

# INDUSTRIE DU FUTUR : POINTS DE VIGILANCE VIS-À-VIS DE L'APPLICATION DES PRINCIPES GÉNÉRAUX DE PRÉVENTION

---

JACQUES  
MARSOT,  
JEAN-  
CHRISTOPHE  
BLAISE  
INRS,  
département  
Ingénierie des  
équipements  
de travail

---

LAURENT  
CLAUDON,  
BENJAMIN  
PATY  
INRS,  
département  
Homme au  
travail

---

JEAN-PIERRE  
LECLERC  
INRS,  
département  
Ingénierie  
des procédés

---

PATRICK  
LAINE  
INRS,  
département  
Expertise  
et conseil  
technique

---

CÉDRIC  
DUVAL  
INRS,  
département  
Information et  
communication

---

L'industrie du futur, portée notamment par l'intégration du numérique et des nouvelles technologies, modifie les systèmes de production et les organisations du travail ; cela ne peut pas être sans conséquence, en matière de santé et de sécurité au travail. Cet article propose une analyse des effets de cette transformation sur l'application des principes généraux de prévention (PGP) des risques professionnels, en s'intéressant à trois axes d'évolution : l'utilisation croissante des technologies de production avancées, la généralisation des technologies numériques au niveau des postes de travail, et l'accroissement de la flexibilité des systèmes de production.

---

**TOMORROW'S INDUSTRY: DUE DILIGENCE FOR THE APPLICATION OF THE GENERAL PRINCIPLES OF PREVENTION** – *Tomorrow's industry, characterised in particular by digitalisation and the introduction of new technologies, will have modified production systems and patterns of work organisation; this evolution cannot but have consequences in terms of occupational health and safety. This article proposes an analysis of the impact of this transformation on the application of the general principles of occupational risk prevention, investigating three directions for progression: increasing use of advanced production technologies, digitalisation of workstations, and greater flexibility of production systems.*

---

L'industrie du futur, ou « industrie 4.0 » (Cf. *Pour en savoir plus*) marque une rupture dans l'évolution du secteur industriel. Reposant sur l'intégration des nouvelles technologies, notamment numériques, dans l'ensemble de la chaîne de production, elle vise à associer contrôle, flexibilité, sécurité et productivité, pour améliorer la compétitivité des entreprises. Ainsi, les modes de production, l'activité des salariés, l'organisation de travail, les relations clients-fournisseurs et le modèle économique de ces entreprises vont être transformés.

Qu'en est-il de l'applicabilité de la démarche de prévention des risques professionnels ? Sera-t-elle aussi bouleversée par ces évolutions technologiques, organisationnelles et économiques ? Afin d'apporter des éléments de réponse à cette

question, cet article se propose d'analyser l'impact de ces transformations sur l'application des principes généraux de prévention (PGP ; Cf. *Encadré*) qui encadrent la santé et la sécurité au travail (S&ST), tant au niveau national (art. L. 4121-2 du Code du travail) qu'europpéen (Directive cadre n° 89/391/CEE)<sup>1</sup>. L'application et l'articulation de façon cohérente des neuf principes généraux de prévention doivent en effet permettre aux entreprises de faire face à tous les types de situations de travail, y compris les plus inédites, du point de vue de la prévention des risques professionnels. Les principales interrogations posées par l'industrie du futur en matière de S&ST des travailleurs peuvent se décliner selon trois axes de transformation des systèmes de production :

- l'utilisation croissante des technologies de production avancées ;



ENCADRÉ

**LES NEUF PRINCIPES GÉNÉRAUX DE PRÉVENTION (PGP)**

**1. Éviter les risques**

Supprimer dans la mesure du possible les dangers ou les risques associés. C'est par exemple la suppression d'un besoin d'intervention en hauteur afin de supprimer le risque de chute.

**2. Évaluer les risques**

Évaluer les risques qui n'ont pas pu être supprimés afin de prioriser les actions de prévention à mettre en place. Cette évaluation se base sur l'estimation de la gravité du dommage potentiel et de sa probabilité d'occurrence.

**3. Combattre les risques à la source**

Intégrer la prévention le plus en amont possible, notamment dès la conception des lieux de travail, des équipements ou des modes opératoires.

**4. Adapter le travail à l'homme**

Adapter les organisations,

les process, les modes opératoires, les postes de travail, etc., aux caractéristiques des salariés (morphologie, force, résistance, compétences, expérience, etc.).

**5. Tenir compte de l'évolution de la technique**

Mettre en place des moyens de prévention répondant aux évolutions techniques et organisationnelles. Cela nécessite la mise en place d'une veille régulière.

**6. Remplacer ce qui est dangereux par ce qui l'est moins**

Prioriser les mesures qui suppriment ou réduisent de façon intrinsèque les dangers par rapport aux mesures qui protègent de ces dangers.

**7. Planifier la prévention**

Intégrer dans un ensemble cohérent l'ensemble des facteurs pouvant

conduire à des accidents ou des maladies professionnelles

**8. Donner la priorité aux mesures de protection collective**

Hiérarchiser les mesures de protection : après les mesures intrinsèques (6<sup>e</sup> principe), il s'agit de prioriser la protection collective par rapport aux mesures de protection individuelles.

**9. Donner les instructions appropriées aux salariés**

Donner aux salariés les informations nécessaires à l'exécution de leurs tâches dans des conditions de sécurité optimales. Il s'agit notamment de leur fournir tous les éléments nécessaires à la bonne compréhension des risques encourus et ainsi de les associer à la démarche de prévention.

- la numérisation (digitalisation) des postes de travail ;
- l'accroissement continu de la flexibilité des systèmes de production.

Ces trois axes soulèvent potentiellement des questions sur l'application de chacun des neuf PGP. Toutefois, afin d'éviter des répétitions qui seraient inévitablement apparues du fait de la complémentarité entre ces axes, ainsi qu'entre les PGP, nous avons choisi de nous focaliser sur les PGP les plus impactés par chacun de ces trois axes.

Ces axes peuvent par ailleurs soulever des questions plus spécifiques, comme celles liées au respect de règles de conception (directive « Machines » n° 2006/42/CE pour les imprimantes 3D ou les robots collaboratifs ; règlement n° 2016/425<sup>2</sup> pour les EPI intelligents), qui ne sont pas abordées dans cet article.

**Impacts des nouvelles technologies de production sur l'application des PGP**

L'industrie du futur repose sur une combinaison de technologies dites « avancées », qui ont comme point commun de permettre l'amélioration de la flexibilité de l'ensemble de la chaîne de production. C'est par exemple le cas de la robotique collaborative, des exosquelettes, de la fabrication additive.

L'intégration de nouvelles technologies de production n'est en soi pas un phénomène nouveau et

ne remet pas en cause la pertinence des PGP. Au contraire, intégrer de nouvelles technologies, c'est tenir compte de l'état de la technique afin d'éviter ou de réduire les risques, à condition de s'assurer que ces nouvelles technologies sont conformes aux règles de conception qui leur sont applicables.

Cependant, ce qui caractérise l'industrie du futur vis-à-vis des nouvelles technologies, c'est l'intégration de systèmes de traitement de l'information destinés à les rendre « intelligentes ». C'est cette complexité croissante, combinée à une accélération de la mise sur le marché de ces technologies, qui peut questionner l'application adéquate de certains PGP. Il faut en effet prendre le temps d'analyser les risques nouveaux, accentués, ou plus difficilement maîtrisables du fait de ces nouvelles technologies. Il peut ainsi être difficile de tenir compte de l'évolution de la technique dans ce contexte d'accélération.

Pour illustrer cette problématique, prenons l'exemple de l'évolution constatée dans le domaine de la robotique.

Les robots industriels ont été initialement développés pour la réalisation d'opérations basiques, répétitives nécessitant des forces importantes (palettisation, manipulation de pièces lourdes, insertion en force...) ou encore dangereuses (soudage, collage, manipulations de pièces chaudes, de produits toxiques...). Conformément au principe de prévention qui consiste à combattre le risque à la source,

l'application des règles de conception conduisait, en phase de production, à isoler les robots industriels dans une enceinte grillagée.

Avec les progrès dans le pilotage des mouvements de ces robots, du fait de l'essor des techniques numériques, leur domaine d'application s'est élargi, notamment avec le développement d'applications dites « collaboratives ». L'objectif est alors d'associer le savoir-faire et le pouvoir décisionnel de l'être humain avec la puissance, l'endurance et la capacité de répétabilité des tâches du robot. La suppression totale ou partielle des barrières physiques entre l'homme et le robot qui en découle remet en cause la stratégie de protection précédemment évoquée, et nécessite une connaissance fine des interactions entre l'humain et le système technique pour mettre en œuvre des solutions de prévention adéquates.

L'une des nouvelles stratégies de prévention proposées consiste à contrôler en temps réel la distance entre le robot (et la pièce ou l'outil qu'il manipule) et l'opérateur, de façon à éviter tout risque de collision. Sans parler du fait que cette stratégie ne préserve pas des risques liés à l'éjection de la pièce maintenue par le robot par exemple, ces dispositifs de contrôle, généralement basés sur l'utilisation de systèmes de vision 3D, en sont encore au stade de tests préindustriels, alors que les robots sont déjà opérationnels dans les ateliers [1].

Une autre stratégie proposée consiste à limiter la puissance et la force du robot, de façon à réduire l'intensité, et donc la gravité des impacts potentiels sur l'homme. Il s'agit là d'une réelle rupture dans la stratégie de prévention, puisque l'on ne cherche plus à éviter le risque mais à en réduire les effets, en les limitant à des niveaux non dangereux. L'acceptation du contact homme – robot pourrait alors conduire à recourir à des équipements de protection individuelle (au lieu d'une protection collective comme

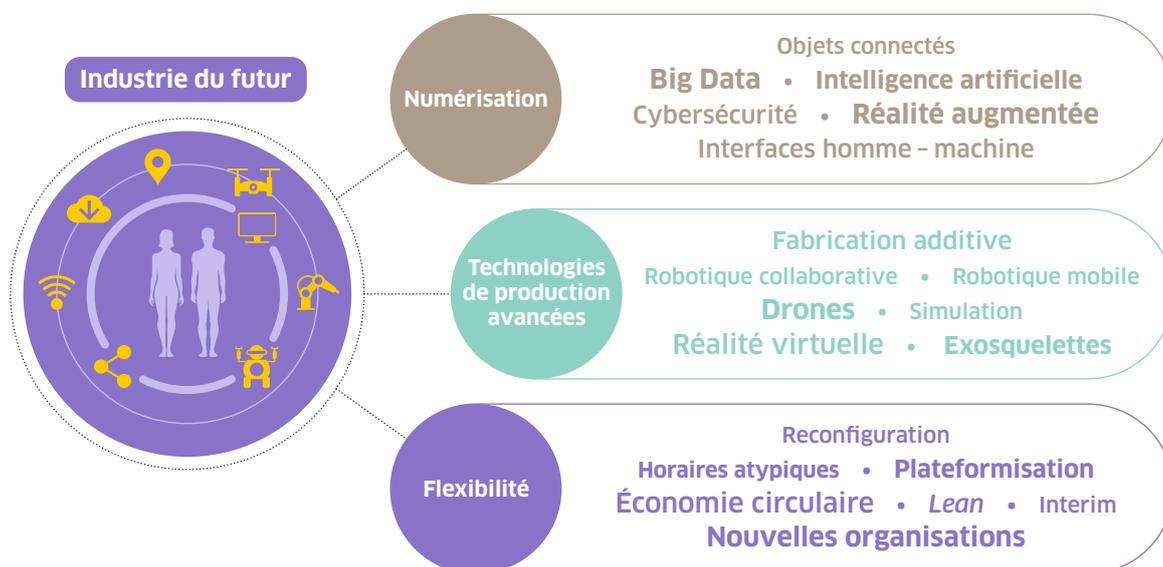
auparavant) pour protéger les parties du corps les plus sensibles comme la tête. Enfin, on peut supposer qu'en cas de contacts répétés, cette stratégie peut aussi générer de nouveaux risques physiques ou psychiques, du fait des mouvements des opérateurs pour éviter ces collisions ou de leur appréhension [2]. En conclusion de ce chapitre, les principaux enjeux liés aux évolutions technologiques vis-à-vis des PGP pourraient se résumer ainsi :

- éviter les risques (PGP n° 1), sans les déplacer ou en créer de nouveaux ;
- tenir compte de l'évolution de la technique (PGP n° 5) des systèmes de production, mais aussi des moyens de protection ;
- remplacer ce qui est dangereux par ce qui l'est moins (PGP n° 6), à condition de maîtriser totalement les risques de ces nouvelles technologies.

### Impacts de la flexibilité de la production sur l'application des PGP

L'effort d'ajustement, en temps réel, de la production en réponse aux exigences fluctuantes de la demande, se traduit par la mise en place de procédés de fabrication toujours plus flexibles.

Prenons l'exemple des procédés chimiques. On constate dans ce secteur une intensification des procédés avec, comme principal avantage, une amélioration de leur flexibilité. Si la conséquence souvent mise en avant est le passage de la production « batch »<sup>3</sup> à une production continue, il n'en demeure pas moins qu'il s'agit d'une « innovation de rupture », basée sur un ensemble de principes nouveaux : la miniaturisation et la structuration interne de procédés, l'apport d'énergie de façon atypique (microondes, champs électromagnétiques, ultrasons...), la multifonctionnalité et l'intégration de systèmes hybrides et, enfin, l'utilisation de régimes transitoires ou périodiques [3].



← FIGURE 1  
Les principaux axes de transformation concernés par l'industrie du futur.



Le point positif de cette évolution pour la prévention est que, sans oublier l'intérêt d'une augmentation de la productivité, les travaux initiaux dans ce domaine ont souvent vocation à améliorer la sécurité des procédés. Cependant, cette intensification induit plusieurs conséquences pour les opérateurs, qui peuvent perturber l'application des PGP.

Ainsi, avec le passage d'une production en réacteur « batch » à une production en continu, les conditions de travail dans les ateliers de production sont fortement modifiées et cela suscite souvent une réticence du personnel. En effet, il existe une forte culture traditionnelle du « batch » dans les entreprises. Si globalement les nouveaux procédés sont plus sûrs, ils présentent de nouveaux risques à intégrer et à évaluer, comme le fait de travailler avec des concentrations de produits plus élevées.

---

## POUR EN SAVOIR +

- *Dossier web INRS « Industrie du futur »* : [www.inrs.fr/inrs/themes-travail/industrie-du-futur/ce-qu-il-faut-retenir.html](http://www.inrs.fr/inrs/themes-travail/industrie-du-futur/ce-qu-il-faut-retenir.html).
  - *Décryptage* : « Industrie du futur, de quoi parle-t-on ? » paru dans *Hygiène & sécurité du travail*, 2018, 253, pp. 6-10. Accessible sur : [www.inrs.fr/media.html?refINRS=DC%2023](http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=DC%2023).
- 

Les systèmes hybrides devraient permettre la réalisation simultanée et dans un même appareil de plusieurs opérations unitaires auparavant découplées, comme la réaction, la séparation et l'échange de chaleur. La compréhension du fonctionnement de ces systèmes est loin d'être évidente et devient beaucoup plus complexe à appréhender par rapport aux anciens procédés, constitués d'opérations unitaires indépendantes. Une formation approfondie des opérateurs est alors indispensable, et les temps d'apprentissage et d'adaptation à ces nouveaux procédés doivent être pris en compte dans l'organisation du travail des opérateurs. Les nouveaux risques professionnels induits par ces systèmes ne sont pas toujours bien connus et sont donc difficiles à évaluer. En effet, si la littérature scientifique est abondante sur le sujet, il n'existe, à notre connaissance, aucun article sur les risques professionnels potentiels liés à ces technologies.

La flexibilité de la production (et des procédés de fabrication), qui représente l'un des grands avantages de l'intensification des procédés, passe également par des procédés de fabrication modulables et des productions à façon, de différents produits aux propriétés contrôlées, issus de matières premières différentes. La planification

de la prévention peut alors s'avérer compliquée à mettre en œuvre pour les entreprises et exposer les salariés à des risques, par manque de temps pour appréhender les systèmes ou produits qu'ils manipulent, et pour assimiler en profondeur les instructions appropriées à ces situations.

L'intensification de procédés peut aussi être obtenue par de nouvelles méthodes de productions chimiques : régime transitoire, cyclique ou pulsé, conditions extrêmes de températures et de pressions, voire de nouveaux milieux réactionnels liquides ioniques [4]. Bien qu'à ce jour, ces évolutions ne soient pas très répandues dans l'industrie, il convient dès à présent d'être vigilant sur les risques potentiels qu'elles présentent. La nécessité de repenser le management des risques industriels a déjà été en partie intégrée dans l'industrie, comme l'illustre l'une des conférences plénières du dernier symposium international *Loss Prevention and Safety* [5].

En complément des enjeux vis-à-vis de l'application des PGP cités au chapitre précédent, ceux liés à la notion de flexibilité peuvent donc se résumer ainsi :

- évaluer les risques (PGP n° 2) et planifier la prévention (PGP n° 7), malgré un contexte de changement permanent ;
- donner les instructions appropriées aux salariés (PGP n° 9), sans les surcharger et en leur laissant le temps de les assimiler.

## Impacts de la numérisation sur l'application des PGP

Les objets connectés et, plus généralement, l'intégration du numérique dans l'ensemble de la chaîne de production, sont au cœur de l'industrie du futur. Si l'objectif est de gagner en productivité, en efficacité et en flexibilité, les usages de ces outils numériques soulèvent aussi des questions vis-à-vis de l'application des PGP.

Certains usages des données numériques générées par ces systèmes interconnectés peuvent contribuer à améliorer la prévention des risques professionnels. Il est désormais envisageable de développer des systèmes intelligents capables de traiter un nombre très important de paramètres sur les procédés de fabrication et les ambiances physiques (bruit, rayonnements, substances chimiques, etc.) auxquels sont exposés les opérateurs, afin d'anticiper la survenue de situations dangereuses. Ces systèmes interconnectés facilitent aussi les démarches collaboratives et l'intégration de préventeurs dans les projets industriels. La numérisation des procédés de fabrication, les technologies d'information et de communication (TIC) et l'intelligence artificielle (IA) peuvent également conduire à la création de plateformes logicielles, pour mettre directement en relation



© Raphaël Chantalat pour l'INRS/2021

fabricants et acheteurs de produits industriels<sup>4</sup>. Comme cela a déjà été mis en évidence dans les secteurs de la publicité ou du développement d'applications, plusieurs dizaines voire plusieurs centaines de personnes peuvent être mises en relation par un donneur d'ordre pour la réalisation d'un produit. Il en résulte une parcellisation des tâches réalisées par des travailleurs généralement indépendants qui ne bénéficient pas de la responsabilité d'un employeur pour la protection de leur santé et de leur sécurité. De récents travaux ont souligné que ce type d'organisation fragilise l'application de certains PGP comme ceux qui consistent à combattre les risques à la source, à planifier la prévention ou encore, à privilégier des mesures de protection collective [6].

Un autre enjeu vis-à-vis des PGP en matière de numérisation concerne l'utilisation à grande échelle d'objets connectés portés par les opérateurs, pour recueillir des données sur leurs activités (localisation, nombre de pas, posture, rythme cardiaque, etc.). Ces données peuvent à terme être mises en réseau, afin d'être exploitées collectivement dans un objectif de prévention des risques

professionnels. Toutefois, le risque est de résumer l'analyse de l'activité des opérateurs, complexe par essence, à une combinaison d'indicateurs mesurables issus de ces capteurs, sans oublier les risques associés à la négligence vis-à-vis de la protection des données individuelles. Face à la complexité de cette mise en réseau, il est nécessaire d'être vigilant sur le fait que la généralisation de ces objets connectés ne conduise pas, à court et moyen termes, à privilégier une approche individuelle de la prévention des risques professionnels au détriment de l'approche collective. Ainsi, sans un traitement collectif approprié et régulier de ces données pour adapter l'activité et les mesures de prévention, le retour d'informations fourni immédiatement à l'opérateur à partir de ces capteurs pourrait implicitement lui adresser le message que c'est avant tout à lui de trouver les moyens de se préserver [7].

Nous retiendrons donc vis-à-vis de cet axe sur la numérisation que les principaux enjeux pour l'application des PGP sont de :

- donner la priorité aux mesures de protection collective (PGP n° 8), en évitant de généraliser les mesures de protection individuelle ;



- planifier la prévention (PGP n° 7) et de combattre les risques à la source (PGP n° 3), malgré les difficultés à remonter à ce niveau.

### Conclusion

Comme nous venons de le voir au travers de quelques exemples, les évolutions portées par le paradigme de l'industrie du futur (ou industrie 4.0) peuvent complexifier l'application des principes généraux de prévention.

En effet, portée par les évolutions technologiques et numériques, la recherche de systèmes de production toujours plus flexibles se traduit par des changements fréquents de configuration des outils de production et de l'organisation du travail. Cela engendre une variabilité des situations, qui nécessite une évaluation des risques plus fréquente. Une obsolescence rapide de cette évaluation, et par conséquent des mesures de prévention, est donc prévisible. Il est également possible de voir s'installer une banalisation de cette évaluation des risques qui deviendrait superficielle et n'intégrerait pas les spécificités des évolutions. On retrouve le même type de difficulté vis-à-vis de la nécessité d'intégrer cette variabilité le plus en amont possible, alors que les données qui la caractérisent ne sont pas totalement connues à ce stade. La planification de la prévention, ainsi que la formation et la délivrance des instructions appropriées aux opérateurs, peuvent aussi être difficilement réalisables, si ces changements s'opèrent avec une contrainte temporelle élevée. Il en résulte des moyens plus importants et une mobilisation plus forte pour atteindre les objectifs visés par les principes généraux de prévention.

Un autre risque réside dans l'utilisation croissante d'objets connectés. Comme vu précédemment, cette évolution peut conduire à éloigner les acteurs de la prévention de la réalité du travail. Elle peut également amener à faire progressivement reposer la prévention sur l'opérateur lui-même et non sur l'employeur.

Par ailleurs, dès lors que, pour satisfaire aux exigences de productivité et de flexibilité, ces évolutions visent à multiplier les tâches réalisées par les opérateurs et à augmenter leurs performances (performances physiques avec les exosquelettes ou les robots collaboratifs, performances sensorielles et cognitives avec la réalité augmentée et/ou l'intelligence artificielle, etc.), la perspective d'opérateur « augmenté » ou « opérateur 4.0 » [8] nous amène à nous interroger sur l'application du principe d'adaptation du travail à l'homme. De qui s'agit-il : du salarié avec ses capacités intrinsèques ou d'un salarié avec des capacités « augmentées » ? La frontière est en effet très étroite entre une utilisation de ces

nouvelles technologies pour préserver la santé et la sécurité des salariés et celle qui aurait au contraire des effets négatifs, car elle viserait en priorité à travailler plus vite, à transporter plus de charges, à standardiser le travail, etc.

En conclusion, il est important de rappeler que les effets de transformations portées par l'industrie du futur sur l'application des PGP dépendent également des organisations dans lesquelles elles vont être déployées. De nombreux travaux issus des sciences humaines et sociales soulignent la nécessité d'intégrer les opérateurs en tant qu'acteurs à part entière de ces transformations, en les impliquant dans le choix des technologies, voire dans leur conception, sur la base de l'analyse de leurs besoins et de leur travail réel [9]. ●

1. Code du travail, art. L. 4121-1 et suivants ; directive n° 89/391/CEE : accessibles sur : [www.legifrance.gouv.fr](http://www.legifrance.gouv.fr) ; voir aussi : [www.inrs.fr/demarche/principes-generaux/introduction.html](http://www.inrs.fr/demarche/principes-generaux/introduction.html).
2. Accessible sur : <https://eur-lex.europa.eu/>.
3. Le « batch » correspond à un mode de production par lots.
4. C'est d'ailleurs cette crainte de l'irruption d'un géant de l'Internet dans le secteur industriel qui est à l'origine du concept d'industrie 4.0, en Allemagne, au début des années 2000.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] RONI-JUSSI HALME R.J. ET AL. – Review of vision-based safety systems for human-robot collaboration. *Procedia CIRP*, 2018, 72, pp. 111-116.
- [2] BUBLATZKY F., ALPERS G., PITTIG A. – From avoidance to approach: The influence of threat-of-shock on reward-based decision making. *Behaviour research and therapy*, 2017, 96, pp. 47-56.
- [3] GOURDON C. – Intensification des procédés. Fondamentaux et exemples d'industrialisation. *Techniques de l'ingénieur*, J7002 V1, septembre 2016.
- [4] CHARPENTIER J.C. – Intensification des procédés. Introduction. *Techniques de l'ingénieur*, J7000 V1, février 2016.
- [5] HOORELBEKE P. – Technological risk management and the 4<sup>th</sup> industrial revolution. *Intervention au 16<sup>th</sup> International Symposium on Loss Prevention and Safety*, 16-19 juin 2019, Delft (Pays-Bas).
- [6] LEICHLÉ J. ET AL. – Restitution de l'exercice de prospective sur la plateforme 2027. *Références en santé au travail*, 2018, 254, TM 45, pp. 105-113. Accessible sur : [www.rst-sante-travail.fr](http://www.rst-sante-travail.fr).
- [7] DÉCRYPTAGE – *Les objets connectés*. INRS, 2018, ED 8000, 4 p. Accessible sur : [www.inrs.fr](http://www.inrs.fr).
- [8] ROMERO D., ET AL. – Towards an operator 4.0 typology: a human-centric perspective on the fourth industrial revolution technologies. In: CIE46 Proceedings, octobre 2016, Tianjin (Chine), pp. 29-31.
- [9] LANCERY A. – *Analyse du travail*. In: VALLERY G. et al. (éds) – *Psychologie du travail et des organisations : 110 notions clés*. Dunod, 2019, pp. 45-49.