chute de la poudre. Afin de limiter le débit des captages, on veillera donc à réduire au minimum les hauteurs de chute de la poudre en sortie de trémie.

Conclusion

La simulation numérique des écoulements est un outil précieux au service de la prévention, notamment lorsqu'elle est utilisée pour analyser le déversement d'une poudre au travers d'une trémie. Elle permet d'agir à la source en mettant en évidence les mécanismes à l'origine de la dispersion de poussières et de dimensionner les dispositifs de protection collective qui pourront être utilisés sur le terrain. ●

BIBLIOGRAPHIE

[1] ANSART R. – Émission de poussières lors de la manipulation de poudre: interaction entre les particules en mouvement et l'air ambiant. Toulouse, INPT, Thèse de doctorat, 2007.
 [2] AUDARD F., FEDE P., SIMONIN O., BELUT E. – Numerical analysis of dust Emission by powder discharge and jet expansion. In: ASME/JSME/KSME 2015 Joint Fluids Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2015, p. V001T32A001.
 [3] AUDARD F. – Modélisation eulérienne de la vidange d'un silo et de l'expansion du panache. Toulouse, INPT, Thèse de doctorat, 2016.

[4] AUDARD F., FEDE P., BELUT E., FONTAINE J.R., NEAU H., SIMONIN O. – Eulerian simulation of 3D freely-falling granular jet. In : ICMF-2016 - 9th International Conference on Multiphase Flow, Florence (Italie) mai 2016. Accessible sur: www.researchgate.net/publication/305641629_Eulerian_simulation_of_3D_freely-falling_granular_jet/link/579751fe08aec89db7b99d69/download
 [5] FEDE P., AUDARD F., BELUT E., FONTAINE J.R., SIMONIN O. – Analytical and practical analysis

of frictional-kinetic model for dense and dilute gas-solid flows. In: ICMF-2016 - 9th International Conference on Multiphase Flow, Florence (Italie) mai 2016. Accessible sur: https://www.researchgate.net/publication/305618695_Analytical_and_practical_analysis_of_frictional-kinetic_model_for_dense_and_dilute_gas-solid_flows/link/5795d9d108aeb0ffcd04e6c0/download
 [6] BEVERLOO W., LENIGER H., VAN DE VELDE J. – The flow of granular solids through orifices. *Chemical Engineering Science*, 1961, 15(3-4), pp. 260-269.