



Revue de littérature SKILLS4.0



Avant-propos

Cette étude bibliographique s'inscrit dans le cadre du projet INTERREG France Wallonie Flandre SKILLS4.0.

L'industrie est un moteur essentiel de l'économie de la région frontalière. Elle garantit un nombre important d'emplois et a investi massivement dans les applications durables et numériques ces dernières années. Cependant, les entreprises peinent de plus en plus à pourvoir leurs postes vacants. Les profils techniques sont particulièrement rares. Cela s'explique par le fait que trop peu de jeunes et d'adultes choisissent encore une formation technique (ou une reconversion professionnelle). Ce phénomène est en partie dû à l'image négative des métiers techniques et des programmes de formation. L'émergence de l'Industrie 4.0 offre toutefois de nombreuses opportunités pour des emplois plus viables, mais implique également une transformation des métiers, qui requièrent de nouvelles connaissances et compétences.

Dans le cadre du projet SKILLS4.0, nous avons cherché à dresser une liste exhaustive des compétences nécessaires à l'Industrie 4.0. Bien qu'une telle liste ne soit pas disponible toute faite, nous avons pu identifier certains besoins et tendances en matière de compétences. Sur cette base, les partenaires du projet développeront de nouveaux contenus et outils de formation pour les métiers techniques, afin de mieux répondre aux besoins (futurs) de l'industrie. Cette étude documentaire s'appuie sur des publications provenant des trois régions concernées (Flandre, Wallonie et France). Les sources ont été sélectionnées en concertation avec les partenaires du projet SKILLS4.0 (POM Flandre-Occidentale, Syntra Ouest, Syntra Midden Vlaanderen, CVO Miras, EEDK, Entreprendre Ensemble, VDAB, Sirris, Sud Concept et MEEF).

En complément de cette étude bibliographique, des entretiens ont été menés et des visites d'entreprises ont été effectuées afin d'obtenir les informations nécessaires.

Avant-propos

1. Introduction : La vague irréversible de l'industrie 4.0
2. Certaines professions deviennent-elles moins pertinentes, vont-elles disparaître ou se transformer ?
 - 2.1. L'opérateur du futur
 - 2.2. Le passage des tâches routinières aux tâches cognitives
 - 2.3. Le technicien hybride et l'opérateur 4.0
3. Compétences de base et compétences techniques dans le cadre de l'Industrie 4.0
 - 3.1. Culture numérique
 - 3.2. Compétences techniques
 - 3.2.1. Analyse des données et IA
 - 3.2.2. Automatisation et robotique
 - 3.2.3. Cybersécurité
 - 3.2.4. Production numérique
4. L'essor des compétences non techniques (= Soft skills) dans l'Industrie 4.0
 - 4.1 Compétences non techniques essentielles
 - 4.2 Absence de compétences non techniques dans les programmes d'études
5. La nécessité de prendre en compte les nuances sectorielles et les dynamiques régionales
 - 5.1 Base transversale, spécialisation sectorielle
 - 5.2 Différences régionales en matière d'approche et de maturité
6. Implications structurelles pour la formation
 - 6.1. Compétences non techniques
 - 6.2. Étendue et profondeur du programme d'études
 - 6.3 Formats de formation innovants pour l'apprentissage tout au long de la vie
7. Politique
 - 7.1 Le rôle stratégique des pouvoirs publics

7.2 La transition vers l'Industrie 5.0 : l'humain au cœur des priorités

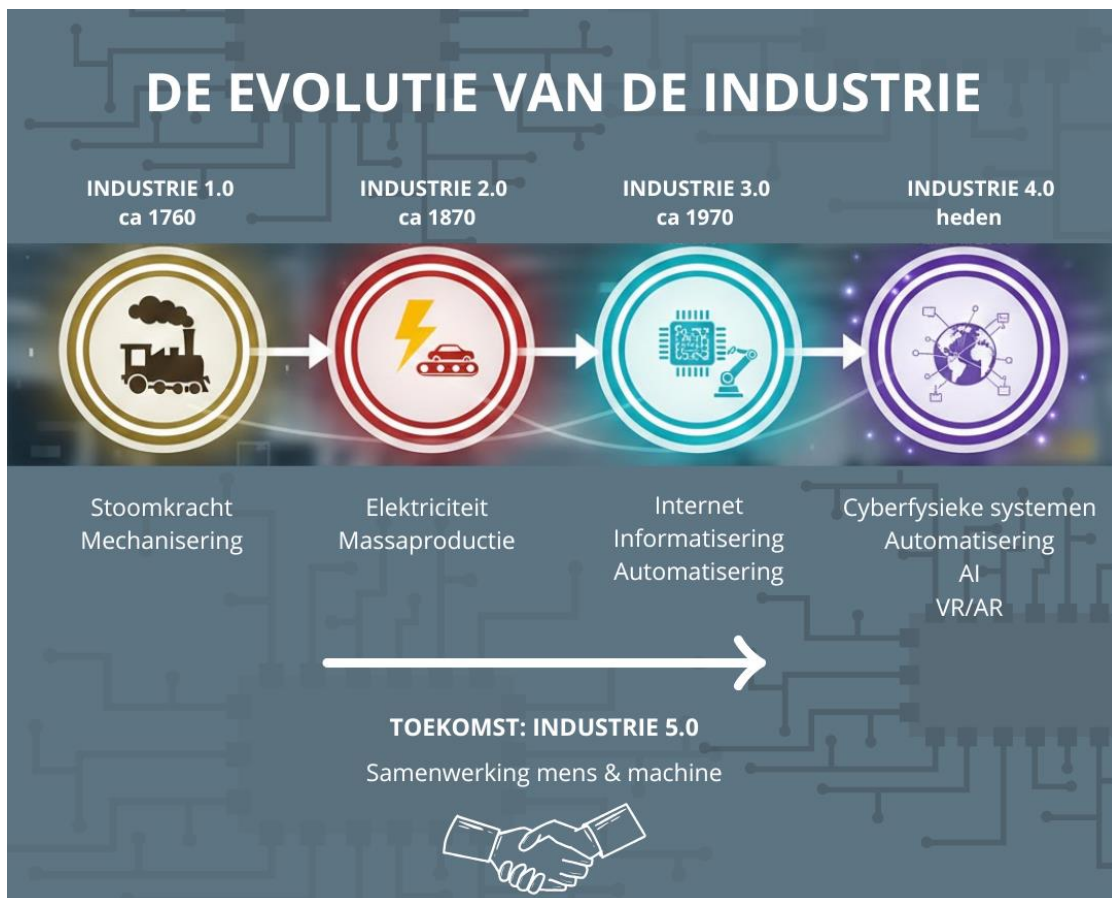
7.3 Bonnes pratiques et modèles stratégiques

8. Conclusion

1. Introduction: La vague irréversible de l'industrie 4.0

Sources : 1, 2, 9, 14, 15, 20, 23, 24, 25, 27, 28, 29

Au cours de l'histoire, nous avons connu plusieurs révolutions industrielles : la première (mécanisation), la deuxième (production de masse et l'électricité) et la troisième (automatisation). Outre leur impact sur la production et les modèles commerciaux, ces révolutions ont également impacté les compétences requises dans l'industrie. Actuellement, nous sommes au cœur de la quatrième révolution industrielle (Industrie 4.0), qui connaît un essor remarquable et s'entremêle avec le



Big Data, entraînant une nouvelle évolution des spécialisations et des compétences des employés.

L'Industrie 4.0 (I4.0) entraîne une transformation notable des professions techniques grâce à l'intégration des technologies numériques, de l'automatisation avancée, de l'intelligence artificielle (IA) et de l'analyse des données. Cette transformation entraîne une redéfinition des compétences. Divers ouvrages décrivent cette évolution comme une réforme fondamentale et irréversible qui va au-delà des simples adaptations technologiques et impacte profondément l'ensemble de l'architecture opérationnelle. Le fil conducteur de cette transformation est le passage d'une exécution manuelle et physique à des fonctions axées sur la cognition, le contrôle et l'optimisation des processus. En d'autres termes, on assiste à une transformation du rôle d'opérateur vers celui de « directeur de système ». Les fonctions techniques sont en effet devenues plus complexes et plus exigeantes en termes de connaissances. Il ne s'agit plus seulement d'utiliser les machines, mais les employés doivent comprendre comment celles-ci fonctionnent au sein d'un système où les systèmes cyberphysiques, l'IA et le Big Data sont intégrés les uns aux autres. Par ailleurs, cette transformation a également un impact sur l'organisation du travail : on constate une tendance à la simplification des structures hiérarchiques, à une plus grande autonomie et à la collaboration au sein d'équipes multidisciplinaires. Les managers évoluent de contrôleurs à coachs.

2. Certaines professions deviennent-elles moins pertinentes, vont-elles disparaître ou se transformer?

2.1. L'opérateur du futur

Sources : 2, 4, 9, 12, 20, 21, 22, 24, 26, 27, 32

Comme l'indiquent diverses sources, la transition au sein de l'industrie n'entraîne pas automatiquement la disparition des emplois, mais ceux-ci subissent en revanche une transformation profonde. Le rôle d'opérateur évolue, comme décrit précédemment, vers celui de directeur de système ou d'« opérateur avancé », capable de comprendre les processus numériques, de les piloter et de les superviser. D'autres fonctions, telles que celles de technicien de maintenance, évoluent d'une maintenance réactive vers une maintenance prédictive grâce à la compréhension et à l'utilisation de capteurs et à l'analyse intelligente des données. Un employé, qu'il soit opérateur ou technicien de maintenance, doit donc être capable d'interpréter le logiciel de la machine connectée et les pannes, et d'intervenir si nécessaire à l'aide d'outils numériques (= contrôle de gestion de la qualité). L'accent est mis sur la maintenance préventive et prédictive, ce qui exige des techniciens qu'ils se concentrent sur l'interprétation de l'état du système plutôt que sur la simple réalisation de réparations.

Si les infrastructures adéquates et les technologies nécessaires sont essentielles à la réussite de la transition, la capacité et les compétences de la main-d'œuvre à se former et se perfectionner en continu (*montée en compétences* et *requalification*) sont également nécessaires. La capacité d'adaptation humaine, indispensable à l'apprentissage continu, est considérée comme le facteur clé de succès d'une évolution à grande échelle, car elle permet aux employés de continuer à appliquer tous les changements substantiels. On peut distinguer deux groupes de compétences :

1. **Compétences techniques** : compétences technologiques telles que l'automatisation, la programmation et l'analyse de données.
2. **Compétences non techniques (= Soft Skills)** : adaptabilité, capacité d'innovation, gestion du changement, collaboration et autonomie.

Les entreprises et les organismes de formation peuvent s'adapter à la rapidité du changement en misant sur l'apprentissage tout au long de la vie ou la formation continue de leurs employés. Investir dans la formation ou la formation interne est un levier essentiel de cette transition. Cependant, ce dernier point représente un défi, car les technologies sont adoptées dans le monde entrepreneurial plus rapidement que le secteur de la formation ne peut suivre.

La littérature spécialisée affirme que certains emplois disparaîtront effectivement. Il s'agit notamment des fonctions répétitives telles que la conduite de machines traditionnelles et la saisie de données, mais aussi les emplois précaires et mal rémunérés qui risquent de devenir obsolètes. Ces emplois peuvent être remplacés par des systèmes automatisés utilisant l'IA. Une conséquence positive de la disparition potentielle de certains emplois est l'émergence de nouvelles professions hybrides. La demande de personnel polyvalent augmente, notamment pour les techniciens de maintenance/analystes de données, les ingénieurs possédant une expertise en informatique et les spécialistes en robotique. Les employés hybrides sont polyvalents car leur profil combine des compétences techniques traditionnelles et une expertise numérique. La structure professionnelle dans le contexte de l'Industrie 4.0 met en évidence l'émergence de rôles spécialisés en ingénierie et en TIC.

2.2. Le passage des tâches routinières aux tâches cognitives

Sources : 1, 2, 5, 13, 15, 16, 21

Les évolutions technologiques, notamment la robotisation, l'automatisation et l'utilisation de la réalité virtuelle et augmentée, transforment profondément le monde du travail. Le déploiement de ces technologies redéfinit le rôle de l'humain dans la chaîne de production.

Dans l'Industrie 3.0, où l'automatisation occupait une place centrale, on attendait des employés qu'ils excellent dans les tâches précises et routinières. L'émergence de l'Industrie 4.0 remet en question ces attentes par sa flexibilité et son caractère «intelligent». Le changement majeur réside dans l'élimination ou la réduction des tâches répétitives (comme le contrôle qualité manuel). Des études menées dans les secteurs de la métallurgie et du textile confirment que ces tâches routinières sont progressivement prises en charge par des systèmes intelligents tels que l'IA et les données intelligentes. Néanmoins, l'Industrie 4.0 offre une opportunité au facteur humain : certaines nouvelles fonctions, comme la gestion de la différenciation et l'interprétation de données prédictives complexes, requièrent l'intelligence humaine car elles ne peuvent pas encore être entièrement automatisées. En bref, la disparition des tâches prévisibles et routinières recentre l'attention sur les tâches cognitives et non routinières afin de s'adapter à la flexibilité de l'Industrie 4.0.

Face à cette évolution, les rôles techniques se transforment. Ils se diversifient car les employés doivent maîtriser ces systèmes intelligents et s'adapter à des tendances en constante évolution. Une certaine flexibilité mentale est donc indispensable, axée sur le leadership intellectuel et la prise de décisions complexes. Dans le contexte de l'Industrie 4.0, on attend des employés qu'ils fassent preuve de flexibilité pour gérer et résoudre les problèmes. Ils doivent pouvoir naviguer et interagir de manière fluide avec les systèmes automatisés. L'autonomie est une compétence clé à cet égard, car si l'IA est capable de reconnaître des schémas complexes, les humains sont plus aptes à identifier et à réagir aux dysfonctionnements inattendus ou imprévisibles.

Le rôle de l'humain évolue : de l'exécution physique à la supervision, au contrôle et à la résolution de problèmes complexes, il accroît les exigences cognitives de l'opérateur dans l'Industrie 4.0. Voici quelques exemples de tâches cognitives :

1. Prise de décision fondée sur les données : interpréter les données pour prendre des décisions stratégiques et/ou opérationnelles.
2. Optimisation des processus nécessitant des compétences créatives et non routinières pour optimiser les lignes de production de manière flexible et compétitive.
3. Supervision où l'employé intervient lorsque l'IA ne parvient pas à résoudre une situation inattendue. Les employés doivent néanmoins pouvoir valider les décisions des machines.

2.3. Le technicien hybride et l'opérateur 4.0

Sources : 12, 20, 22, 26, 27, 29

De même que nous adoptons la technologie pour plus de confort au quotidien, la numérisation et l'IA rendront également le travail plus agréable en usine. Les robots et les chatbots deviendront des « compagnons » des opérateurs, des contrôleurs qualité et des développeurs de produits.

Dans l'Industrie 4.0, les machines et les données sont inextricablement liées, ce qui entraîne une interdépendance entre les technologies opérationnelles (TO) et les technologies de l'information (TI), dont les frontières s'estompent de plus en plus. Cette interdépendance des TO et des TI est également appelée hybridation.

Le profil du nouvel employé hybride a déjà été abordé (voir 2.1. L'opérateur du futur). Cette hybridation des compétences repose sur la combinaison de différents

domaines de compétences auparavant souvent cloisonnés. Dans le cadre de l'Industrie 4.0, l'expertise industrielle traditionnelle est associée à des compétences numériques et à des compétences liées aux applications. Le Technicien 4.0 est donc appelé à incarner la fusion des technologies opérationnelles (TO) et des technologies de l'information (TI), à superviser les cyber systèmes grâce à *la réalité augmentée* (RA), à gérer les données et à valider les résultats automatisés. Un point clé de cette transformation réside dans la capacité du Technicien 4.0 à filtrer l'information. L'intégration des outils numériques génère un afflux massif de données. Si le Technicien 4.0 ne parvient pas à synthétiser ou à filtrer ces données, il risque une surcharge cognitive, qui peut conduire à des erreurs. Le Technicien 4.0 doit donc interpréter, analyser et intégrer de grandes quantités de données dans les processus d'optimisation. La capacité à traduire ces données en actions concrètes constitue une compétence technique essentielle dans l'Industrie 4.0.

Le rôle hybride au sein de l'Industrie 4.0 est centré sur la gestion des exceptions, la résolution des problèmes imprévisibles et la gestion de l'intégrité globale du système. Sans ces profils hybrides, la synergie entre les machines et les données est impossible. Ces profils constituent les « ponts » indispensables entre les technologies opérationnelles (TO – machines) et les technologies de l'information (TI – données et logiciels). Ils sont la clé d'une intégration système fluide et efficace. L'interconnexion des systèmes garantit qu'une panne est rarement due à un problème purement mécanique, mais souvent à une combinaison de problèmes logiciels, électriques et mécaniques. Seul le profil interdisciplinaire permet un diagnostic rapide et efficace, car il supervise l'ensemble de la chaîne système. Ceci accélère le temps de réparation et minimise les temps d'arrêt. Le technicien-analyste de données, capable d'interpréter les données des capteurs et d'agir en conséquence, est ainsi devenu la nouvelle norme en atelier. Ce profil allie connaissances opérationnelles et capacités d'analyse.

3. Compétences de base et compétences techniques dans le cadre de l'Industrie 4.0

3.1. Culture numérique

Sources : 1, 2, 3, 5, 23, 27, 28, 32

Il est désormais évident que l'Industrie 4.0 engendre des changements significatifs tant dans les processus de travail que dans le contenu des emplois. D'une part, il existe un besoin urgent et généralisé d'améliorer le niveau de compétences numériques de l'ensemble des employés. D'autre part, la demande d'experts hautement qualifiés, dotés de connaissances approfondies et spécialisées, est forte et croissante. Les entreprises auront de plus en plus recours à la robotique et aux systèmes intelligents capables d'interagir avec les employés. Cela exige de ces derniers la maîtrise de diverses compétences de base. La littérature aborde notamment *les critères de qualification* et *les facteurs clés de succès* (« *order winners* »).

Les qualifications sont considérées comme des prérequis essentiels pour que les employés puissent travailler dans un contexte Industrie 4.0. Si un employé ne possède pas ces compétences, l'exercice de ses fonctions s'en trouvera compromise. Les qualifications peuvent inclure des connaissances spécialisées, constamment mises à jour grâce à la formation continue. Les employés doivent être disposés à apprendre tout au long de leur vie.

Les « *order winners* » sont des compétences distinctives qui permettent aux employés de se démarquer et d'apporter une valeur ajoutée à l'organisation. Ces compétences permettent à une entreprise de se distinguer de ses concurrents. Parmi les compétences les plus recherchées figurent la collaboration interdisciplinaire et la connaissance du secteur d'activité, qui offrent aux employés une vision globale des processus métier et des objectifs associés.

Cependant, la « compétence fondamentale » de l'Industrie 4.0 est définie comme la capacité à collecter, analyser et valoriser les données. Les spécialisations plus poussées, telles que l'analyse de données, la programmation et l'intégration de systèmes, prennent une importance croissante. Pour les postes peu qualifiés, la maîtrise du numérique est indispensable. Les employés doivent être capables d'utiliser des tablettes, des interfaces et des logiciels simples. Le besoin en compétences numériques et en spécialistes connaissant l'IA et l'automatisation s'accroît, si bien que les compétences numériques ne constituent plus un atout sur le marché du travail, mais une exigence fondamentale.

Même les fonctions traditionnellement considérées comme non techniques exigeront une bonne maîtrise des outils numériques. Par exemple, un emballeur doit savoir utiliser les systèmes de numérisation et des applications numériques et interpréter les instructions de travail numériques. Cela signifie que même les compétences de base devront être mises à niveau dans le cadre de l'Industrie 4.0.

3.2. Compétences techniques

Sources : 1, 2, 3, 4, 13, 20, 24, 26, 28, 29

3.2.1. Analyse des données et IA

Le fil rouge de l'Industrie 4.0 en matière de compétences techniques est la nécessité de profils de compétences hybrides (voir 2.3. Le technicien hybride et l'opérateur 4.0). Ces profils combinent à la fois des connaissances techniques et une expertise des technologies numériques et des données. Par exemple, les compétences analytiques permettant d'interpréter les données sont de plus en plus importantes. Les employés doivent être capables de collecter et d'interpréter de grands flux de données. La gestion et la science des données sont des compétences essentielles à cet égard. La connaissance de l'IA et de *l'apprentissage automatique* est indispensable pour créer des systèmes d'auto-apprentissage et développer des algorithmes de

décision utilisables pour l'analyse. Pour les techniciens et les spécialistes informatiques, la maîtrise de la programmation est essentielle pour développer des logiciels internes, des sites web ou des interfaces utilisateur, par exemple.

3.2.2. Automatisation et robotique

Des connaissances multidisciplinaires en électricité, en électronique et en logiciels, sont de plus en plus importantes pour la programmation des machines et des robots. L'intégration de ces compétences est essentielle pour les lignes de production complexes et automatisées.

3.2.3. Cybersécurité

La sécurisation des systèmes et réseaux industriels connectés est une compétence de plus en plus essentielle. Les employés doivent être capables d'installer et de gérer des réseaux IoT composés de capteurs et d'appareils. Cette connectivité accrue fait de la sensibilisation à la cybersécurité et de la connaissance de l'architecture de sécurité une priorité absolue et, par conséquent, une compétence cruciale dans le contexte de l'Industrie 4.0.

3.2.4. Production numérique

Les compétences spécialisées en impression 3D et en simulation numérique (jumeaux numériques) prennent une importance croissante. Les employés doivent maîtriser l'impression 3D, une forme de fabrication additive, mais aussi la simulation numérique pour tester virtuellement les processus et ainsi réduire les délais de mise sur le marché. Cela accroît la rapidité et la flexibilité de la production.

4. L'essor des compétences non techniques (= Soft skills) dans l'Industrie 4.0

4.1 Compétences non techniques essentielles

Sources : 1, 2, 3, 10, 11, 12, 17, 19, 20, 21, 24, 25, 27, 29, 31

À mesure que l'automatisation prend en charge les tâches cognitives routinières, les tâches humaines deviennent plus complexes, moins structurées et plus collaboratives. Cela accroît le besoin de *compétences non techniques ou Soft Skills*.

Les compétences non techniques ne sont plus secondaires, mais constituent une exigence primordiale pour évoluer dans le contexte de l'Industrie 4.0. Les tâches humaines deviennent de plus en plus complexes et axées sur la communication et la prise de décision. Pour appliquer les compétences techniques dans ce contexte, les compétences non techniques sont essentielles. Sans esprit critique, un technicien de l'Industrie 4.0 ne peut ni interpréter ni appliquer correctement l'analyse des données.

La plupart des études mettent l'accent sur les mêmes compétences : la collaboration, la créativité et l'innovation, mais aussi l'autonomie, les aptitudes relationnelles, le management et les compétences linguistiques. D'autres études soulignent l'adaptabilité et la flexibilité nécessaires pour passer d'une tâche à l'autre. Les employés doivent être capables d'accepter le changement et de s'adapter à l'évolution technologique rapide. La persévérance et la confiance en soi apparaissent comme des compétences non techniques essentielles. Enfin, certaines sources ajoutent la pensée critique et les compétences en résolution de problèmes, importantes pour anticiper les situations imprévisibles ; ces deux compétences distinguent les humains des systèmes automatisés. Avec l'émergence des équipes pluridisciplinaires et le décroisement entre les services (comme dans le cas des technologies de l'information et des technologies opérationnelles), la

communication et la collaboration sont cruciales pour la réussite de l'interdisciplinarité.

4.2 Absence de compétences non techniques dans les programmes d'études

Sources : 14, 17, 18, 33

Compte tenu de l'importance accordée aux compétences non techniques opérationnelles et cognitives (résolution de problèmes, adaptabilité, etc.), les compétences comportementales et éthiques sont souvent négligées dans les référentiels de formation. Cela révèle une lacune dans les programmes de formation actuels. L'intelligence émotionnelle, le leadership, la résolution des conflits et la conscience éthique, par exemple, sont moins explicitement mentionnés. L'accent est fortement mis sur les compétences purement opérationnelles. Or, l'accent mis sur le développement durable, l'inclusion et la transition vers l'Industrie 5.0 (approche centrée sur l'humain) exige que ces compétences soient intégrées de manière structurelle à la formation. La Vision flamande 2050 souligne le lien entre la transition numérique et les objectifs sociétaux, ce qui rend les compétences éthiques indispensables. La capacité à porter des jugements éthiques et à faire preuve de responsabilité sociale dans les décisions technologiques, comme la mise en œuvre de l'IA ou la gestion du Big Data, devient une nécessité.

5. La nécessité de prendre en compte les nuances sectorielles et les dynamiques régionales

5.1 Base transversale, spécialisation sectorielle

Sources : 4, 5, 19, 27

Les compétences fondamentales de l'Industrie 4.0 sont universelles, mais leur application varie selon les secteurs. Le contexte de chaque secteur détermine le niveau de spécialisation requis, en plus des compétences de base générales.

Dans le secteur métallurgique, par exemple, on observe une forte emphase sur les techniques de production avancées, le contrôle de précision et l'expertise spécifique en matière de matériaux pour l'impression 3D métal. La traçabilité via RFID et blockchain est ici essentielle.

Les secteurs chimique et pharmaceutique se caractérisent par une réglementation stricte, la nécessité de compétences pointues en R&D et l'analyse des données issues d'études cliniques. De ce fait, la numérisation se concentre fortement sur l'automatisation des processus, ainsi que sur le développement de la robotique médicale et des dispositifs intelligents. Dans ces secteurs, le cadre juridique est un facteur déterminant.

Dans le secteur agroalimentaire, les enjeux communs sont la sécurité alimentaire, la traçabilité et le développement des produits. L'automatisation utilise des robots pour les tâches délicates et des lunettes connectées pour la préparation des commandes. La connaissance des normes d'hygiène est essentielle.

Dans le secteur de la construction, la numérisation s'articule autour de *la modélisation des informations du bâtiment* (BIM) pour la conception et la gestion, ainsi que des compétences en matière de développement durable, telles que les mesures d'infiltration et thermographiques. Le secteur de la construction privilégie la gestion virtuelle des projets complexes.

Un professionnel précieux est celui qui allie de solides compétences numériques générales à une connaissance approfondie du domaine. Ces deux compétences sont indispensables pour relever les défis spécifiques à son domaine ou secteur.

5.2 Différences régionales en matière d'approche et de maturité

Sources : 1, 2, 3, 4, 6, 10, 19, 22, 33

La mise en œuvre de l'Industrie 4.0 varie d'une région à l'autre, ce qui souligne la nécessité de stratégies transfrontalières coordonnées. Ce besoin est particulièrement criant pour les petites économies fortement intégrées comme la Belgique et la France.

Mais même dans un petit pays comme la Belgique, la transition se fait différemment en Flandre et en Wallonie.

En Flandre, l'approche est progressive et pragmatique. L'accent est mis sur l'efficacité et le soutien des réseaux régionaux et des centres de connaissances tels que Flanders Make et VLAIO. La Wallonie, quant à elle, privilégie le rattrapage, avec une approche descendante qui identifie les pénuries structurelles de compétences. Cette identification s'effectue grâce aux rapports du SCES et à la stratégie Digital Wallonia. L'objectif principal est ici de combler le fossé en matière de maturité technologique. Selon certains acteurs du secteur, la différence entre l'approche flamande, pragmatique et à vocation sociale, et la stratégie wallonne de rattrapage risque d'entraîner une fragmentation du développement des compétences au sein du territoire national, ce qui pourrait potentiellement entraver la collaboration et la mobilité.

En France, la transition est fortement soutenue par de grandes entreprises des secteurs automobile, aéronautique et pharmaceutique.

La Commission européenne se concentre en particulier sur la création d'un cadre commun pour les compétences et l'innovation pédagogique, comme les orientations curriculaires 4. Cette approche est axée sur l'harmonisation.

La comparaison régionale révèle la persistance du fossé entre les grandes entreprises et les PME. La disparité des ressources et la complexité technologique expliquent en grande partie cet écart de rythme d'adoption. Les grandes entreprises disposent des ressources nécessaires pour développer des centres de formation internes (par exemple, l'Université Safran, Verallia 4.0) et des spécialisations pointues, comme les solutions clés pour remporter des contrats. Les PME, quant à elles, sont souvent moins bien dotées en ressources et peuvent accuser un retard en termes de rapidité et de maturité. Le manque de standardisation des technologies et la complexité qui en découle rendent la mise en œuvre et la formation spécialisée moins accessibles aux plus petites structures. De ce fait, des interventions politiques stratégiques s'avèrent indispensables pour combler cet écart et accompagner les PME dans leur transition.

6. Implications structurelles pour la formation

6.1. Compétences non techniques

Sources : 20, 23, 31, 32

Les compétences non techniques étant plus difficiles à acquérir dans le cadre d'un apprentissage traditionnel en salle de classe, leur développement au sein des programmes de formation exige une approche pédagogique spécifique. Dans ce cadre, l'environnement d'apprentissage doit pouvoir simuler la complexité du monde industriel. Le développement des compétences non techniques est particulièrement efficace lorsqu'il repose sur un apprentissage contextualisé, tel que l'apprentissage en milieu professionnel (formation en alternance, stages, etc.), le mentorat, le coaching et les jeux de simulation. Ces formes d'apprentissage reproduisent la réalité parfois déstructurée du monde du travail.

Pour acquérir ces compétences, des méthodes d'apprentissage innovantes, telles que *la réalité virtuelle (RV)* ou *les cours en ligne ouverts à tous (MOOC)*, peuvent être utilisées dans le cadre d'ateliers structurés afin de développer des compétences non techniques spécifiques. L'intégration d'outils numériques permet un apprentissage flexible et contextualisé. Les entreprises utilisent actuellement des programmes internes et des méthodes d'apprentissage mixte pour former leurs employés en interne. Ces programmes mettent l'accent sur la combinaison de compétences techniques et transversales, privilégiant ainsi le transfert de compétences spécifiques pertinentes pour le contexte professionnel. Les outils numériques peuvent être utilisés pour enseigner des compétences transversales actuellement absentes des cursus, telles que l'intelligence émotionnelle, la résolution de conflits ou la conscience éthique (voir : 4.2. Absence de compétences non techniques dans les programmes d'études).

6.2. Étendue et profondeur du programme d'études

Sources : 3, 19, 23, 24, 27, 28, 33

La transformation des métiers à l'ère de l'Industrie 4.0 exige une réforme structurelle de l'offre de formation, axée sur l'intégration intégrale des nouvelles tendances, en abandonnant les modules individuels et en faisant des tendances un élément fondamental des programmes. Cela signifie que les programmes doivent, d'une part, fournir une base solide et étendue en informatique, technologies numériques et langues, et, d'autre part, garantir un niveau d'expertise approfondi. Or, il existe un décalage important entre la demande, forte et croissante, pour ces profils hybrides et l'offre sur le marché du travail, en partie dû au cloisonnement des systèmes de formation. Ce décalage constitue un frein majeur, car le système éducatif ne forme pas suffisamment de profils interdisciplinaires capables de faire le lien entre les métiers – une compétence essentielle pour devenir un acteur clé du marché. Les programmes d'études doivent donc trouver un équilibre entre l'étendue et la profondeur des connaissances.

Outre la transition numérique, les programmes de formation doivent intégrer la transition écologique, en mettant l'accent sur l'efficacité énergétique, l'économie circulaire et l'utilisation durable des matériaux. La Vision flamande 2050 démontre que le développement durable et l'Industrie 4.0 sont indissociables des compétences requises. Les cursus doivent viser à créer un parcours de développement continu préparant les techniciens à évoluer dans des environnements de travail en constante mutation et imprévisibles. Cette approche s'appuie sur la notion de formation continue. On parle alors de former des « *missiles intelligents* » : des personnes capables de s'adapter rapidement. Cette compétence est essentielle pour survivre dans un contexte d'obsolescence rapide des connaissances.

6.3 Formats de formation innovants pour l'apprentissage tout au long de la vie

Sources : 3, 20, 21, 22, 27, 28, 31, 32

L'obsolescence rapide des connaissances fait de la formation continue la nouvelle norme. Le développement continu est essentiel pour rester compétitif sur le marché du travail. Le modèle linéaire du « diplôme unique » n'est plus viable, car le rythme des évolutions technologiques réduit la durée de validité des connaissances acquises.

Diverses sources citent les modèles d'apprentissage suivants qui favorisent l'apprentissage tout au long de la vie :

- Flexibilité modulaire : les micro certifications favorisent la formation continue en permettant aux employés de suivre des formations courtes et spécialisées au besoin tout au long de leur carrière. Cela permet de lutter contre l'obsolescence rapide des connaissances.
- L'apprentissage en milieu professionnel et la simulation : la formation en alternance, les stages pratiques et les modules de formation en situation de travail (formation interne) permettent une acquisition rapide de compétences spécialisées. Le lien direct avec la pratique garantit la pertinence des connaissances acquises.
- *Usines d'apprentissage* et apprentissage par projet : la *meilleure pratique* consiste à créer « l'usine d'apprentissage », un environnement d'apprentissage physique ou virtuel qui simule une usine réelle. Ce modèle favorise *l'apprentissage par l'expérience* et l'apprentissage par projet au sein d'équipes pluridisciplinaires, éléments essentiels au développement de la collaboration interdisciplinaire et

des compétences en résolution de problèmes. L'usine d'apprentissage tire pleinement parti de l'interdisciplinarité et de la collaboration interdisciplinaires.

- Formation mixte et outils numériques : L'utilisation de la formation mixte (en ligne et en présentiel), des MOOC et d'outils comme la réalité augmentée/virtuelle et *la gamification* facilite l'accès à la formation continue et la rend plus flexible et personnalisée. Le format de formation doit être adapté aux besoins individuels de chaque employé.
- La collaboration entre les établissements d'enseignement, les partenaires de formation et les entreprises est essentielle pour maintenir la pertinence de l'offre de formation et la capacité d'innovation des entreprises.

Les entreprises développent une spécialisation pointue grâce à la formation interne, tandis que l'enseignement supérieur doit fournir une formation générale solide et diversifiée. Il s'agit d'un impératif politique qui définit clairement les rôles de chacun. Cela nécessite un dialogue continu, les entreprises identifiant leurs besoins et les établissements d'enseignement adaptant leurs programmes en conséquence. Une interaction dynamique entre l'offre et la demande est essentielle. Des projets concrets, tels que le projet UPSKILL en Flandre-Occidentale – axé sur l'investissement et le partage d'équipements de formation et de plateformes SKILLS, – illustrent l'importance de ces écosystèmes de compétences régionaux. Ce type d'initiative est indispensable pour combler le déficit de compétences des PME, car la spécialisation pointue doit être partagée.

7. Politique

7.1 Le rôle stratégique des pouvoirs publics

Sources : 1, 2, 4, 10, 24, 31, 33

Dans le cadre de l'Industrie 4.0, les politiques publiques jouent un rôle proactif. L'évolution actuelle est trop complexe pour être laissée aux seules mains du marché. C'est pourquoi la littérature recommande que l'État agisse comme un chef de file, un facilitateur, un investisseur et un créateur d'un environnement commercial favorable. Les principales missions des politiques publiques peuvent inclure :

- Gestion stratégique : élaborer de stratégies nationales et régionales et organisation de consultations structurées avec toutes les parties prenantes.
- Innovation et soutien financier : accompagner la transformation technologique des PME. Ceci peut se faire par le biais de subventions, de crédits d'impôt et de programmes spécifiques. Ces mesures peuvent contribuer à réduire l'écart de financement avec les PME.
- Développement des talents : réformer l'éducation en adaptant les programmes scolaires pour y intégrer les sciences, les technologies, l'ingénierie et les mathématiques (STEM), les compétences numériques et la pensée critique comme piliers. De plus, la formation continue doit être structurée et accessible à tous.
- Normalisation : garantir un cadre juridique sûr, comprenant une politique de licences stable et le développement d'infrastructures stratégiques.

7.2 La transition vers l'Industrie 5.0 : l'humain au cœur des priorités

Sources : 3, 14, 34

Une approche purement technologique dans l'Industrie 4.0 peut engendrer un rythme de travail plus intense et un sentiment d'aliénation. Des recherches sur la

qualité du travail en environnements automatisés ont mis en évidence ces risques psychosociaux.

Une approche centrée sur l'humain, ou Industrie 5.0, est essentielle, plaçant le bien-être des employés au premier plan. L'Industrie 5.0 est perçue comme une correction nécessaire à l'approche purement axée sur l'efficacité de l'Industrie 4.0. Par exemple, il est conseillé d'impliquer activement les employés dès le début de la mise en œuvre des nouvelles technologies, afin qu'elles soient perçues comme un outil plutôt que comme une menace. Les politiques publiques doivent élaborer des cadres pour la numérisation avec la participation des partenaires sociaux tels que les syndicats, notamment en actualisant les accords pour garantir les conditions de travail, la confidentialité, le contrôle et la charge de travail. Le dialogue social est crucial pour garantir des conditions de travail décentes.

Une exigence fondamentale est que les systèmes soient « explicables » ou « interprétables » (*IA explicable*), afin que les humains conservent la maîtrise des décisions des systèmes automatisés et puissent les appliquer ou les modifier. Il s'agit d'une exigence éthique visant à prévenir l'aliénation.

7.3 Bonnes pratiques et modèles stratégiques

Sources : 31, 32, 34

Cette transition s'appuie sur un ensemble riche de bonnes pratiques, de modèles et d'outils concrets qui facilitent la mise en œuvre de l'Industrie 4.0.

Catégorie	Description	Bonnes pratiques / Modèles
Cadres stratégiques	Des modèles pour structurer des questions complexes et conceptualiser de	RAMI 4.0 (Cadre de référence pour la normalisation)

	nouveaux modèles commerciaux.	Industrie 5.0 (paradigme centré sur l'humain) Servitisation (par exemple, Kaeser Compressors) Personnalisation de masse.
Méthodes de formation	Des méthodes innovantes et axées sur la pratique pour le développement des compétences.	Les « fabriques d'apprentissage » (par exemple, l'Université technique de Darmstadt) L'initiative CDIO (cycle de vie complet du produit) L'apprentissage actif par projet (A2P2) La formation en ligne duale Les MOOC La réalité augmentée et la réalité virtuelle.
Instruments de mesure	Outils d'auto-évaluation et d'analyse de la	Baromètre des compétences Industrie

	maturité et de la faisabilité.	4.0 (maturité de l'entreprise) Baromètre du travail (analyse des risques psychosociaux) Vérification des compétences en ligne 4.0 (étudiants).
Applications technologiques	Applications concrètes pour l'optimisation sur le lieu de travail.	Cobots (robots collaboratifs) Système SART (réalité augmentée d'Airbus pour le contrôle qualité) ALIS (maintenance prédictive du F-35) Exosquelettes (réduction de la pression physique)

Le développement et l'utilisation de ces modèles, tels que l'*indicateur de compétences Industrie 4.0*, sont essentiels pour accompagner les entreprises, notamment les PME, dans l'élaboration progressive de leur stratégie numérique. La combinaison d'outils de mesure comme l'*indicateur de compétences* (maturité technique) et l'indicateur de travail (risques psychosociaux) garantit une approche intégrée de l'Industrie 4.0.

8. Conclusion et recommandations

Sources : 1, 2, 3, 4, 14, 19, 20, 21, 27, 28, 31, 32, 33, 34

Les résultats de l'analyse bibliographique ci-dessus démontrent que l'évolution actuelle vers l'Industrie 4.0 représente un défi fondamental et complexe, où la mise en œuvre technologique est indissociable du développement des compétences des employés et de la capacité d'adaptation de l'organisation. L'interaction entre ces éléments détermine le succès de l'Industrie 4.0.

Les métiers techniques évoluent, passant de tâches répétitives à la gestion de processus et à la résolution de problèmes, ce qui accroît la demande de profils hybrides alliant compétences techniques et compétences non techniques. La réussite dans ce rôle exige à la fois une expertise technique pointue et une grande capacité d'analyse des situations complexes. Les principaux constats de cette revue de littérature sont les suivants :

- L'hybridation du métier de technicien d'avenir repose sur un profil interdisciplinaire qui fait le lien entre les technologies opérationnelles (TO) et les technologies de l'information (TI), combinant analyse de données et mécanique. Les compétences sont structurées en plusieurs niveaux, l'expertise, la formation continue, le sens des affaires et la collaboration interdisciplinaire étant des facteurs clés. Cette structure devrait servir de base à la réforme des programmes de formation proposés.
- Dans un environnement complexe, des compétences cognitives telles que l'esprit critique, l'adaptabilité et l'autonomie sont essentielles pour une application efficace des spécialisations techniques. Ces compétences constituent un rempart humain contre la complexité de la technologie.

- La solution au déficit de compétences réside dans une adaptation structurelle et permanente de l'environnement d'apprentissage. L'obsolescence rapide des connaissances exige une réponse institutionnelle, les politiques publiques jouant un rôle clé dans la transformation du modèle de formation linéaire actuel en un modèle d'apprentissage tout au long de la vie. Le rôle du gouvernement est non seulement d'innover, mais aussi de placer l'humain au cœur des priorités et de s'attaquer activement à la fracture numérique qui touche les travailleurs peu qualifiés et les PME. La coordination entre les acteurs régionaux et la normalisation de la reconnaissance transfrontalière des compétences sont essentielles pour optimiser la mobilité des talents rares et lutter contre la fragmentation régionale. La recommandation stratégique est donc la suivante : les politiques publiques, l'éducation et l'industrie doivent conjuguer leurs efforts autour de trois axes :
 - La maîtrise du numérique pour l'ensemble de la population active,
 - La spécialisation ciblée grâce à des modèles de formation flexibles
 - La mise en œuvre d'une approche centrée sur l'humain afin de garantir l'efficacité et la maîtrise des systèmes automatisés.

Bien que cette analyse de la littérature fournisse un cadre théorique, le secteur industriel, comme décrit précédemment, est en constante évolution. La prochaine étape du projet SKILLS4.0 consistera en des entretiens avec des entreprises du secteur industriel et des visites d'entreprises. Ces données qualitatives issues du terrain sont essentielles pour valider les compétences théoriques au regard des pratiques quotidiennes des entreprises. De plus, les entretiens et les visites d'entreprises permettront d'affiner la compréhension des différences entre la Flandre, la Wallonie et la France.

Les enseignements tirés de cette recherche, ainsi que des entretiens, constitueront la base du développement ultérieur du projet SKILLS4.0 et du développement associé des outils et des formations.

Liste de référence

1. Connectez-vous aux métiers d'avenir, AFPA Grand Est pour le projet "Digimob Industrie 4.0" . <https://digimob-industrie40.eu/CMS/content/images/202303/livre-blanc-digimob-fr-numerique.pdf>
2. Analyse prospective du développement et des compétences de l'industrie 4.0 (2021) SPW . [https://emploi.wallonie.be/files/DOCS/Actualit%C3%A9s/SCES%20Analyse%20besoins%20comp%C3%A9tences%20industrie%204.0%20\(final\).pdf](https://emploi.wallonie.be/files/DOCS/Actualit%C3%A9s/SCES%20Analyse%20besoins%20comp%C3%A9tences%20industrie%204.0%20(final).pdf)
3. Orientations pédagogiques « Compétences pour l'industrie » 4.0. Commission européenne . <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/845051d4-4ed8-11ea-aece-01aa75ed71a1>
4. Rapport sur l'Industrie 4.0 analysée dans cinq secteurs (2019). SERV. https://www.serv.be/sites/default/files/documenten/StIA_20190617_Digitalisering_Industrie_4.0_RAP.pdf
5. L'Industrie 4.0 dans l'industrie agroalimentaire. Alimento . https://www.alimento.be/sites/default/files/files/alimento_publication/field_file/Alimento-Catalogue-Seminarie%20arbeid-NL-No.1-RVB-Minimum_0.pdf
6. Congrès flamand du marché du travail. Centre d'aide à l'emploi . <https://www.vlaanderen.be/kennisplatform-departement-werk-en-sociale-economie/vlaams-arbeidsmarktcongres-2024/09-12-2024>
7. Rapport de l'industrie. Formulaire. <https://www.leforem.be/documents/a-propos-du-forem/rapport-activite.pdf>
8. /
9. Soyez le changement. Agoria. <https://www.agoria.be/en/services/expertise/talent/be-the-change/be-the-change-looks-can-be-deceiving-2023>
10. BPI France explore les technologies de l'industrie 4.0. BPI . https://bigmedia.bpifrance.fr/nos-dossiers/industrie-40-technologies-enjeux-en-entreprise-ou-en-est?utm_source=chatgpt.com
11. SAP France. SAP . https://www.sap.com/france/products/scm/industry-4-0/what-is-industry-4-0.html?utm_source=chatgpt.com
12. Le potentiel des technologies industries 4.0. IRSEM . https://www.researchgate.net/publication/332290677_MCO_40_Le_potentiel_des_technologies_de_l'industrie_40_appliquees_au_Maintien_en_Condition_Operacionnelle_MCO_des_materiels_de_defense_etude_IRSEM_n65
13. Ville intelligente et grappe industrielle en intelligence artificielle. HEC Montréal l. https://biblos.hec.ca/biblio/memoires/pasteur_brun_valencia_m2022.pdf
14. Evolutio de l'IA : enjeux pour l'activité humaine et la relation huamain-machine. Activités de la Revue Zouinar . <https://journals.openedition.org/activites/4941#tocto1n2>

15. Contribution de l'ergonomie à la conception des nouvelles technologies dans l'industrie 4.0 : un regard neuf sur la conception des situations capacitanes. *Compans & coll. Site Self* .
<https://ergonomie-self.org/document/contribution-de-lergonomie-a-la-conception-des-nouvelles-technologies-dans-lindustrie-4-0-vers-la-conception-de-situations-capacitanes/>
16. L'INDUSTRIE 4.0 DANS LES SECTEURS MÉTALLIQUE ET TEXTILE EN BELGIQUE. *KU Leuven / Hiva*.
<https://lirias.kuleuven.be/retrieve/609897>
17. "Les soft skills dans l'industrie 4.0 : Un levier pour réussir la transformation numérique" (2020). *Revue de gestion RH-D Theurelle-Stein*. <https://shs.cairn.info/revue-management-et-avenir-2017-5-page-129?lang=fr>
18. L'impact de la transformation numérique sur les pratiques et le développement du capital. *IJIFAME - Zouhair EL ARHLABI*. file:///Users/Philippe/Downloads/964-Article%20Text-2515-1-10-20230530.pdf
19. Analyse prospective du développement et des compétences de l'industrie 4.0. *SCES* .
[https://emploi.wallonie.be/files/DOCS/Actualit%C3%A9s/SCES%20Analyse%20besoins%20comp%C3%A9tences%20industrie%204.0%20\(final\).pdf](https://emploi.wallonie.be/files/DOCS/Actualit%C3%A9s/SCES%20Analyse%20besoins%20comp%C3%A9tences%20industrie%204.0%20(final).pdf)
20. Nombreux développements industriels : anciennes compétences auxiliaires. *L'industrie manufacturière de Thibaut Bidet Mayer*. <https://www.la-fabrique.fr/wp-content/uploads/2016/10/N16-Travail-industriel-%C3%A0-l%C3%A8re-du-num%C3%A9rique.pdf>
21. Renforcement des compétences face à l'industrie 4.0. *Industrie numérique*.
<https://www.industrie-numerique.com/renforcement-des-competences-face-a-lered-lindustrie-4-0/>
22. Feuille de route pour les techniciens et l'industrie 4.0. *POM au sein d'UPSKILL*.
https://www.opleidingsmateriaal.be/files/ugd/e83159_72ce212921714dc48e7370a4e0593c28.pdf
23. Les compétences et savoir-faire de l'industrie 4.0 - portail du site. *GIMELEC*.
<https://industrie40.fr/>
24. L'industrie 4.0 s'affranchit des exigences en matière d'infrastructure et de compétences. *DSI* .
<https://www.cio-online.com/actualites/lire-l-industrie-40-freinee-par-les-infrastructures-obsoletes-et-le-manque-de-competences-15291.html>
25. Processus Industrie 4.0 – Le modèle d'intégration intégrée. *École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers* . <https://theses.hal.science/tel-03677479/>
26. Cartographie des emplois, des compétences et des formations de l'industrie du futur. *L'Observatoire Compétences Industries*. <https://www.observatoire-metallurgie.fr/analyses-previsions/cartographie-industrie-du-futur>
27. Étude des compétences requises pour l'industrie 4.0 (2019). *South African Journal of Industrial Engineering*.

https://www.researchgate.net/publication/337327291_An_Investigation_of_Industry_40_Skills_Requirements/fulltext/5dd29679a6fdcc7e138bab03/An-Investigation-of-Industry-40-Skills-Requirements.pdf?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIn19

28. Rebelles de la technologie (2018). *Tech Your Future - Centre d'expertise TechniekOnderwijs*. https://www.techyourfuture.nl/wp-content/uploads/2023/05/401-0017-Rebellen-in-de-Techniek-A4-V4_LR-002-1.pdf?utm_source=chatgpt.com
29. Compétences relationnelles et techniques requises dans l'industrie 4.0 pour les étudiants en génie électrique. *Journal of Applied Engineering and Technological Science*. <https://journal.yrpi.ku.com/index.php/jaets/article/view/2174/2083>
30. /
31. Manuel i4EU : Compétences clés pour un modèle européen d'industrie 4.0 (2022). *Projet i4EU (Erasmus+)*. <https://www.i4eu-pro.eu/handbook-en/>
32. LCAMP - Observatoire des compétences et des emplois (2024). *Projet LCAMP (CoVE)*. <https://lcamp.eu/activity/skills-and-job-observatory/>
33. Vision 2050 (2016). *Flandre*. <https://publicaties.vlaanderen.be/view-file/19586>
34. Perspective des employés dans l'industrie 4.0 : Effet des fonctionnalités technologiques sur la qualité du travail perçue et l'engagement (2021). *HIVA*. https://kuleuven.limo.libis.be/discovery/search?query=any,contains,LIRIAS3393984&tab=LIRIAS&search_scope=lirias_profile&vid=32KUL_KUL:Lirias&offset=0