

Décryptage

L'INDUSTRIE DU FUTUR : DE QUOI PARLE-T-ON ?

Cet article porte sur les principaux enjeux liés au concept d' « Industrie du futur » vis-à-vis de la prévention des risques professionnels. Dans un premier temps, les origines et les objectifs du projet français « Industrie du futur » sont rappelés, notamment la volonté de placer l'Homme au centre des réflexions. Il traite ensuite de façon plus détaillée les enjeux relatifs aux technologies de production dites « avancées », sur lesquelles repose l' « industrie du futur ». Les opportunités et les points de vigilance en matière de prévention des risques professionnels sont présentés. Ils portent autant sur l'utilisation de ces technologies, que sur leur interconnexion numérique et leur intégration organisationnelle.

INDUSTRY OF THE FUTURE : WHAT ARE WE TALKING ABOUT? This article focuses on the main issues related to the concept of "Industry of the future" with regards to prevention of occupational risks. At first, this article recalls the origins and the objectives of the French project "Industry of the future", in particular on the will to place the "Human" at the center of the reflections. It then presents in more details the issues related to so-called "advanced" production technologies, on which the "industry of the future" is based. Opportunities and points of vigilance in the prevention of occupational risks are presented. They are as much about the use of these technologies as their digital interconnection, and their organizational integration.

JACQUES
MARSOT
INRS,
département
Ingénierie des
équipements
de travail

L'expression « Industrie du futur » désigne le projet lancé par le gouvernement français en 2015¹ pour amener les fournisseurs de produits et d'équipements, notamment les PME/PMI, à moderniser leurs outils industriels et à faire évoluer leurs modèles d'affaires, dans un monde de plus en plus basé sur les outils numériques.

Ces transformations répondent au besoin de la plupart des entreprises, qui doivent rester compétitives sur des marchés toujours plus concurrentiels. Dans un contexte de raccourcissement des délais de mise sur le marché, elles doivent être capables de proposer des produits de plus en plus personnalisés, de fabriquer des quantités très variables et de fournir à leurs clients toujours plus de valeur, par exemple en intégrant les services associés à l'utilisation de ces produits. Elles doivent également arriver à concilier production industrielle et protection de l'environnement.

Ces transformations portées par le développement de nouvelles technologies, notamment dans le domaine numérique (cf. figure 1) sont qualifiées de « 4^e révolution industrielle », d'où l'expres-

sion « Industrie 4.0 », fréquemment rencontrée, qui désigne le projet allemand, pionnier dans ce domaine. Des projets similaires ont également été lancés dans la plupart des pays industrialisés², avec chacun leurs particularités en termes de priorités, de modes d'actions, de financement, etc. Comme nous le verrons par la suite, la vision française se distingue des autres projets internationaux en affichant la volonté de placer l'« Homme » au centre de la démarche.

Au-delà du terme « Industrie 4.0 », la littérature spécialisée s'accorde pour définir l'Industrie du futur comme devant être « plus agile et flexible, moins coûteuse et plus respectueuse de ses travailleurs et de l'environnement, grâce à un fort niveau d'automatisation et une intégration numérique de l'ensemble de la chaîne de production »³.

Son contenu est cependant plus difficile à définir, du fait de la variété des enjeux et des dimensions couvertes : économique, technologique, organisationnelle, environnementale, sociétale. Les transformations attendues sont donc nombreuses. Comme le montre le modèle proposé pour l'industrie du futur (cf. figure 2), elles concernent autant



← FIGURE 1. L'industrie du futur : 4^e révolution industrielle.

les équipements de production, l'organisation et le contenu du travail au sein de ces entreprises, que les relations clients-fournisseurs et leurs modèles économiques (fusion des biens et des services, plateformes, économie circulaire, etc.). Par ailleurs, ces transformations se déclinent de façons différentes suivant le type d'entreprise et les secteurs d'activités concernés. « *Chaque site industriel est, et sera, différent. Chaque projet est unique et personnalisé. Chaque entreprise doit pouvoir, en fonction de sa taille, sélectionner ses pistes d'actions* »⁴.

Dans cet article, nous centrerons notre analyse en matière de prévention des risques professionnels sur les technologies de production avancées (2^e niveau du modèle, cf. figure 2).

Nous ne reviendrons pas sur le sujet des objets connectés (premier niveau du modèle), qui a récemment fait l'objet d'un article de décryptage (voir ED 8000, INRS ; cf. Pour en savoir plus). Les niveaux suivants (organisation, relations/clients fournisseurs, modèles économiques) seront abordés ultérieurement.

Technologies de production avancées

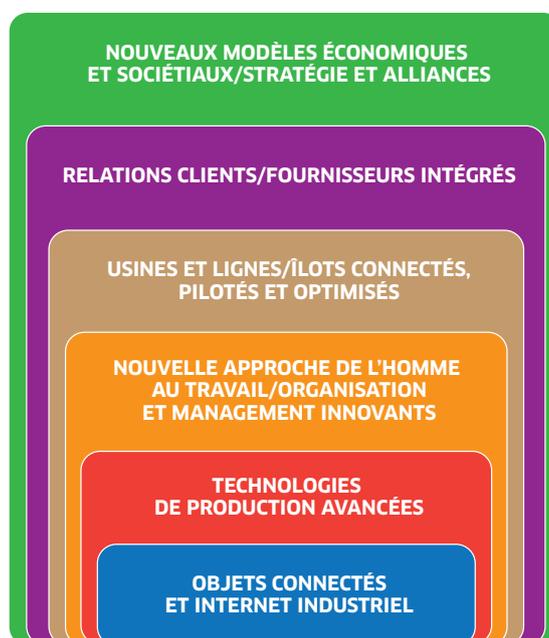
Le concept d'industrie du futur repose sur une combinaison de technologies qui ont comme point commun de permettre une intégration numérique de l'ensemble de la chaîne de production. Cette intégration numérique est en effet l'une des clés pour le développement de procédés de production adaptables, ou rapidement reconfigurables, en fonction de la demande.

Ces technologies de production dites « avancées » concernent les équipements eux-mêmes (robotique mobile ou collaborative, fabrication additive, réalité augmentée, etc.), la façon de les concevoir (simulation, réalité virtuelle) et les systèmes d'acquisition et de traitement de données de production (internet des objets, intelligence artificielle, *big data*, *cloud computing*, etc.). Ces technologies ont différents degrés de maturité. Si certaines sont déjà opérationnelles, d'autres sont en phase d'industrialisation ou de test en entreprises, d'autres encore sont seulement en cours de développement en laboratoire.

Quels enjeux pour la prévention des risques professionnels ?

Comme évoqué en introduction, le projet national « Industrie du futur » affiche le souhait de mettre l'Homme au centre de la démarche et beaucoup d'espoirs sont placés dans l'offre technologique pour améliorer les conditions de travail des salariés. Par exemple, il est souvent repris dans la littérature spécialisée que l'usine du futur devra être « *une usine qui affranchit, grâce à l'automatisation et la robotique collaborative, l'Homme des tâches pénibles ou répétitives, pour qu'il se concentre sur les tâches à forte valeur ajoutée* ».

Les robots dits collaboratifs, les exosquelettes, la réalité augmentée, la simulation, etc. sont effectivement autant de technologies qui devraient permettre de réduire l'exposition des opérateurs à certains risques : contraintes physiques, environnements agressifs, rythmes de travail pénibles, etc. L'utilisation de ces technologies n'est toutefois pas sans risque et il convient, comme pour tout nouvel équipement, d'en faire une évaluation précise. Il faut pour cela s'interroger sur l'apparition de nouveaux risques, l'accentuation ou le déplacement de risques existants (cf. encadré 1).



← FIGURE 2. Illustration du modèle de l'Industrie du futur.



ENCADRÉ 1

SYNTHÈSE DES OPPORTUNITÉS ET POINTS DE VIGILANCE EN S&ST* PAR RAPPORT AUX ÉVOLUTIONS TECHNOLOGIQUES PRÉVISIBLES DE L'INDUSTRIE DU FUTUR

ROBOTS COLLABORATIFS: Il s'agit de robots énergisés, autonomes et intégrés dans une cellule robotique pour travailler à proximité des opérateurs ou en relation directe avec eux. Ils peuvent être avantageusement utilisés au niveau d'un poste de travail pour soulager les opérateurs des tâches répétitives, des efforts de manutention, pour réduire les contraintes posturales en présentant les pièces dans la meilleure position en fonction de la tâche à réaliser et des caractéristiques de l'opérateur. Cependant, comme n'importe quelle machine, ces robots comportent des éléments en mouvement (bras, pinces, outils, pièces manipulées) susceptibles de blesser les opérateurs évoluant à proximité, d'autant plus que la collaboration implique souvent la suppression totale ou partielle des barrières physiques les séparant de l'opérateur. À ces risques, peuvent s'ajouter des contraintes physiques et psychiques, dans le cas où, par exemple, l'opérateur aurait à s'adapter au rythme et aux mouvements du robot collaboratif.
Pour en savoir plus : www.inrs.fr/risques/robots-collaboratifs/

EXOSQUELETTES: Ce sont des systèmes mécaniques ou textiles revêtus par le salarié, visant à lui apporter une assistance physique dans l'exécution d'une tâche, par une compensation de ses efforts ou une augmentation de ses capacités motrices. Si de récents résultats d'études montrent qu'ils permettent effectivement une réduction des efforts exercés par certains muscles lors de tâches de manutention manuelle bien précises, ils peuvent également conduire à l'augmentation des contraintes posturales et des efforts fournis par les muscles antagonistes au mouvement assisté et par ceux qui soutiennent l'exosquelette. Dans le cas de dispositifs énergisés, les opérateurs se trouvent en plus exposés aux risques classiques inhérents aux machines (risques mécaniques, électriques, thermiques, etc.).
Pour en savoir plus : www.inrs.fr/exosquelettes

*S&ST : santé et sécurité au travail.
**IFA : Institut für Arbeitsschutz.

FABRICATION ADDITIVE: La fabrication additive (ou impression 3D) désigne l'ensemble des procédés (chimiques, thermiques, photochimiques, mécaniques, etc.) permettant de fabriquer un produit par ajout ou superposition ciblée de la matière de base (plastiques liquides, photopolymères, poudres métalliques, céramiques, etc.). Par rapport aux procédés de fabrication dits « conventionnels » (usinage, forgeage, découpage, emboutissage, etc.), la fabrication additive permet de réduire, voire de supprimer les risques mécaniques inhérents aux procédés par enlèvement ou déformation de matière. Ils sont cependant remplacés par des risques chimiques, du fait des produits de dégradation thermique de la matière de base utilisée. Le risque d'explosion est aussi à prendre en compte.
*Pour en savoir plus : [La fabrication additive, un empiement de risques ?](http://www.hst.fr/dms/hst/data/articles/HST/TI-VP-3/vp3.pdf)
Accessible sur : www.hst.fr/dms/hst/data/articles/HST/TI-VP-3/vp3.pdf*

SIMULATION NUMÉRIQUE – RÉALITÉ VIRTUELLE: Il s'agit des techniques qui permettent de modéliser et de simuler le fonctionnement d'un produit, d'un procédé, d'un poste de travail, d'un atelier ou d'une usine. La réalité virtuelle permet en plus à l'utilisateur de s'immerger ou d'interagir en temps réel avec une maquette numérique. Ces techniques présentent plusieurs intérêts en matière de prévention des risques professionnels. Le prototypage virtuel d'un poste de travail avant sa réalisation matérielle permet, dans le cadre d'une démarche participative associant utilisateurs et préventeurs, d'anticiper des situations potentiellement dangereuses. Les maquettes numériques peuvent également être utilisées pour sensibiliser ou former du personnel, en le confrontant virtuellement à des situations dangereuses. L'utilisation de ces environnements numériques présente toutefois des limites dès lors qu'il s'agit de simuler l'activité future d'opérateurs. En particulier, les modèles biomécaniques utilisés dans les logiciels de mannequins virtuels ne permettent pas encore une évaluation fidèle des efforts. Par ailleurs, il faut éviter

d'utiliser ces outils de simulation dans une logique d'optimisation, par exemple pour essayer de définir le « bon geste ». Cela conduirait en effet à une réduction des marges de manœuvre des opérateurs avec, à terme, des risques d'apparition de troubles musculosquelettiques ou de la santé psychique.

Pour en savoir plus : [Apports et limites des mannequins virtuels pour la conception des postes de travail.](http://www.hst.fr/dms/hst/data/articles/HST/TI-CC-9/cc9.pdf) Accessible sur : www.hst.fr/dms/hst/data/articles/HST/TI-CC-9/cc9.pdf

RÉALITÉ AUGMENTÉE: Les techniques de réalité augmentée (RA) permettent de superposer à notre perception du monde réel des éléments virtuels (textes, plans, pictogrammes, objets 3D, etc.). Un des intérêts de la réalité augmentée, du point de vue de la prévention des risques professionnels, réside dans sa capacité potentielle (non encore développée à grande échelle) à fournir aux opérateurs la bonne information au bon moment et au bon endroit et ainsi, limiter les risques d'accidents du fait d'erreurs lors de la réalisation de tâches complexes: assemblage, contrôle, maintenance, réparation, préparation de commande, conduite d'engins, etc. Des études récentes, menées par l'IFA** sur l'utilisation de la réalité augmentée dans le milieu industriel, incitent cependant à la prudence, du fait des risques potentiels liés à la distraction des utilisateurs. À l'instar des dispositifs de guidage vocal, le guidage visuel permis par la réalité augmentée peut également être à l'origine de risques psycho-sociaux, du fait d'une intensification du travail, d'une augmentation de la charge mentale, d'isolement, d'une perte d'autonomie, etc. Des questions de santé liées à l'utilisation prolongée de lunettes de réalité augmentée restent à approfondir: effets neurologiques liés à l'affichage des informations sur un seul œil, « cybercécité » assimilable au mal des transports, etc.
Pour en savoir plus : [Les lunettes connectées dans le monde du travail: besoins en réglementation et en normalisation.](http://www.hst.fr) Hygiène et sécurité du travail, 2018, 251, pp. 18-19. Accessible sur : www.hst.fr

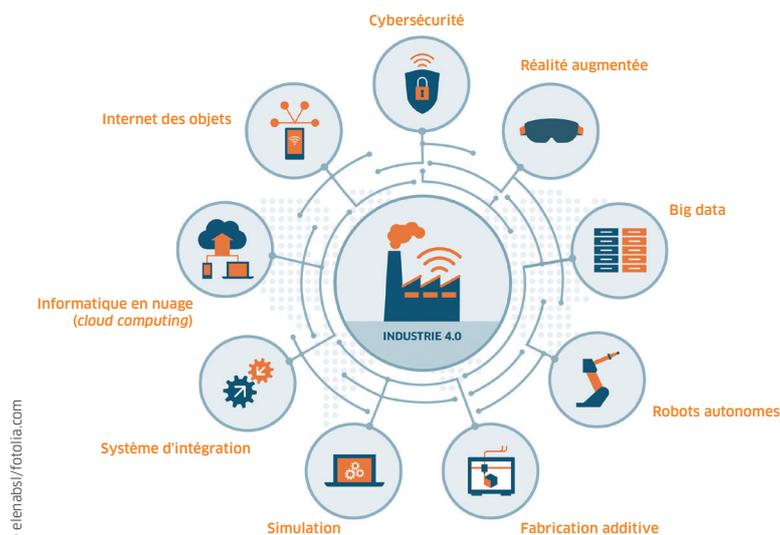
Au-delà des enjeux en termes de prévention des risques professionnels propres à chacune de ces technologies, il est également nécessaire de s'interroger sur les avantages (en termes de prévention) comme sur les risques relatifs à leur interconnexion numérique. Cette interconnexion, couplée à des systèmes de traitement de l'information de plus en plus performants comme ceux faisant appel au *big data*, au *cloud computing*, ou à l'intelligence artificielle (cf. encadré 2), est incontournable pour répondre au besoin de flexibilité, qui est une des principales finalités de l'Industrie du futur.

Cette mise en réseau des processus offre de nouvelles perspectives en matière de prévention des risques professionnels. Par exemple, dans le domaine de la maintenance industrielle, la connexion permanente d'un équipement avec sa maquette numérique, le tout associé à des algorithmes de traitement de données (notion de jumeau numérique), permet déjà d'anticiper des pannes. Les interventions peuvent donc être planifiées et préparées de façon à être exécutées dans les meilleures conditions de santé-sécurité. L'intelligence artificielle peut également contribuer au développement de systèmes de protection plus performants que ceux d'aujourd'hui, par exemple dans le domaine des dispositifs de détection de personnes.

Ces algorithmes et, de façon plus générale, la digitalisation de l'activité des opérateurs par le biais d'interfaces homme-machine ou d'outils d'aide à la décision toujours plus « intelligents », ne sont cependant pas sans danger. De précédentes études sur les effets de l'automatisation mettent en évidence des risques d'appauvrissement des tâches, de perte d'expertise ou d'autonomie, de réduction des marges de manœuvre, du fait du report de tâches et des prises de décisions sur des systèmes intelligents. Ils peuvent également conduire les opérateurs à se désengager de la surveillance qu'ils supposent performante et à laisser la situation se dégrader, jusqu'à en devenir dangereuse.

Enfin, l'ouverture des systèmes de pilotage des équipements industriels au réseau Internet nécessite également de s'interroger sur leur robustesse face aux virus informatiques introduits de façon volontaire (cyberattaques) ou non (mauvais usage d'une clé USB, par exemple). Ces virus peuvent affecter le fonctionnement des installations et en conséquence être plus ou moins directement une cause d'accidents pour les salariés. La cybersécurité, est d'ailleurs un des enjeux majeurs de l'industrie du futur.

Au-delà des risques inhérents à toutes ces évolutions technologiques, un autre enjeu en termes de santé et sécurité au travail est l'acceptation de ces évolutions par les salariés. Il est en effet reconnu que l'introduction d'une nouvelle technologie, quelle qu'elle soit, est un processus qui s'inscrit dans la



© eienabs/fotolia.com

durée et qui crée de l'instabilité, tant au niveau de l'activité des opérateurs, des collectifs de travail, que de l'encadrement : redéfinition des tâches, des procédures, des rôles de chacun, modification des cœurs de métiers, nouvelles compétences à acquérir, etc. En termes de santé et sécurité, là encore, de nombreuses études ou retours d'expérience ont montré que, faute d'anticipation ou d'accompagnement, cette instabilité peut également conduire à l'émergence de risques psycho-sociaux.

↑ FIGURE 3. Principaux domaines technologiques associés à l'industrie du futur.

Et maintenant ?

L'impact des nouvelles technologies, notamment dans le domaine numérique, sur les systèmes de production industrielle, est d'ores et déjà visible. Ces transformations constituent des opportunités pour la santé et la sécurité des salariés des entreprises qui s'engagent dans cette voie. Mais elles nécessitent aussi d'identifier des points de vigilance en matière de prévention des risques professionnels.

Comme toute technologie, celles associées à l'Industrie du futur ne sont intrinsèquement ni bonnes, ni mauvaises, ni même neutres, en termes de santé et de sécurité au travail. Il est donc indispensable de faire une évaluation précise des risques qu'elles présentent, en s'attachant à identifier les risques nouveaux, accentués, ou plus difficilement maîtrisables. Les approches et les normes techniques de sécurité relatives à ces équipements devront donc être revues et complétées, afin d'intégrer l'ensemble de ces risques et proposer des moyens de protection adaptés. Plusieurs études sur la robotique collaborative, les robots d'assistance physique, les exosquelettes, la fabrication additive, les équipements de protection individuels intelligents, etc. sont actuellement menées par l'INRS dans ce sens. D'autres sujets, comme l'intelligence artificielle, la cybersécurité ou la réalité augmentée font l'objet



ENCADRÉ 2

GLOSSAIRE

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE: Ensemble de techniques visant à imiter certaines aptitudes de l'intelligence humaine comme la mémoire, le raisonnement, la perception, la prise de décision et la résolution de problèmes.

BIG DATA (DONNÉES MASSIVES): La disponibilité de données massives permet désormais d'élaborer des méthodes et outils numériques (dont certains relèvent de l'intelligence artificielle) pour la capture, la recherche, le stockage, le partage et le traitement rapide de grandes quantités de données non structurées et hétérogènes, destinés à des usages variés.

CLOUD COMPUTING: Ensemble de processus qui consistent à utiliser la puissance de calcul ou de stockage de serveurs informatiques distants à travers un réseau, généralement Internet.

CYBERSÉCURITÉ: Ensemble des méthodes et processus techniques qui permettent d'assurer que les ressources numériques d'une entreprise sont préservées de toute attaque qui les détournerait de leur fonctionnement initialement prévu, ou de réduire les conséquences de ces attaques.

d'une veille active. L'identification des besoins en normalisation est par ailleurs un des objectifs du Comité d'orientation stratégique Santé et sécurité au travail (CoS-SST) de l'Afnor et du groupe de coordination « Industrie du futur », en lien avec l'association « Alliance industrie du futur » (AIF).

Une vigilance particulière, voire un encadrement éthique, est également nécessaire à propos de l'usage des technologies qui visent à « augmenter » les capacités humaines: capacités physiques avec les exosquelettes ou les robots collaboratifs, capacités sensorielles avec la réalité augmentée, capacités cognitives avec l'intelligence artificielle, etc. La frontière est en effet très étroite entre une utilisation qui permet de 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. Cette vigilance doit également s'appliquer à l'utilisation des données numériques générées par ces systèmes de production interconnectés, dès lors qu'elles peuvent être associées à un opérateur particulier. Comme rappelé dans un précédent article sur les objets connectés (cf. ED 8000, INRS), il convient alors de s'interroger sur leur exploitation, leur conservation, leur protection, etc.

Enfin, les effets de ces technologies de production dites « avancées » vis-à-vis de la santé-sécurité des employés sont également dépendants des organisations dans lesquelles elles vont être déployées. Cette question de l'intégration organisationnelle nous ramène à la question de la place donnée à l'Homme, et plus particulièrement aux opérateurs, dans le déploiement de ces technologies. Certes, le projet national « Industrie du futur » a comme ambition de les placer au centre des transformations attendues, mais avec quel rôle et dans quel but ? En impliquant les opérateurs en

tant que « simples utilisateurs », en toute fin d'un projet mené de façon « techno-centrée » et dans lequel la formation vise principalement à faciliter leur adaptation à ces nouvelles technologies ? Ou 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 réels ? C'est évidemment la seconde option qui offre le plus de perspectives positives en matière de prévention des risques professionnels. ●

1. Voir : www.economie.gouv.fr/lancement-seconde-phase-nouvelle-france-industrielle
2. Voir : <https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/dem/monitor/category/national-initiatives?page=1>
3. Source : www.abilways-digital.com/lusine-du-futur-robotisee-100-numerique-mais-encore-humaine
4. Voir : www.industrie-dufutur.org/content/uploads/2018/03/Guide-des-Technologies_2018_V3.pdf

POUR EN SAVOIR +

- Les objets connectés. INRS, 2018, ED 8000, coll. Décryptage, 4 p. Accessible sur : www.inrs.fr
- Innovation technologique, changements organisationnels : quels enjeux pour la prévention ? *Hygiène et sécurité du travail*, 2017, 249, réf. CC 21, pp. 80-84. Accessible sur : www.hst.fr
- CHARLET V., DEHNERT S. et al. – L'industrie du futur : progrès technique, progrès social ? Regards franco-allemands. La fabrique de l'Industrie, 2017. Accessible sur : www.la-fabrique.fr/wp-content/uploads/2017/10/N20-Industrie-futur-progres-technique-web.pdf
- Guide des technologies de l'industrie du futur. AIF, 2018, 188 p. Accessible sur : www.industrie-dufutur.org/content/uploads/2018/03/Guide-des-Technologies_2018_V3.pdf

Journée de réflexion

Économie circulaire en 2040

Quels impacts en santé et sécurité au travail ?
Quelle prévention ?



Dans un contexte environnemental de plus en plus préoccupant, ONG, pouvoirs publics et entreprises cherchent la voie d'une économie plus sobre. L'économie circulaire est un modèle économique qui a pour ambition de répondre à cette préoccupation en transformant les modes de production et de consommation.

L'INRS s'est entouré de partenaires pour explorer les futurs possibles de l'économie circulaire à l'horizon 2040 et **identifier les enjeux de santé et sécurité au travail**. Les résultats de cette réflexion seront présentés lors de cette journée.