



Intégration de la sécurité dans l'innovation : vers une meilleure caractérisation des expositions professionnelles aux nanoparticules ?

Louis GALEY¹, Sabyne AUDIGNON¹, Olivier WITSCHGER², Aude LACOURT¹, Alain GARRIGOU¹

¹ Univ. Bordeaux, INSERM, Bordeaux Population Health Research Center, team EPICENE, UMR 1219, 146 rue Léo Saignat, F-33000 Bordeaux, France

louis.galey@u-bordeaux.fr

² Laboratoire de Métrologie des Aérosols, Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS), Rue du Morvan, CS 60027, 54500 Vandœuvre-lès-Nancy, France

Le développement des nanotechnologies entraîne de nouvelles expositions professionnelles dans de nombreux secteurs de production. Face aux effets incertains sur la santé, les préventeurs manquent de ressources et les connaissances sur les expositions sont partielles. De nouvelles pratiques d'intervention doivent émerger afin d'intégrer la sécurité le plus en amont de ces innovations. Le projet a pour objectif de développer une méthode opérationnelle et transférable permettant de caractériser les expositions aux nanoparticules par l'intégration de l'analyse d'activité au mesurage des aérosols. Cette méthode doit outiller les préventeurs, apporter des réponses aux entreprises fortement demandeuses mettant en œuvre des procédés technologiques entraînant des transformations majeures du travail et nourrir de nouvelles études épidémiologiques. Ce travail alimente la réflexion sur les stratégies d'intervention innovante en santé au travail.

Mots-clés : ergotoxicologie, nanotechnologies, innovation, video exposure monitoring

Integrating safety into innovation: towards a better assessment of occupational exposure to airborne nanoparticles?

The development of nanotechnologies has changed occupational exposure in industrial processes. A lot of uncertainties dealing with the cause of health issues persist. Knowledge on the subject is in its infancy and prevention of occupational exposure is in development. New strategies have to be developed to integrate safety in the earliest stages of innovation. The objective is to build an operational approach to assess occupational exposure to nanoparticles, integrating activity analysis and exposure measurement. This method has to help answer the concerns of companies introducing new technology that is conducive to important work transformations and to feed epidemiological studies. The proposed approach takes into account limitations of the prevailing paradigm of risk prevention that hide some facets of safety. This method strengthens current thought process regarding innovative intervention in the field of occupational health.

Keywords: ergotoxicology, nanotechnologies, innovation, video exposure monitoring

*Ce texte original a été produit dans le cadre du congrès de la Société d'Ergonomie de Langue Française qui s'est tenu à Toulouse du 20 au 22 septembre 2017. Il est permis d'en faire une copie papier ou digitale pour un usage pédagogique ou universitaire, en citant la source exacte du document, qui est la suivante : Galey, L., Audignon, S., Witschger, O., Lacourt, A., & Garrigou, A. (2017). Intégration de la sécurité dans l'innovation : vers une meilleure caractérisation des expositions professionnelles aux nanoparticules ? 52^{ème} Congrès de la SELF - Présent et Futur de l'Ergonomie (Toulouse, 20-22 septembre).

Introduction

Depuis les années 2000, le développement des nanotechnologies est source d'innovations prometteuses dans la quasi-totalité des secteurs industriels. Les nanoparticules sont définies comme des particules dont au moins une dimension est inférieure à 100nm (ISO, 2007), conférant aux matériaux dans lesquels elles sont incorporées des propriétés inédites. Ces nouvelles propriétés posent également question quant aux impacts possibles sur la santé humaine (Schulte *et al.*, 2016) approximately 15 years later, it is worthwhile to take stock of research and efforts to protect nanomaterial workers from potential risks of adverse health effects. This article provides and examines timelines for major functional areas (toxicology, metrology, exposure assessment, engineering controls and personal protective equipment, risk assessment, risk management, medical surveillance, and epidemiology. L'impact sanitaire de particules de taille similaire émises non intentionnellement par certains process anciens (fumées de soudage, diesel...) ou récents (imprimante 3D métalliques, projection thermique...) suscite également des préoccupations. Qu'elles soient manufacturées ou non intentionnellement produites, de fortes incertitudes persistent sur les effets ainsi que les caractéristiques de ces nanoparticules les plus pertinentes pour faire le lien avec les conséquences sur la santé humaine malgré de nombreux travaux sur la toxicité. Les connaissances épidémiologiques peinent à se développer en raison de l'hétérogénéité des données de la littérature liée à l'incertitude.

De nouveaux défis sont posés pour la santé au travail et la prévention dont plusieurs paradigmes dominants dévoilent leurs limites. Les approches classiques de métrologie des polluants atmosphériques ne sont plus opérantes et les modèles classiques d'évaluation et de prévention des risques sont particulièrement mis à mal dans ce contexte d'incertitude. Ce contexte est une opportunité de construire de nouvelles approches pluridisciplinaires et transprofessionnelles pour intervenir en entreprise, produire de nouvelles connaissances sur les expositions professionnelles et les moyens de s'en prémunir.

C'est dans ce contexte que le projet ExproPNano a été mis en place. Ce projet de trois ans a pour objectif de développer une méthode transférable et opérationnelle à destination des préventeurs de terrain afin de mieux caractériser les expositions professionnelles aux nanoparticules qu'elles soient manufacturées ou non intentionnelles par l'analyse d'activité et la caractérisation des aérosols. Une originalité de ce projet est l'intégration de l'ergonomie, la métrologie et la santé publique.

Méthode

La méthode d'intervention élaborée est le fruit de plusieurs processus complémentaires. Dans un premier temps, un état de l'art des préconisations actuelles pour évaluer les expositions professionnelles aux nanoparticules a été mené. Ensuite, la méthode a pu être co construite grâce aux échanges avec les partenaires du projet (métrologues, épidémiologistes, médecin du travail et toxicologues) et les utilisateurs potentiels de la méthode : des préventeurs institutionnels et les préventeurs d'entreprises concernés par ces expositions aux nanoparticules. Une dernière

étape en cours consiste à mettre en œuvre la méthode dans des entreprises de secteurs industriels d'intérêt.

Bilan bibliographique des préconisations pour évaluer les expositions professionnelles aux nanoparticules

Vingt et un documents ont été sélectionnés et analysés à partir d'une revue exhaustive de la littérature. Quatre sources principales de recommandations apparaissent au niveau national et international :

- les instituts de prévention (NIOSH, INRS, INERIS, CEA (Witschger *et al.*, 2012), BAuA/IFA, IRSST) ;
- les normes (ISO, BSI, CEN) ;
- les groupements pour le développement économique (OCDE, NEDO) ;
- et des chercheurs de disciplines comme l'hygiène industrielle, la métrologie, la santé au travail et l'épidémiologie.

La revue critique de littérature a ciblé des éléments comme la prise en compte de l'activité dans l'analyse des expositions.

Apports de l'ergonomie

Depuis la remise en question des paradigmes dominant de la prévention des risques chimiques (Mohammed-Brahim & Garrigou, 2009), le modèle par écran consistant à juxtaposer des barrières entre les opérateurs et une source de danger montre ses limites. L'opérateur est bien acteur et sujet de son exposition. Finalement, en partant de l'activité de travail, il devient possible de résoudre l'énigme de l'exposition. Le cas des nanotechnologies, bien que fortement marqué par le principe de précaution, ne fait pas exception. Depuis, plusieurs auteurs ont élaboré des méthodes alternatives basées sur l'analyse de l'activité (LAllain, Caroly, Draï, & Witschger, 2015).

Pourtant, certaines pratiques de l'hygiène industrielle proposent des outils permettant d'intégrer l'activité dans l'analyse des expositions. La vidéo exposition monitoring (VEM) décrite par Rosén *et al.* (2005) associe des enregistrements vidéo de l'activité à des données de mesure temps réel. Nous avons déjà eu l'occasion de montrer que ce type de pratique permet de mettre en débat l'activité en créant des espaces intermédiaires de discussion sur le travail et ses expositions (Garrigou, 2011 ; Galey, Barcellini, Rinaldo, & Garrigou, 2014). Cet usage de la VEM permet de construire de nouvelles pratiques de sécurité réglées à partir de pratiques de sécurité gérées élaborées par les opérateurs pour faire face aux risques liés à l'utilisation de nanoparticules.

Ces notions de processus de sécurité ont émergé dans le domaine de la sécurité industrielle (de Morel, Amalberti, & Chauvin, 2008 à Rocha, Mollo, & Daniellou, 2015) et trouvent tout leur sens lorsqu'il s'agit de question de santé au travail. La méthodologie élaborée fait suite à des travaux antérieurs (Garrigou *et al.*, 2015) et se structure autour des notions de sécurité réglée représentant l'ensemble des pratiques formelles et prescrites de sécurité, et de sécurité gérée représentant les pratiques de sécurité effectivement mises en œuvre par les acteurs de l'entreprise.

Processus transdisciplinaire et transprofessionnel

Une dernière étape a consisté à co-construire la

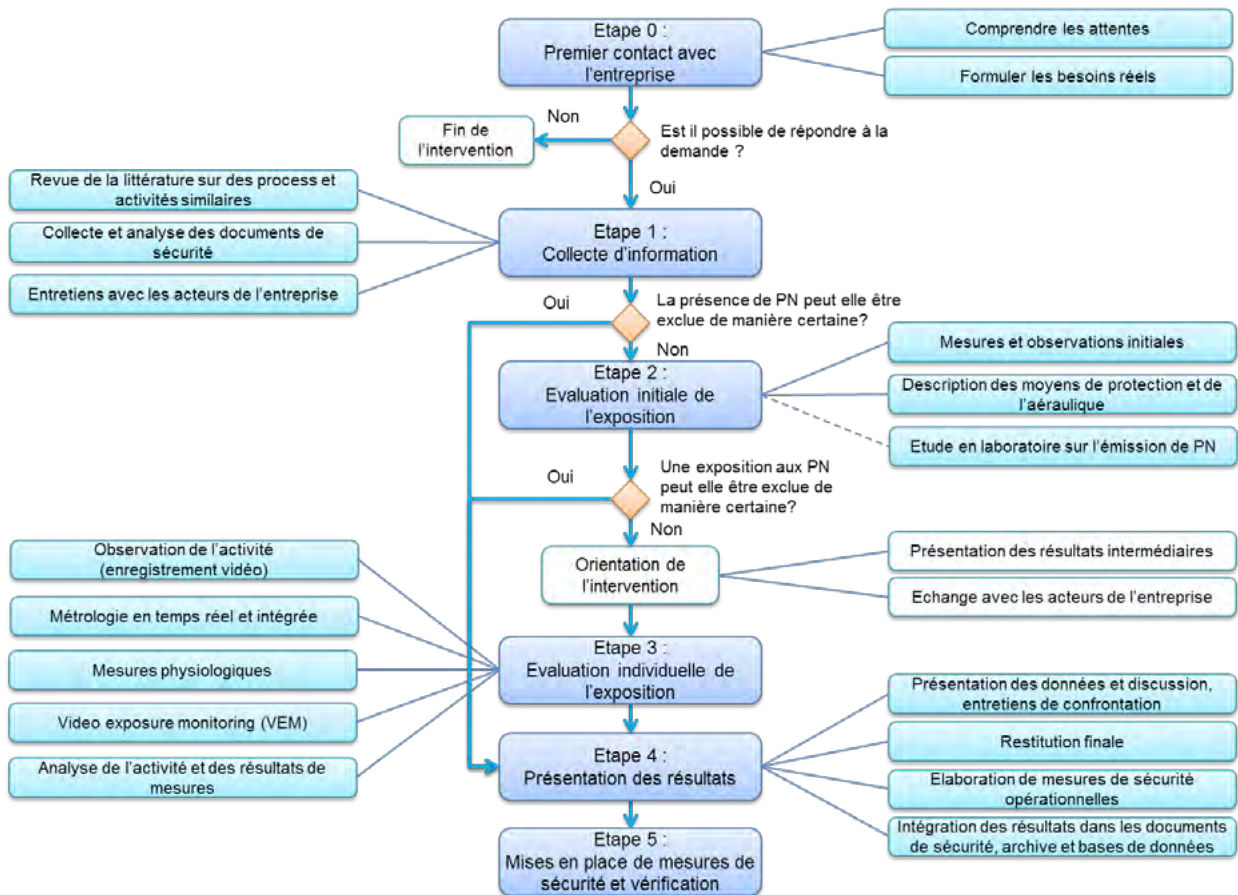


Figure 1. Logigramme d'intervention en entreprise

méthode avec les partenaires du projet. Six journées de séminaires de travail ont permis de débattre *et al.* imenter la méthode élaborée. Les discussions se sont basées sur la méthodologie et les outils envisagés comme le logigramme d'intervention.

Une première journée d'échange avec des préventeurs institutionnels, acteurs quotidiennement confrontés à la problématique d'évaluation des expositions professionnelles aux nanoparticules, a permis un premier niveau de prise en compte de leurs pratiques, difficultés et préoccupations.

Résultats

Recommandations actuelles

Pour être mises en œuvre en entreprise, les recommandations actuelles demandent une expertise forte en hygiène industrielle et en métriologie, les rendant non opérationnelles pour les acteurs de la prévention concernés. Il en résulte que de telles interventions en entreprise restent anecdotiques, dans le cadre de travaux de recherche ou résultantes de collaborations entre instituts de prévention, chercheurs et industriels.

Ce bilan bibliographique montre que l'activité n'est pas abordée. Les recommandations font davantage référence à des opérations de production ou des phases de fonctionnement de process décrites avec peu de détail.

Aucune recommandation présente de méthode ou outils permettant de comprendre l'activité. Un vrai enjeu pour les pratiques de prévention serait d'intégrer l'activité pour mieux caractériser les expositions réelles.

Méthode élaborée

La figure 1 ci-dessus résume la stratégie d'intervention proposée.

La méthode élaborée se structure autour d'une caractérisation des pratiques de sécurité réglées (étape 1 et 2) pour aboutir à une caractérisation des expositions réelles (étape 3) avant de les confronter à partir d'objets intermédiaires entre les acteurs de l'entreprise (étape 4). L'objectif est de construire des pratiques de sécurité plus opérantes (étape 5) par une collaboration entre les opérateurs confrontés à ces expositions et les opérateurs en charge d'élaborer des pratiques de sécurité réglées (encadrement, direction, membres du service sécurité...).

Nous proposons le terme de **sécurité construite** pour faire référence à cette troisième dimension de la sécurité caractérisée par sa dimension dialogique, diachronique et évolutive.

Les différentes étapes de la stratégie sont détaillées ci-dessous :

- L'analyse de l'étape 1 permet de comprendre comment les entreprises élaborent des pratiques de prévention des expositions aux nanoparticules.

- Cette étape se base sur des entretiens et une analyse des supports de sécurité ;
- L'étape 2 consiste à repérer les situations de travail devant faire l'objet d'une évaluation approfondie de l'exposition. Cette étape se base sur des observations et la réalisation de mesures temps réel ;
 - Après une restitution intermédiaire, l'étape 3 consiste à évaluer de manière détaillée les expositions par réalisation de mesures temps réel (des aérosols et physiologiques), intégrées et d'observations vidéo ;
 - L'étape 4 se base sur des entretiens de confrontation (Mollo & Falzon, 2004) à partir de traces de l'activité et de l'exposition (vidéo, résultats de mesure, VEM, verbatim, documents de sécurité...);
 - La dernière étape 5 consiste à mettre en œuvre les pistes de transformation co construites. La posture particulière des préventeurs institutionnels permet un suivi et un accompagnement dans le temps.

Possibilités d'agir des préventeurs

Les premiers résultats issus de cette recherche action laissent entrevoir des possibilités de ré appropriation de la méthode de la part des préventeurs institutionnels mais aussi de préventeurs d'entreprises. La VEM, objet intermédiaire intégrateur de l'activité de travail et des mesures, utilisée par certains de ces préventeurs permet d'ouvrir la discussion sur le travail réel. Ces acteurs de la prévention réinterrogent naturellement les pratiques de sécurité réglées à partir de ces situations réelles d'exposition. Dans d'autres cas, l'usage d'instrument de mesure en temps réel amène naturellement les préventeurs à avoir recours à la vidéo pour comprendre les fluctuations d'exposition. Même si ce genre d'analyse reste marginal, un travail va continuer à être réalisé dans le cadre du projet afin de consolider et renforcer ces pratiques.

Discussion

La mesure, support d'évaluation des expositions dans les paradigmes les plus traditionnels de l'évaluation des risques (National Research Council, 1983) apporte la nécessité de s'intéresser aux facteurs pouvant faire varier les valeurs obtenues. Le cas des nanoparticules fait appel à de nombreux instruments de mesure permettant d'obtenir un niveau de concentration en fonction du temps. En ce sens, l'interprétation des résultats fait naturellement appel à la nécessité de comprendre l'évolution de la situation de travail et ainsi de l'activité de travail.

Plusieurs demandes des entreprises concernant des expositions aux nanotubes de carbone ou noir de carbone nous rappellent la spécificité de la mesure et la variété des méthodes de prélèvement et d'analyses des aérosols. Les techniques d'analyse de ce type de prélèvement ne sont pas stabilisées. Pour les entreprises, ces expositions restent la principale préoccupation en raison de la toxicité potentielle ou encore de symptômes et ressentis d'opérateur. Pour l'instant, ces expositions sont complexes à analyser.

Compte tenu de l'exigence sur la maîtrise du matériel

de mesure et des éléments en lien avec l'analyse de l'activité, la question de l'appropriation de la méthode par les multiples acteurs se pose. L'acquisition et l'usage du matériel de mesure présente un investissement important.

Conclusion

Ce projet apparaît comme une possibilité de conforter l'importance d'intégrer l'activité de travail dans l'analyse des expositions professionnelles aux produits chimiques à partir du cas des nanotechnologies. Ces nanotechnologies entraînent des innovations fortes dans l'industrie principalement et la sphère professionnelle de manière plus générale (laboratoire de recherche...). L'enjeu est donc d'intégrer la sécurité le plus en amont possible du développement de ces innovations. Proposer des objets intermédiaires (Judon, Hella, Pasquereau, & Garrigou, 2015) contribuant à l'évaluation de l'exposition des travailleurs permettant de rendre visible le travail réel est novateur vis à vis des paradigmes classiques d'évaluation des risques professionnels. Le sujet de l'exposition aux nanoparticules conserve certains de ces paradigmes dominant en ouvrant des perspectives fortes de prise en compte de l'activité humaine de travail. La prise en compte de l'activité permet *alors* de comprendre les mécanismes conduisant à l'exposition. L'identification de ces causes réelles permet de faire le lien avec les besoins de prévention soulevés par ces transformations technologiques. Partir de l'activité pour comprendre les expositions réelles et les mettre en discussion ouvre ainsi de nombreuses perspectives pour agir en santé au travail et tendre vers une sécurité construite.

Les premiers résultats renforcent l'hypothèse que ce flou de prescription favorisé par le contexte d'innovation et d'incertitude laisse une place importante à l'ensemble des acteurs de l'entreprise pour élaborer des pratiques de sécurité gérées. Ce type de pratiques conduit dans certains cas à des expositions. Il devient urgent de mettre en discussion ces situations d'exposition pour construire la sécurité. A ce titre, les échanges doivent être renforcés au niveau des entreprises mais aussi à l'extérieur.

Cette recherche action s'intéresse également au processus de conception (Barcellini, Van Belleghem, & Daniellou, 2013). Une hypothèse centrale est que l'ergonome est un concepteur à part entière qu'il élabore des méthodes pour intervenir sur des problèmes ou se positionne en accompagnateur de projets de conception. Les retombées de ce travail permettront d'alimenter la réflexion sur les nouvelles pratiques de l'ergonome en lien avec les évolutions actuelles du travail.

Remerciements

Les auteurs tiennent particulièrement à remercier l'ANSES, l'INRS et la Région Aquitaine ainsi que l'ensemble des partenaires du projet.

Bibliographie

Barcellini, F., Van Belleghem, L., & Daniellou, F. (2013). Les projets de conception comme opportunité de développements des activités. *Ergonomie constructive*, 191-206.

- Galey, L., Barcellini, F., Rinaldo, M., & Garrigou, A. (2014). Exposition aux nanotubes de carbone dans une plateforme de transfert de technologies. In *ACE 2014 Annual Conference Proceedings*. Montréal, Canada.
- Garrigou, A. (2011). *Le développement de l'ergotoxicologie : une contribution de l'ergonomie à la santé au travail* (Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches en Ergonomie). Université de Bordeaux.
- Garrigou, A., Théry, L., Chassaing, K., Effantin, E., Mercieca, P., Dimerman, S., Vanderghote, M., Négroni, P., Gauthier, P., Goutille, F., Galey, L., Rambaud, C., Laporte, E., Merlin, X., Vergneaux, L., Baratta, R. (2015). Une approche pluridisciplinaire du processus de construction sociale de la prévention du risque CMR. In *Actes du 50ème Congrès International de la Société d'Ergonomie de Langue Française* (p. 476-489). Paris, France.
- ISO. (2007). ISO TR 27628 - Workplace atmospheres — Ultrafine, nanoparticle and nano-structured aerosols — Inhalation exposure characterization and assessment. ISO.
- Judon, N., Hella, F., Pasquereau, P., & Garrigou, A. (2015). Vers une prévention intégrée du risque chimique lié à l'exposition cutanée au bitume des travailleurs de la route. Élaboration d'une méthodologie dans le cadre de l'ergotoxicologie. *Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé*, (17-2). <https://doi.org/10.4000/pistes.4586>
- L'Allain, C., Caroly, S., Drais, E., & Witschger, O. (2015). Concevoir la prévention d'un risque émergent: une démarche fondée sur les représentations et les activités. *Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé*, (17-1). Consulté à l'adresse <http://pistes.revues.org/4421>
- Mohammed-Brahim, B., & Garrigou, A. (2009). Une approche critique du modèle dominant de prévention du risque chimique. *Activités*, 06(1). <https://doi.org/10.4000/activites.2086>
- Mollo, V., & Falzon, P. (2004). Auto- and allo-confrontation as tools for reflective activities. *Applied Ergonomics*, 35(6), 531-540. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2004.06.003>
- National Research Council. (1983). *Risk Assessment in the Federal Government: Managing the Process*.
- Rocha, R., Mollo, V., & Daniellou, F. (2015). Work debate spaces: A tool for developing a participatory safety management. *Applied Ergonomics*, 46, 107-114. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2014.07.012>
- Rosén, G., Andersson, I.-M., Walsh, P. T., Clark, R. D. R., Säämänen, A., Heinonen, K., Pääkkönen, R. (2005). A Review of Video Exposure Monitoring as an Occupational Hygiene Tool. *Annals of Occupational Hygiene*, 49(3), 201-217. <https://doi.org/10.1093/annhyg/meh110>
- Schulte, P. A., Roth, G., Hodson, L. L., Murashov, V., Hoover, M. D., Zumwalde, R., ... Howard, J. (2016). Taking stock of the occupational safety and health challenges of nanotechnology: 2000-2015. *Journal of Nanoparticle Research: An Interdisciplinary Forum for Nanoscale Science and Technology*, 18, 159. <https://doi.org/10.1007/s11051-016-3459-1>
- Witschger, O., Le Bihan, O., Reynier, M., Durand, C., Marchetto, A., Zimmermann, E., & Charpentier, D. (2012). Préconisations en matière de caractérisation des potentiels d'émission et d'exposition professionnelle aux aérosols lors d'opérations mettant en oeuvre des nanomatériaux - Article de revue - INRS. ND 2355. Consulté à l'adresse <http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ND%202355>

