



Intelligence artificielle 4.0 pour l'Industrie 4.0

Eunika Mercier-Laurent ¹

Le contexte

La globalisation et la recherche de main d'œuvre bon marché ont changé le paysage industriel des pays développés. Pour faire face à la concurrence asiatique le gouvernement allemand a proposé le terme Industrie 4.0² en 2011 afin de promouvoir la numérisation de la fabrication, revaloriser l'industrie européenne et créer des emplois en Europe [2].

L'Industrie 4.0 (I4) représente la quatrième révolution industrielle après l'invention de la machine à vapeur, mécanisation et production de masse, informatisation et robotisation (cf. figure 1).

Alors que la plupart s'accordent pour considérer la machine à vapeur comme une invention marquante de la première révolution, on oublie le métier à tisser automatique introduit par Joseph-Marie Jacquard en 1789³. À noter au passage que cette machine utilisait la programmation à cartes.

La seconde révolution industrielle est située par les historiens entre la seconde moitié du 19^e siècle et le début du 20^e siècle. Utilisant comme ressources l'électricité et le pétrole, elle vise la croissance économique par le développement de la production et de la distribution de ces ressources, de la mécanique et de la chimie.

1. Laboratoire CRéSTIC, Université de Reims Champagne-Ardenne

2. <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/industry-4-0/29278>

3. <https://www.france-pittoresque.com/spip.php?article12487&fbclid=IwAR3jDdgysoaIXI615B-fjcPw4NiAM0v-OAaucwAVQwd7WlbqM9UqKjcqAQ>.

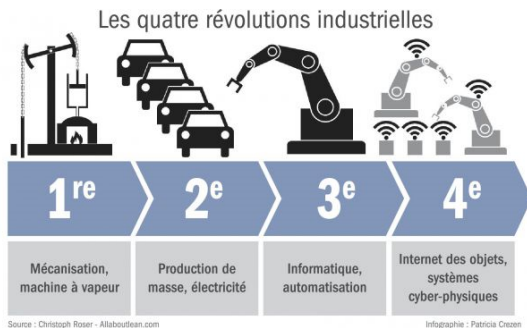


FIGURE 1. Quatre révolutions industrielles.

L'invention de la radio, du téléphone, de l'ordinateur et des réseaux de neurones date de cette époque.

Les premiers cris d'alarme sur les impacts de ce développement ayant pour seul objectif de générer des richesses matérielles pour les investisseurs ont été lancés dans les années 1960 [1].

La troisième révolution industrielle, amorcée dans des années 1970, correspond à une nouvelle étape dans l'histoire des sciences et des techniques. Elle se caractérise principalement par l'utilisation de l'énergie nucléaire, le développement de l'électronique et de l'informatique, qui rendent possibles la production de matériels miniaturisés et l'automatisation poussée de la production, la multiplication des produits de synthèse, le développement des technologies spatiales et celui des biotechnologies et de l'Internet.

Les acteurs de cette période ne se préoccupent pas des impacts générés par leurs activités, continuant à produire plus pour vendre plus. L'obsolescence programmée est bien intégrée dans la conception de produits. Les équipements électroniques et informatiques sont tristement compris dans cette démarche.

Intégrant l'informatique traditionnelle et l'IA, l'Industrie 4.0 est sensée apporter une plus grande flexibilité, une optimisation de processus de fabrication et faciliter l'innovation à toutes les étapes. La transformation de processus repose sur cinq principes fondamentaux :

- (1) Présence de réseaux des personnes, des machines et des objets connectés dans l'espace physique et virtuel.
- (2) Amélioration de l'efficacité et de la flexibilité grâce à une exploitation optimisée des données.

- (3) Amélioration de la qualité de produits et de la rapidité de leur mise sur le marché grâce aux tests en réalité augmentée et virtuelle.
- (4) Optimisation de planification, fabrication et maintenance avec des techniques IA.
- (5) Robotisation.

De manière générale Industrie 4.0 comporte la décision décentralisée, l'interopérabilité, la cyberassistance, la maintenance prédictive et l'écoconception ; elle est centrée sur l'utilisateur/client.

L'intelligence artificielle, non mentionnée sur la figure 1, est déjà fortement présente dans l'industrie et souvent « embarquée » dans des systèmes d'aide à la décision, de diagnostic, de maintenance et d'optimisation [10, 6]. D'ailleurs les systèmes embarqués (station spatiale, pilote automatique, voiture autonome, etc.) intègrent de l'IA.

Les applications de l'IA en industrie ont été exposées durant la conférence annuelle d'Avignon « Systèmes Experts et leurs applications » (1987-1994). À signaler également le groupe de travail sur les applications opérationnelles de l'Intelligence Artificielle (GTAOIA) de l'AFIA (Association Française pour l'Intelligence Artificielle), animé par Bertrand Braunschweig et Eunika Mercier-Laurent, qui a donné le jour à SSI en 1998, puis à ISAI, la première conférence sur les applications de la plate-forme AFIA en 1999. Depuis, elle est annuelle et a été renommée APIA⁴.

Le bulletin AFIA, édité depuis 1989, a abordé un certain nombre de thématiques liées aux applications industrielles, comme récemment « IA et la robotique mobile »⁵.

Quelques éléments d'Industrie 4.0

La plupart des illustrations incluses dans le cercle de la figure 2 représentent des éléments de l'Industrie 4.0 : *cloud* pour le stockage et traitement distant, *big data* et *analytics*, objets connectés, simulation, fabrication additive (*additive manufacturing*), réalité augmentée et virtuelle pour le prototypage et la formation et robotique industrielle. À celles-ci, il faut ajouter l'intégration et la cyber-sécurité.

La fabrication additive, appelée également impression 3D, désigne les procédés de fabrication par ajout de matière. Cette technique peut être utilisée dans le cycle de vie d'un produit aussi bien dans le prototypage rapide et la production que les applications d'outillage. La fabrication additive est plus particulièrement appropriée à la production de très petits composants en grandes quantités ou à la production de pièces d'une grande complexité géométrique. L'impression 3D peut également servir à produire des pièces détachées et éviter de jeter les appareils endommagés à

4. <https://www.irit.fr/pfia2019/apia/>

5. https://afia.asso.fr/wp-content/uploads/2019/04/104_avr19.pdf

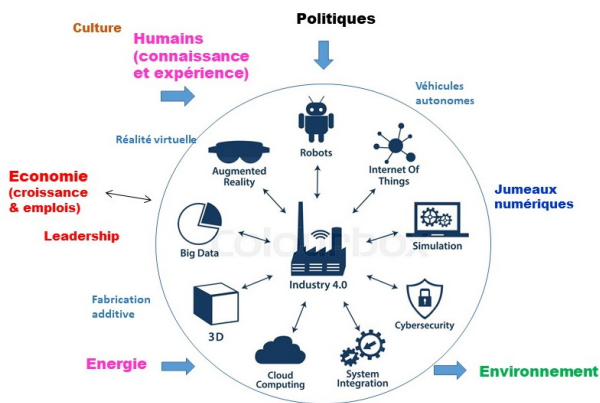


FIGURE 2. Quelques éléments de l'industrie 4.0 (dans le cercle).

Source : monicaodo-stock.adobe.com. Ajouts Eunika Mercier-Laurent.

condition que le prix d'impression et de remplacement soit inférieur au prix de l'appareil neuf. Les pièces à reproduire peuvent être scannées. Bien que le terme intelligence artificielle ne soit pas mentionné, on y devine des classiques de l'IA comme les robots avec vision artificielle, les capteurs, le traitement du signal, de la voix, de l'image, la fouille de données, les diagnostics (plusieurs techniques possibles) et la simulation.

On notera également que les drones sont utilisés aujourd'hui pour l'observation (caméra, analyse de l'image), pour une action de prévention (détection de fissures) ou de réparation (Fukushima). L'industrie de guerre utilise des mini-drones équipés de reconnaissance faciale et d'une charge d'explosif.

La conception de produits est bien intégrée dans I4 ; le *design thinking* et l'éco-conception font de plus en plus partie intégrante du cycle de développement [11]. Au départ de cette tendance, les entreprises ont surtout travaillé sur la conformité à la norme ISO 26000 et les éco-designers sur le recyclage des produits en fin de vie. Maintenant, les responsables du développement durable interviennent aux côtés des concepteurs pour minimiser par tous les moyens l'impact environnemental de leurs innovations. Encore ici la simulation en amont avait un grand rôle à jouer. Cette écoconception en informatique n'en est qu'à ces balbutiements.

Deux ajouts par rapport à la figure 2 :

- (1) Éléments qui font maintenant partie de l'IA, comme les clones virtuels, les systèmes cyber-physiques et les co-bots, qui tirent leur nom de la contraction des termes anglais *collaborative robots*. Ces robots d'un nouveau genre ont la particularité de travailler en collaboration avec un humain, dopant sa productivité en le délestant des missions les plus ingrates, éprouvantes et répétitives ;
- (2) Éléments extérieurs indispensables pour le bon fonctionnement d'I4.

Le clonage virtuel (*digital twin* ou jumeau numérique) est un modèle numérique de comportement physique d'un équipement, comme par exemple une ligne de production. Ces outils sont très utiles pour vérifier la commande d'un équipement avant sa mise en service, pour prévoir des incidents ou des pannes avant qu'elles n'apparaissent ou encore pour étudier la fiabilité de composants mécaniques exposés à des conditions extrêmes.

Les systèmes cyber-physiques (CPS) sont des systèmes formés d'entités collaboratives, dotées de capacité de calcul, en connexion intensive avec le monde physique environnant et les phénomènes s'y déroulant, fournissant et utilisant à la fois les services de mise à disposition et de traitement de données disponibles sur le réseau. Le principe est présenté sur la figure 3.

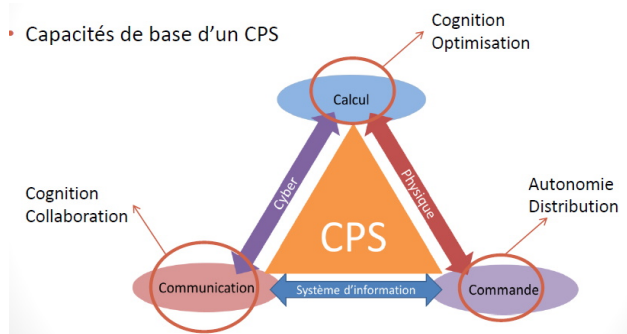


FIGURE 3. Systèmes cyber-physiques (CPS)⁶.

Alors que Lee, Bagheri et Kao [4] décrivent plusieurs niveaux de CPS (cf. figure 4), ce qui nous intéresse ici du point de vue l'IA sont les niveaux C3 (apprentissage système), C4 (autodiagnostic) et C5 (auto-adaptation).

Les co-bots, présents dans les usines du futur, ont pour principe de collaborer avec des opérateurs humains via en général des écrans tactiles.

6. http://ims2.cran.univ-lorraine.fr/sites/ims2.cran.univ-lorraine.fr/files/inline-files/Olivier_Cardin-les_CPFS.pdf

- **C1.** Au niveau **Connexion**, le CPS opère sur un réseau Plug&Play et utilise des données envoyées par un réseau de capteurs ;
- **C2.** Au niveau **Conversion**, le CPS sait traiter l'information et la retranscrire en informations de plus haut niveau ;
- **C3.** Au niveau **Cyber**, le CPS a une connaissance des autres CPS de l'environnement et peut interagir avec eux pour enrichir son propre traitement d'information ;
- **C4.** Au niveau **Cognition**, le CPS est capable d'établir un diagnostic basé sur des simulations de son propre comportement et une analyse différentielle des données de capteurs ;
- **C5.** Au niveau **Configuration**, le CPS peut s'adapter seul en cas de défaillance, se reconfigurer ou ajuster de manière autonome ses paramètres afin de retourner à un comportement nominal.

FIGURE 4. Les différents niveaux de CPS selon [4].

À gauche de la figure 2, il y a des éléments à prendre en compte (connaissance du contexte) pour le bon fonctionnement de l'ensemble. Bien que les personnes soient considérées comme partie intégrante de l'I4, leurs connaissances et expériences ne sont pas suffisamment exploitées, car la mode est aux données. L'environnement multiculturel généré par la mondialisation peut enrichir le système, mais aussi le freiner. Les politiques imposées par les gouvernements prennent maintenant en compte l'impact de l'I4 et l'IA. De plus, le système a besoin de l'énergie pour fonctionner ; l'efficacité énergétique est intégrée dans quelques usines du futur.

L'impact environnemental est encore faiblement pris en compte via la norme ISO 26000. Des lignes directrices pour aider les organismes à établir, documenter, mettre en œuvre, tenir à jour et améliorer en permanence leur management de l'éco-conception sont fournies par l'ISO 14006 :2011. Cependant, cet impact doit être considéré tout au long du processus de l'innovation, l'impact de l'informatique y compris [6, 7].

L'usine intelligente ou l'usine du futur (*Smart Factory*) est considérée comme le déclencheur de la quatrième révolution industrielle. En effet, la digitalisation massive, mode au *big data* et leur exploitation par entre autre le *deep learning* sont parmi les éléments fondateurs. L'usine Schneider de Vaudreuil⁷ et celle de Safran sont exemplaires en ce qui concerne le déploiement des principes de l'I4 et l'utilisation généralisée de l'IA.

Intelligence artificielle – de 3.0 à 4.0

Bien que le déclencheur de la nouvelle vague de l'IA a été le marketing et le leitmotiv de vendre plus et au plus grand nombre, les techniques pour explorer le *big data* sont bien connues par la communauté de l'IA sous le nom « fouille de

7. <https://www.youtube.com/watch?v=N0tnFyZC4bs>

données ». Le *machine learning* est omniprésent et très galvaudé, alors que la science du *machine learning* remonte aux années 1970. L'année 1995 a apporté un concept de *tool box* composé d'un ensemble des techniques existantes, appelé *Multi-strategy Machine Learning* [8].

Cap Digital⁸ constate : « Cette nouvelle vague de l'intelligence artificielle cultive une volonté de s'approcher voire d'augmenter et améliorer nos fonctions humaines. Les interfaces deviennent plus naturellement « humaines » et rentrer en contact avec des machines n'a jamais été aussi intuitif. L'interface tactile est d'ores et déjà une norme, la voix tend à devenir un nouveau canal de contrôle pour la maison par exemple. La machine et l'humain tendent à se fondre et se confondre, à s'interpeller l'un l'autre pour s'enrichir mutuellement ».

Dans cette effervescence, on oublie que l'IA a plus de 60 ans et offre un ensemble d'approches et de techniques pour traiter efficacement la plupart des problèmes complexes auxquels nous devons faire face actuellement (cf. figure 5).

Tout cet éventail des techniques intègre également celles associées à la modélisation et au traitement des connaissances (et d'expériences) – le chaînon manquant dans la troisième vague. Résoudre des problèmes industriels complexes impose la combinaison de plusieurs techniques dans des systèmes hybrides [3]. Les SMA (systèmes multi-agents) encapsulent déjà quelques techniques (spécialisation des agents). John Launchbury (DARPA) prédit la nouvelle génération de l'IA combinant les techniques numériques avec celles du traitement de connaissances⁹.

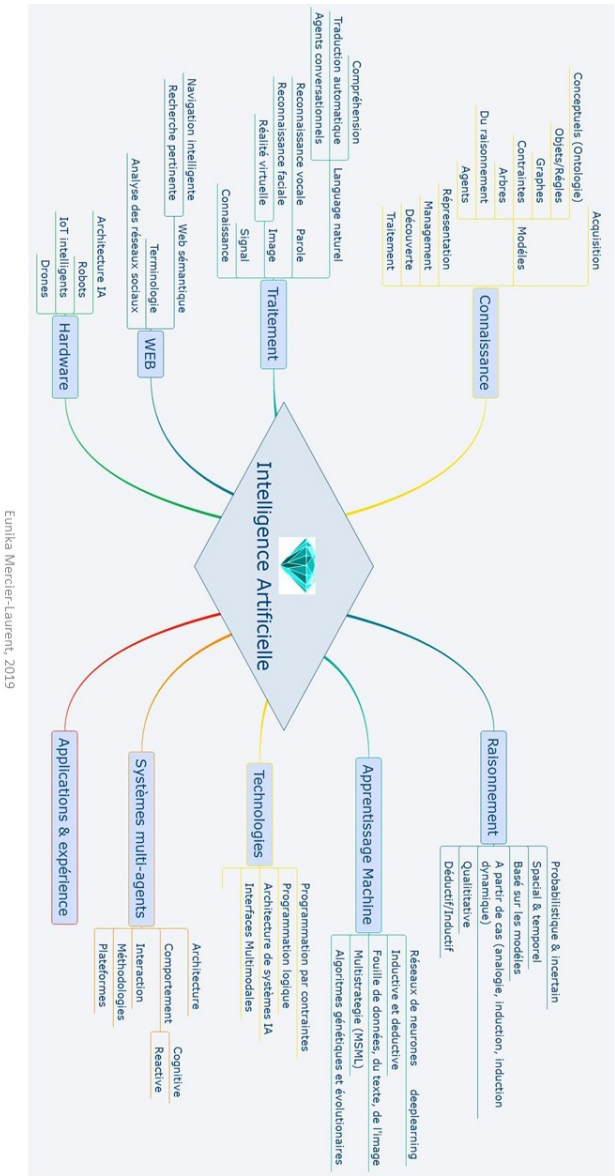
C'est cette IA 4.0 combinant les techniques liées au traitement des connaissances et la découverte d'information (appelée à tort « connaissance ») de *big data* qui rend des vrais services à l'Industrie 4.0.

Décortiquons la vision de Vinci énergies : « En étant connectées entre elles, les machines sont capables de produire intelligemment. Dans les faits, cela se retrouve sur de nombreux points, par exemple :

- Une production plus flexible qui permet de s'adapter à la demande en temps réel (programmation par contraintes).
- Une traçabilité poussée, qui permet de savoir où et quand a été fabriqué le produit, mais aussi comment. À cela s'ajoutent des contrôles de sécurité tout au long de la fabrication, qui permettent de rappeler un produit en cas de défaillance, de manière ciblée et plus rapidement (reconnaissance de formes).
- Des machines capables de contacter un spécialiste apte à les dépanner à distance (déjà vu en 1996 chez Darty avec du CBR, accès aux bases d'expériences), ou pour se mettre à jour et améliorer leurs performances, grâce à Internet (diagnostic).

8. <https://www.capdigital.com>

9. <https://www.youtube.com/watch?v=-001G3tSYpU>



Eunika Mercier-Laurent, 2019

FIGURE 5. Principales techniques de l'intelligence artificielle (Eunika Mercier-Laurent).

- Une scénarisation du cycle de production grâce à laquelle la fabrication est pilotée en fonction du client et qui est capable de personnaliser le produit (taille, couleur, type d'emballage...), (modélisation par scénario – Shank, 1990 mais aussi CBR, Legrand).
- Une optimisation des consommations par l'efficacité énergétique : la production est optimisée en fonction du coût de l'énergie et de sa disponibilité au cours d'une journée, lorsqu'elle est moins chère ou lorsque les énergies alternatives sont utilisables. Une mise hors tension des machines est également effectuée si elles n'ont pas besoin de fonctionner. Les remontées d'informations peuvent aider à optimiser les consommations et participent ainsi à l'efficacité énergétique de l'usine (système hybride combinant systèmes experts, Bayésien et réseaux de neurones [3]). »

Les problèmes complexes ne peuvent pas être résolus avec une seule technique, comme les médias semblent le faire croire aujourd'hui. Par exemple, les systèmes de vision industrielle utilisés dans les secteurs de l'automobile, de l'agroalimentaire, de l'emballage, du médical et de l'industrie pharmaceutique mettent en œuvre à la fois des composants matériels et logiciels, tels que l'éclairage, les lentilles, les capteurs et les équipements de communication et d'analyse de données, tâches d'identification, contexte d'automatisation de la production, les systèmes de guidage des robots.

Les chercheurs et les praticiens de l'intelligence artificielle ont inventé et expérimenté un éventail d'approches et de techniques qui permettent aujourd'hui de faire face aux défis à condition de savoir penser sans frontières entre les domaines.

Dans nos laboratoires de recherche

Les industriels se regroupent, créent des consortiums internationaux pour proposer des solutions couvrant l'ensemble des problématiques liées à l'I4. Siemens a créé MindSphere, une plateforme IoT ouverte couvrant les besoins des entreprises, les logiciels comme Astree, Aquiweb et bien d'autres ont été présents au salon Smart Industrie à Lyon en 2019.

Les laboratoires travaillent sur tous les sujets mentionnés précédemment. Parmi eux, on peut citer le LORIA, le GEI (INSA), le LAAS, le LIRMM¹⁰, l'université de Poitiers¹¹. Parmi les thèmes de recherche, il y a le traitement du signal et des images, le *data mining* et le *machine learning*.

Les modèles de connaissance complètent efficacement ces modèles mathématiques et le traitement de connaissances apporte une plus-value dans de nombreux cas.

10. <http://www.lirmm.fr/~reitz/di-marel/20160219-expose-GL-SCP.pdf>

11. <http://blogs.univ-poitiers.fr/f-launay/tag/systeme-cyber-physique/>

L'intégration des capteurs en réseau, avec des systèmes de calcul et des moyens de télécommunication embarqués, en tant qu'organes actifs et intelligents, permet d'améliorer la surveillance, le diagnostic et la maintenance automatique des systèmes.

Parmi les projets rapprochant les mondes de l'IT (*Information Technology*) et de l'OT (*Operational Technology*), on peut par exemple citer les systèmes d'aide à la décision pour les opérateurs de production, le diagnostic en ligne des systèmes automatisés de production utilisant le raisonnement par analogie et l'intégration de l'humain au cœur de l'industrie du futur.

A l'étranger, les chercheurs de Fraunhofer travaillent sur l'optimisation des ressources pour la fabrication (machines de fabrication, robots, systèmes de convoyeurs et d'entreposage et installations de production) autonomes, capables d'auto-contrôle en réponse à différentes situations, auto-configuration, intégration de connaissances, équipés de capteurs spatiaux et qui intègrent également les systèmes de planification et de gestion¹².

Au Danemark¹³, les chercheurs travaillent sur les jumeaux numériques impliquant la fouille de données provenant d'éoliennes en mer, en collaboration avec des simulateurs pour la maintenance prédictive. En Hongrie, la laboratoire MMTDI-Szechenyi Istvan University Győr travaille sur les systèmes cyberphysiques (travaux de Josvai Janos, Cristina Monsone [9]).

En 2016, l'Union européenne a investi 50 milliards d'euros dans la recherche européenne en I4 intelligent. Cette investissement a généré quelques résultats probants et même des plateformes en Italie, Autriche, Hongrie¹⁴. En Chine et en Corée, I4 a été introduit directement dans des usines¹⁵. L'article de L. Wang et G. Wang donne un bon aperçu sur l'I4 aux États-Unis [5].

Conclusion

Une collaboration plus étroite entre les centres de recherche et les industriels sur les défis posés par l'Industrie 4.0, renforcée par de l'IA bien ciblée serait bénéfique pour tous.

Nos laboratoires sont un gisement d'inspiration et d'idées, mais les défis industriels bien que parfois ardues peuvent constituer plusieurs sujets de thèses multidisciplinaires et communicants à l'instar de réseaux I4 (association de compétences, comme par exemple <https://www.openindustry4.com>).

12. <https://www.fraunhofer.de/en/research/fields-of-research/production-supply-of-services/industry-4-0.html>

13. <https://www.dtu.dk/english/research>

14. <https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/dem/monitor/tags/industry-40>

15. <https://www.innovationiseverywhere.com/industry-4-0-asia/>

L'IA en France est particulièrement riche, mais mal connue à l'international et pas suffisamment « industrialisée ». Son plus grand défi est la reconnaissance à l'international via les grands événements. Le rapport collaboratif de Cédric Villani n'est pas traduit en anglais.

Le défi pour l'informatique ne tient pas uniquement en la performance de machines, la compression et le stockage, mais en l' intelligence intégrée (*green software*, liens à la place de stockage de milliards de photos, d'enregistrements vidéo). En 1996, nous avons proposé le web indexé par des modèles de connaissances, mais on a préféré juste générer les données.

L'Internet du futur est à inventer. Enfin, *Green* et *smart software* pour diminuer l'impact environnemental de l'informatique sont fortement souhaités, ainsi que l'innovation en sécurité.

Références

- [1] Erik P. Eckholm. Losing ground : Environmental stress and world food prospects. *Environmental Conservation*, 3(2), 1976.
- [2] Henning Kagermann, Wolfgang Wahlster, and Johannes Helbig. *Recommendations for implementing the strategic initiative*. Industrie 4.0 : Final report of the Industrie 4.0 Working Group, 2013.
- [3] Mercier-Laurent Eunika Kayakutlu Gulgun. *Intelligence in Energy*. Elsevier, 2017.
- [4] Jay Lee, Behrad Bagheri, and Hung-An Kao. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3 :18 – 23, 2015.
- [5] Wang Lidong and Wang Guanghui. Big data in cyber-physical systems, digital manufacturing and industry 4.0. *International Journal of Engineering and Manufacturing*, 6(4) :1–8, 2016.
- [6] Eunika Mercier-Laurent. *Les écosystèmes de l'innovation*. Lavoisier, 2011.
- [7] Eunika Mercier-Laurent. *The Innovation Biosphere. Planet and Brains in Digital Era*. John Wiley & Sons, 05 2015.
- [8] Ryszard Michalski and George Tecuci. *Machine Learning*. Morgan Kaufmann, 1994.
- [9] Cristina Monsone, Eunika Mercier-Laurent, and Józsvai János. The Overview of Digital Twins in Industry 4.0 : Managing the Whole Ecosystem. In *11th International Conference on Knowledge Management and Information Systems*, pages 271–276, Vienna, Austria, September 2019. SCITEPRESS - Science and Technology Publications.
- [10] Wendy B. Rauch-Hindin. *Artificial Intelligence in Business, Science, and Industry. Vol. II : Applications*. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA, 1985.
- [11] Feng Zhang, Maud Rio, Romain Allais, Peggy Zwolinski, Tatiana Reyes Carrillo, Lionel Roucoules, Eunika Mercier-Laurent, and Nicolas Buclet. Toward an systemic navigation framework to integrate sustainable development into the company. *Journal of Cleaner Production*, 54 :199 – 214, 2013.