



المدرسة المغربية للهندسة
ECOLE MAROCAINE D'INGENIERIE



**LES ECOLES THEMATIQUES
DE L'ECOLE MAROCAINE D'INGENIERIE
THEMA 2022**

**TECHNOLOGIES DE L'INDUSTRIE
SMART 4.0
ET LEURS APPLICATIONS**

**23 – 24 Février 2022
Rabat – Maroc**

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|-----|
| Présentation..... | 2 |
| Industrie smart 4.0 | 5 |
| Cloud et edge computing | 57 |
| Modelisation numerique - optimisation de forme et prototypage rapide imprimerie 3D | 60 |
| Intelligence artificielle et machine learning | 77 |
| Blockchain pour les systèmes cyber-physiques :..... | 87 |
| Défis et applications | 87 |
| Future of Education: Education 4.0 / Smart Education | 101 |
| La Réalité Etendue un Nouveau Paradigme Technologique pour les Industriels | 113 |
| Big data et sciences des données et leurs applications dans les secteurs actifs | 120 |
| Harnessing The Digital Transformation For Resilient Sustainable Smart Cities | 129 |
| Les réseaux électriques intelligents pour une meilleure integration des énergies renouvelables | 136 |
| Le Digital Twin et la Simulation numérique | 147 |
| La maintenance intelligente au service de la performance | 156 |
| de l'entreprise | 156 |
| Supply chain 4.0 : la transformation digitale de la supply chain | 163 |
| Design d'un système cobotique centré sur le facteur humain | 171 |
| lean 4.0 | 179 |
| Smart economy économie des données : deux cas d'étude et quelques défis | 202 |



BOUAMI Driss

Ingénieur, Docteur d'Etat

Président du Directoire de l'Ecole Marocaine
d'Ingénierie
Rabat, Maroc

1/ PRÉSENTATION

L'EMG organise une école thématique, la première d'une lignée qu'on espère pérenne. Chaque année, une thématique scientifique ou technique ou managériale sera traitée sur deux journées et les interventions, faites par des experts reconnus nationaux et internationaux, seront rassemblées dans une revue de bonne facture. Cette année, en Février 2022, la thématique d'actualité choisie est «les technologies de l'industrie 4.0 et leurs applications» eu égard au développement incessant et effréné de ces technologies et de leur apport dans différents domaines socio-économiques en terme de performance technique et économique, de réactivité, de flexibilité et de robustesse.

Depuis une dizaine d'années, on voit fleurir partout des vocables tels que industrie 4.0 ou entreprise 4.0, usine intelligente (smart factory), digitalisation d'entreprise, transformation digitale ou encore de façon globale 4ème révolution. Toutes ces appellations concernent le même concept. Cette 4ème révolution est venue après la première qui a apporté la machine à vapeur (1690-1800), la deuxième vit l'avènement de l'électricité et des machines de production de masse (1800-1900), la troisième était portée par l'électronique, l'automatique, l'informatique et l'internet (1900-2010). La quatrième révolution tourne autour de l'interconnexion, la numérisation, le big data et son traitement notamment par le machine learning pour réaliser des opérations qui n'étaient pas envisageables avant.

Le concept fut mis en évidence pour la première fois lors la foire de Hanovre (Salon de la technologie industrielle) de 2011. En 2013, un rapport décrivant le schéma fut présenté par un groupe de travail transdisciplinaire à la foire de Hanovre. Néanmoins, il importe de préciser que les méthodes et techniques numériques qu'exploite cette révolution ne datent pas de 2011 voire 2013 mais proviennent d'une accumulation progressives depuis une quarantaine d'années.

La nouvelle révolution est fondée sur l'usine intelligente, qui se caractérise par une interconnexion des ressources matérielles et humaines mais aussi entre ces ressources et avec l'extérieur (clients, partenaires, autres sites de productions). Elle consiste, dans le domaine industriel, à rendre la chaîne de production plus intelligente et flexible en prévoyant l'interconnexion généralisée des machines, des hommes et des objets, la collecte automatique de données de masse et leur traitement ainsi que l'automatisation des actions qui en découlent.

Si cette évolution est maîtrisée, les entreprises peuvent développer grandement leur performance, leur flexibilité et leur réactivité. Elles pourraient prévoir mieux leurs besoins et d'anticiper les attentes et les fluctuations du marché (variation des besoins, augmentation ou baisse de la demande). De la conception à la livraison des produits, toute la chaîne de production pourrait être automatisée, connectée et intégrée.

L'Industrie 4.0 ou industrie du futur correspond à une nouvelle façon d'organiser et d'exploiter les 5 M contribuant à la réalisation de tous les processus d'une chaîne de valeur (men, material, machine, medium, methods); chaîne qui comporte l'identification des besoins client, la conception, la production, la livraison et l'exploitation du produit. Cette nouvelle industrie se présente comme la convergence des deux mondes: le virtuel et le réel pour réaliser des actions qui n'étaient pas possibles avant et ce, grâce à plusieurs méthodes et techniques relevant aussi bien du monde physique que numérique.

Dans le cadre de cette industrie nouvelle, on peut réaliser des produits uniques et personnalisés à la demande même en cas de faibles volumes de fabrication tout en maintenant voire augmentant le profit de l'entreprise. Les consommateurs peuvent communiquer avec les machines durant les phases de réalisation. Ce type de production s'appelle la «Smart Product».

Cette transformation numérique change les usages, les comportements, les activités, les modes de travail ainsi que le business model des entreprises. Elle modifie structurellement le monde industriel et induit une vraie révolution industrielle vers une industrie smart 4.0.

On s'accorde, désormais, à affirmer que les techniques soutenant la 4ème révolution sont principalement les suivantes:

- **Cyber Physical Systems et communication M2M**
- **Robots autonomes et collaboratifs (cobots)**
- **Internet des Objets et l'Internet industriel des objets (IoT et IIoT)**
- **Big Data, Data Mining et Data science**
- **Cloud Computing et edge computing**

- Intelligence artificielle, Machine Learning et deep learning
- Simulation numérique et jumeau numérique (digital twin)
- Fabrication additive ou impression 3D
- Intégration de système horizontale et verticale
- Réalité augmentée et interface H2M
- Code QR et RFID
- Cyber sécurité

1/ OBJECTIFS DE L'ECOLE THEMATIQUE

Cette école thématique pour objectif de définir les contours de l'industrie 4.0 et des technologies qui la sous-tendent, ses enjeux ainsi que les exigences auxquelles la transformation digitale doit souscrire et les conséquences qu'elle induit. Elle vise, aussi, à faire état des applications qu'elle a permis dans différents secteurs du monde socioéconomique (bâtiment, industrie, agriculture, finance etc) et différents domaines (lean management, supply chain, maintenance, sécurité, qualité etc) et aussi celles qui sont prévues compte tenu du développement économique, technique et social.

Cette école sera animée par des experts qui ont une forte connaissance de leur domaine et de l'application des technologies de l'industrie 4.0 dans ce domaine et qui ont, aussi, un recul par rapport à ces technologies pour faire des projections sur l'avenir objectives et réalisables.

PROGRAMME DE L'ECOLE

| | Horaire | Intervention | Intervenant |
|----------------------------|---------------|--|--|
| Journée du 23 Février 2022 | 08h30 à 08h45 | Mot d'ouverture | Prof. BOUAMI Driss (EMG) |
| | 08h45 à 09h30 | Transformation digitale: enjeux et implémentation | Prof. BOUAMI Driss (EMG) |
| | 09h30 à 10h15 | Cloud et edge computing | Prof. KHALIL Ismail (Linz University) |
| | 10h15 à 10h45 | Pause Café | |
| | 10h45 à 11h30 | Fabrication additive - impression 3D | Prof. BOUDI EL Mostapha (EMI) |
| | 11h30 à 12h15 | Intelligence artificielle et machine learning | Prof. SOUISSI Omar (INPT) |
| | 12h15 à 14h00 | Pause Déjeuner | |
| | 14h00 à 14h45 | Cyber Physical Systems et Communication M2M | Prof. MALEH Yassine (ENSA Houribga) |
| | 14h45 à 15h30 | Education 4.0 | Prof. ESSAAIDI Mohamed (ENSIAS) |
| | 15h30 à 16h00 | Pause Café | |
| | 16h00 à 16h45 | Réalité augmentée et virtuelle | Dr. BOURHIM El Mostafa (EMI) |
| | 16h45 à 17h30 | Science des données et big data et leurs applications dans les secteurs actifs | Prof. TKATEK Said (UIT) |

| | | | |
|-----------------------------------|---------------|--------------------------------------|---|
| Journée du 24 Février 2022 | 08h30 à 09h15 | Smart homes and cities | Prof. ESSAAIDI Mohamed (ENSIAS) |
| | 09h15 à 10h00 | Renewable energy and smart grid | Prof. ANIBA Ghassane (EMI) |
| | 10h00 à 10h30 | Pause Café | |
| | 10h30 à 11h15 | Simulation numérique et digital twin | Prof. MOUNIR Hamid (EMI) |
| | 11h15 à 12h00 | Maintenance 4.0 | Prof. MEDDAOUI Anwar (ENSAM – Casa blanca) |
| | 12h00 à 13h45 | Pause Déjeuner | |
| | 13h45 à 14h30 | Supply chain 4.0 | Prof. SOULHI Aziz (ENIM) |
| | 14h30 à 15h15 | Robots et cobots | Prof. CHERKAOUI Abdelghani (EMI) |
| | 15h15 à 15h45 | Pause Café | |
| | 15h45 à 16h30 | Lean Management 4.0 | Prof. BOUAMI Driss (EMG) |
| | 16h30 à 17h15 | Smart economy and digital business | Prof. OUHBI Brahim (ENSAM - Meknes) |
| | 17h15 à 17h30 | Mot de clôture | Prof. BOUAMI Driss (EMG) |



BOUAMI Driss

Ingénieur, Docteur d'Etat

Président du Directoire de l'Ecole Marocaine
d'Ingénierie
Rabat, Maroc

Transformation Digitale: Enjeux et Implémentation

L'intervention porte sur l'industrie 4.0, l'origine de sa dénomination, son historique, ses enjeux aussi bien techniques, économiques, sociaux, environnementaux etc. Elle traite aussi des différentes technologies exploitées dans cette industrie 4.0: Cyber Physical Systems, Robots autonomes et collaboratifs, Internet des Objets, Big Data, Data Mining et Data science, Cloud Computing, Intelligence artificielle et Machine Learning, Simulation numérique, Fabrication additive, Intégration de système, Réalité augmentée, Code QR et RFID et Cyber sécurité. l'intervention donne aussi une démarche de transformation digitale efficace.

INDUSTRIE SMART 4.0

Le monde industriel a connu trois grandes révolutions et une quatrième qui se développe actuellement (Figure 1):

- La première révolution industrielle (Grande-Bretagne, 1765): cette première révolution s'étale entre la fin du XVIIIe et le début du XIXe siècle. Elle remonte à l'exploitation du charbon et la mise au point de la machine à vapeur par James Watten 1769. Cela va transformer radicalement le mode de fabrication et de transport.
- La deuxième révolution industrielle (1870): Près d'un siècle plus tard, la deuxième révolution a lieu au milieu du XIXème siècle. Elle commence vers 1880 et repose sur des nouvelles sources d'énergie, le pétrole et l'électricité. C'est aussi l'époque du développement de la mécanisation, de la production de masse, de l'automobile, de la chimie, des machines-outils.
- La troisième révolution industrielle (1969): Près d'un siècle plus tard, dans la deuxième partie du XXe, la troisième révolution a lieu en 1950 qui remplace l'humain dans des tâches répétitives, dangereuses et qui symbolise l'effet ciseau des coûts entre les technologies et l'emploi humain. Elle vit l'apparition de l'électronique, l'automatique, de l'informatique et de l'internet
- La quatrième révolution industrielle ou l'Industrie 4.0 (a commencée en Allemagne, 2011): cette dernière révolution est appelée l'usine du futur. Elle se caractérise fondamentalement par une automatisation intelligente et par une intégration de nouvelles technologies à la chaîne de valeur de l'entreprise.

Il s'agit d'une transformation numérique qui bouleverse l'entreprise manufacturière et plus globalement le monde en apportant des changements radicaux non seulement aux systèmes et processus, mais également aux modes de gestion, aux modèles d'affaires, aux ressources humaines et même aux modes de vie.

Actuellement, l'industrie 4.0 est une réalité. Mais on perçoit, dès à présent, qu'elle s'inscrit dans une évolution qui va non seulement bouleverser notre façon de conduire l'activité économique, mais aussi notre façon de vivre ensemble au sein de la société.

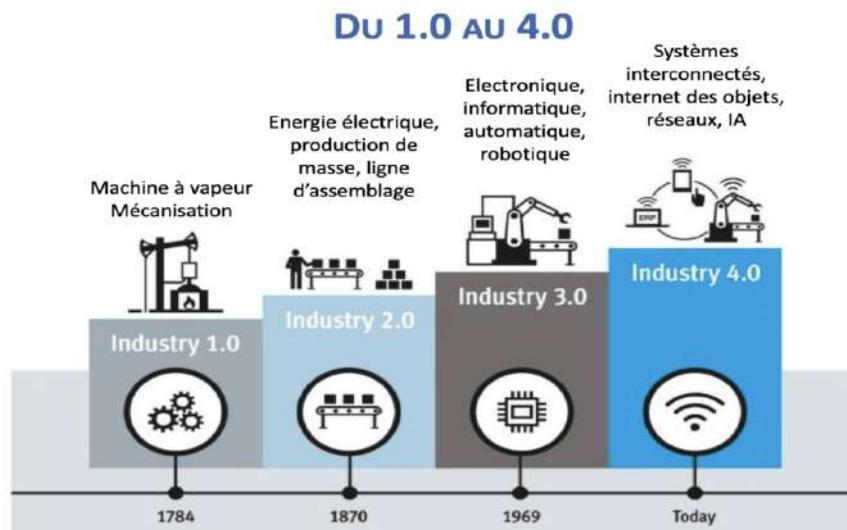


Figure 1: Les révolutions industrielles

1/ Définition

Le concept fut mis en évidence pour la première fois lors la foire de Hanovre en Allemagne (Salon de la technologie industrielle) de 2011. Un rapport fut présenté, en 2013, par un groupe de travail transdisciplinaire à cette foire qui décrit comment promouvoir et mettre en œuvre l'interconnexion, la numérisation totale des systèmes de production ainsi que la prise de décision factuelle et intelligente dans le but d'améliorer la compétitivité des entreprises allemandes. La quatrième révolution industrielle est un terme qui fut inventé par Klaus Schwab, fondateur et président exécutif du Forum économique mondial et qui décrit un monde où les individus passent des domaines numériques à la réalité et inversement en utilisant la technologie connectée pour organiser et gérer leur vie.

L'industrie 4.0, propose un nouveau modèle basé sur l'interconnexion de toutes les entités de l'entreprise, la collecte et le traitement intelligent des données pour réaliser une prise de décision factuelle rapide voire en temps réel. Cette révolution s'adosse à de nouvelles technologies telles que la robotique, le big data, l'intelligence artificielle, la simulation numérique, la fabrication additive, le cloud computing, la vision artificielle, les capteurs intelligents, les technologies cognitives etc.

Avec ce nouveau paradigme, il s'agit de mettre en œuvre des moyens intelligents, capables de s'autogérer, de se configurer et de prendre des décisions sur la base de leur connexion avec d'autres mécanismes à l'intérieur et à l'extérieur de l'industrie.

Plus concrètement, l'usine 4.0 est

- interconnectée
- intelligente et innovante
- totalement digitalisée
- automatisée et autonome
- flexible et agile
- orientée client
- responsable sur le plan sociétal
- respectueuse de l'environnement

La révolution industrielle de 4ème génération a conduit à l'usine intelligente consistant à mettre en place les éléments principaux suivants:

- Smart Production: La technologie qui permet l'interconnexion, la collaboration et l'autonomisation des 5M de la production: opérateurs, machines, outils, locaux, standards, gestionnaires etc.
- Smart Service: technologie qui permet d'intégrer les besoins et les interactions de l'entreprise avec les

fournisseurs, les clients et les autres interacteurs externes.

- Smart Energy: Créer des systèmes plus efficaces (consommation d'énergie sans gaspillage) et respectant l'environnement,

Cette révolution a été possible grâce aux évolutions suivantes:

- les capteurs plus petits, moins coûteux et plus intelligents
- les technologies de connexion et de communication plus performantes
- l'internet des objets permettant la transmission de données de tous types d'objets
- les moyens de stockage de données plus importants et moins coûteux
- les algorithmes de traitement et d'intelligence artificielle plus performants
- des moyens matériels de traitement plus rapides et plus puissants
- L'identification automatique pour la fabrication de produits personnalisés crée une identification unique et des liens vers le monde virtuel;
- Les dispositifs de terrain intelligents utilisant un logiciel permettant la distribution dynamique globale de la fonctionnalité font partie intégrante de l'intégration du système;
- Gestion des appareils mobiles (MDM): interfaces homme-machine pour un fonctionnement intuitif de systèmes complexes sans formation particulière.

L'industrie 4.0 a été rendue techniquement et économiquement viable par le fait que les nouvelles technologies sont devenues abondantes et abordables. En même temps, la capacité à recueillir, à distribuer, à relayer et à analyser l'information s'est considérablement améliorée. Elle donne lieu à une prise de décisions éclairée par des données en temps réel et par l'analyse prédictive de plus en plus précise et fiable, ce qui permet d'ajouter de la valeur commerciale.

La baisse importante des coûts des capteurs, de la bande passante et du traitement au cours des 10 dernières années en témoigne:

- Le prix des capteurs a chuté pour atteindre 0,60 \$ en moyenne.
- Le coût de la bande passante est près de 40 fois moindre.
- Les coûts de traitement sont près de 60 fois moins élevés.

Industrie 4.0: Evolution ou révolution:

Bien que chaque révolution industrielle soit souvent considérée comme un événement indépendant, on peut mieux comprendre qu'il s'agit d'une série d'événements s'appuyant sur les innovations de la révolution précédente et menant à des formes de production plus perfectionnées. L'industrie 4.0 est une évolution car toutes les technologies qu'elle exploite ont été découvertes bien avant 2011 (Tableau 1), année de l'apparition de ce terme, et depuis plus de trente ans pour certaines d'entre elles. Elles ont subi au fil des ans des améliorations progressives. Il n'y a pas eu de rupture comme ce fut le cas pour le disque laser, la clé USB, le smartphone, le téléviseur smart qui ont été mis sur le marché et qui ont bouleversé le marché. L'industrie 4.0 peut être considérée aussi comme une révolution car des changements importants et brutaux vont affecter notre vie et notre façon de travailler tels que les robots et véhicules autonomes, la réalité augmentée, la prévision au moyen d'algorithmes avancés, les capteurs intelligents, la fabrication additive, le cloud etc.

| Technologie | Année de création | Technologie | Année de création |
|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| Big data | 60-70 | Smartphone | 2007 |
| Internet | Années 60 | Adresse IP | 2008 |
| IoT | 1999 | Cloud | 1991 |
| Objet connecté | 2003 | Fabrication additive | 1984 |
| Réalité augmentée | 1968 | IA | 1950 |
| CPS | 2006 | Machine learning | 1959 |
| Simulation numérique | 1953 | Deep blue | 1997 |
| Objet connecté | 2003 | RFID | 1983 |

Tableau 1: Technologies de l'industrie 4.0 et année de leur création

Enjeux de l'industrie 4.0:

Enjeux économiques:

Les technologies de l'I4.0 permettent de mieux satisfaire le client en termes de qualité, temps, coût, sécurité et environnement. Elle permettent ainsi aux entreprises qui les ont adoptées d'être plus compétitives, de fidéliser leurs clients et d'en acquérir d'autres. Elles leur permettent d'être plus florissante économiquement. Cela est obtenu en assurant de meilleures performances en définition des besoins du client, en conception du produit, en fabrication en logistique interne et externe, en maintenance, en sécurité, en protection de l'environnement, en SAV et en fin de vie.

Des études concordantes menées par différents organismes (notamment McKinsey et Boston Consulting Group) montrent les gains importants apportés par l'industrie 4.0 dont on peut citer les suivants (Tableau 2):

| Elément | Tendance | Fourchette |
|-------------------------------------|-----------------|-------------------|
| Coût de maintenance | réduction | à 40% 10 |
| Temps d'arrêt non planifié | réduction | à 50% 30 |
| Investissement dans les équipements | réduction | Jusqu'à 5% |
| Cycle de vie des équipements | augmentation | Jusqu'à 5% |
| Coût des accidents et incidents | réduction | à 28% 10 |
| Time to market | réduction | à 50% 20 |
| Coût de fabrication | réduction | à 20% 10 |
| Coût de logistique | réduction | à 20% 10 |
| Coût d'obtention de la qualité | réduction | à 20% 10 |
| Coût de main-d'œuvre | réduction | à 25% 10 |
| Coût de l'énergie | réduction | à 30% 10 |
| Consommation d'eau | réduction | Jusqu'à 40% |
| Coût de stocks | réduction | à 50% 20 |
| Productivité | augmentation | à 25% 5 |
| Rendement global | augmentation | à 15% 5 |
| Efficacité des ressources | augmentation | Jusqu'à 18% |
| Précision des prévisions | augmentation | Jusqu'à 85% |

Tableau 2: Gains drainés par l'industrie 4.0

Enjeux sociaux:

La destruction d'emploi est probablement ce qui inquiète dans la mise en place de l'industrie 4.0. La numérisation et l'automatisation des processus, les robots et l'IA sont perçus comme des substituts aux humains. Beaucoup de métiers vont disparaître mais beaucoup d'autres vont apparaître.

Il y aura besoin de compétences technologiques en IoT, en réseaux, en cybersécurité, en robotique, et globalement dans la manipulation des outils du numériques ainsi qu'en ingénierie des systèmes électroniques et informatiques. Il y aura aussi besoin de compétences non-technologiques : par exemple, la gestion du savoir, la gestion de l'information, la gestion des réseaux sociaux. Les soft skills seront davantage valorisés, comme par exemple l'autonomie, la responsabilité, la capacité à collaborer efficacement, la gestion de projet, la prise d'initiative ou de décision, et la créativité.

Les futurs nouveaux métiers répondront aux besoins de l'industrie 4.0. Par exemple, il y aura de nombreux métiers, déjà plus ou moins répandus, liés au domaine de la data : data scientist, data architect, data engineer, data analyst, responsable des données numériques... Il y aura également besoin d'experts en fabrication additive, en simulation numérique ou en mécatronique. Il faudra aussi des ingénieurs en cybersécurité, des statisticiens en maintenance prédictive, ou encore des responsables en CRM. Pour la gestion de la supply chain, il faudra des responsables, des conducteurs de ligne, des opérateurs de commandes numériques, des opérateurs et des techniciens de maintenance. Enfin, les métiers du management seront aussi transformés avec le digital qui va investir tous les processus de l'entreprise

L'accès à la formation continue sera crucial pour accompagner les travailleurs dans la transformation numérique de l'industrie : d'abord pour acquérir une culture numérique, ensuite pour évoluer en même temps que les technologies.

L'industrie 4.0 apporte aussi de grands changements bénéfiques pour la vie et le travail de l'homme à travers des applications telles que les smart cities, les smart homes, l'ergonomie etc.

Enjeux environnementaux:

Il est indéniable que la production industrielle entraîne des dégradations environnementales telles que exagération des ressources non renouvelables (fossiles) comme le pétrole ou le charbon. Les économies d'énergie et la réduction d'émission s'imposent comme des solutions efficaces pour éviter ces dégradations.

L'industrie 4.0 peut contribuer dans les efforts mondiaux de réduction des émissions de carbone notamment en développant l'efficacité énergétique, un paradigme qui encourage les entreprises à faire plus avec moins d'énergie.

Les données recueillies par des capteurs, interprétées par des outils d'analyse et intégrées dans des modèles prédictifs. Elles peuvent permettre de réaliser des économies d'énergie en détectant les processus inefficaces, en optimisant la production et la logistique et en anticipant les besoins de maintenance. Elles permettent également d'adapter la demande au prix et à la disponibilité de l'énergie, d'affiner la gestion de la température et même de réduire les coûts de recherche et développement en donnant la possibilité de tester et de modéliser virtuellement les machines, les processus et les usines grâce à des jumeaux numériques.

Les données sont également cruciales pour faire évoluer le mix énergétique vers des sources renouvelables selon les périodes de consommation ce que font les smart grids qui en électricité est un dispositif de réseaux d'électricité, basé sur des technologies informatiques qui, en collectant et en analysant des informations sur l'état d'un réseau électrique, contribue à ajuster les flux d'électricité entre producteurs, distributeurs et consommateurs pour assurer une consommation et un coût moindre.

Les technologies de l'I4.0 contribuent aussi à optimiser la logistique très polluantes par le choix des modes de transport, de leurs trajets, de leur nombre, de leur charge, de leur état etc. Elles optimisent aussi la consommation d'eau pour l'irrigation en déterminant pour chaque type de plantation la quantité d'eau requise et les moments propices pour l'injecter.

Technologies de l'industrie 4.0:

Une usine 4.0 est caractérisée par l'utilisation de plusieurs technologies liées à l'automatisation et la robotisation, le recueil de mégadonnées, le traitement de celles-ci par le biais notamment des algorithmes de l'intelligence artificielle pour en tirer des applications pertinentes et des aides à la décision. Ces technologies sont principalement les suivantes:

- Capteurs
- QR code
- RFID
- Cyber physical systems
- Internet des objets IoT
- Big data
- Cloud computing et edge computing
- Data science et data mining
- Intelligence artificielle et machine learning
- Simulation numérique et jumeau numérique
- Réalité augmentée
- Fabrication additive
- Robots collaboratifs
- Intégration horizontale et verticale
- Cybersécurité

Les capteurs classiques et intelligents:

Les capteurs classiques:

Un capteur est un dispositif transformant l'état d'une grandeur physique observée en une information utilisable, telle qu'une tension électrique, une hauteur de mercure, une intensité ou la déviation d'une aiguille. Il importe de différencier

le capteur du transducteur qui en est une composante. Le rôle de ce dernier est de traduire un phénomène physique en signal électrique (exemple traducteur piézoélectrique). Il convient de noter aussi que le capteur se distingue de l'instrument de mesure par le fait qu'il ne constitue qu'une simple interface entre un processus physique et une information manipulable tandis que l'instrument de mesure est un appareil autonome qui dispose d'un affichage et d'un système de stockage des données.

Les capteurs sont à la base de l'Industrie 4.0. Les robots, les machines, les hommes et les locaux peuvent produire de très nombreuses données grâce à des capteurs judicieusement choisis et mis en place. Ces données peuvent concerner la température, le temps, la pression, le débit, la vibration, les gaz et de nombreuses autres variables importantes de processus de production ou d'environnement. Elles sont transmises, stockées et traitées pour aider à la décision pertinente et factuelle.

On distingue pour ces capteurs deux types de détections:

- Détection avec contact (le capteur entre en contact physique avec un phénomène pour le détecter).
- Détection sans contact (le capteur détecte le phénomène à proximité de celui-ci).

Les capteurs peuvent être de température, de vibration, de pression, de débit, de vitesse, de distance, de mouvement, de tension, de courant, rayonnement, gaz, niveau etc.

Capteurs intelligents:

un capteur est un dispositif permettant de transformer une grandeur physique observée en une grandeur physique utilisable. Il sert à collecter toutes sortes d'informations terrain : tensions électriques, vibrations, températures, pressions, sons, consommation de lubrifiants ou d'électricité, etc. Le capteur traditionnel ne fait que collecter l'information qui est ensuite interprétée par un humain. Le capteur dit « intelligent » intègre des éléments de traitement numérique de la donnée qui lui confère des capacités d'interprétation autonomes.

Les capteurs intelligents se composent de trois éléments : un ou plusieurs capteurs « classiques », un microprocesseur et une interface de communication. Ils sont, par exemple, capables d'identifier des signaux faibles annonçant un problème technique, de réaliser des auto-diagnostics ou encore d'engager des actions en fonction de règles prédéfinies.

Les capteurs intelligents intègrent des fonctions telles que:

- des fonctions configurables de traitement du signal (filtre, gains, etc.) ;
- des fonctions d'auto-test et d'auto-contrôle ;
- l'étalonnage automatique;

Les capteurs intelligents gagnent également en polyvalence. Par exemple, des capteurs intelligents peuvent servir au contrôle de conformité, mais aussi aux mesures sans contact, à l'identification et au tri, ou encore à la lecture et la vérification de marquages. En outre, il peut être configuré à distance, grâce à ses capacités de communications bidirectionnelles.

La grande avancée qui a conduit indéniablement à la révolution 4.0 est le développement de capteurs pour toutes applications, plus sensibles, plus précis, petits voire miniature, moins coûteux et intelligents.

Capteurs de vision:

Les capteurs de vision sont des systèmes capables de reconnaître des objets ou d'identifier les images capturées et prendre des décisions qui sont utilisés dans un système intelligent et automatisé.

Un capteur de vision est un système de détection de vision autonome avec capteur d'image et éclairage intégré dans un boîtier très compact (Figure 2).



Figure 2: Capteurs intelligents de contrôle qualité

La vision industrielle, appelée «Machine Vision» par les Anglo-Saxons, est une discipline de la vision artificielle qui utilise des moyens électroniques et informatiques pour doter des machines et robots de capacités sensorielles analogues à la vision humaine. Elle emploie le traitement numérique d'images pour automatiser des tâches. Pour cela, elle utilise des caméras comme capteurs pour détecter des défauts sur des objets manufacturés, inspecter des pièces en cours de fabrication, les compter, les trier, les classer, les mesurer, ... à partir de leur apparence visuelle. Inspecter un produit au sens de la vision industrielle consiste à déterminer s'il répond à un certain nombre de spécifications. Cela revient souvent à vérifier si un assemblage a été correctement réalisé, si les dimensions d'un produit sont respectées ou si son aspect extérieur est satisfaisant ou encore s'il est conforme par rapport à un modèle de référence. On distingue deux types d'inspections: implicite et explicite.

- implicite lorsque les défauts à détecter sont connus à l'avance. Par exemple, la présence d'un bouchon sur une bouteille ou d'une étiquette sur un emballage, l'intégrité d'un afficheur à cristaux liquides, sont des éléments qui peuvent être identifiés par référence à un modèle.
- explicite quand les défauts recherchés sont mal définis ou sont même imprévisibles comme l'aspect visuel d'un état de surface, une déchirure, une fissure ou une tâche qui sont difficilement prévisibles. L'automatisation d'une inspection explicite est souvent difficile et demande beaucoup de recherche notamment en matière d'algorithmes de reconnaissance.
- **QR code:** Le code QR (en anglais QR Code) est un type de codes à barres à deux dimensions (ou code matriciel) constitué de modules noirs disposés dans un carré à fond blanc. L'agencement de ces modules définit l'information que contient le code. En outre, il convient de préciser que QR (abréviation de l'anglais Quick Response) signifie que le contenu du code peut être décodé rapidement après avoir été lu par un lecteur de codes à barres approprié: un téléphone mobile, un smartphone, ou encore une webcam. Son avantage est de pouvoir stocker plus d'informations qu'un code à barres normal linéaire, mono ou bicouche, et surtout des données directement reconnues par différentes applications. Le code QR a été créé par l'entreprise japonaise Denso Wave en 1994 pour suivre le cheminement des pièces détachées dans les usines de Toyota.

Les codes QR peuvent contenir des adresses web, du texte, des numéros de téléphone, des mots de passe Wi-Fi, des SMS ou autres types de données comme le format VCard (permettant l'ajout rapide d'un contact), lisibles par les smartphones et les téléphones mobiles équipés d'une application de lecture (lecteur de code QR ou QR Reader en anglais) pouvant être téléchargée gratuitement sur plusieurs pages web. En outre, plusieurs sites web permettent de générer librement les codes QR (Figure 3 et tableau 3).



Figure 3: QR code

| Types de code | Explications | Exemples | Barres |
|--|--|--|---|
| Les codes barres unidimensionnels ou linéaires | Ainsi nommés car ils sont lus de façon linéaire | EAN8, EAN13/UPC, EAN14, EAN128 Codabar Monarch Code 11 Code 39 Code 93 ITF ou Interleaved 2 of 5 CIP Pharmacode France Laetus Pharmacode |  |
| Les codes barres linéaires empilés | Ainsi nommés car ils sont constitués de plusieurs codes-barres linéaires empilés les uns sur les autres. Ils sont lus verticalement avec un lecteur à balayage automatique (type CCD, Laser ou caméra) | <ul style="list-style-type: none"> - PDF 417 - Code 16K - Code 49 - Le Postnet |  |
| Les codes barres à deux dimensions | Ainsi nommés car ils sont codés et lus horizontalement et verticalement. Ils permettent donc de coder un plus grand nombre de données sur une même surface | <ul style="list-style-type: none"> - QR code - Code One - Datamatrix - Maxicode - Code Aztec |  |

Tableau 3: Types de codes à barres

Radio Frequency Identification (RFID):

RFID veut dire Radio Frequency Identification, ou plus simplement radio-identification en français. Cette technologie permet de lire, sauvegarder, collecter des données à distance et les stocker sur des radio-étiquettes, appelées aussi tags RFID. Celles-ci transmettent les données via leur antenne à un lecteur émettant à une certaine fréquence.

La radio-identification fut d'abord utilisée dans les années 1930 mais c'est seulement depuis 2005 qu'elle est employée largement dans le monde entier pour de nombreuses utilisations quotidiennes.

Les radio-étiquettes ou tags RFID, pouvant être réinscriptibles ou non, sont composées d'une antenne, d'une fine puce en silicium et d'une encapsulation (Figure 4). Certaines sont dites passives lorsqu'elles comptent sur l'énergie du lecteur RFID pour fonctionner. D'autres sont dites actives. Elles sont équipées d'une batterie qui leur permet de transmettre des informations à un lecteur situé à distance. Les radio-étiquettes intelligentes, quant à elles, autorisent à crypter les informations qu'elles contiennent. Les lecteurs RFID émettent des radiofréquences destinées à activer les puces RFID se trouvant dans les environs, de quelques centimètres à plusieurs centaines de mètres pour les plus performants, et permettant ainsi d'échanger des informations avec elles. Les fréquences les plus élevées sont utilisées pour échanger plus d'informations à un débit plus important. Les fréquences les moins élevées aident à mieux pénétrer dans la matière.

La radio-identification fonctionne simplement: un lecteur lit à distance un tag RFID contenant des données en émettant une fréquence radio.

• Le lecteur RFID

Un lecteur RFID peut alimenter les tags passifs, lire et écrire des données sur les tags, convertir les informations reçues et les transmettre à un terminal en émettant des radio-fréquences via une antenne. La fréquence varie selon l'utilisation faite. Les basses fréquences ont un taux de transfert lent et une portée courte, mais une capacité de lecture élevée, quel que soit l'environnement. Plus la fréquence est haute, plus le taux de transfert est rapide et la portée longue, plus la capacité de lecture se révèle difficile. Les basses fréquences sont par exemple utilisées pour le suivi d'animaux et d'objets et les plus hautes fréquences pour les télépéages.

Il existe plusieurs types de lecteurs selon l'utilisation. Ils peuvent, fixes ou portatifs. Ils peuvent être de différentes tailles.

- Les tags RFID:

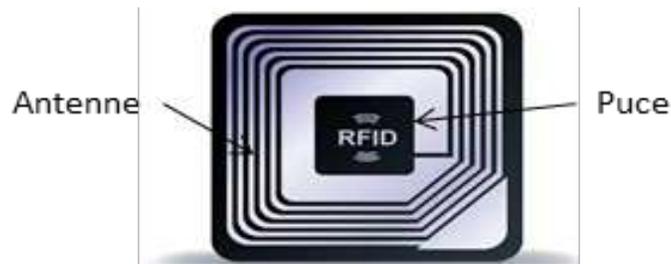


Figure 4: Constitution de TAG RFID

Les tags RFID peuvent être: passifs, actifs ou semi actifs.

- **passifs**

Les radio-étiquettes passives sont alimentées par le lecteur RFID au moment de l'utilisation grâce à un transfert d'énergie par électromagnétisme. Elles ont l'avantage d'être discrètes et fines. Leur fabrication est facile et peu coûteuse. Les tags RFID passifs sont les plus couramment utilisés.

- **actifs**

Les radio-étiquettes actives peuvent émettre un signal sur de longues distances et stocker plus de données grâce à une batterie incorporée. Elles ont un coût de fabrication élevé et une durée de vie moins grande que les radio-étiquettes passives. Leur utilisation est plus spécifique et moins répandue.

- **semi-actifs**

Il existe des radio-étiquettes semi-actives. Elles ont un fonctionnement similaire aux tags passifs, mais possèdent une petite batterie utilisée pour enregistrer des données.

Equipements du Système RFID:

Pour équiper son entreprise avec un système de traçabilité RFID, celle-ci doit donc mettre en place un équipement de base spécifique composé des éléments suivants (Figure 5):

- un support RFID : étiquette, carte RFID ou badge RFID composé d'une puce + d'une antenne RFID,
- un lecteur : avec antenne intégrée ou externe,
- une infrastructure informatique qui sert à collecter et à exploiter les données,
- une imprimante RFID.

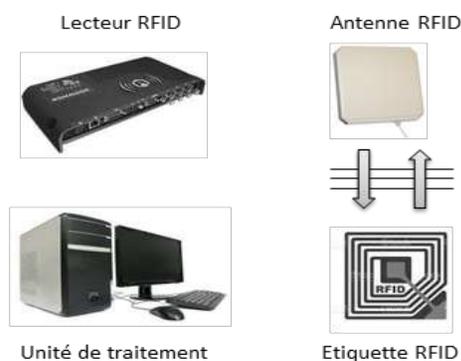


Figure 5: Equipements du système RFID

Pratique, discrète et facile à mettre en place, la technologie RFID est aujourd'hui répandue dans le monde entier. Elle sert essentiellement à tracer et identifier des objets ou des personnes. On la retrouve notamment dans: les télépéages; l'accès aux transports publics; le paiement sans contact; l'identification et la traçabilité d'objets (inventaire d'articles en magasin ou suivi logistique par exemple); les contrôles d'accès; les passeports biométriques; les antivol; la gestion des déchets ménagers; le marquage d'êtres vivants (plantes, animaux d'élevages, êtres humains) etc

Les cyber physical systems:

La première définition que l'on peut trouver de systèmes cyberphysiques (CPS) date de 2006, lors de travaux avec la National Science Foundation (NSF) américaine

Une génération de précurseurs des systèmes cyber-physiques est celle des systèmes embarqués particulièrement utilisés dans le transport aérien et ferroviaire. Dans ces ces systèmes embarqués, est plutôt mis sur les éléments informatiques et moins sur les liens entre les éléments informatiques et les éléments physiques.

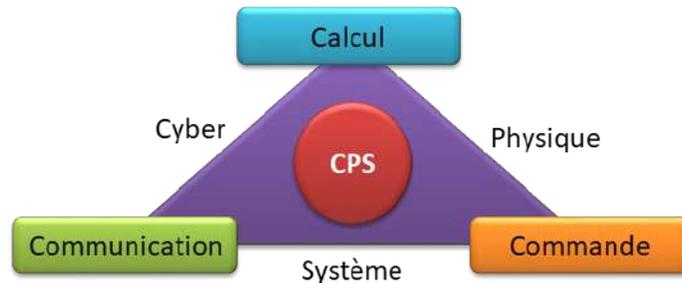


Figure 6: Composantes d'un système CPS.

À la différence des systèmes embarqués traditionnels, un système cyber-physique est généralement conçu comme un réseau d'éléments informatiques en interaction avec des entrées et des sorties physiques au lieu de dispositifs autonomes en interaction.

Les CPS intègrent des processus physiques et informatiques. Des ordinateurs et réseaux embarqués surveillent et contrôlent les processus physiques, généralement avec des boucles de rétroaction où les processus physiques affectent les calculs et vice versa (Figure 6). En d'autres mots, les CPS utilisent des calculs et de la communication profondément intégrée et interagissant avec les processus physiques afin de produire de nouvelles capacités du système. Un CPS peut être considéré aussi bien à une petite échelle (exemple: pace maker) qu'à de grandes échelles (exemple: un réseau national de distribution d'énergie)

Les CPS sont donc des systèmes formés d'entités collaboratives, dotées de capacité de calcul, qui sont 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

Dans un système cyber-physique, il existe trois manières principales de collecter des données : homme à machine, machine à machine, et acquisition et traitement de données.

- **De l'homme à la machine:** Le CPS peut collecter des informations via la saisie de données par l'opérateur avec des méthodes telles que la saisie sur un ordinateur ou la sélection d'options sur une tablette. Les opérateurs peuvent également partager des informations grâce à une technologie de pointe comme, par exemple, la vision par ordinateur qui peut collecter des données à partir de gestes ou de mouvements spécifiques qui ont une signification.
- **de Machine à Machine (M2M machine to machine):** La communication de machine à machine signifiait historiquement une machine poussant des données dans une autre machine. Ces machines étaient généralement connectées via une connexion Ethernet. L'IoT transforme la communication de machine à machine en la rendant opérationnelle dans les deux sens.
- **Acquisition et traitement de données:** Les entreprises utilisent un logiciel de planification des ressources d'entreprise (ERP) pour gérer les achats, la planification financière, les employés et d'autres aspects de leur entreprise. Ils utilisent le MES ou des systèmes d'exécution de fabrication pour suivre et tracer les matériaux, les ressources, etc. Ces systèmes contiennent souvent des données critiques pour la production, mais ils sont massifs, cloisonnés et souvent difficiles d'accès ou de manœuvre. Le CPS peut transmettre des données à ces systèmes et à d'autres, ou extraire des données critiques de production de ces systèmes. En fin de compte, ces données peuvent se combiner pour offrir une vision holistique et interconnectée de la production.

L'Internet des Objets (IoT):

En 1999, le britannique Kevin Ashton, cofondateur de l'Auto-ID Laboratory au MIT, a inventé le terme « Internet of Things » pour décrire un système où Internet est connecté au monde physique via des capteurs omniprésents dont les codes à barres et le RFID (identification par radiofréquence).

L'Internet des objets, ou IoT (Internet of Things), consiste en ce que les objets, les animaux et les personnes se voient attribuer des identifiants uniques ainsi que la capacité de transférer des données sur un réseau internet sans nécessiter aucune interaction humain-à-humain ou humain-à-machine.

L'IoT est issu de la convergence des technologies sans fil, des systèmes micro-électromécaniques (MEMS) et d'Internet.

Dans l'Internet des objets, un « objet » peut être une personne équipée d'un pacemaker, un animal portant une puce (transpondeur), une voiture embarquant des capteurs pour alerter le conducteur lorsque la pression des pneumatiques est trop faible ou encore tout objet naturel ou fabriqué par l'être humain auquel peuvent être attribuées une adresse IP et la capacité de transférer des données.

La forte hausse de l'espace d'adressage qu'autorise le protocole IPv6 constitue un facteur important du développement de l'Internet des objets. L'être humain peut facilement affecter une adresse IP à chaque « objet » sur Terre.

Les machines de l'usine sont équipées de capteurs dotés d'une adresse IP qui leur permet de se connecter à d'autres appareils compatibles avec le web. Cette mécanisation et cette connectivité permettent de collecter, d'analyser et d'échanger de grandes quantités de données de valeur.

L'Internet of Things industriel (Industrial IoT - IIoT) désigne l'application de la technologie IoT dans un cadre industriel, en particulier en ce qui concerne l'instrumentation et le contrôle des capteurs et des terminaux qui font appel à des technologies Cloud et qui sont exploités dans l'usine. Depuis peu, les industries utilisent la communication de machine à machine (M2M) pour bénéficier des fonctionnalités d'automatisation et de contrôle sans fil. L'IIoT est couramment utilisé dans les activités suivantes :

- Production intelligente
- Actifs connectés et maintenance préventive et prédictive
- Réseaux électriques intelligents
- Villes intelligentes
- Logistique connectée
- Supply chains digitales intelligentes

L'IIoT (Industrial Internet of Things) est une sous-catégorie de l'Internet des objets (IoT) qui fait bénéficier les industriels d'une meilleure efficacité opérationnelle en permettant aux machines de s'auto-surveiller et de prévoir la survenue de problèmes.

Pour l'industrie, la maintenance prédictive est ainsi la principale application de ces technologies car elle permet de réduire les temps d'arrêt, par :

- le recueil de données par les capteurs
- la transmission de ces données
- la centralisation dans une base de données
- l'analyse de scénarios de panne, grâce au Machine Learning

Les produits qui intègrent des capacités de communication M2M et de traitement de données, à divers degrés, sont souvent désignés par le terme intelligent ou smart. On parle, par exemple, d'étiquette intelligente, de compteur intelligent, de capteur intelligent etc. Avec l'IoT, les objets les plus communs de notre quotidien seront dotés d'électronique et de communication; les objets connectés seront des objets intelligents.

L'aspect de l'IoT dans la nouvelle révolution industrielle est l'utilisation de ces objets connectés dans les processus de fabrication. Cela veut dire que les capteurs intelligents et les outils intelligents en général seront disponibles dans l'usine. Ces technologies aideront à collecter plus de données sur le processus de fabrication afin de vérifier la conformité et d'optimiser la production en temps réel. Dans l'IoT chaque objet sera doté d'un capteur dédié qui a pour rôle la mesure des valeurs pour lesquelles il a été programmé et les envoie, à intervalles réguliers, à une base de données où ils sont analysés.

Le problème posé est l'explosion des données, plusieurs milliards d'envois, est aujourd'hui freinée par deux obstacles majeurs : le coût et la disponibilité d'adresses IP.

En effet, au 25 novembre 2019, le RIPE NCC a annoncé la pénurie d'IPv4. Internet ne cessera pas de fonctionner, mais il cessera de grandir. La transition vers IPv6 est une nécessité vitale.

Une adresse IPv4 est une adresse IP dans la version 4 du protocole IP (IPv4). Cette adresse permet d'identifier chaque machine connectée sur un réseau informatique utilisant le protocole IP version 4.

Cette adresse est composée de quatre octets, chacun ayant leur valeur décimale comprise entre 0 et 255, séparés par des points ; exemple : 212.85.150.133.

- L'IPv4 a été créé en 1981. L'adresse IPv4 compte 4 octets, au format décimal, séparés par un point. Cela donne une adresse d'une taille de 32 bits, correspondant à 4,3 milliards d'adresses IP uniques.
- L'IPv6 a quant à elle été créée en 1990. Elle compte 16 octets, au format hexadécimal, qui sont séparés par deux points. Cela donne donc une taille d'adresse de 128 bits, correspondant à 340 sextillions (10^{36}) d'adresses uniques (tableau 4).

| Protocole IPv4 | Protocole IPv6 |
|---|--|
| Déployé en 1981 | Déployé en 1998 |
| Adresse IP 32 bit | Adresse IP 128 bit |
| adresses 10^9 4,3 | x 10^{36} adresses 340 |
| Notation numérique point décimale Ex: 192.168.5.18 | Notation alphanumérique hexadécimale Ex: 50d2:6400:0000:0000:6c3a:b17d:0:10a9 |
| DHCP ou configuration manuelle | Autoconfiguration supportée |

Tableau 4: Protocoles IPv4 et IPv6

Système IoT:

- Un système IoT est composé des éléments suivants (Figure 7) :
- d'un réseau d'objets connectés ;
- de passerelles et réseaux de communication sans fil (Wifi et Bluetooth notamment) ;
- de protocoles réseau (Sigfox et LoRa) ;
- d'API et de plateformes pour collecter et traiter les données ;
- d'hébergeur ou de fournisseurs de cloud computing pour stocker les informations ;
- de logiciels et applications pour visualiser, trier et afficher plus facilement les données ;
- d'une informatique en périphérie (Edge Computing) pour déplacer si nécessaire le traitement et l'analyse de données près de l'utilisateur final afin de réduire toute latence.

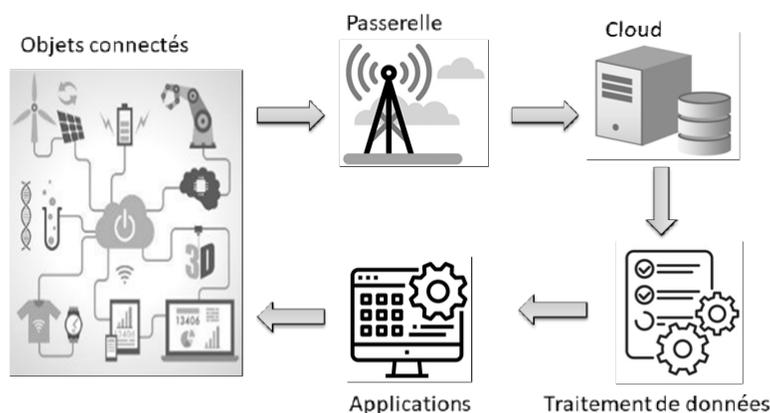


Figure 7: Système IoT

Statistiques générales de l'Internet des objets:

1. Les ménages ont dix appareils connectés en moyenne et passeront à 50 en 2021 (*Temps économique*)
2. Les dépenses mondiales liées à l'IoT ont dépassé 1 billion de dollars rien qu'en 2020 (*Sdx centrale*)
3. Les dépenses consacrées aux solutions IoT Endpoint Security atteindront 631 millions de dollars en 2021 (*Gartner*)
4. Chaque seconde, 127 appareils se connectent à Internet pour la première fois. (*McKinsey numérique*)
5. Le chiffre d'affaires pour 2020 devrait être de 212 milliards de dollars dans le monde. (*Business Insider*)
6. Le matériel représente actuellement environ 35% de la valeur du marché. (*motomarine*)
7. Les entreprises pourraient investir jusqu'à 15 billions de dollars dans l'IdO d'ici 2025 (*Gigabit*)
8. La réduction des coûts est la principale raison de l'investissement dans l'IdO. (*Analyse IoT*)
9. Près de 70% de tous les nouveaux véhicules dans le monde seront connectés à Internet d'ici 2023 (*IDC*)
10. Les appareils IoT généreront 79.4 zettaoctets de données d'ici 2025 (*IDC*)

Big data:

Big data signifie mégadonnées, grosses données ou encore données massives. Ils désignent un ensemble très volumineux de données qu'aucun outil classique de gestion de base de données ou de gestion de l'information ne peut traiter. En effet, on produit environ 2,5 trillions (10^{12}) d'octets de données tous les jours. Ce sont les informations provenant de différentes sources: messages, vidéos, informations climatiques, signaux GPS, enregistrements transactionnels d'achats en ligne, mesures de capteurs montés sur des machines et bien d'autres encore.

En 2010, le monde ne comptait que deux zettaoctets (zettaoctet (Zo)= 10^{21} octets) de données numériques. En 2015, ce chiffre avait été multiplié par six. Selon IDC, dont les données sont mises en forme par Statista, le volume mondial de données sera multiplié par 3,5 tous les cinq ans jusqu'en 2035, pour atteindre la somme vertigineuse de 2 142 zettaoctets. En d'autres termes, les solutions de stockage du big data, la puissance des serveurs et la bande passante sont appelées à progresser à grande vitesse pour absorber les flux croissants de données.

En 2018, on a estimé que 90 % des données disponibles dans le monde ont été créées dans les deux dernières années. En 2021, le nombre de personnes utilisant internet atteignit 4,9 milliards.

Inventé par les géants du web facebook, youtube, instagram etc, le Big Data est une solution permettant d'accéder en temps réel à des bases de données géantes. Ce concept regroupe une famille d'outils dite règle des 3V:

- volume considérable de données à traiter, une grande
- variété large d'informations (venant de diverses sources, non-structurées, organisées, Open...),
- vitesse à atteindre, autrement dit de fréquence de création, collecte et partage de ces données.

La croissance du Big Data a été possible grâce à deux grandes familles de technologies:

- les technologies de stockage qui ont bénéficié du cloud ou infonuagique;
- les technologies de traitement ajustées, spécialement le développement de nouvelles bases de données adaptées aux données non-structurées (Hadoop) et la mise au point de modes de calcul à haute performance (MapReduce).

Au niveau industriel, cette croissance est due aussi aux capteurs sont devenus plus sensibles, plus précis, plus petits et peu coûteux et cela a contribué à leur très large utilisation.

- Grâce au Big Data on peut:
- suivre les produits depuis leurs créations jusqu'à la fin de leurs vie,
- relier les produits à leur fabricant,
- offrir des opportunités pour une nouvelle génération de maintenance (comme la maintenance prévisionnelle),
- contrôler la qualité des produits tout le long du cycle de vie des produits,
- faire émerger des profils clients sans modèle à priori,
- augmenter l'efficacité des entreprises et proposer de nouveaux services,
- donner la possibilité d'une logistique de l'information en temps réel.
- Maîtriser la supply chain.

Data Analytics:

On a longtemps parlé d'analyse de données, ou **Data Analysis** en anglais. Désormais on parle plus souvent de **Data Analytics**, ou analytique de la donnée en français. Le Data Analytics (DA) consiste à examiner des données brutes (souvent en grand volume) afin d'en ressortir des informations pertinentes compréhensibles par l'humain et difficilement observables par analyse directe. La représentation graphique (**Data Visualisation** ou **DataViz**) rend intelligible ces informations et permet l'interprétation et la prise de décision.

On peut différencier le Data Analytics du **Data Analytics avancé** (comme le Data Mining), ou encore du **Big Data Analytics**, en positionnant cette analytique de la donnée uniquement sur ce qui est déjà connu. En d'autres termes, le DA ne permet pas d'identifier de nouvelles relations cachées entre des données ou des événements. Le DA permet, par exemple, de rechercher l'équipement responsable d'un pic de consommation en comparant les phases de démarrage de tous les équipements avec des valeurs de consommation, tandis que l'analytique avancé permettra d'identifier une cause jusqu'ici inconnue et indépendante des démarrages des équipements.

La Business Intelligence (BI) ou informatique décisionnelle:

Elle existe depuis plus de 20 ans mais se fait de plus en plus connaître grâce à la diffusion de logiciels qui proposent des environnements de visualisation et d'analyse pour des spécialistes métier (qui n'ont pas de compétences en mathématiques et en informatique pour traiter des données). Les outils informatiques de BI étant de plus en plus évolués, l'analytique et l'analytique avancé se confondent de plus en plus et repoussent les limites de l'analyse. Le terme Business Intelligence (BI) désigne les technologies, applications et pratiques de collecte, d'intégration, d'analyse et de présentation de l'information. L'objectif de la Business Intelligence est de soutenir une meilleure prise de décision métiers, commerciale, marketing, finance etc. Essentiellement, les systèmes de Business Intelligence sont des systèmes d'aide à la décision axés sur les données.

Data Visualisation ou Dataviz:

L'homme est naturellement attiré par l'image ou le graphique plus que par le texte ou les tableaux. La visualisation de données, appelée «dataviz», est préférée à la donnée brute. Elle aide à éclairer des informations en apparence complexes ou noyées dans une grande quantité de paramètres. Elle éclaire un phénomène en lui donnant un aspect plus ergonomique qu'un tableur rempli de chiffres. Ainsi, par l'intermédiaire de graphiques, d'images ou de cartes colorées, l'information est transmise sans frein. En plus d'être accessible à tout le monde, elle ne conserve que l'essentiel du message et gagne ainsi en rapidité et en efficacité. Au final, cela permet des prises de décision éclairées sans que l'utilisateur de la dataviz soit un expert technique.

La Dataviz affiche les données sous forme graphique et permet la création de groupes, de classements, de filtres, etc. La dataviz consiste en l'automatisation de la collecte et du traitement de données, la mise à jour automatique, la vérification de la qualité de la donnée et leur visualisation sous des formes compréhensibles facilitant la prise de décision.

La Data Visualisation permet la prise de décision et la communication. Les outils de Business Intelligence (BI) intègrent la Dataviz. A partir d'un certain volume de données, il n'est plus possible d'analyser des tableaux de données brutes, l'effort d'abstraction étant trop important.

Data Science:

La Data Science est un terme que certains utilisent comme synonyme de Data Analytics, d'autres considèrent que la Data Science, littéralement science de la donnée, regroupe l'analytique (Data Analytics), l'apprentissage automatique (Machine Learning), l'exploration de données (Data Mining), l'Intelligence Artificielle (IA) et tout un ensemble de méthodes mathématiques et informatiques.

Cette discipline étudie les données ou les informations en ayant recours aux mathématiques, aux statistiques et à l'informatique. Elle est à différencier du Data Analytics (analyse des données), de la Business Intelligence (informatique décisionnelle) et du Data Mining (exploration des données).

Les données stockées étant trop volumineuses, il devient impératif de confier l'analyse et le traitement de toutes ces informations à un professionnel, le Data Scientist. Grâce à ses connaissances, il rend lisibles les données brutes, complexes et déstructurées. Il en tire ainsi des informations pertinentes et utiles. La principale mission du Data Scientist est d'interpréter

les données. Les résultats serviront à établir une stratégie efficace pour développer l'entreprise ou l'aideront à prendre les bonnes décisions.

Pour exploiter les données (qui sont souvent déstructurées et sans agencement), le Data Scientist utilise ses connaissances techniques pour les extraire, les nettoyer et les organiser. À cet effet, il se base sur ses acquis en Data Mining et en Machine Learning. À cela s'ajoutent ses connaissances en statistiques. Une fois que les données sont bien agencées, le Data Scientist détermine les tendances et les anticipe.

Data Mining:

Le data mining ou forage de données ou explorations de données ou fouilles de données désigne l'analyse de données depuis différentes perspectives et le fait de transformer ces données en informations utiles, en établissant des relations entre les données ou en repérant des motifs (patterns). Ces informations peuvent ensuite être utilisées par les entreprises pour augmenter un chiffre d'affaires ou pour réduire des coûts ou prévoir les pannes. Elles peuvent également servir à mieux comprendre une clientèle afin d'établir de meilleures stratégies marketing.

Les logiciels Data Mining font partie des outils analytiques (analytics) utilisés pour l'analyse de données. Ils permettent aux utilisateurs d'analyser des données sous différents angles, de les catégoriser et de résumer les relations identifiées. Techniquement, le Data Mining est le procédé permettant de trouver des corrélations ou des patterns (images ou motifs) entre de nombreuses bases de données relationnelles.

Le Data Mining utilise des algorithmes complexes et sophistiqués permettant de segmenter les données et d'évaluer les probabilités futures. Le Data Mining est surnommé aussi Knowledge Discovery in Data (La découverte de savoir dans les données).

On distingue cinq variétés du Data Mining :

Association: chercher des patterns au sein desquelles un événement est lié à un autre événement.

Analyse de séquence: chercher des patterns au sein desquelles un événement mène à un autre événement plus tardif.

Classification: chercher de nouvelles patterns, quitte à changer la façon dont les données sont organisées.

Clustering: trouver et documenter visuellement des groupes de faits précédemment inconnus.

Prédiction: découvrir des patterns de données pouvant mener à des prédictions raisonnables sur le futur. Ce type de data mining est aussi connu sous le nom d'analyse prédictive.

Le Data Mining repose sur cinq éléments majeurs:

- L'extraction, la transformation, et le chargement de données transactionnelles sur le système de Data Warehouse.
- Le stockage et la gestion de données dans un système de base de données multidimensionnel.
- Fournir l'accès aux données aux analystes de business et aux professionnels des technologies informatiques.
- Analyser les données grâce à un logiciel applicatif.
- Présenter les données sous un format utile, comme un graphique ou un tableau.

Les différents outils d'analyse:

- **Les réseaux de neurones artificiels:** Des modèles prédictifs non linéaires qui apprennent par l'entraînement et s'apparentent à des réseaux neuronaux biologiques dans leur structure.
- **Algorithmes génétiques:** Les techniques d'optimisation utilisent des procédés tels que la combinaison génétique, la mutation, et la sélection naturelle dans un design basé sur les concepts de l'évolution naturelle.
- **Les arbres décisionnels:** Ces structures en forme d'arbres représentent des ensembles de décisions. Ces décisions génèrent des règles pour la classification d'un ensemble de données. Les méthodes spécifiques d'arbres décisionnels incluent les Arbres de Classification et Régression (CART), et les Chi Square Automatic Interaction Detection (CHAID). Ces deux méthodes sont utilisées pour la classification d'un ensemble de données. Elles fournissent un ensemble de règles pouvant être appliqués à un nouvel ensemble de données pour prédire quels enregistrements auront un résultat. Le CART segmente un ensemble de données en créant une division à deux issues, tandis que le CHAID segmente l'ensemble en utilisant des tests de chi square pour créer des issues à plusieurs voies. En général, CART requiert moins de préparation de données que CHAID.

- **La méthode du voisin le plus proche:** Cette technique classe chaque enregistrement d'un ensemble de données en se basant sur une combinaison des classes du k, similaire à un ensemble de données historique.
- **L'induction de règle:** L'extraction de règles « si-alors » depuis les données, basées sur des significances statistiques.
- **Data visualization:** L'interprétation visuelle de relations complexes dans les données multidimensionnelles. Les outils graphiques sont utilisés pour illustrer les relations de données.

Les propriétés principales du Data Mining

On dénombre trois propriétés principales du Data Mining Big Data :

- **La découverte automatique de patterns:** Le Data Mining repose sur le développement de modèles. Un modèle utilise un algorithme pour agir sur un ensemble de données. La notion de découverte automatique se réfère à l'exécution de modèles de Data Mining. Ces modèles peuvent être utilisés pour étudier les données sur lesquelles ils sont bâtis mais la plupart des types de modèles peuvent être généralisés à de nouvelles données. Le processus permettant d'appliquer un modèle à de nouvelles données est appelé scoring.
- **La prédiction de résultats probables:** De nombreuses formes de Data Mining sont prédictives. Les prédictions ont une probabilité associée. Certaines formes de Data Mining prédictif génèrent des règles, qui sont les conditions pour obtenir un résultat. Par exemple, on peut prévoir le moment de pannes en se basant sur les données de fonctionnement d'une machine..
- **La création d'informations exploitables:** Le Data Mining permet de **dégager des informations exploitables de larges volumes de données**. Par exemple, une agence de location de voiture peut utiliser un modèle pour identifier des segments de consommateurs afin de créer une promotion ciblant les clients à forte valeur.

Les logiciels Data Mining:

Les nombreux logiciels de Data Mining analysent les relations entre les données et repèrent des patterns en fonction des requêtes des utilisateurs. Par exemple, un restaurant peut utiliser le Data Mining pour déterminer à quel moment proposer certaines offres. Il faudra alors chercher dans les informations collectées, et créer des classes en se basant sur les moments auxquels ont lieu les visites de clients et ce qu'ils commandent.

Dans d'autres cas, les Data Miners trouvent des clusters d'informations en se basant sur des relations logiques ou bien ils cherchent des associations et des patterns séquentielles pour tirer des conclusions sur le comportement des utilisateurs.

Data Warehouse, Datamart et Data Lake:

La multiplication des bases de données ainsi que le besoin croissant en analyse a induit la création d'entrepôts de données (Data Warehouse en anglais) qui centralisent les données et facilitent leur gestion. La notion n'est pas nouvelle, mais le mot lui-même est récent. Plutôt que de travailler sur les bases de données opérationnelles (risque de baisse de performance), on applique les traitements d'analyse sur une base de données constituée et administrée dans cet objectif. Les logiciels de BI qui intègrent un Data Warehouse rendent ainsi possible l'accès libre à l'ensemble des données.

Le Datamart est un sous-ensemble du Data Warehouse ; si le Data Warehouse est le référentiel central de toutes les données, le Datamart concerne les besoins d'un groupe unique d'utilisateurs et est, par conséquent, organisé pour la recherche de données selon un mode unique.

Le Data Lake (lac de données en français) est une forme de stockage propre au Big Data permettant de stocker dans un lieu unique des données brutes ou très peu transformées et de natures variées (données structurées, semi structurées et non structurées) et de permettre l'application de traitement d'analytique Big Data.

Cloud Computing:

Le terme « cloud », traduit en Français par nuagique ou infonuagique, désigne les serveurs accessibles sur Internet ainsi que les logiciels et bases de données qui fonctionnent sur ces serveurs. Les serveurs situés dans le cloud sont de très grande capacité pour recevoir les big data et sont hébergés au sein de datacenters (centres de données) répartis dans le monde entier. Un centre de données est une installation abritant de nombreux serveurs en réseau qui fonctionnent ensemble pour traiter, stocker et partager des données. L'utilisation du cloud computing (informatique de cloud) permet aux utilisateurs et aux entreprises de s'affranchir de la nécessité de gérer des serveurs physiques eux-mêmes ou d'exécuter des applications logicielles sur leurs propres équipements.

Le cloud permet aux utilisateurs d'accéder aux mêmes fichiers et aux mêmes applications à partir de presque n'importe quel appareil dans n'importe quel point de la terre car les processus informatiques et le stockage ont lieu sur des serveurs dans un datacenter et non localement sur la machine utilisateur. C'est pourquoi un utilisateur dont le téléphone est défaillant peut se connecter à son compte Instagram à partir d'un nouveau téléphone et retrouver son compte actif en place, avec toutes ses photos, vidéos et l'historique de ses conversations. Il en va de même avec les fournisseurs de messagerie cloud comme Gmail ou Microsoft Office 365 et les fournisseurs de stockage cloud comme Dropbox ou Google Drive.

Pour les entreprises, le passage au cloud computing supprime certains coûts et frais informatiques : par exemple, les sociétés n'ont plus besoin de mettre à jour et d'entretenir leurs propres serveurs, c'est le fournisseur de cloud qui s'en charge. Cet aspect a surtout un impact sur les petites entreprises qui ne peuvent pas toujours se permettre de disposer de leur propre infrastructure interne. Elles peuvent externaliser leurs besoins en infrastructure à un coût abordable via le cloud. Le cloud peut également faciliter les opérations internationales des entreprises car les employés et les clients peuvent accéder aux mêmes fichiers et applications à partir de n'importe quel emplacement.

Fonctionnement du cloud computing:

Le cloud exploite la technologie de virtualisation qui consiste à créer un ordinateur « virtuel », uniquement numérique, qui se comporte en tout point comme un ordinateur réel physique doté de ses équipements matériels propres. Ce type d'ordinateur est dénommé machine virtuelle. Ces machines situées sur le même ordinateur hôte se voient mises en « sandbox » (c'est-à-dire isolées), de sorte qu'elles n'interagissent pas du tout les unes avec les autres. Les fichiers et les applications figurant sur une machine virtuelle donnée ne sont pas visibles par les autres machines même si ces dernières se trouvent sur la même machine physique.

Les machines virtuelles utilisent également plus efficacement le matériel qui les héberge. En exécutant plusieurs machines virtuelles à la fois, un serveur devient plusieurs serveurs et un datacenter devient une multitude de datacenters, capables de servir de nombreuses organisations. Ainsi, les fournisseurs de cloud peuvent proposer l'utilisation de leurs serveurs à un nombre de clients bien plus important et à un coût modéré.

Même si certains serveurs tombent en panne, les serveurs cloud en général doivent toujours être en ligne et toujours disponibles. Les fournisseurs de cloud sauvegardent généralement leurs services sur plusieurs machines et dans plusieurs régions (redondances).

Les utilisateurs accèdent aux services cloud par le biais d'un navigateur ou d'une application qui se connecte au cloud via Internet (c'est-à-dire, par l'intermédiaire de nombreux réseaux interconnectés), indépendamment des appareils qu'ils utilisent.

Les quatre modèles de services de cloud computing:

- **Software-as-a-Service (SaaS)** : les applications SaaS sont hébergées sur des serveurs cloud et les utilisateurs y accèdent via Internet plutôt que de les installer sur leurs machines et appareils. Les services SaaS s'apparentent à la location d'une habitation : le propriétaire entretient l'habitation, tandis que le locataire l'utilise comme si elle lui appartenait. Parmi les exemples d'applications SaaS, on citera Salesforce, MailChimp et Slack.
- **Platform-as-a-Service (PaaS)** : dans ce modèle, les entreprises ne paient pas pour les applications hébergées. Elles paient pour les éléments dont elles ont besoin pour créer leurs propres applications. Les fournisseurs de PaaS proposent tout ce qui est nécessaire pour construire une application, y compris les outils de développement, l'infrastructure et les systèmes d'exploitation, sur Internet. Le PaaS peut être comparé à la location des outils et des équipements pour construire une maison, au lieu d'en louer une. Parmi les exemples de services PaaS, on citera notamment Heroku et Microsoft Azure.
- **Infrastructure-as-a-Service (IaaS)** : dans ce modèle, une entreprise loue les serveurs et l'espace de stockage dont elle a besoin à un fournisseur de cloud. Elle peut alors utiliser cette infrastructure cloud pour développer ses propres applications. L'approche IaaS s'apparente à la location d'un terrain par une entreprise : cette dernière peut y construire ce qu'elle souhaite, mais elle doit fournir ses propres équipements et matériaux de construction. Parmi les fournisseurs de services IaaS, on citera DigitalOcean, Google Compute Engine et OpenStack.
- **Function-as-a-Service (FAAS)** : le modèle FaaS (également connu sous le nom de serverless computing ou informatique sans serveur) divise les applications cloud en composants plus petits, uniquement exécutés en

cas de besoin. Imaginez qu'il soit possible de louer une maison une pièce à la fois. Le locataire ne louerait, par exemple, que la salle à manger au moment des repas, la chambre quand il va dormir et le salon quand il regarde la télévision, sans avoir à régler le loyer correspondant lorsqu'il n'utilise pas ces pièces.

À l'instar de tous les autres modèles d'informatique cloud, les applications FaaS ou serverless s'exécutent néanmoins toujours sur des serveurs. Toutefois, on les définit comme « serverless », car elles ne s'exécutent pas sur des machines dédiées et que les entreprises qui développent ces applications n'ont aucun serveur à gérer.

Par ailleurs, les fonctions serverless peuvent évoluer ou être dupliquées lorsqu'un nombre plus élevé d'utilisateurs se servent de l'application. Imaginez que la salle à manger du locataire puisse s'agrandir à la demande lorsque de nouveaux convives se joignent à lui pour le dîner !

Informatique de périphérie (edge computing):

L'edge computing ou « informatique en périphérie » désigne le traitement informatique qui s'effectue à l'emplacement physique de l'utilisateur ou de la source des données ou à proximité. En rapprochant les services de calcul de ces emplacements, l'edge computing permet aux utilisateurs de profiter de services plus rapides et fiables et offre aux entreprises la flexibilité d'un cloud. Avec l'edge computing, les entreprises peuvent également utiliser et distribuer un ensemble de ressources communes sur plusieurs sites. L'edge computing permet d'étendre un environnement uniforme, depuis le datacenter central jusqu'aux emplacements physiques proches des utilisateurs et des données, situés en périphérie du réseau. L'edge computing est désormais utilisé dans de nombreux secteurs d'activité dont notamment les télécommunications, la fabrication, les transports et les services publics.

Comme les utilisateurs finaux sont de plus en plus nombreux et demandaient des applications basées sur le cloud, et que de plus en plus d'entreprises travaillaient sur plusieurs sites, il est devenu nécessaire de traiter davantage de données en dehors du datacenter, directement à la source, et de les gérer à partir d'un emplacement central. C'est à ce moment-là que l'edge computing mobile est devenu une réalité.

Dans le secteur industriel, l'edge computing permet aux entreprises de surveiller de près l'efficacité des équipements et des chaînes de production et, dans certains cas, de détecter les pannes avant qu'elles ne se produisent, ce qui permet d'éviter les retards coûteux dus aux temps d'arrêt.

Les exigences des opérations de production en temps réel signifient que certaines analyses de données doivent être effectuées à la « périphérie », c'est-à-dire là où les données sont créées, afin de réduire le temps de latence entre le moment où les données sont produites et celui où une réponse est fournie. Par exemple, la détection d'un problème de sécurité ou de qualité peut nécessiter une intervention en temps quasi réel sur l'équipement. Le temps nécessaire à l'envoi des données vers le cloud de l'entreprise, puis pour les renvoyer à l'usine peut être trop long et dépend de la fiabilité du réseau. L'utilisation de l'informatique en périphérie signifie également que les données restent près de leur source, ce qui réduit les risques de sécurité.

Un autre exemple d'utilisation de l'edge computing est celui des véhicules connectés. Les bus et les trains sont équipés d'ordinateurs qui permettent de suivre le flux de passagers et la prestation de services. Les livreurs peuvent trouver les trajets les plus rapides grâce à la technologie embarquée dans leur véhicule. Lorsqu'une stratégie d'edge computing est mise en œuvre, chaque véhicule utilise la même plateforme standardisée que le reste de la flotte, ce qui rend les services plus fiables et permet de protéger les données de manière uniforme.

Dans le cas des véhicules autonomes, l'edge computing implique le traitement d'un gros volume de données en temps réel dans une situation où la connexion au réseau peut être instable. En raison de ce volume, les véhicules autonomes, tels que les voitures sans conducteur, traitent les données des capteurs à bord du véhicule afin de réduire la latence. Ils peuvent cependant toujours se connecter à distance à un point central pour recevoir des mises à jour logicielles.

Intelligence Artificielle et machine learning:

L'intelligence artificielle (IA, ou AI en anglais pour Artificial Intelligence) est l'ensemble des techniques permettant aux machines d'imiter une forme d'intelligence réelle de l'homme. La notion voit le jour dans les années 1950 grâce au mathématicien Alan Turing. Dans son livre « Computing Machinery and Intelligence », il soulève la question d'apporter aux machines une forme d'intelligence. Il décrit alors un test, aujourd'hui connu sous le nom « Test de Turing », dans lequel un sujet interagit à l'aveugle avec un autre humain, d'une part, et avec une machine programmée pour formuler des réponses

sensées, d'autre part. Si le sujet n'est pas capable de faire la différence entre les réponses de l'homme et de la machine, alors celle-ci a réussi le test et, selon l'auteur, peut véritablement être considérée comme « intelligente ».

L'Intelligence Artificielle (IA) est la simulation de processus d'intelligence humaine par des machines, plus particulièrement, des systèmes informatiques. Ces processus comprennent trois phases. Tout d'abord, l'apprentissage, c'est-à-dire l'acquisition de l'information et ses règles d'utilisation. Puis, le raisonnement, soit l'utilisation de règles pour tirer des conclusions approximatives ou définitives. Et enfin, l'autocorrection. Les applications particulières de l'IA comprennent la narrow AI, la reconnaissance faciale et la vision par ordinateur. Comme dit précédemment, le domaine de l'IA est très vaste et s'organise en de multiples branches qui associent sciences cognitives, mathématiques, électronique, informatique etc (Figure 8).

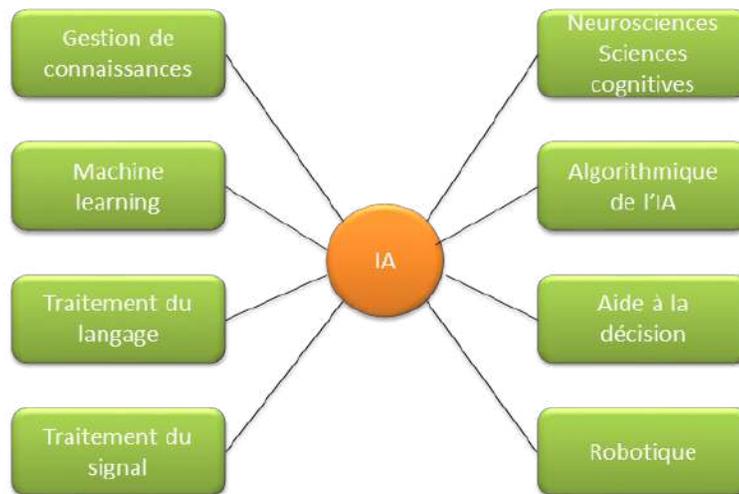


Figure 8: Différents domaines de l'IA

Les différents types d'IA dépendent du niveau d'intelligence intégré dans un robot sont les suivants:

- **Intelligence artificielle étroite (ANI)**

L'intelligence artificielle étroite (ANI), également connue sous le nom d'IA étroite ou d'IA faible, est un type d'intelligence artificielle axée sur une seule tâche étroite. C'est la seule IA qui existe aujourd'hui, pour l'instant. On trouve ce type d'IA dans Google Assistant, Google Translate, Siri, Cortana ou Alexa.

Ce sont toutes des machines intelligentes qui utilisent le traitement automatique du langage naturel. En comprenant la parole et le texte dans le langage naturel, ils sont programmés pour interagir avec les humains de manière personnalisée et naturelle.

Les systèmes d'IA sont aujourd'hui utilisés en médecine pour diagnostiquer les cancers et autres maladies avec une extrême précision. Ils reproduisent la cognition et le raisonnement de type humain.

Intelligence artificielle générale (AGI)

- **intelligence générale artificielle (AGI):**

C'est un type d'IA qui est à peu près aussi capable qu'un humain. Lorsqu'on lui présente une tâche inconnue, il est capable de trouver une solution, sans intervention humaine.

Cependant, ce type d'intelligence artificielle est encore un domaine émergent.

Étant donné que le cerveau humain est le modèle de création de l'intelligence générale, il semble que cela ne se produira pas assez tôt car il n'y a pas encore de connaissance approfondie du fonctionnement du cerveau humain.

- **Super Intelligence artificielle (ASI)**

Ce type d'IA sera capable de performer extraordinairement bien, mieux que les humains, dans des domaines tels que les arts, la prise de décision et les relations émotionnelles. Ces choses font aujourd'hui partie de ce qui différencie une machine d'un humain.

Les coûts du matériel, des logiciels et du personnel pour l'intelligence artificielle peuvent être élevés. Alors, de nombreux fournisseurs incluent des composants d'IA dans leurs offres standard ainsi que l'accès aux plates-formes AlaaS (Artificial Intelligence as a Service, pour intelligence artificielle en tant que service). Les offres les plus populaires de Cloud computing

d'intelligence artificielle comprennent les services d'Amazon AI, IBM Watson Assistant, Microsoft Cognitive Services et les services de Google AI.

L'IA et l'apprentissage automatique, qui en fait partie, permettent aux entreprises de tirer pleinement parti du volume d'informations générées non seulement dans l'entreprise, mais aussi dans l'ensemble de leurs unités commerciales, et même auprès de partenaires et de fournisseurs. L'IA et l'apprentissage automatique peuvent créer des informations offrant la visibilité, la prévisibilité et l'automatisation des opérations et des processus opérationnels. Par exemple, l'exploitation des données collectées à partir de machines peut aider les entreprises à effectuer une maintenance prédictive basée sur des algorithmes d'apprentissage automatique ce qui permet de déterminer la date optimale d'intervention avant panne et d'augmenter ainsi le temps de fonctionnement et l'efficacité. L'intelligence artificielle (IA), reproduit toutes proportions gardées, le processus de réflexion et de prise de décision de l'homme.

Le marché de l'IA est en rapide expansion: en 2015 il pesait 200 millions de dollars. En 2025, on estime qu'il s'élèvera à près de 90 milliards de dollars.

Exemples d'application de l'IA:

La vision artificielle, par exemple, permet à la machine de déterminer précisément le contenu d'une image pour ensuite la classer automatiquement selon l'objet, la couleur ou le visage repéré. C'est cela qui est utilisé dans le cas des véhicules autonomes qui arrivent à identifier et différencier automatiquement les objets et les êtres vivants rencontrés.

Les algorithmes utilisés sont en mesure d'optimiser leurs calculs au fur et à mesure qu'ils effectuent des traitements. C'est ainsi que, par exemple, les filtres antispam deviennent de plus en plus efficaces au fur et à mesure que l'utilisateur identifie un message indésirable.

La reconnaissance vocale se développe également rapidement avec des assistants virtuels capables de transcrire les propos formulés en langage naturel puis de traiter les requêtes soit en répondant directement via une synthèse vocale, soit avec une traduction instantanée ou encore en effectuant une requête relative à la commande.

On distingue l'intelligence artificielle forte de l'intelligence artificielle faible. La première permet aux objets d'agir de façon intelligente mais aussi d'assimiler des concepts abstraits et d'avoir une véritable conscience proche des sentiments éprouvés par les êtres humains. Les machines qui se limitent à résoudre des problèmes entrent plutôt dans la catégorie d'intelligence artificielle faible.

L'intelligence artificielle a investi pratiquement tous domaines. Elle est présente dans les appareils photo des smartphones. En effet, en mode nocturne, elle permet d'adapter la colorimétrie à l'environnement, et de redonner à une façade éclairée son éclat original pour le reproduire fidèlement sur votre cliché.

En photographie, l'IA intervient aussi pour détecter des scènes précises, pour stabiliser l'appareil ou pour optimiser la précision du zoom. La reconnaissance faciale est une autre technologie rendue possible grâce à l'intelligence artificielle. Elle sert à reconnaître l'utilisateur d'un téléphone portable, mais aussi à plus grande échelle à identifier des personnes, par exemple dans les aéroports.

L'IA est aussi introduite dans le domaine militaire (par exemple pour la prise de décisions des drones), dans le secteur des finances (évaluation des risques d'une opération comme l'octroi d'un crédit immobilier), en médecine (diagnostic d'affections oculaires), en robotique, dans les jeux vidéo (animation des personnages non-joueurs), dans les transports (gestion du trafic dans les transports en commun) et les industries (mise en place de systèmes de maintenance pour faire face aux problèmes de production).

Machine learning:

Le Machine Learning ou l'apprentissage automatique est un type d'intelligence artificielle qui permet aux ordinateurs d'avoir une capacité d'apprendre sans être explicitement programmés. Ce sont des machines intelligentes qui s'auto-perfectionnent afin de permettre à leurs actions futures de gagner en efficacité et donc en productivité.

Un exemple concret est celui des tondeuses à gazon automatique ou de l'aspirateur autonome qui apprennent, en se déplaçant, la topographie des lieux dans lesquels ils sont appelés à opérer.

Le Machine Learning peut être défini comme une branche de l'intelligence artificielle englobant de nombreuses méthodes permettant de créer automatiquement des modèles (patterns) à partir des données. Ces méthodes sont en fait des

algorithmes très performants.

Un programme informatique traditionnel effectue une tâche en suivant des instructions précises, et donc systématiquement de la même façon. Au contraire, un système Machine Learning ne suit pas d'instructions, mais apprend à partir de l'expérience. Ses performances s'améliorent au fil de son « entraînement », de son apprentissage à mesure que l'algorithme est exposé à davantage de données et de situations.

Le Machine Learning est composé de quatre types d'apprentissage qui sont : l'apprentissage supervisé, non supervisé, semi supervisé et par renforcement.

- **L'apprentissage supervisé** : l'apprentissage supervisé: les données utilisées pour l'entraînement sont déjà « étiquetées ». Par conséquent, le modèle de Machine Learning sait déjà ce qu'il doit chercher (motif, élément...) dans ces données. À la fin de l'apprentissage, le modèle ainsi entraîné sera capable de retrouver les mêmes éléments sur des données non étiquetées.

Parmi les algorithmes supervisés, on distingue les algorithmes de classification (prédictions non numériques) et les algorithmes de régression (prédictions numérique). En fonction du problème à résoudre, on utilisera l'un de ces deux archétypes.

L'apprentissage supervisé se décline selon en deux étapes :

- La première correspond à déterminer un modèle de données étiquetées.
- La deuxième consiste à prédire l'étiquette d'une nouvelle donnée connaissant le modèle préalablement appris.

- **L'apprentissage non supervisé** : L'apprentissage non supervisé: il consiste, au contraire, à entraîner le modèle sur des données sans étiquettes. La machine parcourt les données sans aucun indice et tente d'y découvrir des motifs (patterns) ou des tendances récurrentes. Cette approche est couramment utilisée dans certains domaines, comme la cybersécurité.

Il existe deux principaux domaines de modèles dans l'apprentissage non-supervisées pour retrouver les regroupements :

- **Les méthodes par partitionnement** : L'algorithme des K-moyennes (K-means) est un algorithme non supervisé très connu en matière de Clustering. Le clustering est une discipline particulière du Machine Learning ayant pour objectif de séparer vos données en groupes homogènes ayant des caractéristiques communes. C'est un domaine très apprécié en marketing, par exemple, où l'on cherche souvent à segmenter les bases clients pour détecter des comportements particuliers communs.
- **Les méthodes de regroupement hiérarchique** : La classification ascendante hiérarchique (CAH) est une méthode de classification itérative dont le principe est simple.

1. On commence par calculer la dissimilarité entre les N objets.
2. Puis on regroupe les deux objets dont le regroupement minimise un critère d'agrégation donné, créant ainsi une classe comprenant ces deux objets.
3. On calcule ensuite la dissimilarité entre cette classe et les N-2 autres objets en utilisant le critère d'agrégation. Puis on regroupe les deux objets ou classes d'objets dont le regroupement minimise le critère d'agrégation. On continue ainsi jusqu'à ce que tous les objets soient regroupés.

Ces regroupements successifs produisent un arbre binaire de classification (dendrogramme), dont la racine correspond à la classe regroupant l'ensemble des individus. Ce dendrogramme représente une hiérarchie de partitions. On peut alors choisir une partition en tronquant l'arbre à un niveau donné qui dépend soit des contraintes de l'utilisateur (l'utilisateur sait combien de classes il veut obtenir), soit de critères plus objectifs.

Parmi les modèles non-supervisés, on distingue les algorithmes de clustering (pour trouver des groupes d'objets similaires), d'association (pour trouver des liens entre des objets) et de réduction dimensionnelle (pour choisir ou extraire des caractéristiques).

- **L'apprentissage semi-supervisé**: Il utilise un ensemble de données étiquetées et non-étiquetées. Il se situe ainsi entre l'apprentissage supervisé qui n'utilise que des données étiquetées et l'apprentissage non-supervisé qui n'utilise que des données non-étiquetées. Il a été démontré que l'utilisation de données non-étiquetées, en combinaison avec des données étiquetées, permet d'améliorer significativement la qualité de l'apprentissage. Un autre intérêt provient du fait que l'étiquetage de données nécessite l'intervention d'un utilisateur humain.

Lorsque les jeux de données deviennent très grands, cette opération peut s'avérer fastidieuse. Dans ce cas, l'apprentissage semi-supervisé, qui ne nécessite que quelques étiquettes, revêt un intérêt pratique évident.

- **Apprentissage par renforcement:** Le grand principe de l'apprentissage par renforcement est de laisser à un agent, par exemple un petit robot, le loisir d'explorer son environnement, un labyrinthe par exemple, et, lorsqu'il trouve la sortie, de valoriser les actions qui l'y ont conduit (Figure 9).

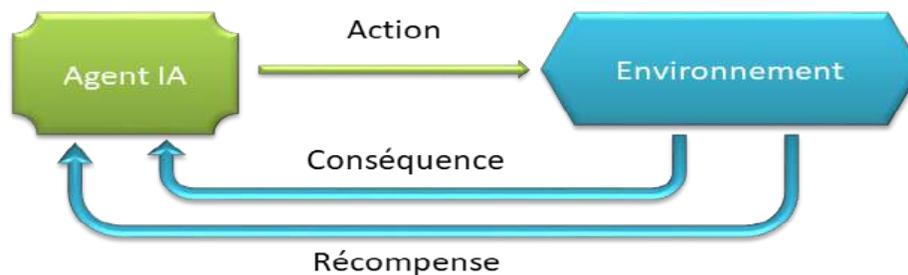


Figure 9: Principe de l'apprentissage par renforcement

L'apprentissage par renforcement c'est que pour chaque état de l'environnement, l'agent est capable d'évaluer les conséquences de l'action qu'il choisit (i.e. quel sera le nouvel état), et réalise donc l'action dont la récompense est la plus élevée.

Pour notre labyrinthe, le robot va se déplacer aléatoirement au début, et aura une récompense négative (car il n'aura pas trouvé la sortie et son énergie est limitée et diminue ce qui va le motiver à sortir). Au bout d'un moment, un choix lui permettra de sortir et lui donnera une récompense positive, qui viendra renforcer les derniers choix qu'il a fait de manière dégressive (par exemple, la dernière action aura une récompense de 1, celle d'avant de 0.8, celle encore avant 0.5 etc).

Après plusieurs itérations, quand le robot se retrouvera à 3 cases de la sortie du labyrinthe, il regardera sa politique d'action et verra que depuis cette case, le plus intéressant (i.e. ce qui apporte la plus grande récompense) est de tourner à droite, par exemple, plutôt qu'à gauche. Et après encore plus d'itérations, il sera capable de trouver la sortie tout seul. Si on ajoute des événements aléatoires lors de l'apprentissage, il pourra même se débrouiller (par exemple si la présence d'eau sur sa route le retarde, il l'évitera lorsqu'il en rencontrera). Dans cette approche,

- on n'a pas besoin de coder les règles métier ou quoi que ce soit, l'IA va les découvrir d'elle-même
- on peut donc s'adapter à toutes les situations peu importe les entrants (pas besoin d'être exhaustif, il y a une part de « généralisation »)
- on évite la partie « compréhension du problème ». En effet, à titre d'exemple, imaginons qu'on veuille créer un robot qui marche. On pourrait programmer chacun de ses moteurs pour qu'il ait le bon mouvement, qu'en cas de chute il puisse se relever, etc... mais ce serait extrêmement laborieux et difficile. On peut créer alors un environnement virtuel de simulation, placer mon modèle de robot dedans et le laisser apprendre à se lever et marcher grâce à un apprentissage par renforcement. Après des dizaines de milliers de tentatives, il sera en mesure de le faire, et peu importe comment il tombe, il saura se relever !

En guise d'exemple, on peut citer le programme AlphaGo qui a triomphé du champion du monde de jeu de Go.

Algorithmes de machine learning:

Les algorithmes d'apprentissage automatique sont nombreux. Les principaux sont indiqués dans le tableau 5 et sont classés selon le type d'apprentissage.

| Apprentissage supervisé | Apprentissage non supervisé | Apprentissage semi-supervisé | Apprentissage par renforcement |
|--|---|--|---|
| Les data scientists fournissent les entrées, les sorties et le feedback pour construire le modèle | On utilise le deep learning pour arriver aux conclusions et motifs (patterns) via des données non étiquetées d'entraînement | On construit un modèle via un mix de données non étiquetées, un ensemble de catégories, suggestions et d'exemple de données étiquetées | Auto-interprétation basée sur un système de récompenses et de punitions à travers d'essais et de recherche d'erreurs pour obtenir une récompense maximale |
| <p><u>Algorithmes</u></p> <p>Régression linéaire:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Prévisions de ventes - Evaluation de risques <p>Machine support vector:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Classification d'images - Comparaison de performance financière <p>Arbre de décision:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Analyses prévisionnelles - Etablissement de prix | <p><u>Algorithmes</u></p> <p>A-priori:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fonctions de vente - Associations de mots - Détection de motifs (patterns) <p>K-means clustering:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Suivi de performance - Détection de motifs (patterns) | <p><u>Algorithmes</u></p> <p>Generative adversarial networks:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Manipulations audio et vidéo - Création de données <p>Classificateur Native Bayes auto-apprenant:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Traitement du langage naturel | <p><u>Algorithmes</u></p> <p>Q-learning:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Création de polices - Réduction de consommation <p>Model-based value estimation:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tâches linéaires - Estimation de paramètres |

Tableau 5: Types de machine learning

Les algorithmes d'apprentissage supervisé:

- **Régression linéaire:** Les algorithmes de régression linéaire sont les plus utilisés par les équipes de data science. Ils consistent à effectuer des corrélations simples entre deux variables dans un jeu de données. Un ensemble d'entrées et les sorties correspondantes sont examinés et quantifiés pour montrer une relation, par exemple comment le changement d'une variable affecte une autre (par exemple entre les ventes de fusils et celles de cartouches). Les régressions linéaires sont représentées sous forme de droites sur un graphique.

La popularité de la régression linéaire s'explique par sa simplicité car elle est facilement explicable, relativement transparente et il y a peu de paramètres à configurer. Ce type d'algorithmes est utilisé souvent pour prévoir des ventes ou des risques ou des relations de causes à effet.

- **Machine à vecteurs de support (SVM):** Les machines à vecteurs de support ou SVM (Séparateurs à vastes marges) sont des algorithmes qui séparent les données en classes. Pendant l'entraînement, un SVM trouve une ligne qui sépare les données d'un jeu en classes spécifiques et maximise les marges (les distances entre les frontières de séparation et les échantillons les plus proches) de chaque classe. Après avoir appris les lignes de classification, le modèle peut ensuite les appliquer à des données nouvelles.

Les spécialistes placent le SVM dans la catégorie des « classificateurs linéaires » : l'algorithme est idéal pour identifier des classes simples qu'il sépare par des vecteurs nommés hyperplans. Il est également possible de programmer l'algorithme pour les données non linéaires, que l'on ne peut pas séparer clairement par des vecteurs. Mais, avec des données d'entraînement hypercomplexes, visages, traits de personnalité, génomes et matériel génétique, les systèmes de classes deviennent plus petits et plus difficiles à identifier et nécessitent un peu plus d'assistance humaine.

Les machines à vecteurs de support sont très utilisées dans la finance. Elles offrent une grande précision sur les données actuelles et futures. Les modèles associés peuvent servir à comparer virtuellement les performances financières relatives, la valeur et les retours sur investissement.

Les SVM dits non linéaires sont souvent mis à contribution pour classifier des images (vision par ordinateur) ou des mots, des phrases et des entités (NLP).

- **Arbre de décision:** Un algorithme d'arbre de décision représente graphiquement les données en branches pour

montrer les résultats possibles de diverses actions. Il classe et prédit les variables de réponse en fonction des décisions passées. Les résultats des arbres de décision sont faciles à interpréter. Les décisions et leurs impacts probables sur un résultat final sont aisément visibles, même lorsque les jeux de données en entrée sont incomplets. Cependant, les arbres de décision deviennent difficiles à lire quand ils sont associés à de gros volumes de données et à des variables complexes. C'est pourquoi ils sont utilisés pour les décisions à faibles enjeux, comme l'anticipation des variations de taux d'emprunt ou les réactions du marché si une entreprise modifie un élément important d'un de ses produits.

Les algorithmes d'apprentissage non supervisé:

- **Les algorithmes Apriori**

Cet algorithme d'exploration de données cherche les affinités entre deux éléments d'un jeu de données afin d'identifier s'il y a une corrélation négative ou positive entre eux.

L'algorithme Apriori est très utilisé par les équipes commerciales qui cherchent à savoir quels produits un client va possiblement acquérir avec un autre. Si un pourcentage élevé de clients qui achètent du pain achètent aussi du beurre, alors l'algorithme peut conclure que l'achat du produit A (le pain) sera souvent suivi par celui du produit B (le beurre). Ces données peuvent être croisées dans des ensembles de données, des points de données et des ratios d'achat.

Un tel algorithme peut également déterminer que l'acquisition d'un élément A n'a de 10 % de chances de conduire de l'achat d'un produit C. Les équipes de marketing peuvent utiliser ces informations pour élaborer des stratégies d'agencement de produits dans un magasin, par exemple. Les algorithmes Apriori sont particulièrement appréciés par les géants du e-commerce tels qu'Amazon et Alibaba. Les éditeurs de moteur de recherche les utilisent pour prédire la prochaine requête d'un internaute, tandis que Netflix l'utilise comme un outil de recommandation du prochain contenu à regarder.

- **La répartition en K-moyennes (K-means):**

L'algorithme K-means s'appuie sur une méthode itérative pour trier des données en groupes basés sur des caractéristiques similaires. Par exemple, un modèle de ce type classerait les résultats Web du mot talisman en un groupe relatif à un objet disposant de vertus de protection et un autre au modèle de voiture produit par le groupe Renault, la berline Renault Talisman.

La répartition en K-moyennes a la réputation d'être précise, tout en étant capable de gérer des groupes de données en un laps de temps relativement court. Ce type d'algorithme est aussi bien utilisé par les éditeurs de moteur de recherche pour proposer des résultats pertinents ou par des entreprises qui veulent classer les comportements des utilisateurs.

Les algorithmes d'apprentissage semi-supervisé:

- **Réseaux antagonistes génératifs:**

Les réseaux antagonistes génératifs (Generative Adversarial Networks ou GAN en Anglais) consistent à placer deux réseaux en compétition afin de déterminer la meilleure solution à un problème. Un des réseaux neuronaux, appelé générateur, se nourrit des données d'entrée pour générer une sortie passable, tandis que le second, le discriminateur, s'appuie sur la sortie du premier pour y repérer les défauts et l'améliorer. Ce processus est répété autant de fois que nécessaire pour trouver une réponse idéale à un problème. Dans l'industrie, la fabrication de pièces en constitue une des applications. En effet, un ingénieur indique les dimensions et les paramètres (ses données d'entrée) pour fabriquer la structure d'une pièce (le résultat) qu'il imprimera ensuite en trois dimensions. Ce procédé permet d'itérer jusqu'à trouver la forme, la structure ou encore les matériaux idéaux pour la mettre en production. Dans la production audiovisuelle, cette technique permet de générer des visages, des objets ou des morceaux de musique.

- **Classificateur bayésien naïf:**

Le classificateur bayésien naïf (Naive Bayes) s'appuie sur le théorème de Bayes fondé sur les probabilités conditionnelles. Cet algorithme est utilisé pour reconnaître des classes d'objets sur jeux de données étiquetées. Ensuite, l'algorithme est entraîné sur des données non étiquetées. Une fois ce cycle terminé, on associe les étiquettes et on relance l'entraînement. Cette technique est particulièrement utilisée dans le cadre du traitement du langage naturel ou pour labéliser des jeux de données.

Algorithmes d'apprentissage par renforcement

- **Q-Learning:**

Les algorithmes de Q-Learning cherchent à trouver la meilleure méthode (une politique optimale) pour atteindre un objectif défini en cherchant à obtenir un maximum de récompenses. Ils tentent le plus grand nombre d'actions possibles par état du système sans avoir de connaissance initiale de l'environnement. Un algorithme de ce type peut être construit pour obtenir rapidement des récompenses ou pour atteindre un objectif majeur. Le Q-Learning est souvent associé à des modèles de Deep Learning dont ceux de Google DeepMind.

- **Algorithme basé sur un modèle (model-based):**

À l'inverse du Q-Learning, les algorithmes basés sur un modèle ont une liberté limitée pour créer des états et des actions. Cela leur apporte, néanmoins, une efficacité statistique supérieure. Ils sont formés avec des données spécifiques et des actions de base en provenance de l'environnement via un entraînement supervisé. Cela permet, en principe, d'accélérer l'apprentissage. Un tel algorithme peut servir de référentiel dans le cadre du déploiement d'un jumeau numérique.

Le Deep Learning:

Le Deep Learning est une sous-branche du Machine Learning, lui-même une branche de l'intelligence Artificielle. On parlait originellement d'Intelligence Artificielle symbolique. Elle utilisait simplement un ensemble de données et de règles pour créer des systèmes experts qui étaient capables, par exemple, de détecter et de proposer des traitements pour des infections bactériennes (MYCIN) en analysant une base de données de symptômes et de traitements prédéfinis. À partir des années 1990, est apparu le Machine Learning qui consiste à utiliser des techniques statistiques à grande échelle pour déceler au sein d'une importante quantité de données, de l'information cachée sans utiliser de règles explicitement définies par un opérateur humain. Bien que le Deep Learning ait vu le jour en tant que branche du Machine Learning, il n'a commencé à devenir populaire qu'au début des années 2010.

Aujourd'hui, les applications du Deep Learning sont omniprésentes, de la reconnaissance d'images à la compréhension, la transcription et la génération du langage parlé en passant par le marketing ajusté au client (réseaux sociaux, Youtube etc).

La popularité du Deep Learning est en majorité due à sa versatilité et à sa capacité à résoudre plusieurs types de problèmes. Il automatise également une partie importante (et pas évidente) du processus de Machine Learning : la sélection de variables indépendantes (feature selection). Par ailleurs, les avancées en terme de puissance de traitement des systèmes informatiques dans les années précédentes ont favorisé la démocratisation du Deep Learning avec l'apparition et la vulgarisation des GPUs et des TPUs optimisées pour le Deep Learning et rendus de plus en plus accessibles -au travers de produits à coûts inexistant ou réduits tels que NVIDIA Jetson Nano ou Google Colab. De plus, les données nécessaires à l'entraînement de réseaux de neurones performants sont de plus en plus nombreuses et bien plus facilement collectables à partir de sites populaires comme Youtube, Flickr, Wikipedia ou encore depuis des répertoires de données spécialement dédiés au Deep Learning. La popularité du Deep Learning est due aussi au fait que les algorithmes évoluent très rapidement et les différents types de configuration existant pour les réseaux de neurones ont évolué très rapidement au cours des dernières années pour permettre la construction de réseaux de plus en plus performants. Enfin, il est important de mentionner que la popularité du Deep Learning est due aussi au fait que les réseaux de neurones peuvent être réutilisés et améliorés pour accomplir des tâches autres que celles pour lesquelles elles ont été initialement construites, ce qui occasionne un gain de temps considérable et une réduction importante de la charge de travail.

Mais attention, bien qu'il soit très versatile et semble pouvoir résoudre tous types de problèmes, le Deep Learning n'est pas toujours la meilleure solution, notamment quand on n'a pas suffisamment de données pour l'entraînement du réseau ou quand il existe des solutions plus simples de l'ordre du Machine Learning pour résoudre le problème. Cependant pour certaines tâches, les réseaux de neurones sont recommandés tels que le traitement d'images, par exemple, depuis quelques années les réseaux de neurones convolutifs sont devenus la norme.

Les noms donnés aux réseaux de neurones utilisés sont les suivants:

- réseau de neurones artificiels (ANN en anglais pour Artificial Neural Network)
- réseau dense (Dense en anglais et dans beaucoup de bibliothèques de deep learning)
- perceptron ou perceptron multi-couches (MLP en anglais pour Multi-Layer Perceptron), un peu plus précis que les autres mots car cela désigne un système particulier

- fully-connected (FC en anglais)
- réseau de neurones profonds (DNN en anglais pour Deep Neural Network) Le terme le plus général dans tout ça est ANN (et DNN qui est équivalent).

Le neurone artificiel ou neurone formel:

C'est en 1957 qu'a été formalisée l'idée d'un neurone artificiel par Rosenblatt. Ce neurone est une abstraction mathématique très simplifiée inspirée d'un neurone du cerveau humain.

Un neurone artificiel est un outil mathématique qui reçoit des valeurs en entrée, pondère ces valeurs avec des poids (ou coefficients) et donne une valeur en sortie sous la forme de la somme des valeurs pondérées. La valeur renvoyée par le neurone s'appelle alors une activation. C'est donc bel et bien une abstraction mathématique d'un neurone biologique qui, de façon très simplifiée, reçoit des signaux électriques par ses dendrites, les transforme dans ses synapses et s'active ou non en fonction des signaux reçus. Si un neurone biologique s'active, cela signifie qu'il transmet le signal électrique reçu à d'autres neurones (Figure 10).

Comme dans les neurones du cerveau où des connexions se créent, disparaissent ou se renforcent en fonction de différents stimuli et produisent une action, les réseaux de neurones artificiels (ou formels) ajustent des paramètres (baptisés poids synaptiques en référence au fonctionnement biologique du cerveau) en fonction des écarts entre les données de sortie attendues et réelles.

En machine learning, un neurone fait une combinaison linéaire des entrées pondérées qu'il reçoit à laquelle il ajoute une valeur appelée biais égal à 1 mais pondérée aussi. Une fonction non linéaire, dite d'activation, (comme par exemple la sigmoïde) est alors appliquée à la valeur de sortie. Cette valeur est ensuite transmise à la couche de neurone suivante. Chaque neurone effectue ainsi un calcul rudimentaire mais c'est la succession des couches de neurones qui permet d'obtenir des réseaux complexes. Durant cette phase dite «d'entraînement», le réseau va ajuster automatiquement les paramètres de chaque neurone que sont les poids afin de minimiser l'erreur moyenne calculée sur l'ensemble des exemples entre la sortie attendue et celle observée. Après cet entraînement, le réseau est capable de traiter de manière satisfaisante de nouveaux exemples, dont la sortie est inconnue, en fonction de ce qu'il a «appris». Cette phase d'apprentissage peut se faire sur des caractères manuscrits, des objets dans une image, des sons etc.

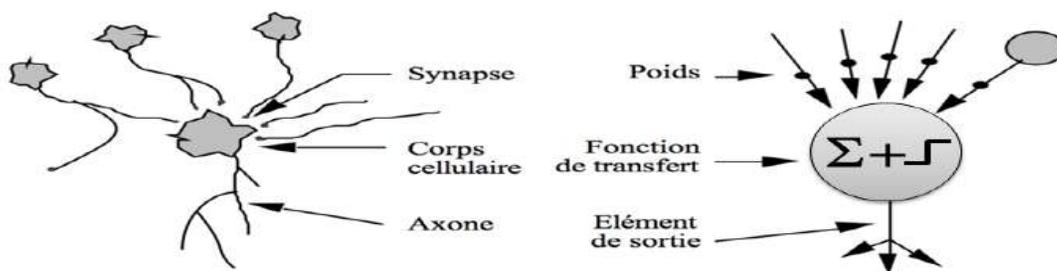


Figure 10: Analogie neurone biologique / neurone artificiel

Un neurone formel ou perceptron, au même titre qu'un neurone biologique, reçoit plusieurs stimuli via les poids. Il analyse ces informations et fournit un résultat en suivant.

Un neurone formel est une représentation artificielle et schématique d'un neurone biologique :

- Les synapses sont modélisées par des poids,
- Le soma ou corps cellulaire est modélisé par la fonction de transfert ou d'activation
- L'axone par l'élément de sortie

Le neurone artificiel est finalement une représentation mathématique inspirée du neurone biologique. Il est caractérisé par

les éléments suivants (Figure 11):

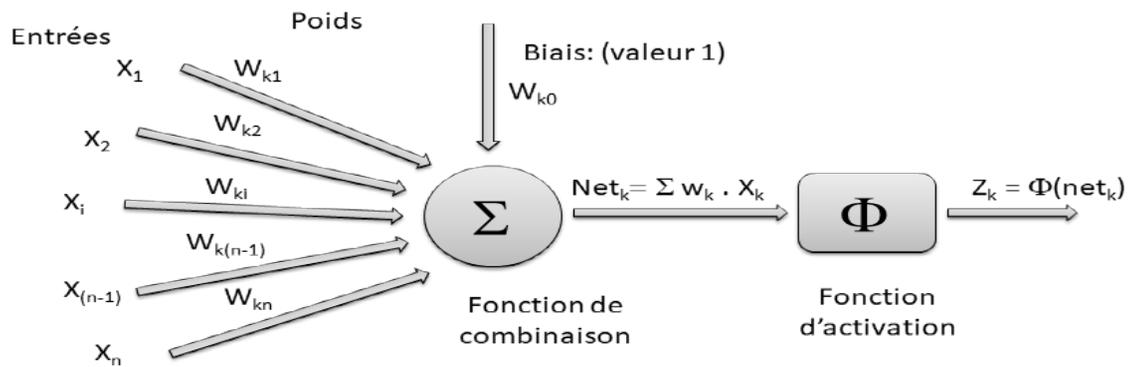


Figure 11: Structure d'un perceptron simple

des entrées de valeurs x_i et ayant un poids w_{ij} pour évaluer l'importance relative d'une entrée par rapport à une autre. Chaque poids possède une valeur notée w_{ij} . Chaque neurone i envoie un stimuli x_i , pondéré par w_{ij} soit $w_{ij} \cdot x_i$. Ainsi le neurone j reçoit plusieurs stimuli dont il fait la somme

$\sum_{i=1}^n w_{ij} \cdot x_i$. Cette somme représente la fonction de combinaison que le neurone formel j doit alors traiter avec la fonction d'activation ou de transfert.

Il est à noter que le biais peut être considéré comme une entrée de valeur 1 et ayant un poids w_{j0} .

Il est à noter que le biais peut être considéré comme une entrée de valeur 1 et ayant un poids .

Limites du perceptron simple:

Malgré son ingéniosité, l'application pratique du perceptron reste tout de même limitée à une valeur binaire, positive ou négative. Mais à son époque, rappelons-nous que la puissance de calcul était un élément majeur qui conditionnait les recherches fondamentales.

Le perceptron sert seulement à résoudre des problèmes linéaires (Cas A de la figure 12). L'une des innovations ultérieures a été l'inclusion de plusieurs perceptrons afin de permettre une plus grande flexibilité et un plus grand champ d'application dans la résolution de problèmes.

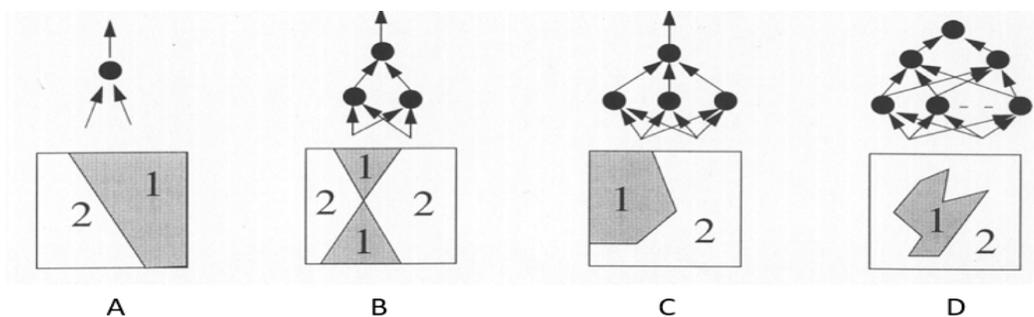


Figure 12: Réseaux de neurones et classification de données 1 et 2

Un perceptron simple ne pourra pas trouver cette frontière de décision entre les éléments bleus et les éléments rouges car son traitement est linéaire et le cas étudié ne l'est pas (cas B de la figure 12).

Pour traiter des cas non linéaires, il faut ajouter des couches de neurones. On obtient alors un réseau de neurones multicouches (Multi layer neural network MLNN) (cas B, C et D de la figure 12).

Les réseaux de neurones multicouches:

Il s'agit comme le nom le sous-entend d'un regroupement de composantes de base appelés neurones qui sont interconnectés entre eux. Le perceptron multicouches fut développée en 1986 par Geoffrey Hinton. Les neurones sont organisés en 3 types de couches (Figure 13):

- **La couche d'entrée** (input layer): Elle contient des neurones qui ont des valeurs correspondant à la représentation sous forme de tenseur de la donnée sur laquelle on souhaite travailler (soit une image, un

texte, ou une liste d'entrées dans une base de données par exemple). Un tenseur est tout simplement une représentation multidimensionnelle de ces données d'entrées. Il peut être un vecteur, une matrice ou une structure de données d'une plus grande dimension.

- **Les couches cachées** (hidden layers): Elles contiennent des valeurs intermédiaires calculées lors de l'entraînement du réseau de neurones afin de «capturer» les variables qui permettront à partir des données entrées, d'obtenir le résultat attendu. Par exemple, les neurones cachés permettront de capturer la relation entre une image d'un chiot (représenté sous forme de tenseur) et la catégorie «chien» dans laquelle il est sensé être classifié.
- **La couche de sortie** (output layer): Elle contient des neurones ayant comme valeurs le résultat de notre opération. Par exemple, Pour un problème de classification d'image de chats et de chiens, on pourra avoir deux neurones de sortie contenant la probabilité que l'image soit effectivement un chat ou un chien.

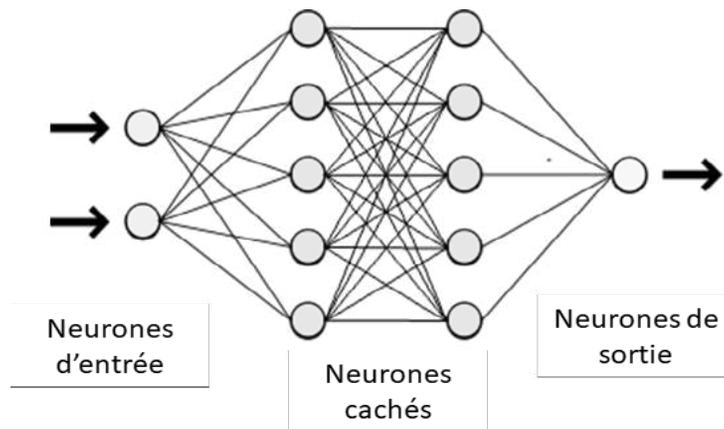


Figure 13: Exemple de réseau multicouche

Chaque neurone j d'une couche k est représenté par le schéma de la figure:

- Chaque poids possède une valeur notée w_{ij} . Cette notation, la plus répandue dans la littérature scientifique, désigne le poids allant d'un neurone formel i au neurone formel j .
- Chaque poids transmet une information/un stimulus provenant du neurone source i noté x_i .
- Ce stimulus (sa valeur) correspondant à l'information envoyée par le neurone source i est modulé par le poids liant les neurones i et j . Mathématiquement cela se traduit par : $w_{ij} \cdot x_i$.
- Ainsi le neurone j reçoit autant de stimuli que de poids, dont il fait la somme $\sum_{i=1}^n w_{ij} \cdot x_i$.

Cette somme représente la fonction de combinaison que le neurone formel j doit alors traiter avec la fonction d'activation ou de transfert.

Selon le type de neurones et le type de leur interconnexion, plusieurs architectures de réseaux de neurones existent permettant de résoudre différents problèmes. Une carte assez complète des options existantes est disponible. Pour vous donner une idée, en général, on utilisera :

- Les réseaux/couches densément ou complètement connectés pour traiter les données à deux dimensions donc pour de simples problèmes de classification de texte ou de transactions par exemple.
- Les réseaux LSTM pour le traitement des données 3D donc dans l'écriture et la reconnaissance de discours par exemple.
- Les réseaux convolutionnels ou convolutifs CNN pour les données 4D et donc idéalement pour le traitement de vidéos/images.

Que ce soit pour un perceptron simple ou pour un réseau de neurones, on utilise dans l'ordre

4. la fonction de combinaison
5. la fonction d'activation
6. l'algorithme de feedforward
7. l'algorithme de backpropagation

La fonction de combinaison:

Chaque couche est différente de l'autre, mais les deux fonctions : combinaison et activation sont toujours les mêmes.

La fonction de combinaison permet de faire une équation toute simple qui ajoute le poids et la valeur de chaque entrée pour déterminer si ce résultat passera la fonction d'activation et permettra au perceptron de s'activer ou non (le perceptron est l'élément le plus simple lorsque vient le temps de représenter une "intelligence artificielle").

Le neurone reçoit des neurones en amont un certain nombre de valeurs via ses connexions synaptiques, et il produit une certaine valeur en utilisant une fonction de combinaison. Cette fonction peut donc être formalisée comme étant une fonction vecteur-à-scalaire, notamment :

- Les réseaux de type MLP (multi-layer perceptron) calculent une combinaison linéaire des entrées, c'est-à-dire que la fonction de combinaison renvoie le produit scalaire entre le vecteur des entrées et le vecteur des poids synaptiques. $\sum_{i=1}^n w_{ij} \cdot x_i$
- Les réseaux de type RBF (Radial Basis Function) calculent la distance entre les entrées, c'est-à-dire que la fonction de combinaison renvoie la norme euclidienne du vecteur issu de la différence vectorielle entre les vecteurs d'entrées.

Chaque entrée, ayant une valeur unique et un poids associé, se voit utilisée dans la fonction de combinaison. Dans le cas de l'exemple simple du perceptron, la fonction de combinaison est une somme pondérée des entrées et des poids synaptiques comme noté ci-avant.

La fonction d'activation ou d'atténuation:

Le rôle de la fonction d'activation ici est d'introduire la non-linéarité pour capturer les relations entre variables indépendantes et dépendantes qui ne peuvent être capturées par de simples additions et produits scalaires. Le bias quant à lui sert augmenter ou diminuer la sensibilité du neurone en déplacement son seuil d'activation (plus de détails sur le rôle et le choix du bias dans le prochain article). Elle a pour objectif de prendre le résultat de la fonction de combinaison et de déterminer si le neurone se déclenchera. Il existe plusieurs types de fonctions d'activation, dont les mérites sont souvent discutés et comparés afin d'améliorer la précision d'un réseau de neurones.

Les fonctions d'activation les plus utilisées sont les suivantes (Tableau 6):

| Activation function | Equation | Example | 1D Graph |
|---|---|---|----------|
| Unit step (Heaviside) | $\phi(z) = \begin{cases} 0, & z < 0, \\ 0.5, & z = 0, \\ 1, & z > 0, \end{cases}$ | Perceptron variant | |
| Sign (Signum) | $\phi(z) = \begin{cases} -1, & z < 0, \\ 0, & z = 0, \\ 1, & z > 0, \end{cases}$ | Perceptron variant | |
| Linear | $\phi(z) = z$ | Adaline, linear regression | |
| Piece-wise linear | $\phi(z) = \begin{cases} 1, & z \geq \frac{1}{2}, \\ z + \frac{1}{2}, & -\frac{1}{2} < z < \frac{1}{2}, \\ 0, & z \leq -\frac{1}{2}, \end{cases}$ | Support vector machine | |
| Logistic (sigmoid) | $\phi(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}}$ | Logistic regression, Multi-layer NN | |
| Hyperbolic tangent | $\phi(z) = \frac{e^z - e^{-z}}{e^z + e^{-z}}$ | Multi-layer Neural Networks | |
| Rectifier, ReLU (Rectified Linear Unit) | $\phi(z) = \max(0, z)$ | Multi-layer Neural Networks | |
| Rectifier, softplus | $\phi(z) = \ln(1 + e^z)$ | Multi-layer Neural Networks | |

Copyright © Sebastian Raschka 2016
(<http://sebastianraschka.com>)

Tableau 6: Fonctions d'activation

Aujourd'hui, la plupart des couches cachées utiliseront la fonction relu comme activation et la fonction softmax pour la couche de sortie afin d'obtenir une variable de sortie entre 0 et 1. Mais plusieurs autres fonctions existent et certains cas comme les problèmes de régression nécessitent même parfois que la couche de sortie n'utilise aucune fonction d'activation sur ses neurones.

L'algorithme de FeedForward:

L'algorithme du feedforward est la transmission des sorties à travers dizaines de couches et de milliers de neurones depuis la couche d'entrée jusqu'à la couche de sortie en passant par les couches cachées pour calculer les valeurs de sorties.

Chaque neurone de la première couche cachée reçoit en entrée les valeurs de la couche d'entrée multipliées par les poids des connections les reliant, le tout passé au travers de la fonction associée à tous les neurones de la couche en question. Ce résultat est ensuite passé comme entrée aux neurones de la seconde couche cachée et ainsi de suite jusqu'à ce que l'on obtienne les résultats de la couche de sortie. Dans une première étape du fonctionnement d'un réseau de neurones, on utilise un ensemble de données d'entraînement (training data set) présenté sous forme de tableau composé de données de référence d'entrées qui seront appliquées et des sorties qui devraient en découler.

L'entraînement d'un réseau de neurones est le processus durant lequel la configuration d'un réseau de neurones est modifiée au fur et à mesure que les données d'entrée y sont passées jusqu'à ce que le réseau soit en mesure de faire prédictions correctes sur des données nouvelles (non utilisées lors de l'entraînement). L'entraînement d'un réseau de neurones comprend deux étapes principales.

Une fonction de coût (cost function) va permettre de calculer la différence entre le résultat donné par le réseau et le résultat attendu. Cette différence sert à modifier les poids des connections afin que les prochaines prédictions soient plus précises. C'est cela l'entraînement du réseau de neurones. Les poids des connections sont d'abord initialisés avec des valeurs arbitraires puis affinés, ensuite, au fur et à mesure de l'entraînement selon la différence entre la prédiction et les résultats attendus. La mise à jour des poids se fait en utilisant un algorithme appelé rétropropagation du gradient de descente.

L'algorithme rétropropagation du gradient de descente:

Pour obtenir un réseau de neurones efficient qui a appris au moyen du training data set et qui donne donc les résultats attendus, on utilise un algorithme de rétropropagation (backpropagation) consistant à minimiser l'erreur matérialisée par la différence entre le résultat de référence attendu (du training dataset) et le résultat (sortie) donné par le réseau de neurone. Sitôt cette erreur minimisée, le réseau devient prêt à traiter d'autres cas que le training set. Pour minimiser l'erreur précitée, on utilise l'algorithme de descente de gradient.

La Descente de Gradient, (ou Gradient Descent en anglais) est un des algorithmes les plus importants de tout le Machine Learning et de tout le Deep Learning. Il s'agit d'un algorithme d'optimisation extrêmement puissant qui permet d'entraîner les modèles de régression linéaire, régression logistiques ou encore les réseaux de neurones.

La Descente de Gradient est un algorithme d'optimisation qui permet de trouver le minimum de n'importe quelle fonction convexe en convergeant progressivement vers celui-ci.

Une fonction convexe est une fonction dont l'allure ressemble à celle d'une belle vallée avec au centre un minimum global. A l'inverse, une fonction non-convexe est une fonction qui présente plusieurs minimums locaux et l'algorithme de descente de gradient ne doit pas être utilisé sur ces fonctions, au risque de se bloquer au premier minima rencontré (Figure 14).

L'algorithme de la Descente de Gradient est utilisé dans les problèmes d'apprentissage supervisé pour minimiser la fonction coût (fonction erreur), qui justement est une fonction convexe (par exemple l'erreur quadratique moyenne). C'est grâce à cet algorithme que la machine apprend, c'est-à-dire trouve le meilleur modèle.

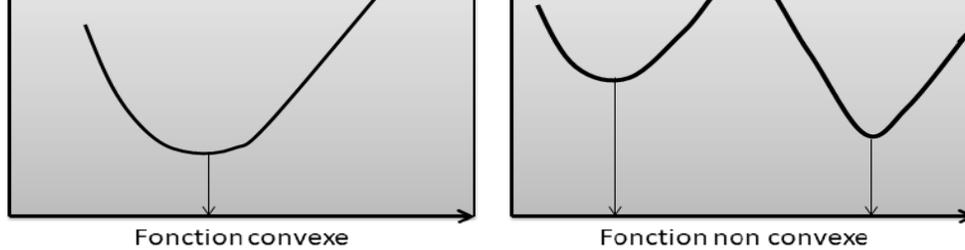


Figure 14: Minima des fonctions convexes et non convexes

Il s'agit de minimiser l'erreur qui est l'écart entre la valeur attendue (target) t_k et la valeur donnée par le réseau de neurones. Cette erreur E peut être déterminée au moyen de la mean square error MSE (erreur quadratique moyenne):

$$E = 1/2 [\sum (Vc - Vr)^2]$$

avec : valeur cible et Vr: valeur donnée par le réseau de neurones.

Le but est de déterminer à partir de l'erreur globale constatée à la sortie du réseau de neurone, les modifications à apporter aux poids w des différents nœuds pour que cette erreur soit minimale.

$$E(W) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^c (t^k - z^k)^2 = \frac{1}{2} \|t - Z\|^2 \quad (\text{Training error})$$

$$\Delta w = -\theta \frac{\delta E[w(m)]}{\delta w(m)} \quad \theta : \text{taux d'apprentissage (learning rate)} > 0$$

$$w(m+1) = w(m) + \Delta w(m)$$

Pour corriger les poids w , il faut déterminer $\frac{\delta E}{\delta w_{kj}}$

$$\frac{\delta E}{\delta w_{kj}} = \frac{\delta E}{\delta z_k} \cdot \frac{\delta z_k}{\delta net_k} \cdot \frac{\delta net_k}{\delta w_{kj}}$$

$$\frac{\delta E}{\delta z_k} = -(t_k - z_k)^2$$

$$\frac{\delta z_k}{\delta net_k} = \phi'(net_k) \quad \text{avec} \quad z_k = \phi(net_k)$$

Dans le cas d'une fonction d'activation ϕ sigmoïde, $\phi(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$ sa dérivée est alors donnée par l'expression:

$$\phi(x)' = \phi(x) \cdot [1 - \phi(x)]$$

Q étant la fonction d'activation dont l'expression est connue

$$net_k = \sum_j^n w_j \cdot y_{kj} \quad \text{avec} \quad y_0 = 1$$

$$\frac{\delta net_k}{\delta y_j} = y_j$$

$$\frac{\delta E}{\delta y_j} = \sum_{k=1}^c \left(\frac{\delta E}{\delta z_k} \cdot \frac{\delta z_k}{\delta y_k} \right) = - \left\{ \sum_{k=1}^c [(t_k - z_k) \cdot \frac{\delta z_k}{\delta y_k}] \right\} = - \left\{ \sum_{k=1}^c (t_k - z_k) \cdot \frac{\delta z_k}{\delta net_k} \cdot \frac{\delta net_k}{\delta w_{kj}} \right\} = - \left\{ \sum_{k=1}^c (t_k - z_k) \cdot \phi'(net_k) \cdot w_{kj} \right\}$$

$$\Delta w_{jl}(m) = -\theta \cdot \frac{\delta E[w(m)]}{\delta w_{jl}(m)} \quad \theta: \text{taux d'apprentissage}$$

La figure 15 donne une image des différentes itérations de l'algorithme de descente de gradient.

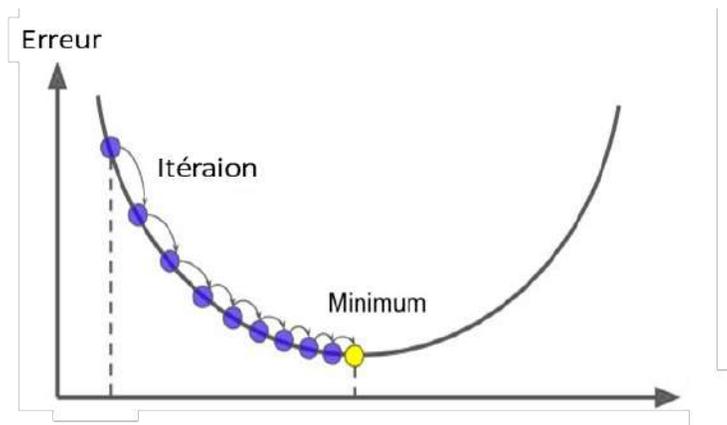


Figure 15: Algorithme de descente de gradient

Learning Rate : le rôle de l'hyper-paramètre alpha:

En Machine Learning, on appelle le learning rate α un Hyper-paramètre, parce qu'il n'est pas à proprement parler un paramètre de notre modèle, mais il a tout de même un impact sur la performance finale de notre modèle comme les paramètres du modèle. Il est compris entre 0 et 1.

- Si ce **Learning Rate** est **trop grand**, alors on fait de trop grands pas dans la descente de gradient et cela permet de descendre rapidement vers le minimum de la fonction coût mais on risque de rater ce minimum en oscillant autour à l'infini.
- Si le Learning Rate trop petit, on risque de mettre un temps trop grand avant de converger vers le minimum de la fonction coût.

Pour trouver le bon Learning Rate, il n'existe malheureusement pas de formule magique. Le plus souvent, on tâtonne avec plusieurs valeurs pour trouver la bonne. On appelle ça l'Hyperparameter Tuning (le réglage des hyper-paramètres). Néanmoins, un bon Learning Rate se situe souvent aux alentours des $\alpha = 0,01$.

Optimisation des poids par la descente du gradient:

Ce processus d'optimisation des résultats du réseau s'appelle descente du gradient stochastique (mini-batch Stochastic gradient descent). Le terme stochastique fait simplement allusion au fait que les données d'entrée sont passées à travers le réseau, lot par lot et que ces lots de données sont tirés de façon aléatoire.

Chaque fonction de perte possède des minimum locaux et des minimums globaux. Le rôle du pas est de réduire le nombre d'itérations nécessaires pour atteindre le minimum global. Un pas trop petit peut rendre le temps de convergence vers les paramètres optimaux trop long (modifications trop petites des poids) ou entraîner la sélection d'un minimum local au lieu d'un minimum global (au bout d'un certain nombre d'itérations ne générant pas de perte plus petite). Un pas trop grand peut au contraire nous faire rater le minimum (en modifiant les poids de façon trop importante) donc le pas doit être sélectionné avec soin.

Plusieurs variantes de l'algorithme de la descente du gradient existent. Dans le cas décrit plus haut, il s'agit de l'algorithme de descente du gradient stochastique mini-lot. Quand, au lieu d'un lot de données, un seul élément est passé à travers le réseau à la fois, on parle de vraie descente du gradient stochastique et quand toutes les données d'entrée sont passées à chaque itération, on parle de descente du gradient stochastique par lot. Il existe de nombreuses variantes de descente du gradient stochastique appelées optimisateurs telles que Adagrad ou encore RMSProp.

Les couches d'un réseau de neurones sont chaînées de manière à ce que les résultats d'une couche sont les données d'entrée de la suivante calculant ainsi les données de la couche sortie à base des valeurs de la première couche. De la même manière, la perte (le coût) de la prédiction est répercutée en changement de tous les poids du réseau de neurones mais cette fois-ci de la dernière à la première couche.

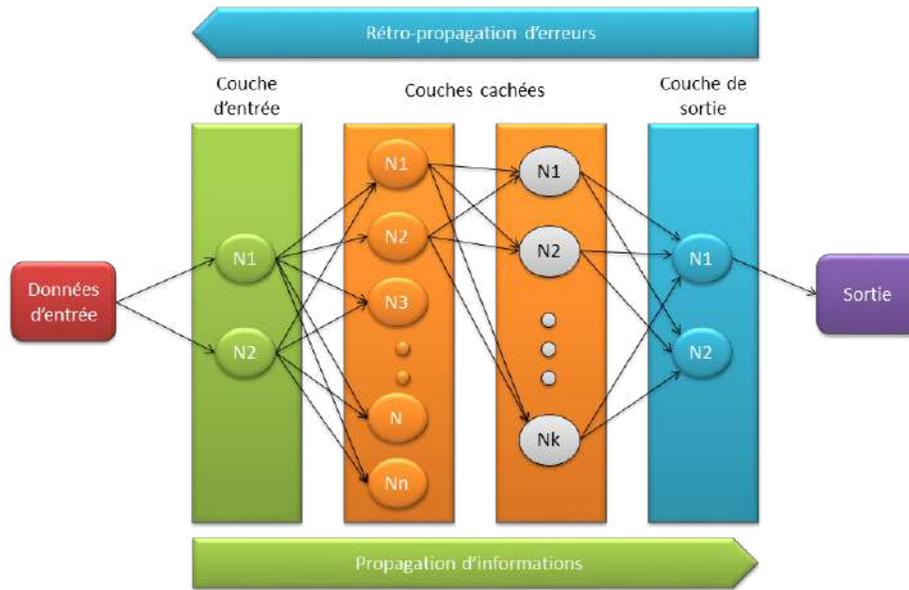


Figure 16: Rétro-propagation en réseau de neurones

Les étapes de l'algorithme sont les suivantes (Figure 16) :

- Tirer un lot de données d'entraînement X_i et les prédictions correctes Y_i correspondantes.
- Exécuter l'algorithme du feedforward pour obtenir les Y_i' prédits.
- Calculer la différence/perte entre les sorties attendues (cibles ou targets) et obtenues en utilisant la fonction de perte (MSE ou autre)
- Calculer le gradient (la dérivée) de la fonction de perte avec comme valeurs des inconnues, les paramètres du réseau qui ont généré les résultats obtenus.
- Modifier les poids des connexions du réseau dans la direction réduisant le gradient suivant la formule :
- À l'issue du processus de feedforward des résultats $Y = [1 \dots m]$ sont obtenus et comparés avec les résultats corrects Y' . On calcule la perte/le coût avec : $\text{Coût} = f(Y - Y')$ en utilisant une fonction appropriée.
- D'après l'algorithme du feedforward, les résultats de chaque couche sont générés par une fonction des valeurs des neurones de la couche précédente et des poids des liaisons qui les relie. Ainsi, pour modifier les valeurs $[1 \dots m]$ pour se rapprocher du résultat correct Y' , il faut modifier les valeurs des poids $[W_{11} \dots W_{mp}]$ mais aussi celles des neurones $[1 \dots p]$.
- Récursivement, afin de modifier les neurones de la couche cachée $[1 \dots p]$, il faut agir sur les poids $[V_{11} \dots V_{pn}]$. Ainsi donc la perte associée à chaque prédiction est propagée en termes de modifications de poids à travers le réseau jusqu'à la couche d'entrée d'où le nom : Rétropropagation du gradient.

Différents types d'algorithmes de deep learning:

Pour répondre aux besoins de traiter différents problèmes constituant une palette très diversifiés et de complexités différentes, plusieurs types de réseaux de neurones ont été développés (Tableau 7). Chacun est bien adapté pour un ensemble d'applications.

| | Types de Réseaux | Applications |
|-----------------------------|--|--|
| Algorithme de deep learning | Réseau de neurones artificiels (Artificial Neural Networks ANN) | Prévisions Classifications |
| | Réseau de neurones convolutifs (Convolutional Neuron Networks CNN) | Analyse d'images Analyse de texte Analyse de sons |
| | Réseau antagoniste génératif (Generative adversarial Networks GAN) | Génération d'images Génération de jeux de données Génération de textes Génération de voix |
| | Réseau de neurones récurrents (Recurrent Neural Networks RNN) | Prévisions (maintenance prévisionnelle, prévisions de stocks) Langage naturel (analyse de texte, génération de texte) |

Tableau 7: Principaux algorithmes de Deep Learning (crédit : Lambert Rosique)

Ils sont simples et efficaces et constituent un très bon point d'entrée dans la logique « en couches » du deep learning, et trouvent des applications dans toutes sortes de prédictions à base de nombres et de classifications.

Les réseaux de neurones convolutifs (Convolutional Neural Networks, ConvNets ou CNN):

Proposés par Yann LeCun dès les années 90, ils sont inspirés des processus biologiques du cortex visuel des animaux et permettent de transformer un problème global de reconnaissance d'image en une succession d'étapes plus faciles à résoudre. L'architecture des CNN comprend (Figure 17):

- une alternance de couches de traitement (couches de convolution, d'activation et de simplification ou pooling) qui permettent d'extraire des caractéristiques (features),
- puis des couches semblables à celle d'un MLP classique (couches Fully Connected) qui, après mise à plat (flattening) des « cartes » issues de l'extraction de caractéristiques, effectuent la classification finale.

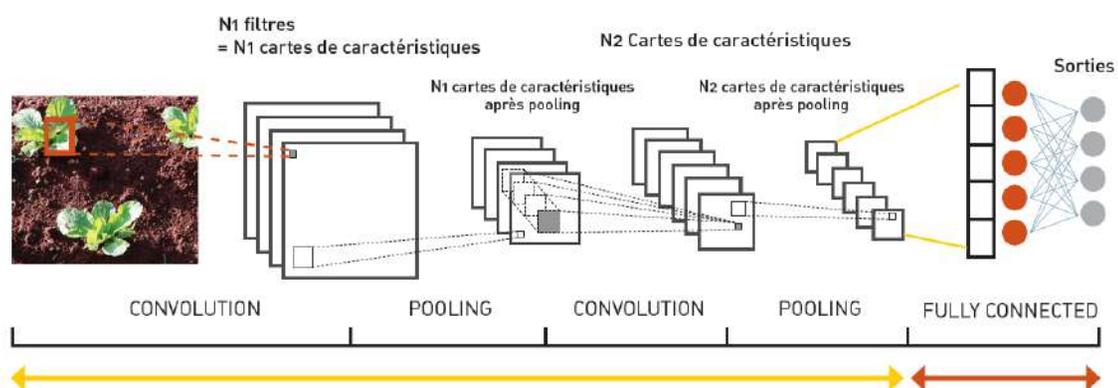


Figure 17: Schéma de fonctionnement de réseau convolutif

Les réseaux de neurones convolutifs reçoivent des images en entrée, détectent les «*features*» (caractéristiques) de chacune d'entre elles, puis entraînent un classifieur dessus. Les *features* sont apprises automatiquement ! Les CNN réalisent eux-mêmes tout le boulot fastidieux d'extraction et de description de *features* : lors de la phase d'entraînement, l'erreur de classification est minimisée afin d'optimiser les paramètres du classifieur et les *features*. L'extraction et la hiérarchisation automatiques des *features*, qui s'adaptent au problème donné, constituent une des forces des réseaux de neurones convolutifs. Contrairement aux techniques d'apprentissage supervisé, les réseaux de neurones convolutifs apprennent les *features* de chaque image. C'est là que réside la force de ces réseaux : dans leur capacité d'extraction automatique de *features* contrairement aux techniques d'apprentissage

Comme les MLP, ces réseaux ont un fonctionnement par propagation vers l'avant. Mais à la différence des MLP, toutes les couches ne sont pas entièrement connectées. Ainsi, au premier niveau de couches, ce que l'on observe est une combinaison de pixels sur un petit voisinage. Au deuxième niveau, c'est une combinaison des combinaisons issues du niveau précédent et ainsi de suite. Les premiers niveaux permettent d'extraire des constituants élémentaires (des petites portions de contours, des points, des zones homogènes...) et plus on progresse vers les couches profondes, plus on obtient des combinaisons complexes donc de plus en plus abstraites.

La convolution consiste à faire glisser des filtres sur les images pour faire ressortir de façon marquée certaines caractéristiques (1 filtre = 1 type de caractéristique). Un filtre est en fait une matrice de poids. C'est l'opérateur qui choisit l'architecture du réseau (nombre et taille des filtres...) mais c'est la machine qui, par l'apprentissage, va découvrir les bons poids à appliquer et ainsi construire ses filtres sur mesure.

De par leur nature, ces réseaux sont principalement utilisés en analyse d'images mais leur utilisation se diversifie sur bien d'autres cas dès lors qu'il est possible d'extraire des sous éléments comme on extrait des pixels d'une image. Par exemple, un signal audio peut être décomposé en

un ensemble de petits morceaux plus courts et chacun de ces morceaux peut être décomposé en différentes bandes de fréquence.

Les réseaux antagonistes génératifs (Generative Adversarial Networks ou GANs):

Ce sont des algorithmes d'apprentissage non-supervisé qui reposent sur l'association de deux réseaux de neurones en compétition (Figure 18). L'un, dit le générateur, qui est convolutif, a pour but de créer des données similaires aux échantillons de données réelles. L'autre, le discriminateur (« adversaire ») (qui est déconvolutif), reçoit à la fois des données réelles et des données « fausses » créées par le générateur. Sa tâche est d'identifier quels échantillons sont réels et quels sont ceux qui sont faux. Les deux réseaux apprennent par feedback: le générateur est informé des données qui ont été reconnues comme fausses que le discriminateur des données avait considérées vraies alors qu'elles étaient fausses (et vice-versa). Ces réseaux sont ceux qui sont utilisés pour créer de belles images extraordinaires. Mais au-delà de cet usage qui pourrait sembler gadget, ces réseaux sont aujourd'hui utilisés dans des processus de « débruitage » d'images, de détection et de cartographie d'anomalies, dans les domaines industriel et médical notamment. En effet, pour créer des échantillons réalistes ou pour distinguer les vrais des faux, les deux réseaux doivent bien « comprendre » les échantillons de l'ensemble de données, vraies et fausses, en en dégagant les caractéristiques. En se renforçant l'un l'autre, ces réseaux peuvent fonctionner avec moins de données d'apprentissage que d'autres.

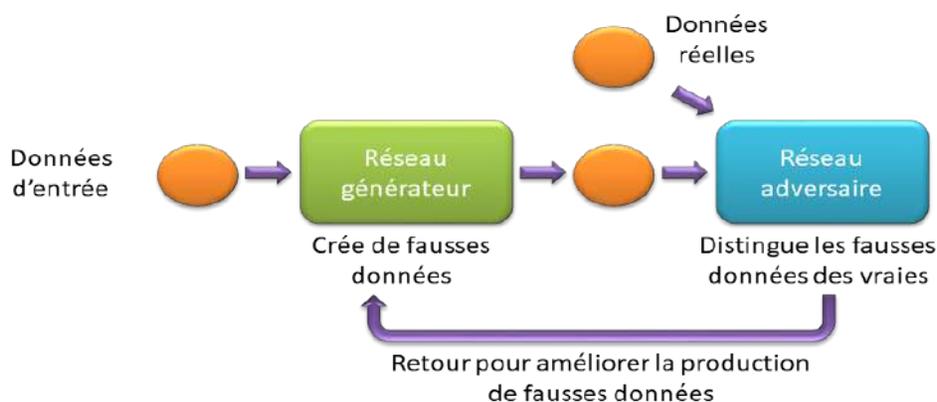


Figure 18: Schéma de principe d'un GAN

Les réseaux neuronaux récurrents (RNR ou Recurrent Neural Networks, RNN, en anglais):

Lorsqu'on monte encore en complexité, on trouve les neurones récurrents (ou RNN pour Recurrent Neural Networks) qui sont des réseaux de neurones dans lesquels l'information peut se propager dans les deux sens, y compris des couches profondes aux premières couches.

Un réseau de neurones récurrent peut être considéré comme plusieurs copies du même réseau dont chacune transmet un message à celle qui lui succède (Figure 19).

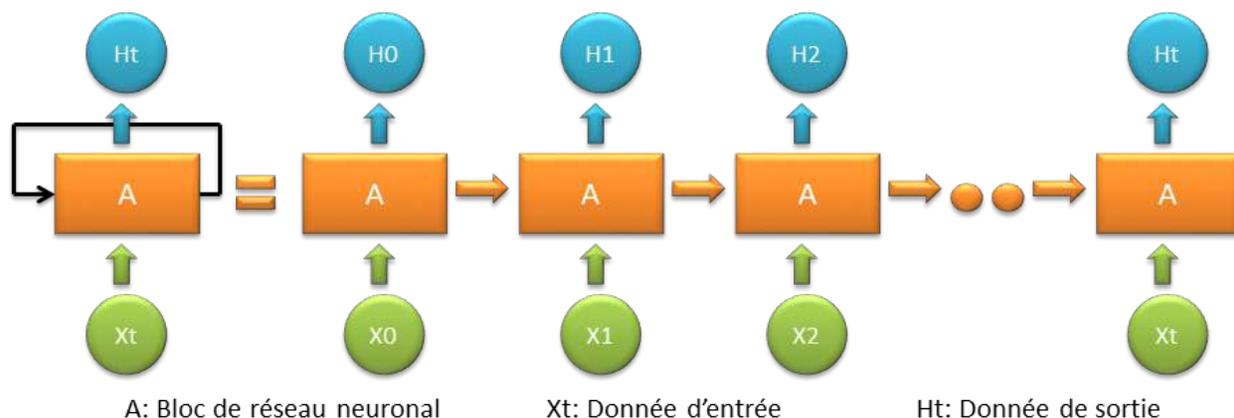


Figure 19: Principe général d'un réseau de neurones récurrents (vue "déroulé")

Ces réseaux peuvent intervenir lorsqu'une dimension temporelle ou le traitement de séquences est à prendre en compte. En effet, en intégrant au moins une boucle dans la structure du réseau (d'où le terme récurrents ou récursifs, ils permettent aux informations de persister et visent ainsi à traduire l'une des propriétés de l'intelligence : la capacité à se remémorer le passé pour mieux prédire et planifier.

Les RNN traditionnels permettent de se remémorer des informations court terme c'est-à-dire acquises lors du cycle précédent. Des versions plus sophistiquées de ces réseaux, tels les réseaux de neurones récurrents à mémoire long terme et court terme ou LSTM (Long Short Term Memory) ou encore les GRU (Gated Recurrent Unit), sont capables d'apprendre des dépendances à long terme. Ils constituent un axe de recherche prioritaire car ils permettent de prendre en compte des notions de contexte pour affiner une prédiction.

A chaque nouvelle entrée, le système met à jour l'état d'une mémoire à court terme et d'une mémoire à long terme à partir des nouvelles observations et de l'état de la mémoire à court terme de la date antérieure. Des portes (ou gates) permettent d'oublier certaines informations qui ne sont plus jugées pertinentes (elles sont alors enlevées de la mémoire à long terme), de sélectionner l'information pertinente à ajouter dans la mémoire à long terme ou de sélectionner l'information à transmettre à la date suivante. On peut ainsi pour chaque date si on le souhaite proposer des probabilités d'appartenance aux classes attendues en sortie.

En cela, ils sont plus proches du vrai fonctionnement du système nerveux, qui n'est pas à sens unique. Ces réseaux possèdent des connexions récurrentes au sens où elles conservent des informations en mémoire : ils peuvent prendre en compte à un instant t un certain nombre d'états passés. Pour cette raison, les RNNs sont particulièrement adaptés aux applications faisant intervenir le contexte et plus particulièrement au traitement des séquences temporelles comme l'apprentissage et la génération de signaux c'est à dire quand les données forment une suite et ne sont pas indépendantes les unes des autres.

Les RNN sont utilisés, par exemple, pour l'analyse du langage naturel : pour la traduction, la production de légendes pour les images, les systèmes de dialogues. Nous verrons également que des travaux de recherche en cours visent à les exploiter pour le traitement de séries temporelles d'images en vue de prédire les types de cultures par exemple.

Néanmoins, pour les applications faisant intervenir de longs écarts temporels (typiquement la classification de séquences vidéo), cette « mémoire à court-terme » n'est pas suffisante. En effet, les RNNs « classiques » (réseaux de neurones récurrents simples ou Vanilla RNNs) ne sont capables de mémoriser que le passé proche, et commencent à « oublier » au bout d'une cinquantaine d'itérations environ. Ce transfert d'information à double sens rend leur entraînement beaucoup plus compliqué, et ce n'est que récemment que des méthodes efficaces ont été mises au point comme les LSTM (Long Short Term Memory). Ces réseaux à large « mémoire court-terme » ont notamment révolutionné la reconnaissance de la voix par les machines (Speech Recognition) ou la compréhension et la génération de texte (Natural Language Processing). D'un point de vue théorique, les RNNs ont un potentiel bien plus grand que les réseaux de neurones classiques.

Les frameworks et plateformes de deep learning:

Le développement rapide du Deep Learning est favorisé par le fait que l'écosystème, au départ initié par le monde de la recherche, est majoritairement open source. Il est ainsi « relativement » simple pour quelqu'un ayant des connaissances de base en

informatique et/ou mathématique de faire fonctionner des réseaux de neurones en s'appuyant sur des frameworks en accès libre, des infrastructures de développement permettant aux développeurs d'accéder facilement à des bibliothèques d'algorithmes pré-établis. Les principaux frameworks utilisés en deep learning : PyTorch de Facebook, TensorFlow de Google, keras (open source), Caffe2, Theano, Sonnet de DeepMind, MXNet (Open source), ONNX de Microsoft et de Facebook, H2O etc. Ces frameworks sont très documentés et nourris en continu par une grande communauté de contributeurs. Ils sont en général compatibles avec plusieurs langages informatiques (Python, C++, R, ...)

L'intérêt pour les grandes firmes est d'inviter ensuite les développeurs et data scientists à rejoindre leurs services payants sur le cloud, notamment pour toutes les plateformes Amazon Sagemaker, Azure ML Studio de Microsoft, Facebook Learner, IBM Watson Studio, Deep Cognition, Dataiku, DataRobot et C3 – AI Suite etc. et les services hébergés dans le Cloud.

En parallèle de ces fournisseurs d'infrastructures et de services Deep Learning, se développent également rapidement les fournisseurs de « Hardware », notamment ceux qui permettent d'exécuter les calculs pour l'apprentissage (GPU de NVIDIA, AMD, Intel, Google...).

Applications du deep Learning:

Le deep Learning est utilisé dans de nombreux domaines :

- reconnaissance d'image,
- traduction automatique,
- voiture autonome,
- diagnostic médical,
- recommandations personnalisées,
- modération automatique des réseaux sociaux,
- prédiction financière et trading automatisé,
- identification de pièces défectueuses,
- détection de malwares ou de fraudes,
- **chatbots** (agents conversationnels),
- exploration spatiale,
- robots intelligents.

Articulations intelligence artificielle, machine learning et deep learning:

Finalement on peut affirmer que l'intelligence artificielle englobe le machine learning. En effet, les systèmes experts, par exemple, font partie de l'IA mais ne font pas partie du machine learning car ils sont basés sur des règles et non sur un apprentissage. Le machine learning, à son tour, comprend le deep learning en raison de l'apprentissage opéré dans les réseaux de neurones (Figure 20).

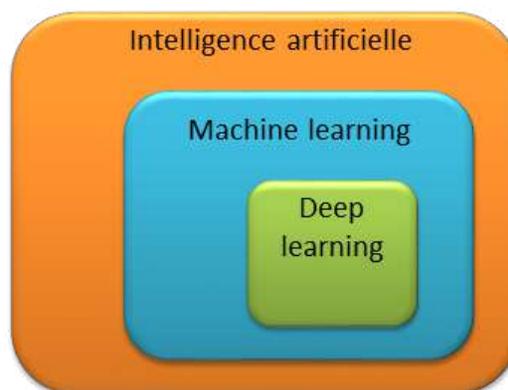


Figure 20: Intelligence artificielle, machine learning et deep learning

Simulation numérique:

La simulation numérique est une représentation de phénomènes physiques complexes rendue possible grâce à une série de calculs et un modèle mathématique. La méthode la plus répandue est celle des éléments finis. C'est le moyen de

simuler de manière virtuelle un produit et son comportement dans son environnement final.

Un simulateur peut réagir à des modifications de paramètres et modifier ses résultats en conséquence. Un simulateur de vol, par exemple, modifie la trajectoire calculée de l'avion en fonction des commandes transmises par l'utilisateur.

Une simulation numérique peut représenter des phénomènes physiques complexes dont la description repose sur un modèle mathématique comportant des équations aux dérivées partielles. L'ordinateur résout alors ces équations numériquement en utilisant la méthode des éléments finis. C'est le cas, par exemple, pour la modélisation, dans la mécanique des fluides, de l'écoulement de l'air ou de l'eau autour d'un avion ou d'un navire, la déformation d'une pièce etc.

La simulation peut concerner :

- un objet: comportement sous sollicitation, un usinage de pièce, le comportement en environnement agressif etc
- un processus; processus de production, un vol d'avion etc
- un homme: comportement en environnement agressif, accident etc

Tout peut faire l'objet de simulation tant qu'il peut être modélisé.

La simulation numérique permet une meilleure prise en compte des besoins et des contraintes ainsi qu'une modification rapide des paramètres à moindres coûts. Cela permet, par conséquent, de tester des concepts innovants plus facilement. Certaines techniques d'optimisation permettent également de faire des économies rationnelles de matériaux et d'améliorer la qualité et la durée de vie des produits et/ou d'optimiser des processus de production.

Lorsqu'une entreprise cherche à décrire un phénomène et à résoudre une problématique, elle a souvent besoin d'expérimenter les implications de divers facteurs sur une situation initialement connue. Or, une expérimentation en situation réelle peut se révéler extrêmement coûteuse, prendre un temps considérable à l'entreprise, et donner des résultats dont la fiabilité n'est pas garantie.

Les avantages de la modélisation et de la simulation numérique sont doubles :

- Tout d'abord, il est beaucoup moins coûteux de simuler une expérience sur ordinateur que de la réaliser en réalité. Le processus est incomparablement moins onéreux.
- Par ailleurs, soumettre artificiellement les données à un modèle est bien plus simple que de tester les implications de données diverses en situation réelle. Or, en multipliant les données, on réduit la marge d'erreur et on obtient un jumeau numérique (prototype numérique) fiable et précis.

La simulation réaliste, c'est être capable de réaliser des analyses complexes en tenant compte de plusieurs facteurs simultanément, de faire moins d'hypothèses, pour des résultats plus robustes, plus fiables et qui représentent réellement le comportement de vos produits. La simulation devient un prototype à part entière et permet ainsi d'atteindre réellement les performances optimales recherchées (Figure 21).

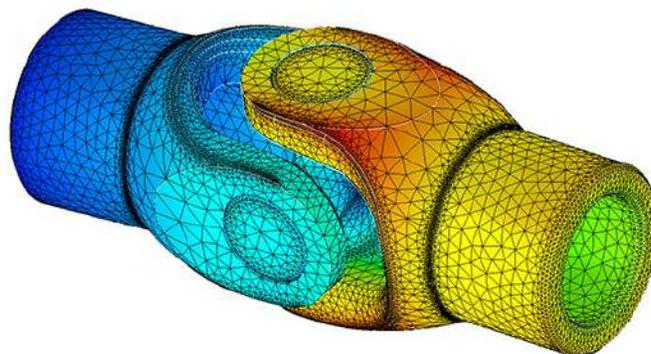


Figure 21: Simulation des sollicitations dans une articulation

La simulation numérique est un segment très porteur sur le marché du PLM depuis plusieurs années et les prévisions de croissance sont sur la même tendance (entre 5 et 10%). L'amélioration constante des performances machines et les interfaces toujours plus intuitives accélèrent la démocratisation de ces solutions et leur développement au sein des entreprises.

Jumeau numérique (digital twin):

Grâce à la transformation numérique offerte par l'industrie 4.0, on peut créer des jumeaux numériques qui sont des répliques virtuelles des processus, des lignes de production, des usines et des chaînes d'approvisionnement. Un jumeau numérique est créé à partir des données des capteurs IoT, des appareils, des contrôleurs logiques numériques et d'autres objets connectés à Internet. Les fabricants peuvent utiliser des jumeaux numériques pour accroître la productivité, améliorer les flux de travail et concevoir de nouveaux produits. En simulant un processus de production, par exemple, les fabricants peuvent tester les modifications apportées au processus, afin de trouver des moyens de réduire les temps d'indisponibilité ou d'améliorer la capacité.

Le jumeau numérique est une réplique numérique "exacte" d'un objet physique (Figure 22), qui tient compte :

- des matériaux utilisés pour sa fabrication et de leurs propriétés
- des interactions avec l'environnement physique réel : sollicitations mécaniques, température, humidité, vibration, etc.

Le jumeau numérique est ainsi en permanence nourri de données récoltées par des capteurs (IIoT) placés sur son jumeau physique.

Cette technologie permet, entre autres :

- d'améliorer la conception de produit, processus etc
- de tester de nouveaux régimes de production sans avoir à réaliser de prototype physique
- de former des opérateurs sur le modèle numérique, sans devoir attendre l'arrivée d'une nouvelle machine.



Figure 22: Exemple de jumeau numérique d'un ensemble motopompe

Exemple d'application:

Les cinématiques des machines d'usinage sont de plus en plus complexes et les risques de collision sont importants. Grâce au jumeau numérique, les opérateurs en usinage sont désormais en mesure de vérifier l'absence de risque de collision, sur machine virtuelle, avant de lancer l'usinage.

Essentiellement, le jumeau numérique consiste à connecter le monde physique au monde virtuel par le biais de données et d'informations.

Il n'est donc pas surprenant que l'IoT et les capacités accrues de collecte et de traitement des données permettent au jumeau numérique de devenir une réalité.

Un jumeau numérique repose sur la disponibilité d'informations complètes telles que des données fournies par des capteurs, des rapports d'inspection de la qualité, voire des commentaires des clients. Il doit également fonctionner avec les actifs, les produits et les processus existants.

Réalité Augmentée:

La réalité augmentée (ou AR pour Augmented Reality) permet d'ajouter des informations dans le champ visuel grâce à des casques, des lunettes ou des tablettes. Ainsi la personne voit la réalité mais avec, en plus, des informations en surimpression sur le moyen visuel utilisé. La RA fait coexister spatialement et temporellement un monde virtuel avec l'environnement

réel. Cette coexistence a pour objectif l'enrichissement de la perception de l'utilisateur de son environnement réel par des augmentations visuelles, sonores ou haptiques. L'environnement peut être d'intérieur (« indoor ») ou d'extérieur (« outdoor »). L'utilisateur peut être présent dans l'environnement réel (réalité augmentée en vision directe sur site) ou peut le percevoir à distance (réalité augmentée en vision indirecte généralement hors site). La virtualité augmentée est la présence d'objets physique dans un environnement virtuel comme par exemple la visite d'un musée en virtuel (Figure 23).

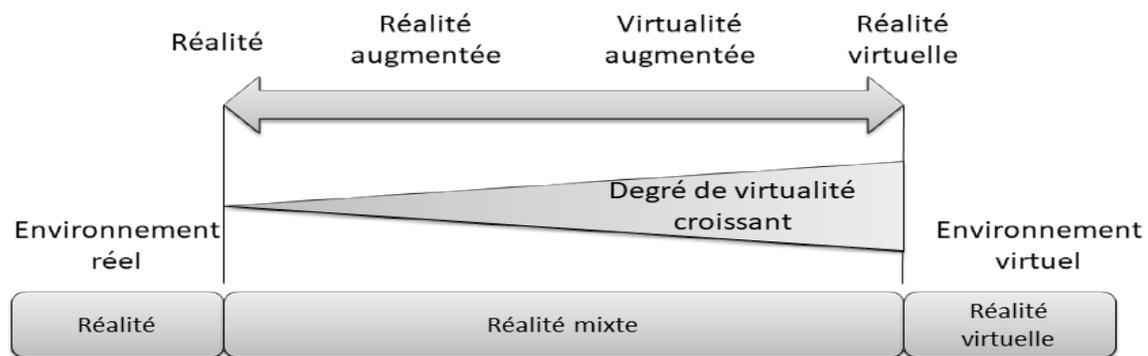


Figure 23: Continuum «réalité-virtualité»

La réalité augmentée est une technologie qui permet de superposer des informations virtuelles à l'environnement réel (Figure 24). Dans l'industrie, il peut s'agir :

- de la maintenance de machines
- d'éléments à assembler sur un moteur, un véhicule, etc.
- de l'intervention sur des tableaux électriques

La réalité augmentée présente de très nombreuses applications dans l'industrie, car elle permet :

- d'afficher tous types d'informations, de manière dynamique et ergonomique, ce qui remplacera, à terme, l'utilisation de manuels en papier
- de faciliter la formation des opérateurs et techniciens, en sollicitant leur mémoire gestuelle et visuelle
- de gagner en productivité, en éliminant les erreurs de montage ou de maintenance
- d'améliorer la maintenance et donc la qualité de la production, en permettant par exemple de faire des contrôles automatiques de positionnement de composants



Figure 24: Exemple de réalité augmentée sur tablette

Fabrication additive:

La fabrication additive s'oppose à la fabrication soustractive où l'on enlève de la matière pour atteindre la forme désirée comme le fraisage, le tournage, le perçage etc. Dans la fabrication additive, les pièces en 3D sont construites par addition de couches successives de matière sous contrôle d'un ordinateur (Figure 25). À ses débuts, l'impression 3D a principalement

été utilisée pour le prototypage rapide, mais les fabricants ont rapidement découvert le potentiel offert par ce nouveau processus de fabrication. Avoir recours à la fabrication additive, en particulier dans les applications de pointe comme celles de l'aérospatiale et de l'automobile, permet non seulement de produire efficacement des composants, mais aussi d'en créer de nouveaux, innovants, qui n'étaient pas réalisables auparavant. Certains des matériaux les plus utilisés pour ces applications exigeantes, comme l'Inconel 718 et titane Ti6Al4V peuvent être utilisés en impression 3D.

La « fabrication additive » (FA) est connue aussi sous d'autres dénominations telles que "impression 3D", "prototypage rapide", "fabrication rapide", "fabrication numérique directe" ou "fabrication par couche". Appelé communément "impression 3D", le terme "fabrication additive" est celui à employer dans un cadre industriel. En effet, les processus de fabrication additive sont tous "additifs" mais tous ne s'apparentent pas à de «l'impression».

Cette technologie, inventée dans les années 1980, commence à s'imposer, du fait de son atout majeur : la réalisation de pièces de forme aussi complexe qu'on le souhaite et en un temps très court. Cette technologie en constante évolution permet de supplanter la fabrication de certaines pièces réalisées jusqu'à présent par des procédés traditionnels. Aujourd'hui, des pièces de formes complexes peuvent être réalisées à l'aide de cette technologie.

L'impression 3D permet de réaliser avec une très grande précision, de façon automatique sans intervention d'opérateur de fabrication, un objet tel qu'il a été conçu sur ordinateur (CAO). Cette technologie présente les avantages suivants:

- **Réduction du « Time to market »** : la fabrication additive peut fabriquer le prototype en quelques minutes ou quelques heures à partir de la conception CAO. Le développement classique de prototypes prenait beaucoup de temps et était coûteux et nécessitait parfois une intervention même au niveau de la ligne de production.
- **Personnalisation plus rapide** : la personnalisation dans le système de production traditionnel est très complexe. Mais avec la fabrication additive, il est facile de modifier le produit à faible coût et de manière efficace selon la demande du client. Le processus de fabrication peut être également adapté en peu de temps.
- **Zéro déchet** : la fabrication additive peut produire des composants de manière plus efficace et à moindre coût car elle ne génère pas de pertes puisque les erreurs ont été éliminés au stade de la conception numérique.

Sous l'impulsion des dernières grandes avancées technologiques dans le domaine, la FA a été débarrassée de ses limites et est aujourd'hui utilisée pour fabriquer des produits finis à destination de l'industrie aéronautique, la dentisterie, les implants chirurgicaux, l'automobile etc.

Les applications les plus courantes sont:

- La visualisation et la validation expérimentale de la conception de produits (prototypage).
- La fabrication d'outillage industriel.
- La création de produits hautement personnalisés au client.
- La production de composants en petites séries.
- La création d'organes et de tissus humains.
- La construction d'édifices architecturaux (maisons, etc).
- La confection de vêtements. etc

De nos jours, l'utilisation de la fabrication additive est la plus pertinente dans les applications aéronautiques et spatiales car le gain de complexité offert aux géométries des objets permet d'obtenir des composants légers (réduisant la consommation énergétique) et de consolider les assemblages en réduisant le nombre de leurs composants (améliorant ainsi la fiabilité).

Ces possibilités sont transposables aux constructeurs automobiles, leur permettant de produire des véhicules plus légers que ce qu'autorisaient les procédés de fabrication classiques.

Enfin, la technologie de la FA apporte des avantages importants pour le travail de matériaux de haute qualité tels que l'Inconel 718 et le titane Ti6Al4V dont le prix est relativement élevé. En effet, ces matériaux sont traditionnellement difficiles à usiner pour atteindre des formes complexes, ce qui entraîne d'importantes pertes de matière. La FA ne produit, quant à elle, que très peu de déchets.



Figure 25: Exemple de fabrication additive

Procédés de la fabrication additive:

Les procédés de fabrication additive suivent tous selon le même principe. Un modèle CAO est d'abord converti au format de fichier .STL pour ensuite être exploité sur une machine de fabrication additive. Lorsqu'il est lu, il est découpé en un certain nombre de couches en fonction de la précision souhaitée. La fabrication additive offre un large éventail de procédés différents::

1) Fusion sur lit de poudre

Dans la fabrication additive, la fusion sur lit de poudre désigne les procédés selon lesquels on utilise l'énergie thermique (laser ou faisceau d'électrons) pour faire fondre et fusionner les particules des régions bien déterminées d'un lit de poudre.

| Processus | Techniques | Matériaux |
|-------------------------|--|--|
| Lit de poudre en fusion | Direct metal laser sintering (DMLS) (frittage) Selective laser sintering, selective laser melting (fusion), electron beam melting | Polymères, métaux: aciers maraging, aciers inox 316L, 15-5PH, 17-4PH, superalliages base nickel, inconel 718, Inconel 625, Hastelloy X, titane TA6V, chrome-cobalt, aluminium AISi10Mg |

2) Extrusion de matériaux

L'extrusion de matériaux est un procédé de fabrication additive, dans lequel des perles de filament thermoplastique sont fondues pour être extrudées et distribuées sélectivement à travers une buse. La puissance de chauffe dans la tête de la buse contrôle le débit de matériau fondu.

| Processus | Techniques | Matériaux |
|-----------|----------------------------------|--------------------------|
| Extrusion | Fusion Deposition Modeling (FDM) | Filament thermoplastique |

3) Dépôt de matériaux

Le dépôt de matériau est un procédé de fabrication additive selon lequel de fines gouttelettes d'un matériau sont déposées sélectivement par des têtes d'impression semblables à celles d'imprimantes à papier.

| Processus | Techniques | Matériaux |
|-------------------|-----------------|---------------------------------|
| Dépôt de matériau | Jet de matériau | Polymères, matériaux comme cire |

4) Stratification de matériau en feuille

La stratification de matériau en feuille désigne un procédé de fabrication additive selon lequel des feuilles de matière sont liées entre elles pour former un objet complet. Pour parvenir à la forme désirée, cette technique peut se joindre à un

dispositif de découpe contrôlé par ordinateur afin de délimiter les frontières de chaque couche.

| Processus | Techniques | Matériaux |
|-------------------|--|---|
| Feuilles laminées | Laminage d'objets, laminage de papier, fabrication additive avec ultrasons | Papier adhésif, bobines de métal, feuilles de plastique |

5) Photopolymérisation en cuve

La photopolymérisation en cuve est un procédé de fabrication additive selon lequel une résine liquide durcissable présente dans une cuve est sélectivement durcie lorsque la polymérisation de ses chaînes moléculaires est déclenchée par la lumière ultraviolette.

| Processus | Techniques | Matériaux |
|-------------------------|--|---------------------------|
| Vat photopolymerization | Stéréolithographie Digital light processing (DLP) | Résine photopolymérisable |

6) Dépôt de matériau et fusion (DED)

Il s'agit d'un procédé de fabrication additive selon lequel de l'énergie thermique focalisée fusionne le matériau en le faisant fondre au fur et à mesure qu'il est déposé.

| Processus | Techniques | Matériaux |
|--------------------------|--|--|
| Direct Energy Deposition | Laser engineered Lens Shaping (LENS), direct Metal deposition (DMD) Blown Powder (poudre soufflée) Laser Cladding (revêtement) | Métaux tels que les alliages Nickel, l'aluminium etc |

La cobotique ou robotique collaborative:

Le cobot est un robot qui est dédié à la manipulation d'objets en collaboration avec un opérateur humain. Le terme cobot est issu de «COLlaborative roBOTS».

Les cobots sont équipés de nombreux capteurs et de logiciels et n'ont pas besoin d'être séparés des travailleurs humains. Si la robotique traditionnelle a permis aux industriels d'automatiser leurs procédés et de gagner en productivité, la robotique collaborative répond à d'autres besoins :

- réaliser des opérations délicates pour l'homme en termes de précision et de sécurité
- réduire les risques d'apparition de TMS (troubles musculo-squelettiques), en soulageant les opérateurs dans les tâches les plus pénibles.
- apporter plus de flexibilité dans l'exécution des processus de fabrication, grâce à des robots plus mobiles.

Un cobot n'a en effet pas pour vocation d'être indépendant ou programmé pour une tâche qu'il répètera indéfiniment. Qu'il soit piloté en temps réel, configuré à l'avance, ou qu'il travaille à côté d'un humain, le cobot est conçu pour collaborer avec l'opérateur et l'assister. Une étude de 2016 menée par des chercheurs du MIT a d'ailleurs montré que la collaboration homme-robot était 85% plus productive qu'un humain ou un robot travaillant seul.

Relativement petits et légers, les robots collaboratifs ne sont pas dangereux pour l'homme et sont conçus pour apporter une sécurité maximale à l'opérateur. Ils sont aussi très adaptables à différentes tâches, et sont également très facilement programmables. En outre, ils sont beaucoup moins chers (environ 10 fois moins cher qu'un robot industriel classique) et moins énergivores que leurs confrères.



Figure 26: Exemple de cobot

Il existe trois grands types de cobots :

- les robots pilotés par un opérateur à proximité immédiate du système (co-manipulation) (Exemple de la figure 26),
- Les robots commandés à distance (télé-opération),
- les exosquelettes ou ergo-squelettiques, des structures électromécaniques qui assistent le corps humain dans son effort et permettent de décupler la force de l'homme sans le fatiguer (Figure 27).

La machine ne remplace pas l'homme, elle l'assiste dans son travail en lui apportant sécurité, force, précision, souplesse et confort, sans lui ôter ses capacités cognitives d'analyse et de décision. Les tâches les plus pénibles, difficiles ou dans lesquelles l'humain a peu de valeur ajoutée sont transférées à la machine.



Figure 27: Exemple d'exosquelette

On voit arriver dans l'univers industriel une nouvelle cobotique dite de logistique et de transitique. Il s'agit de petites machines autonomes qui se déplacent pour effectuer des tâches de transport de petit matériel, de produits ou petits colis en interne, pour de l'approvisionnement de chaîne de production mais aussi pour apporter outils, compléments ou autres à la demande.

Les robots sont des machines contrôlés par un système informatique et sont conçus pour développer des tâches déterminées. Il existe trois catégories différentes de robots:

- Ingénierie douce (soft engineering): Ce sont des robots qui effectuent principalement des tâches simples dans un environnement humain. Ils sont facilement reprogrammables et peuvent fonctionner en continu.
- Ingénierie dure (hard engineering): ces types de robots peuvent effectuer des tâches difficiles et être interconnectés avec d'autres machines. Habituellement, ils n'ont pas besoin d'interaction humaine. La série

Cirris produite par la société ULC Robotics, est un groupe de robots qui effectuent l'inspection, la réparation et le scellement des joints dans les gazoducs. Ils effectuent la tâche qui nécessitait généralement des semaines en quelques heures seulement.

- Robots de service : Ces robots peuvent effectuer toutes les tâches non opérationnelles telles que la surveillance, le transport (AGV) ou aider les opérateurs dans leurs tâches de manutention ou autres. L'idée principale est qu'au lieu de remplacer les travailleurs humains, les machines deviennent leurs collaborateurs. Grâce à la technologie des capteurs, les cobots observent comment les opérateurs effectuent leurs tâches et ils les y assistent directement sans exposer les humains au risque de blessure. En outre, par cette observations, ils apprennent comment faire face aux différents problèmes et situations. Les cobots sont plus légers et plus faciles à déplacer que les robots, Ils sont flexibles et faciles à gérer. On s'oriente vers la création de cobots de plus en plus intelligents afin de mieux assister les opérateurs dans des tâches fastidieuses, dangereuses ou qui demandent une précision que l'homme ne peut pas assurer.

les véhicules à guidage automatique (AGV) et les véhicules à guidage laser (LGV) sont aussi des sortes de cobots qui assistent les opérateurs dans le transport d'articles. Ces véhicules sans conducteur ont été utilisés dans la fabrication au cours des six dernières années pour augmenter l'efficacité dans usines et entrepôts. Dans une Smart Factory l'interconnectivité est centrale; ainsi, les AGV font partie du réseau et ne sont pas des systèmes automatisés isolés. Ils rentrent dans la catégorie de «transitique». Les AVG sont des véhicules autonomes utilisés pour le transport et la livraison de produit au sein de l'entreprise vers des magasins, des bords de lignes, des supermarchés etc (Figure 28). La tâche principale des véhicules autonomes est essentiellement le transport. Ils reçoivent les instructions relatives aux produits à livrer et il le font de façon efficace sans l'intervention de l'homme en se déplaçant de façon autonome selon des chemins optimisés.



Figure 28: Automated guided vehicale

On trouve aussi les drones ou UAV (Unmanned Aerial Vehicles) qui sont utiles pour les activités d'inspection et de maintenance. Par exemple, on utilise des drones dans le secteur pétrolier et gazier pour l'inspection de pipelines et autres installations par imagerie thermique aérienne.

Les UVA sont particulièrement utiles pour l'inspection sur de grandes installations et des unités réparties sur de grandes distances. Ils sont également exploités pour les la topographie, l'agriculture, la surveillance de la pollution de la mer, la logistique etc (Figures 29 et 30).



Figure 29: Exemple de drone de transport



Figure 30: Exemple de drone d'inspection de pipelines

Les applications de la cobotique se développent dans de nombreux secteurs : l'aéronautique, l'automobile, l'agroalimentaire, la construction navale, la défense ou encore la santé, pour l'assistance des personnes âgées, l'utilisation de substances potentiellement toxiques, ou les opérations de grande précision. Les cobots aident par exemple les chirurgiens pour effectuer des opérations d'une précision inégalable par la main humaine.

Le marché des cobots est en forte croissance. En effet, si les robots collaboratifs représentent encore une toute petite part des robots industriels (moins de 2 %), leurs ventes, elles, ne cessent de croître. En 2017, 9 000 robots collaboratifs ont été commercialisés dans le monde (+80% par rapport à 2016). En 2023, le marché de la **cobotique** pourrait passer de 284 millions de dollars à plus de 5 milliards selon le cabinet d'études BIS Research.

Intégration numérique horizontale et verticale:

Pour aboutir au concept d'Industrie 4.0, les processus au sein de l'entreprise doivent être reliés en mettant en œuvre une continuité numérique entre les services. Deux types d'intégrations existent et doivent être combinées: la verticale et l'horizontale.

- L'intégration horizontale: Elle désigne la digitalisation de l'ensemble de la chaîne de valeur et d'approvisionnement de l'industrie (marketing, conception, approvisionnement, fabrication, livraison, exploitation, service après vente et fin de vie) . Cela concerne les flux internes et externes allant du fournisseur, au client en passant par le distributeur et les partenaires. Il est évident que l'intégration horizontale aide à la collaboration, aux économies de coûts, à la création de valeur, à la performance avec une efficacité des opérations ainsi qu'une mise sur le marché plus rapide. L'intégration concerne aussi l'intégration des interactions entre les 5 M des différents processus de l'entreprise (men, machines, media, material et methods). L'intégration portera aussi sur les différentes fonctions de l'entreprise (Figure 31).

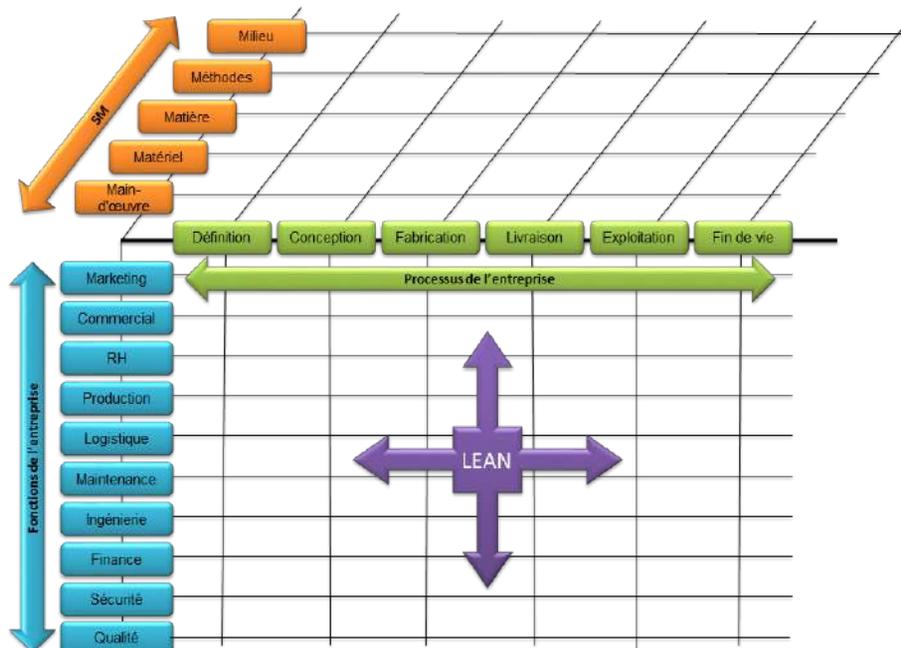


Figure 31: Intégration horizontale selon trois dimensions

- L'intégration verticale: Elle intègre la composante hiérarchique. La digitalisation est réalisée à différents niveaux de fabrication et de production (Figure 32). C'est cette intégration qui permet de reconfigurer le processus de production en fonction de la demande client. Parmi les solutions et technologies typiques de cette intégration, on peut citer la réutilisation de solutions éprouvées comme les automates programmables (PLC) qui contrôlent les processus de fabrication et se situent au niveau contrôle, les SCADA qui permettent diverses tâches de supervision de processus et de production, les systèmes MES ou d'exécution de la fabrication et l'ERP intelligent pour le niveau entreprise, qui est le plus haut niveau et désigne la planification globale de la production.

Les PLC (Programmable Logic Controller) sont des ordinateurs industriels créés pour le contrôle de processus de fabrication, tels que des chaînes de montage ou des dispositifs robotiques. Les SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) sont des systèmes de contrôle et d'acquisition de données au niveau du pilotage des machines automatisées. Les MES pour Manufacturing Execution System sont les systèmes de gestion de production permettant de délivrer aux automates les données nécessaires à l'exécution de l'ordre de fabrication. Il peut être positionné sur le cloud. Les ERP (Entreprise Resource Planning) sont des logiciels qui permettent de gérer l'ensemble des processus d'une entreprise en intégrant l'ensemble de ses fonctions; ressources humaines, fonctions comptables, ventes... Possible en cloud également

L'intégration verticale appliquée dans un système d'automatisation recueille des données des niveaux les plus bas et les achemine jusqu'au plus haut niveau. Elle permet également à ces données de circuler dans le sens inverse : à partir du plus haut niveau vers les périphériques de terrain, pour transférer de nouvelles configurations de format, par exemple.

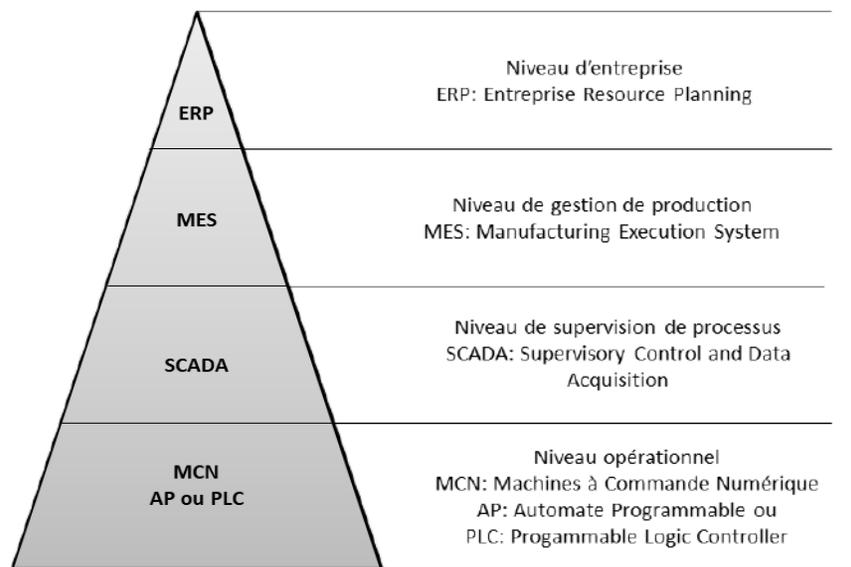


Figure 32: Intégration verticale et horizontale

Types de communication M2M et H2M:

Une des grandes avancées apportée par l'industrie 4.0 est la communication horizontale entre acteurs de la production. Il existe deux types de communication horizontale: machine à machine (M2M) et homme-machine (H2M).

- Communication Machine to machine (M2M): Elle est réalisée de façon directe entre les entités utilisant n'importe quel canal de communication filaire ou sans fil. La communication de machine à machine peut inclure l'instrumentation industrielle, permettant à un capteur ou à un compteur de communiquer les informations qu'il enregistre (telles que la température, le niveau de stock, etc.) à un logiciel d'application qui peut l'utiliser (par exemple, ajuster un processus industriel en fonction de la température ou passer des commandes pour reconstituer les stocks). Une telle communication était à l'origine réalisée en faisant en sorte qu'un réseau distant de machines relaie l'information à un concentrateur central pour analyse, qui serait ensuite redirigé vers un système comme un ordinateur personnel. La communication de machine à machine plus récente s'est transformée en un système de réseaux qui transmet des données aux appareils personnels. L'expansion des réseaux IP dans le monde entier a rendu la communication de machine à machine plus rapide et plus facile tout en consommant moins d'énergie.

La technologie M2M est directement basée sur des protocoles et technologies de communication standard pour créer des réseaux de machines et de systèmes ce qui facilite l'échange direct entre les machines d'une grande flotte. En conséquence, le processus de production dans son ensemble, peut être reconfiguré pour réagir aux aléas et changements rencontrés. Cela, est issu de la capacité des machines à communiquer entre elles de façon autonome et auto-organisée. Ainsi, on peut avoir l'accès à des actions en temps réel pour établir des organisations plus intelligentes et plus agiles, ce qui permet de mieux administrer les ressources, protéger les actifs spécifiques de l'entreprise, déployer des applications intelligentes pour élargir la portée et répondre rapidement aux exigences pouvant être à évolution rapide. La communication M2M, permet d'offrir une meilleure surveillance et utilisation des ressources ce qui réduit les coûts sur le court terme et déclencher, exécuter automatiquement des décisions qui servent les objectifs et maintiennent les compétitivités de l'entreprise dans le long terme.

L'interaction homme-machine (IHM): Les humains interagissent avec les ordinateurs qui les entourent et cette interaction nécessite des interfaces qui facilitent la communication entre l'humain et la machine. La facilitation de l'utilisation de dispositifs devient de plus en plus importante avec le nombre croissant d'interfaces numériques dans la vie quotidienne. L'IHM a pour but de trouver les moyens les plus efficaces, les plus accessibles et les plus intuitifs pour les utilisateurs de compléter une tâche le plus rapidement et le plus précisément possible. L'IHM, s'appuie notamment sur la linguistique, la vision par ordinateur et sur l'humain. L'interaction homme-machine est un domaine pluridisciplinaire entre l'ingénierie (informatique, électronique, mécanique...), la science de la nature (sciences cognitives, psychologie, sociologie...) et l'art et design (design de produit, design interactif, ergonomie etc).

La Cyber-sécurité:

La cybersécurité est l'ensemble des techniques et outils permettant de protéger les ordinateurs, les serveurs, les appareils mobiles, les systèmes électroniques, les réseaux et les données contre les attaques malveillantes. On l'appelle également sécurité informatique ou sécurité des systèmes d'information. Elle appelle les éléments suivants:

- La sécurité réseaux qui consiste à protéger le réseau informatique contre les intrus, qu'il s'agisse d'attaques ciblées ou de malwares opportunistes.
- La sécurité des applications qui vise à protéger les logiciels et les appareils contre les menaces. Une application corrompue pourrait ouvrir l'accès aux données qu'elle est censée protéger.
- La sécurité des informations qui veille à garantir l'intégrité et la confidentialité des données, qu'elles soient stockées ou en transit.
- La sécurité opérationnelle qui comprend les processus et les décisions liés au traitement et à la protection des données. Les autorisations des utilisateurs pour l'accès au réseau et les procédures qui définissent le stockage et l'emplacement des données relèvent de ce type de sécurité.
- La reprise et continuité des opérations qui spécifient la manière dont une entreprise répond à un incident de cyber-sécurité ou tout autre événement causant une perte des opérations ou de données. Les politiques de reprise après sinistre régissent la manière dont une entreprise recouvre ses opérations et ses informations pour retrouver la même capacité de fonctionnement qu'avant l'événement. La continuité des opérations se réfère au plan sur lequel s'appuie une entreprise tout en essayant de fonctionner sans certaines ressources.
- La formation des utilisateurs finaux qui porte sur le facteur le plus imprévisible : les personnes. Tout le monde peut accidentellement introduire un virus dans un système habituellement sécurisé en ne respectant pas les bonnes pratiques de sécurité. Apprendre aux utilisateurs à supprimer les pièces jointes suspectes et à ne pas brancher de clés USB non identifiées est essentiel pour la sécurité d'une entreprise.

Les cyber-menaces continuent d'évoluer rapidement dans le monde et le nombre de violations de données augmentant chaque année. Un rapport de Risk Based Security a révélé que 7,9 milliards de données ont été exposées à des attaques au cours des neuf premiers mois de 2019 seulement. Ces chiffres représentent plus du double (112 %) du nombre de données exposées lors de la même période en 2018.

De fait, année après année, les dépenses mondiales en cyber-sécurité ne cessent d'augmenter. Les entreprises commencent à comprendre que, d'un côté, les malwares sont facilement accessibles à quiconque se sentira des velléités de cyber-pirate et que, de l'autre, le foisonnement de fournisseurs et solutions de sécurité n'a que peu d'efficacité face aux attaques. Or, la cyber-sécurité requiert une attention et un engagement de tous les instants.

Devant l'ampleur croissante de la cyber-menace, l'International Data Corporation prévoit que les dépenses mondiales

consacrées aux solutions de cyber-sécurité atteindront, en 2022, la somme considérable de 133,7 milliards de dollars.

Schéma global d'une usine 4.0:

La figure 33 montre comment s'articulent les principales technologies de l'industrie 4.0 dans une usine de fabrication.

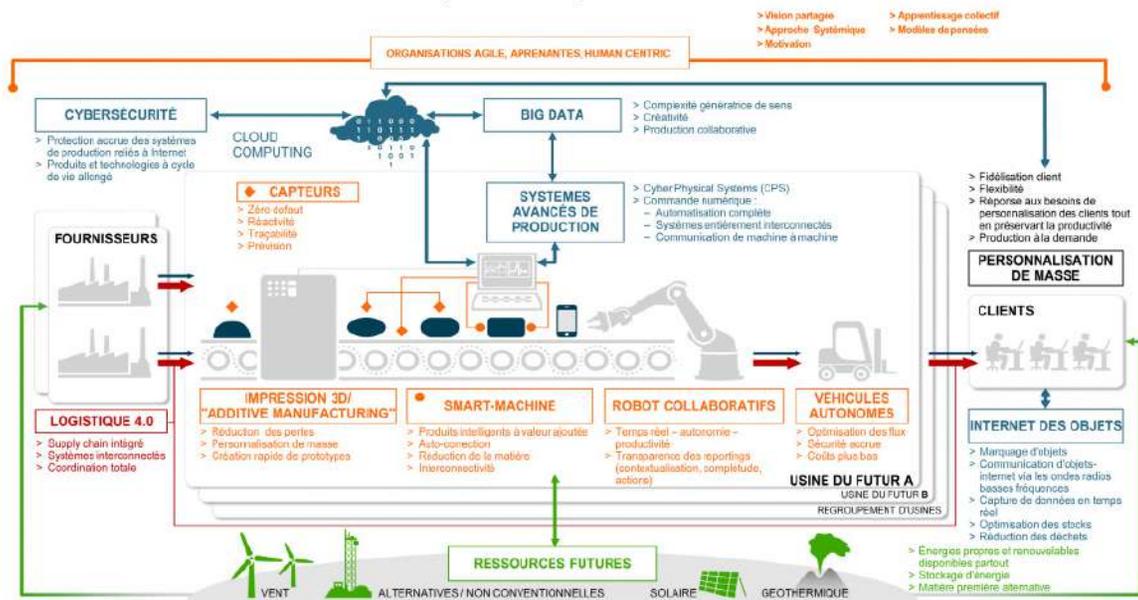


Figure 33: Vue générale d'une usine 4.0 (Source: Rolland Berger)

Démarche de mise en œuvre:

1. Décision stratégique
2. Constitution de groupe de pilotage
3. Formation aux technologies 4.0
4. Formation au lean
5. Diagnostic numérique et évaluation de maturité numérique
6. Diagnostic lean
7. Plan d'action lean
8. Plan d'action digital I4.0
9. Intégration Lean - I4.0
10. Etude de faisabilité technique et économique
11. Mise en œuvre des plans intégrés
12. Analyse des résultats et rétro-action
13. Généralisation
14. Capitalisation

La démarche industrie 4.0 nécessite des investissements dans des solutions logicielles, dans des équipements et dans la formation de la main-d'œuvre. La valeur ajoutée que créeront les données numériques entrainera des changements dans les comportements d'opération et de gestion.

Depuis plus de trente ans, l'acquisition de technologies numériques s'est généralement faite à la pièce, l'entreprise répondant à des besoins technologiques spécifiques pour améliorer sa performance.

Il importe de ne pas oublier que l'infrastructure numérique n'est pas une fin en soi. Il s'agit d'un moyen au service des processus. Ce sont eux qui lui donnent une véritable valeur. La voiture la plus connectée et la plus smart ne sert à rien si elle ne fonctionne pas.

Les entreprises peuvent acquérir les mêmes équipements et technologies mais l'élément qui les différenciera est leur capacité à maîtriser et à intégrer ces technologies dans un portefeuille cohérent et performant intégrant le matériel et l'homme.

Maturité numérique:

Pour être en mesure d'élaborer un plan d'action numérique, il est important de faire le constat de la situation actuelle. Pour cela, il faut énumérer, dans un premier temps, les processus d'affaires de l'entreprise ainsi que les technologies numériques utilisées.

- **Les technologies:**

Les technologies numériques viennent en appui à un processus d'affaires pour permettre d'en accélérer le temps de traitement, d'en assurer la qualité, et de l'automatiser partiellement ou entièrement. Il faut préalablement que le processus concerné soit déjà efficient; il n'y a aucune raison d'informatiser le chaos ou des processus inefficients.

Une évaluation des technologies en place est nécessaire pour s'assurer que l'entreprise dispose de la bonne technologie en fonction de ses besoins actuels et futurs.

- **Maîtrise des technologies:**

Bien que l'entreprise utilise des technologies numériques dans son quotidien, il n'est pas garanti qu'elle en retire les bénéfices escomptés. Une analyse des méthodes d'utilisation des technologies numériques est nécessaire pour s'assurer qu'elles sont exploitées à leur plein potentiel.

- **Intégration des technologies :**

Les technologies numériques d'une entreprise ont souvent été acquises en fonction de besoins précis, sans considération de leur capacité à s'intégrer aux technologies déjà en place.

Un progiciel de conception peut très bien fonctionner de façon autonome. Les bénéfices que vous pourrez en retirer ne seront jamais aussi élevés que s'il s'intègre avec les autres technologies de l'entreprise. Une synchronisation bidirectionnelle avec le système intégré de gestion (ERP) permettrait de lier les pièces à des articles du fichier « stock » du système intégré de gestion, pour en extraire les caractéristiques qui s'afficheraient dans les dessins sans que le dessinateur ait besoin d'écrire quoi que ce soit. Ce partage numérique d'informations entre les départements ou directions est essentiel. Il désenclave les informations et les rend disponibles à ceux qui en ont besoin.

Audit des technologies:

L'auto-évaluation du niveau de maturité numérique est un exercice difficile à quantifier sans un modèle d'évaluation et sans une compétence dans une grande variété de domaines d'expertise.

Présenté sous la forme d'un rapport écrit, l'audit livre un diagnostic sur l'utilisation des différents outils (logiciels et équipements) de l'entreprise. Il fait l'inventaire des outils, évalue leur degré d'actualité et de maturité et détermine le degré de maîtrise des utilisateurs. L'audit livre également des pistes d'amélioration pour l'acquisition de technologies et établit les besoins de formation, de connectivité et d'optimisation se rapportant à la vision numérique, le modèle d'affaires et les processus de l'entreprise. L'audit sert de fondement à l'élaboration d'une stratégie numérique. Il fixe le point de départ, pour dresser, ensuite, la feuille de route à suivre.

Il prend en compte les technologies utilisées par les processus d'affaires, soit les activités relatives à la conception, la gestion de la production, les opérations de production, les services et les connaissances numériques. Il mesure les méthodes d'utilisation et le degré de maîtrise de ces technologies.

Evaluation du niveau de maturité numérique:

Le niveau de maturité numérique est le résultat d'un audit qui fournit un indicateur quantitatif lié à la présence d'outils numériques logiciels et d'équipements, à leur maîtrise et à leur intégration.

Niveau de maturité numérique = somme (technologies x maîtrise x intégration).

Le niveau de maturité numérique est empirique; aucune théorie complète ne le sous-tend. Plusieurs modèles existent pour l'évaluer.

Stratégie numérique:

L'émergence des objets connectés et la multiplication des progiciels de gestion et de coordination font ressortir le besoin de se doter d'un plan d'action global.

Ce plan (ou cette stratégie) numérique doit être enchâssé dans la planification stratégique de l'organisation. Il a pour objectifs d'optimiser les outils actuels, de dresser le plan d'acquisition des technologies futures et d'en assurer la cohésion et l'intégration, tout cela en tenant compte du modèle d'affaires.

Un plan numérique:

Les pistes d'amélioration de l'audit permettent de rédiger un plan numérique qui correspond au modèle d'affaires que l'entreprise veut mettre en place. C'est un outil stratégique qui procure une vue d'ensemble et un échéancier quant aux actions à planifier pour prendre le virage industrie 4.0.

Le plan sera à l'image du niveau de maturité numérique ainsi qu'à celle de l'équipe de direction et reflétera l'orientation que celle-ci désire donner à l'entreprise. Cette stratégie pourra être traditionnelle, émergente ou avant-gardiste.

Méthodologie de déploiement:

Dans un premier temps, il est important de faire ressortir les objectifs du projet d'acquisition de la nouvelle technologie à mettre en place, car ils serviront de lignes directrices pour guider les responsables durant l'implantation. Il est également important de faire ressortir les contraintes pouvant influencer l'atteinte des objectifs.

Il est également nécessaire de réaliser un diagnostic de maturité numérique vous permettra d'évaluer le niveau de maîtrise de votre entreprise sur l'ensemble de vos pratiques et savoir-faire afin d'identifier, par la suite, la trajectoire restant à parcourir pour réussir votre transformation digitale.

Plusieurs modèles de diagnostic de maturité numérique existent (Digital Maturity Model de TM Forum, Digital Internet Maturity Model de Fayon-Tatar, The Digital Maturity Model 5.0 de Forrester), mais il convient de noter qu'ils s'intéressent tous aux ces cinq dimensions suivantes :

- Proposition de valeur et stratégie
- Relations clients et parcours utilisateurs
- Opérations et processus métiers
- Hommes et culture d'entreprise
- Technologies et innovation

1) Proposition de valeur et stratégie:

Cette étape consiste à analyser la manière dont l'offre de l'entreprise répond aux besoins des clients et comment elle va pérenniser le business. Elle évalue également la bonne adéquation de l'organisation de la chaîne de valeur avec la mutation numérique, en place ou à venir, du marché.

2) Relations clients et parcours utilisateurs:

La maturité numérique mesure, aussi, la capacité de l'entreprise à comprendre et interagir avec les clients grâce à l'utilisation intelligente de la donnée afin d'obtenir une expérience client optimale et personnalisée.

3) Opérations et processus métiers:

Il s'agit ici de savoir comment améliorer l'efficacité des équipes opérationnelles grâce aux technologies numériques.

4) Hommes et culture d'entreprise:

La digitalisation d'une entreprise entraîne un profond changement d'état d'esprit, aussi bien de la part de la direction de l'entreprise que de ses collaborateurs. Il est important de mesurer si la culture d'entreprise ainsi que les hommes qui la composent sont favorables ou non au changement afin de s'assurer que le facteur humain ne vienne pas freiner la transformation.

5) Technologie utilisée:

Le succès d'une stratégie de développement s'appuyant sur le digital est étroitement lié au bon choix et à l'efficacité des technologies déployées. Le fait de pouvoir créer, stocker, sécuriser, retraiter, mesurer et échanger des données pour répondre aux besoins de ses clients, collaborateurs, et fournisseurs à moindre coût est un levier de croissance majeur.

Le Digital Maturity Model cité ci-dessus, par exemple, est composé au total de 110 critères pouvant aider à mesurer le niveau actuel de maturité numérique de l'entreprise et aider à définir le niveau que l'on souhaite atteindre.

Attention!!

On estime que 80% des projets de digitalisation échouent pour les raisons suivantes:

- Investissements élevés
- Etude préalable et de faisabilité insuffisante
- Manque de formation
- Difficulté et rigueur d'implémentation
- Charge de travail au début d'implantation
- Organisation préalable de l'entreprise et rigueur de travail insuffisante
- Absence de projet pilote motivant
- Absence de préparation du terrain
- Compétences existantes insuffisantes
- Volonté de vouloir tout transformer digitalement



KHALIL Ismail

Ph.D

Deputy Head of the Institute of Telecooperation,
Johannes Kepler University Linz, Austria.

Cloud et Edge Computing

With the advent of Edge Computing, we have now fully entered the era of Edge Intelligence computing championed by services such as Amazon Web Services, for example. Computing has evolved towards a service paradigm for enabling ubiquitous, convenient, on-demand network access to a shared pool of configurable computing resources (networks, servers, storage, applications, and services). Processing units and storage are managed in data centers whose architecture (clusters or grid) is transparent to the users and programmers. Both desktop and mobile multimedia applications are accessed from the web anytime anywhere. An unenthusiastic computer scientist could claim that there is nothing new under the sun since RPC (Remote Procedure Call). Therefore, this talk will try and shed a light on the research questions raised by this new technological ecosystem and by various scenarios for its evolution.

CLOUD ET EDGE COMPUTING

Le terme « cloud », traduit en Français par nuagique ou infonuagique, désigne les serveurs accessibles sur Internet ainsi que les logiciels et bases de données qui fonctionnent sur ces serveurs. Les serveurs situés dans le cloud sont de très grandes capacité pour recevoir les big data et sont hébergés au sein de datacenters (centres de données) répartis dans le monde entier. Un centre de données est une installation abritant de nombreux serveurs en réseau qui fonctionnent ensemble pour traiter, stocker et partager des données. L'utilisation du cloud computing (informatique de cloud) permet aux utilisateurs et aux entreprises de s'affranchir de la nécessité de gérer des serveurs physiques eux-mêmes ou d'exécuter des applications logicielles sur leurs propres équipements.

Le cloud permet aux utilisateurs d'accéder aux mêmes fichiers et aux mêmes applications à partir de presque n'importe quel appareil dans n'importe quel point de la terre car les processus informatiques et le stockage ont lieu sur des serveurs dans un datacenter et non localement sur la machine utilisateur. C'est pourquoi un utilisateur dont le téléphone est défectueux peut se connecter à son compte Instagram à partir d'un nouveau téléphone et retrouver son compte actif en place, avec toutes ses photos, vidéos et l'historique de ses conversations. Il en va de même avec les fournisseurs de messagerie cloud comme Gmail ou Microsoft Office 365 et les fournisseurs de stockage cloud comme Dropbox ou Google Drive.

Pour les entreprises, le passage au cloud computing supprime certains coûts et frais informatiques : par exemple, les sociétés n'ont plus besoin de mettre à jour et d'entretenir leurs propres serveurs, c'est le fournisseur de cloud qui s'en charge. Cet aspect a surtout un impact sur les petites entreprises qui ne peuvent pas toujours se permettre de disposer de leur propre infrastructure interne. Elles peuvent externaliser leurs besoins en infrastructure à un coût abordable via le cloud.

Le cloud peut également faciliter les opérations internationales des entreprises car les employés et les clients peuvent accéder aux mêmes fichiers et applications à partir de n'importe quel emplacement.

1/ Fonctionnement du cloud computing

Le cloud exploite la technologie de virtualisation qui consiste à créer un ordinateur « virtuel », uniquement numérique, qui se comporte en tout point comme un ordinateur réel physique doté de ses équipements matériels propres. Ce type d'ordinateur est dénommé machine virtuelle. Ces machines situées sur le même ordinateur hôte se voient mises en « sandbox » (c'est-à-dire isolées), de sorte qu'elles n'interagissent pas du tout les unes avec les autres. Les fichiers et les applications figurant sur une machine virtuelle donnée ne sont pas visibles par les autres machines même si ces dernières se trouvent sur la même machine physique.

Les machines virtuelles utilisent également plus efficacement le matériel qui les héberge. En exécutant plusieurs machines virtuelles à la fois, un serveur devient plusieurs serveurs et un datacenter devient une multitude de datacenters, capables de servir de nombreuses organisations. Ainsi, les fournisseurs de cloud peuvent proposer l'utilisation de leurs serveurs à un nombre de clients bien plus important et à un coût modéré.

Même si certains serveurs tombent en panne, les serveurs cloud en général doivent toujours être en ligne et toujours disponibles. Les fournisseurs de cloud sauvegardent généralement leurs services sur plusieurs machines et dans plusieurs régions (redondances).

Les utilisateurs accèdent aux services cloud par le biais d'un navigateur ou d'une application qui se connecte au cloud via Internet (c'est-à-dire, par l'intermédiaire de nombreux réseaux interconnectés), indépendamment des appareils qu'ils utilisent.

2/ Les quatre modèles de services de cloud computing

• Software-as-a-Service (SaaS) :

les applications SaaS sont hébergées sur des serveurs cloud et les utilisateurs y accèdent via Internet plutôt que de les installer sur leurs machines et appareils. Les services SaaS s'apparentent à la location d'une habitation : le propriétaire entretient l'habitation, tandis que le locataire l'utilise comme si elle lui appartenait. Parmi les exemples d'applications SaaS, on citera Salesforce, MailChimp et Slack.

• Platform-as-a-Service (PaaS) :

dans ce modèle, les entreprises ne paient pas pour les applications hébergées. Elles paient pour les éléments dont elles ont besoin pour créer leurs propres applications. Les fournisseurs de PaaS proposent tout ce qui est nécessaire pour construire une application, y compris les outils de développement, l'infrastructure et les systèmes d'exploitation, sur Internet. Le PaaS peuvent être comparé à la location des outils et des équipements pour construire une maison, au lieu d'en louer une.

Parmi les exemples de services PaaS, on citera notamment Heroku et Microsoft Azure.

• Infrastructure-as-a-Service (IaaS) :

dans ce modèle, une entreprise loue les serveurs et l'espace de stockage dont elle a besoin à un fournisseur de cloud. Elle peut alors utiliser cette infrastructure cloud pour développer ses propres applications. L'approche IaaS s'apparente à la location d'un terrain par une entreprise : cette dernière peut y construire ce qu'elle souhaite, mais elle doit fournir ses propres équipements et matériaux de construction. Parmi les fournisseurs de services IaaS, on citera DigitalOcean, Google Compute Engine et OpenStack.

• Function-as-a-Service (FAAS) :

le modèle FaaS (également connu sous le nom de serverless computing ou informatique sans serveur) divise les applications cloud en composants plus petits, uniquement exécutés en cas de besoin. Imaginez qu'il soit possible de louer une maison une pièce à la fois. Le locataire ne louerait, par exemple, que la salle à manger au moment des repas, la chambre quand il va dormir et le salon quand il regarde la télévision, sans avoir à régler le loyer correspondant lorsqu'il n'utilise pas ces pièces.

À l'instar de tous les autres modèles d'informatique cloud, les applications FaaS ou serverless s'exécutent néanmoins toujours sur des serveurs. Toutefois, on les définit comme « serverless », car elles ne s'exécutent pas sur des machines dédiées et que les entreprises qui développent ces applications n'ont aucun serveur à gérer.

Par ailleurs, les fonctions serverless peuvent évoluer ou être dupliquées lorsqu'un nombre plus élevé d'utilisateurs se servent de l'application. Imaginez que la salle à manger du locataire puisse s'agrandir à la demande lorsque de nouveaux convives se joignent à lui pour le dîner !

3/ Informatique de périphérie (edge computing)

L'edge computing ou « informatique en périphérie » désigne le traitement informatique qui s'effectue à l'emplacement physique de l'utilisateur ou de la source des données ou à proximité. En rapprochant les services de calcul de ces emplacements, l'edge computing permet aux utilisateurs de profiter de services plus rapides et fiables et offre aux entreprises la flexibilité d'un cloud. Avec l'edge computing, les entreprises peuvent également utiliser et distribuer un ensemble de ressources communes sur plusieurs sites. L'edge computing permet d'étendre un environnement uniforme, depuis le datacenter central jusqu'aux emplacements physiques proches des utilisateurs et des données, situés en périphérie du réseau. L'edge computing est désormais utilisé dans de nombreux secteurs d'activité dont notamment les télécommunications, la fabrication, les transports et les services publics.

Comme les utilisateurs finaux sont de plus en plus nombreux et demandaient des applications basées sur le cloud, et que de plus en plus d'entreprises travaillaient sur plusieurs sites, il est devenu nécessaire de traiter davantage de données en dehors du datacenter, directement à la source, et de les gérer à partir d'un emplacement central. C'est à ce moment-là que l'edge computing mobile est devenu une réalité.

Dans le secteur industriel, l'edge computing permet aux entreprises de surveiller de près l'efficacité des équipements et des chaînes de production et, dans certains cas, de détecter les pannes avant qu'elles ne se produisent, ce qui permet d'éviter les retards coûteux dus aux temps d'arrêt.

Les exigences des opérations de production en temps réel signifient que certaines analyses de données doivent être effectuées à la « périphérie », c'est-à-dire là où les données sont créées, afin de réduire le temps de latence entre le moment où les données sont produites et celui où une réponse est fournie. Par exemple, la détection d'un problème de sécurité ou de qualité peut nécessiter une intervention en temps quasi réel sur l'équipement. Le temps nécessaire à l'envoi des données vers le cloud de l'entreprise, puis pour les renvoyer à l'usine peut être trop long et dépend de la fiabilité du réseau. L'utilisation de l'informatique en périphérie signifie également que les données restent près de leur source, ce qui réduit les risques de sécurité.

Un autre exemple d'utilisation de l'edge computing est celui des véhicules connectés. Les bus et les trains sont équipés d'ordinateurs qui permettent de suivre le flux de passagers et la prestation de services. Les livreurs peuvent trouver les trajets les plus rapides grâce à la technologie embarquée dans leur véhicule. Lorsqu'une stratégie d'edge computing est mise en œuvre, chaque véhicule utilise la même plateforme standardisée que le reste de la flotte, ce qui rend les services plus fiables et permet de protéger les données de manière uniforme.

Dans le cas des véhicules autonomes, l'edge computing implique le traitement d'un gros volume de données en temps réel dans une situation où la connexion au réseau peut être instable. En raison de ce volume, les véhicules autonomes, tels que les voitures sans conducteur, traitent les données des capteurs à bord du véhicule afin de réduire la latence. Ils peuvent cependant toujours se connecter à distance à un point central pour recevoir des mises à jour logicielles.



BOUDI El Mostapha
Ingénieur, Docteur d'Etat

Professeur à l'Ecole Mohammedia d'Ingénieurs
Rabat, Maroc

Fabrication Additive Impression 3D

Le domaine de l'imprimerie 3D est en plein développement à travers le monde tant au niveau industriel qu'au niveau formation. Le logiciel que vous devez utiliser quand vous concevez une pièce imprimée en 3D dépend entièrement de sa nature. La complexité de l'objet influence le choix final. En général, les logiciels de modélisation peuvent être séparés en deux catégories : logiciel de CAO et logiciel de modélisation 3D.

MODELISATION NUMERIQUE – OPTIMISATION DE FORME ET PROTOTYPAGE RAPIDE IMPRIMERIE 3D

1/ Introduction

Au cours des dernières années, les médias ont beaucoup évoqué de la transformation appelée «industrie 4.0». Pourtant, cette notion n'était pas vraiment connue. Au-delà du concept qui fait jaser, on doit savoir que le passage à l'industrie 4.0 pourrait propulser la productivité de l'entreprise, réduire considérablement ses coûts et améliorer grandement la qualité de ses produits.

«À la base, l'industrie 4.0 consiste à surveiller et à contrôler en temps réel les machines et l'équipement en installant des capteurs à chaque étape du processus de production»,

En gros, la technologie permet d'avoir à l'œil la production à chacune des étapes du processus, ce qui permet d'améliorer la qualité des produits. Elle aide également à réduire – voire à éliminer – les temps d'arrêt, car les données de l'équipement avertissent lorsqu'il faut procéder à l'entretien des machines et signalent les pannes imminentes.

L'objet de cet article est la présentation des techniques numériques de conception assistée par ordinateur et particulièrement le processus d'optimisation de forme de pièces mécaniques ainsi que le prototypage par impression 3D.

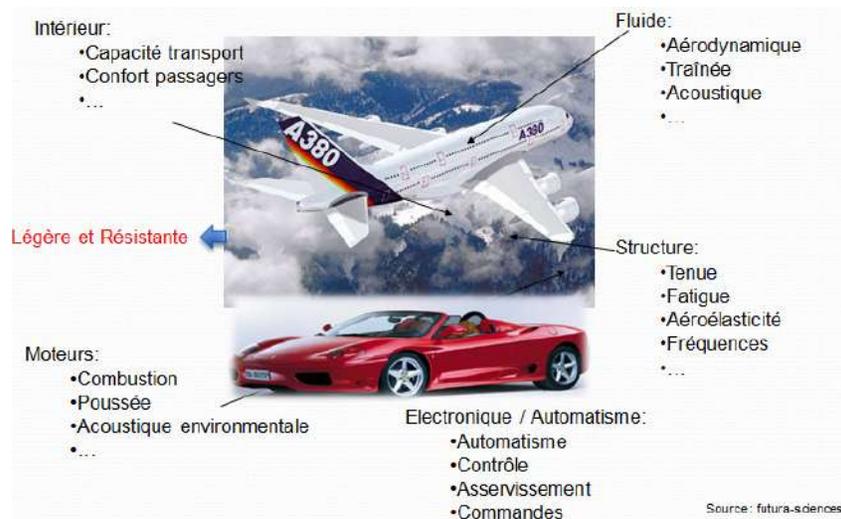
2/ Processus conception assistée par ordinateur

La fabrication rapide est un procédé de fabrication dont le marché est en expansion rapide. Ce procédé de fabrication

présente de nouvelles possibilités de fabrication révolutionnaires, telle la possibilité de créer des formes plus complexes et la possibilité de fabriquer des pièces composées de plusieurs matériaux. De plus, avec les procédés de fabrication traditionnels, dits par enlèvement de matière, le facteur le plus important du coût de fabrication est la complexité de la pièce. En utilisant la fabrication rapide comme moyen de fabrication, le coût de fabrication est influencé principalement par le volume de la pièce, ce qui fait qu'ajouter de la complexité n'est pas un problème. Les méthodologies de conception utilisées auparavant aident le concepteur à créer des pièces simples à fabriquer avec des procédés par enlèvement de matière et donc de diminuer les coûts. Toutefois, aucune de ces méthodologies ne sont applicables à la fabrication rapide. Avec la fabrication rapide, il est préférable de guider le concepteur à ajouter de la complexité afin d'améliorer le produit.

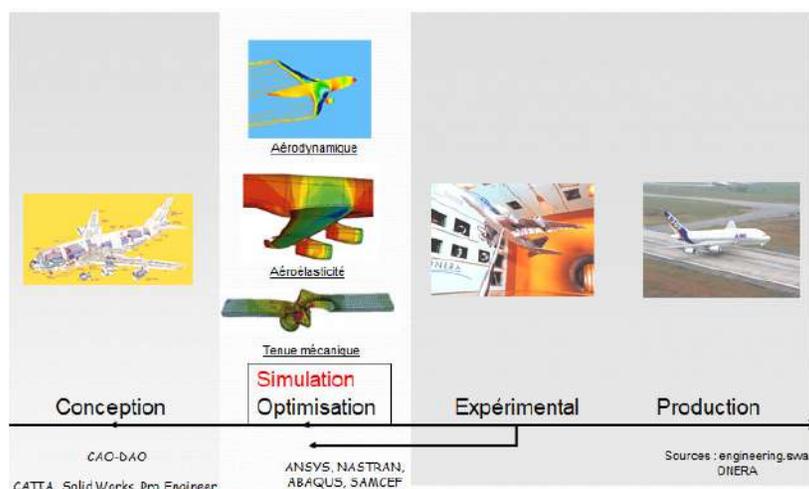
L'objectif général est le développement des nouvelles connaissances, méthodes et outils destinés aux changements de paradigmes dans la conception, le dimensionnement et la fabrication de systèmes mécaniques, mécatroniques, voire thermomécaniques complexes, et ainsi contribuer à inventer le bureau d'études du futur et l'usine du futur, à l'ère de l'Industrie 4.0 en vue d'innover tout en rationalisant le processus routiniers d'ingénierie.

Beaucoup de domaines industriels sont concernés par ce concept. L'industrie aéronautique, l'industrie automobile, l'industrie navale, etc, qui sont généralement des industries complexes et nécessitent une multi compétence : mathématiques, physique, Informatiques, l'infographie, etc



3/ Modelisation multi-physique et optimisation numerique

Le processus de conception de machines se présente comme une chaîne de conception industrielle.



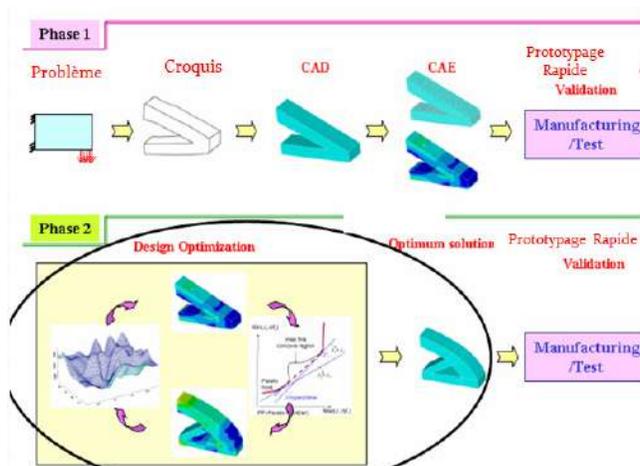
Dans cette chaîne, une phase importante est consacrée à la recherche de forme optimale (masse minimale, coût minimal, énergie minimale, etc) répondant bien sûr aux exigences mécaniques de résistance et de fiabilité exigées par les normes.

Dans ce cadre, on procède à la modélisation multi-physique et l'optimisation numérique de l'interaction Produit-Procédé-Matériau et plus particulièrement à la problématique du calcul et du dimensionnement de systèmes mécaniques complexes soumis à des contraintes multi-physique en ayant recours à la modélisation, à la simulation et l'optimisation numérique, aussi bien en tenue mécanique de pièces, que sur des phénomènes complexes touchant aux problèmes de contact ou encore à la mécanique non-linéaire : hyper élasticité, dynamique rapide, etc. Plusieurs applications sont étudiées: modélisation de tissus biologiques mous, de soudures, de mise en forme de matériaux à haute vitesse.

Un autre objectif vise à optimiser les temps de calculs nécessaires pour réaliser des simulations et des boucles d'optimisation numérique performantes de phénomènes physiques complexes, qui limitent le recours à des algorithmes d'optimisation classiques. En effet, les familles d'algorithmes d'optimisation actuels, tels que ceux à gradients, manquent d'efficacité dans la détection de l'optimum global et nécessitent au recours à des calculs de gradients, par différences finies, particulièrement coûteux en temps de calcul avec des difficultés numériques de différenciation. D'autres algorithmes, tels que les algorithmes stochastiques (algorithmes génétiques, PSO, etc.), peuvent remédier à ce problème de détection de l'optimum local, mais présentent des temps de calculs exorbitants.

De nouvelles orientations de recherche sont actuellement explorées dans le domaine de l'optimisation topologique pour l'aide à la conception de matériaux innovants. Elles concernent :

- le couplage entre optimisation topologique métaheuristique et techniques de modélisation et simulation numérique multi-échelle
- l'obtention de structures aux propriétés mécaniques « extraordinaire », des métamatériaux, « manufacturables » par fabrication additive

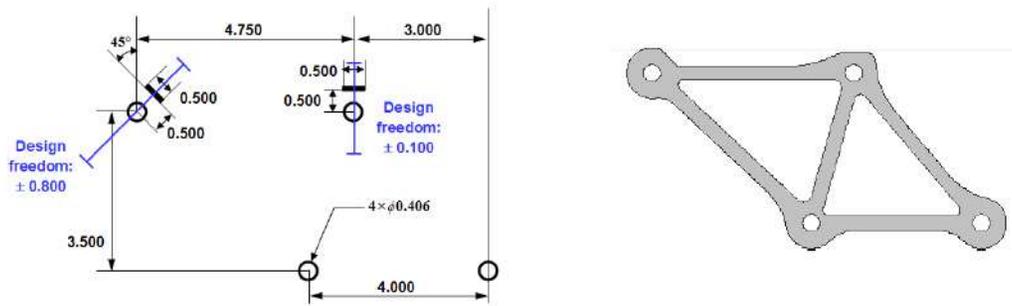
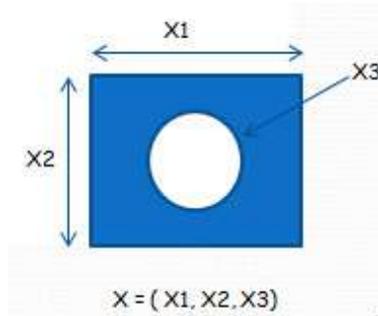


Formulation d'un problème d'optimisation :

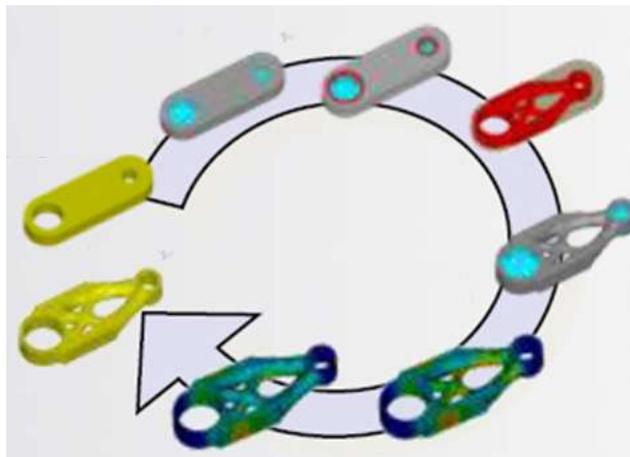
$$\begin{aligned} &\text{Minimize } f(\mathbf{x}) \\ &\text{Subject to } g(\mathbf{x}) \leq 0 \\ & \quad \quad \quad h(\mathbf{x}) = 0 \end{aligned}$$

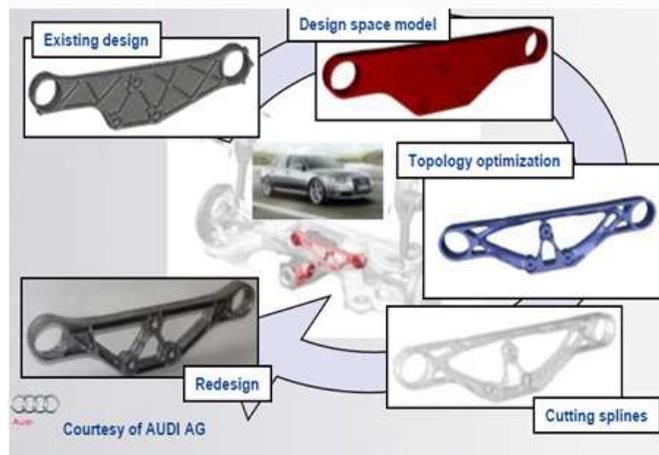
- $f(\mathbf{x})$: Fonction objectif
- $g(\mathbf{x})$: Contraintes d'inégalité
- $h(\mathbf{x})$; Contraintes d'égalité
- \mathbf{x} : variable de conception

Variables de conception:



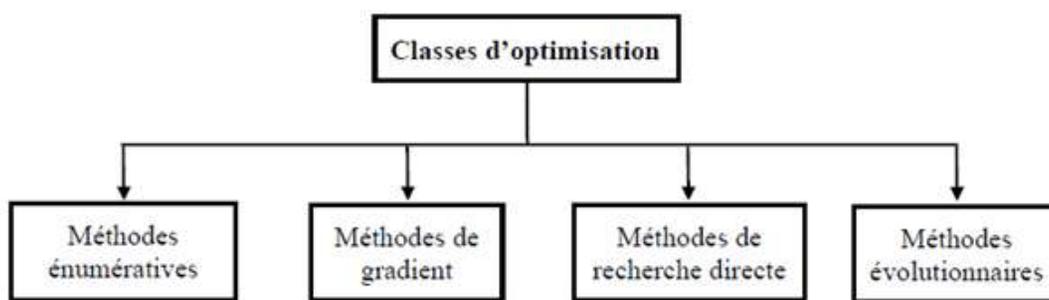
Cycle d'optimisation:





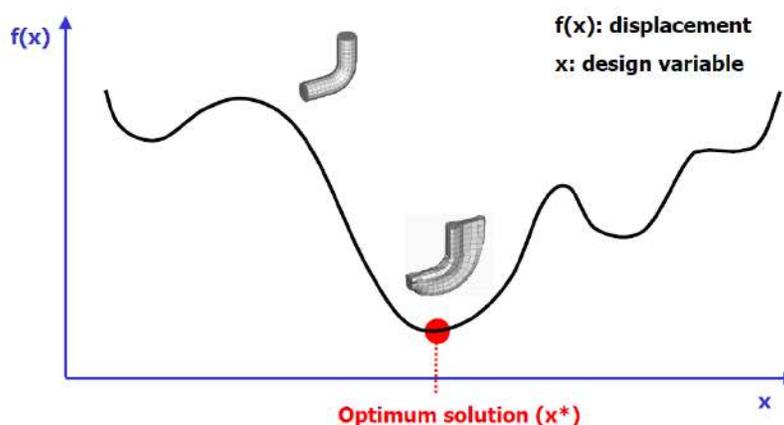
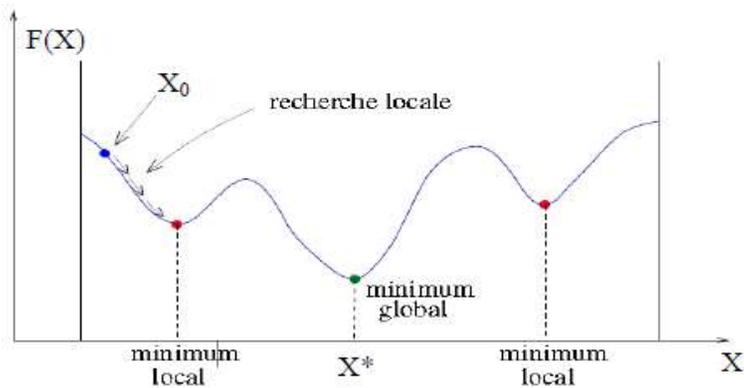
Exemple: fonction objectif. Trouver la forme avec le maximum de résistance mécanique et un minimum de poids

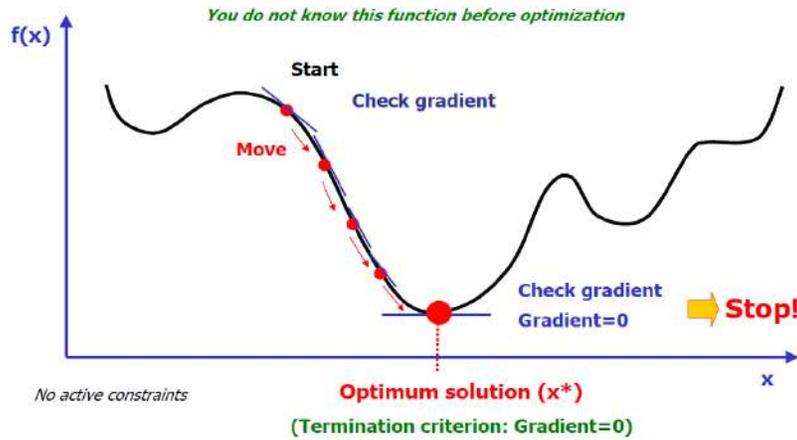
Méthodes et Algorithmes d'optimisation de forme



Méthodes du gradient ;

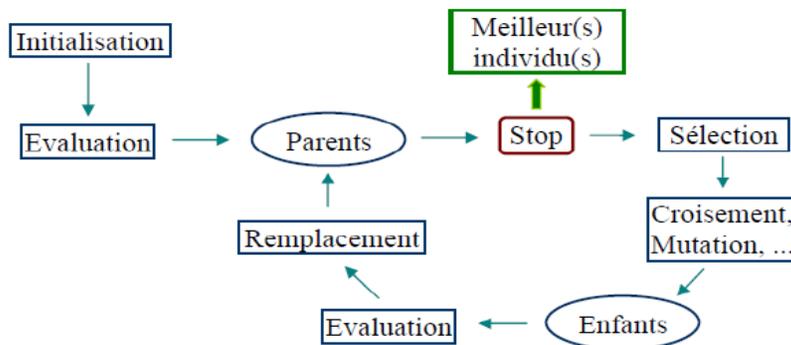
Les méthodes du gradient sont destinées à minimiser une fonction réelle différentiable. Il s'agit d'un algorithme itératif qui procède donc par des améliorations successives. Au point courant, le déplacement est effectué dans une direction opposée au gradient appelée direction de descente, de manière à faire décroître la fonction objectif.



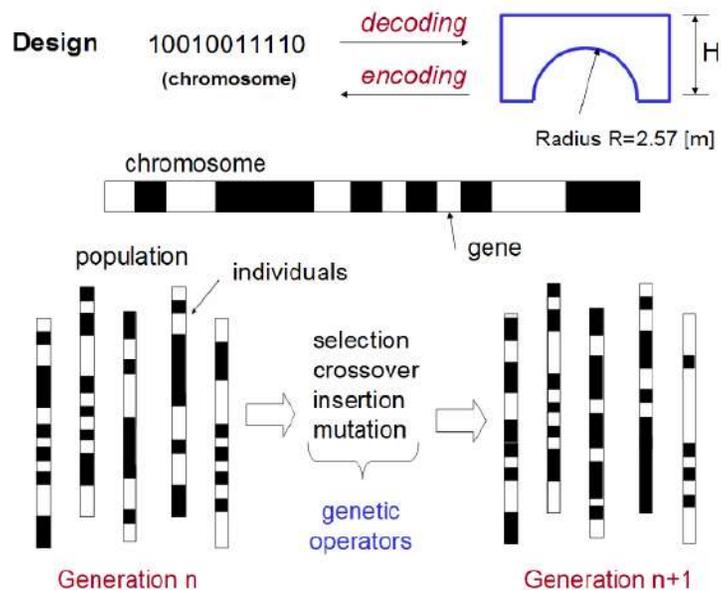


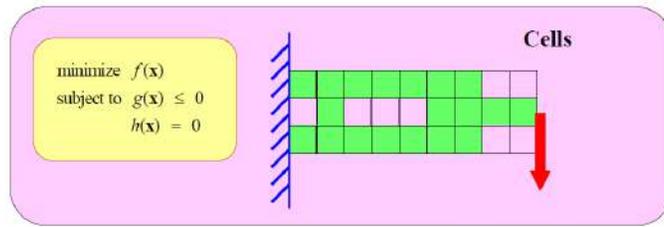
Méthodes évolutionnaires

Les méthodes d'optimisation évolutionnaires trouvent leur inspiration dans la théorie de l'évolution de Darwin. Elles sont caractérisées par une population de solutions qui évoluent vers de meilleures solutions grâce à un processus ou un mécanisme qui est analogue au processus de sélection naturelle (Goldberg). Les individus les plus adaptés se reproduisent plus efficacement, leurs caractéristiques ont donc de plus grande probabilité de survivre et de se reproduire dans la population donnant ainsi à des descendants encore mieux adaptés. Il s'agit de méthodes stochastiques puisqu'ils utilisent itérativement des processus aléatoires.



Principe by Charles Darwin - Natural Selection

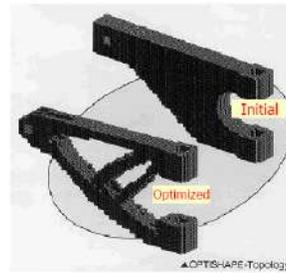
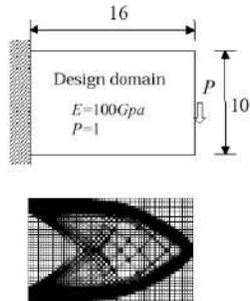




Design variables (x)
 x : density of each cell
Number of design variables (ndv)
 ndv = 27

f(x) : compliance
 g(x) : mass

Short Cantilever problem

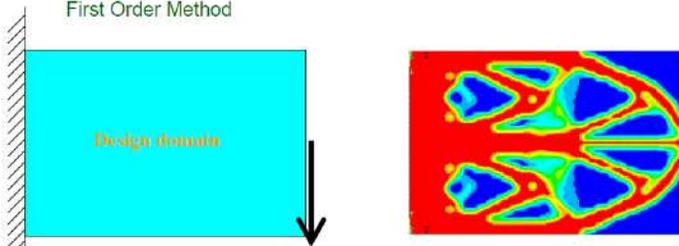


❖ **ANSYS**

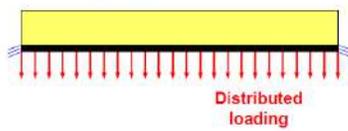


- Static Topology Optimization
- Dynamic Topology Optimization
- Electromagnetic Topology Optimization

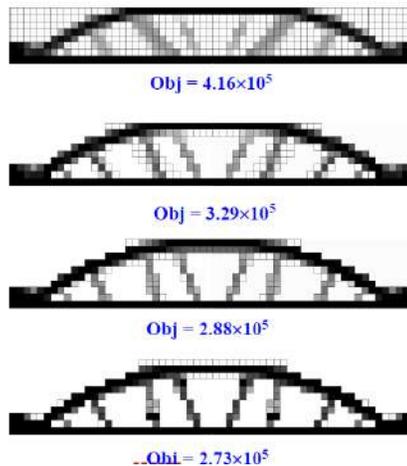
- Subproblem Approximation Method
- First Order Method



Bridge problem



Minimize $\int_{\Gamma} F^i z^i d\Gamma,$
 Subject to $\int_{\Omega} \rho(x) d\Omega \leq M_o,$
 $0 \leq \rho(x) \leq 1$
 Mass constraints: 35%

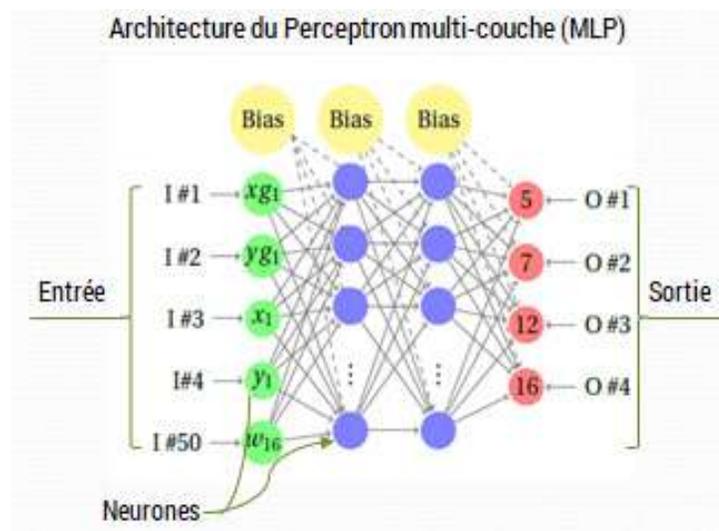


Quelques logiciels industriels



Optimisation par utilisation de l'intelligence artificielle (réseaux de Neurones)

La classification est une méthode algorithmique permettant d'attribuer un objet x' à une classe y' sur la base d'un ensemble de données $D=(x_1,y_1)...(x_n,y_n)$ ou l'appartenance des éléments x_i aux classes y_i est connue



4/ Prototypage et Imprimerie 3D

Avant toute chose il faut définir ce qu'est l'impression 3d. il existe une norme définissant les termes utilisés dans la technologie de la fabrication additive (FA) : Norme ISO/ASTM 52900 : 2015.

La fabrication additive regroupe les technologies permettant de fabriquer des pièces par couches successives de matière à partir d'un modèle numérique.

Cette nouvelle façon de concevoir permet de mieux répondre aux contraintes de développement d'un produit. Les différentes phases de vie du produit (phases de fabrication, d'utilisation et de recyclage) sont plus faciles à prendre en compte. Il est possible de personnaliser le produit, de respecter des délais courts, des petites séries, et de réaliser des formes complexes, tout en réduisant les coûts.

Il y a trois finalités pour la fabrication additive en plus de la fabrication domestique :

- le prototype rapide (PR) : on réalise un prototype pour valider les concepts liés à la conception (esthétique, maniabilité, fonctionnement,..)
- L'outillage rapide (OR) : on réalise un outillage fonctionnel permettant de fabriquer une série de pièces.
- Fabrication rapide (FR) : on réalise des objets fonctionnels

Les grandes étapes de la fabrication additive sont les suivantes :

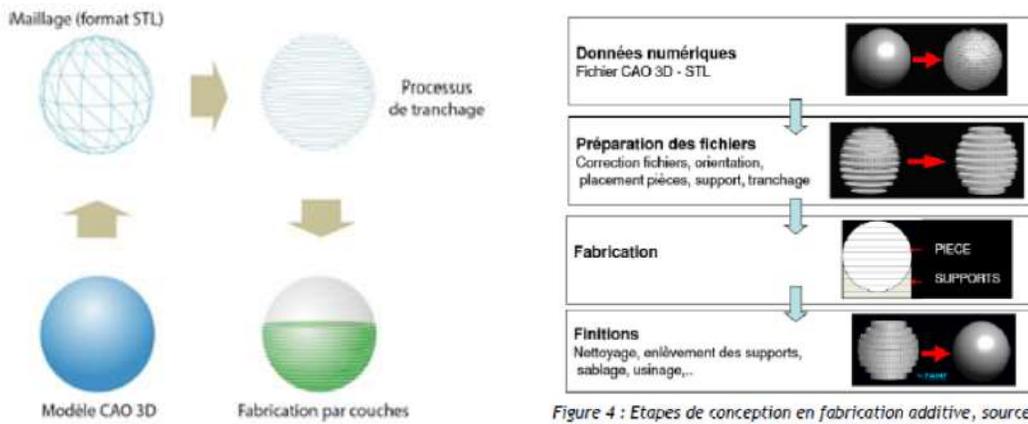


Figure 4 : Etapes de conception en fabrication additive, source [4]

Après avoir conçu le modèle CAO, il faut le préparer pour l'impression, en effet il faut trancher la pièce et l'orienter pour définir les supports. Il est possible d'optimiser la pièce en termes de masse grâce à l'optimisation topologique. Une fois la pièce imprimée il faut la nettoyer, enlever le support, et l'usine si besoin.

Dans la conception de la pièce il faut choisir le procédé de fabrication en fonction de ses critères.

Les sept familles de procédés de fabrication additive:

1. Projection de gouttes de matériau

Principe :

Le principe de fonctionnement est le même que les imprimantes jet d'encre, une tête d'impression dépose de manière sélective des gouttes de matériau et fabrique couche par le modèle par abaissement du plateau de fabrication. Pour la solidification il y a deux méthodes : refroidissement ou photopolymérisation

Schéma de principe :

- 1 Tuyau d'alimentation
- 2 Tête de dépose
- 3 Jet de matière
- 4 Support
- 5 Plateau de fabrication
- 6 Pièce à fabriquer

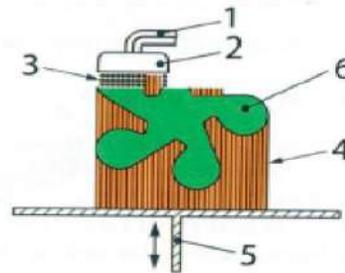


Figure 6 : Principe de la projection de gouttes de matériau, source [2]

Exemples et matériaux :

Matériaux plastiques photopolymérisables, cires synthétiques, thermoplastiques à bas point de fusion.



Figure 7 : Exemples de réalisation de pièces par projection de gouttes, source [3]

Avantages et limites :

Avec ce procédé on obtient de très bonnes qualités dimensionnelles et un bon état de surface (détails, belles finitions). Cependant les caractéristiques mécaniques sont limitées, de part les spécificités des matériaux utilisés.

Exemple de machine :

Projet HD 3000 3D Systèmes, coût 55000 € TTC, consommable de cire : 400 €/Kg TTC.



Machine à projection de gouttes, Projet HD 3000 3D Systems,

2. Polymérisation d'une résine sous l'action d'un laser

Principe :

Une résine photosensible réagit en surface sur une certaine profondeur sous l'action d'un laser le rayon laser est dévié par des miroirs pour balayer plus rapidement toute la surface. Il existe une variante utilisant un masque et une lampe UV.

Schéma de principe :

- 1 Source laser
- 2 Miroir galvanométrique
- 4 Support
- 5 Pièce à fabriquer
- 6 Résine photosensible
- 9 Eventuel racleur

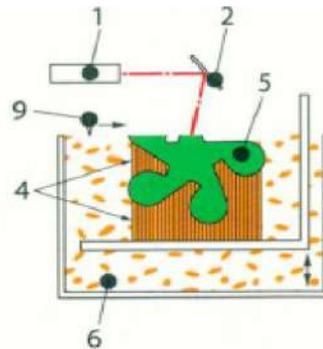
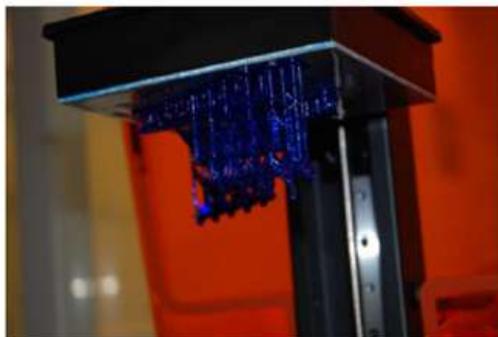


Figure 9 : Principe polymérisation d'une résine sous l'action d'un laser, source [2]

Exemples et matériaux :

Matériaux plastiques polymérisables types polycarbonate, ABS, Acrylique.



Avantages et limites :

L'état de surface est bon, ainsi que les qualités dimensionnelles. Mais les caractéristiques mécaniques sont limitées. Les objets peuvent être sensibles aux UV.

Exemple de Machine :

Formlabs form1+, coût : de 2500 à 4500 € TTC, consommable résine : 80 à 350 €/L TTC.



Figure 11 : Machine à polymérisation de résine par laser, Formlabs Form 1+, source [3]

3. Projection d'un liant sur un substrat de poudre

Principe

Une tête d'impression jet d'encre dépose de manière sélective un agent de liaison liquide afin de lier le matériau en poudre. La poudre non liée pouvant servir de support. Ensuite le plateau descend d'un incrément et l'impression se poursuit.

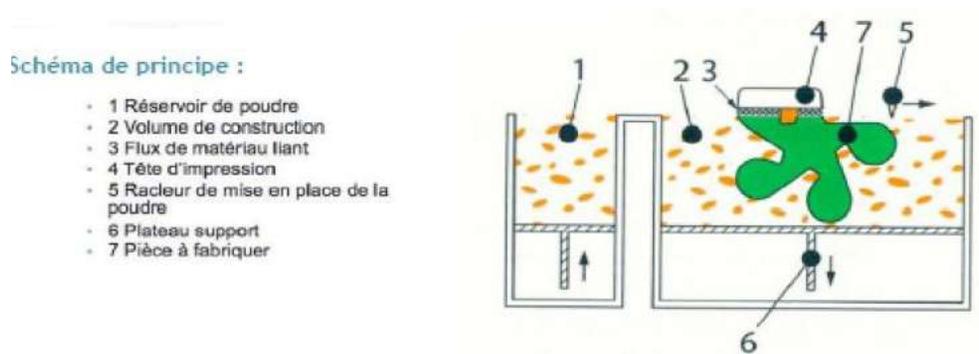


Figure 12 : Principe de la projection d'un liant sur un substrat de poudre, source [2]

Exemples et matériaux

Matériaux en poudre type plastiques, amidon, plâtre, métallique voire minéral (ex : sable)



Figure 13 : Exemple de réalisation de pièces par projection de liant, source D. Comberton

Avantages et limites :

Ce procédé est plus rapide (x5) mais on obtient moins de détails et des finitions moins bonnes. Par contre il est possible d'imprimer en couleur directement. Il est possible d'utiliser des matériaux écologiques et inoffensifs. Cependant les caractéristiques mécaniques sont limitées et on peut obtenir un aspect granuleux.

Exemple de machine :

Z corp, coût : 10 000 à 50 000 € TTC, consommable : 10 à 150 €/Kg TTC



Figure 14 : Machine à projection de liant sur substrat en poutre, Z Corp, source [3]

4. Solidification de poudre sous l'action d'une source d'énergie (laser ou faisceau d'électrons).

Principe :

Une énergie thermique permet de solidifier de manière sélective certaines zones d'un lit de poudre. Soit par laser (SLM – sélective laser Melting), soit par un faisceau d'électrons (EBM – electron – BeamMelting)

Schéma de principe :

- 1 Réservoir de poudre
- 2 Volume de construction
- 3 Tête laser
- 4 Miroirs galvanométriques
- 5 Racleur de mise en place de la poudre
- 6 Plateau support
- 7 Réservoir de poudre
- 8 Source d'énergie
- 9 Faisceau d'électron
- 10 Support
- 11 Pièce à fabriquer

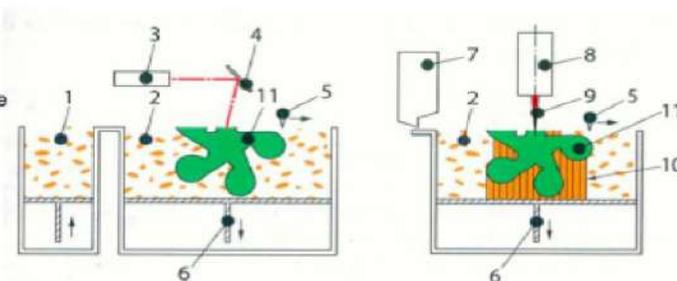


Figure 15 : Principe de la projection d'un liant sur un substrat de poudre, source [2]

Exemples et matériaux :

Matériaux en poudre type plastique, caoutchouc, sable et verre ou encore des poudres métalliques (aciers, aciers inoxydables, aluminium, titane).

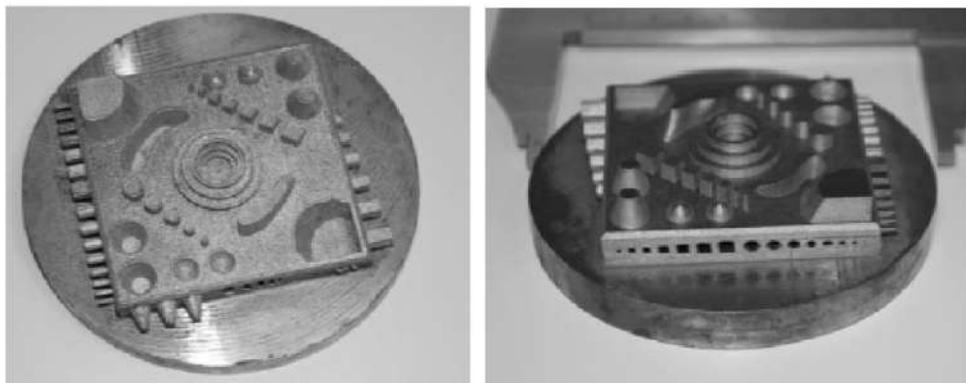


Figure 16 : Exemple de réalisation de pièces par solidification de poudre, source HHM

Avantages et milites :

Les caractéristiques mécaniques sont bonnes ; puisque proches ou matériau de base. Dans le cas d'une technologie à haute température on obtient des caractéristiques similaires à des pièces obtenues en fonderie.

Par contre le retrait de la pièce sur le support est une opération à prévoir et délicate à réaliser.

Exemples de Machine :

Formup 350 (SLM) et Arcam A2 (EBM), coût : plusieurs centaines de milliers d'euros, consommable : 200 à 1000 €/Kg TTC.



Figure 17 : Machine à solidification de poutre sous l'action de, source [3]

Ce procédé fait l'objet d'une ressource pédagogique à part entière : « Impression 3D : Procédé de fusion sur lit de poudre »

5. Dépôt de matière sous énergie concentrée

Principe :

Une source d'énergie (laser ou plasma) localisée fusionne le matériau d'apport et une couche mince du substrat. (Ce procédé se rapproche du soudage).

schéma de principe :

- 1 Réservoir de poudre
- 2 Flux d'énergie
- 3 Pièce en cours de construction
- 4 Plateau support
- 5 Dérouleur (fil)
- 6 Support

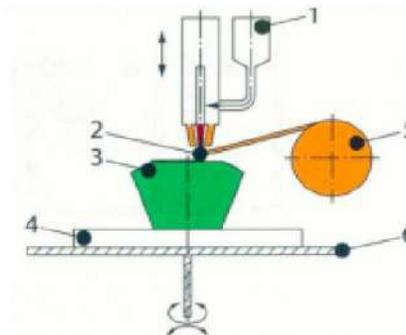


Figure 18 : Principe de dépôt de matière sous énergie concentrée, source [2]

Exemples et matériaux :

Les matériaux sont des poudres ou un fil, sous forme d'alliage ou de métaux purs. Il faut que le matériau soit soudable. (Alliage de titane, aciers inox, bases nickel).



Figure 19 : Exemple de réalisation de pièces par dépôt de matière sous énergie concentrée, source [3]

Avantages et limites :

Ce procédé permet de fabriquer des pièces de grandes dimensions, limité par l'enceinte de la machine. Les vitesses de fabrications sont élevées : 10 à 200 cm³/h selon la qualité désirée. Les caractéristiques matériaux sont bonnes, proches du matériau de base. Il y a un large choix de matériaux. De plus on peut ajouter de nouvelles parties à une pièce. Il existe

des machines de fraisage / tournage avec une buse à poudre.

Exemples de machine :

Machine BeAM modèle Magic (enceinte inerte) et Lasertec 65 3D (fraisage/tournage et buse à poudre), coût : plusieurs centaines de milliers d'euros, poudres : 350 à 1000 € /Kg TTC.



6. Fusion de fil au travers d'une buse chauffante

Principe :

Ce procédé dépose un fil thermoplaste chauffé et comprimé, celui-ci refroidit et durcit au contact de la couche précédente, elles sont donc liées. (Il peut y avoir un plateau chauffant ainsi que des enceintes thermo régulées.)

Schéma de principe :

- 1 Support
- 2 Plateau de fabrication
- 3 Buse chauffante d'extrusion motorisée en XY
- 4 Bobine fil plastique
- 5 Pièce à fabriquer

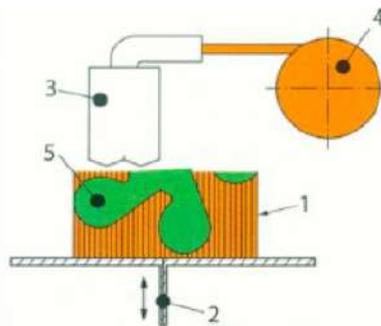


Figure 21 : Principe du dépôt de fusion au travers d'une buse chauffante, source [2]

Exemples et matériaux :

Les matériaux utilisés sont des thermoplastiques : ABS, polycarbonate, cire synthétique, acide polylactique (PLA).



Figure 22 : Exemples de réalisation par fusion au travers d'une buse chauffante, source D. Comberton

Avantages et limites :

Il s'agit d'un procédé assez lent, encore plus s'il s'agit d'une massive. Les caractéristiques mécaniques sont limitées au matériau utilisé. La finition et la précision sont des points à améliorer. Il s'agit du procédé le plus connu et le plus mature.

Exemples de Machine :

Il existe une grande gamme de machine, grand public et professionnelle. Citons : Fortus de Stratasys et la replicator de Makerbot, coût : de 250 à 50 000€ TTC, consommable (fil) : 35 à 350€/Kg TTC.



7. Assemblage de couches à partir de feuilles ou de plaques découpées

Principe :

Ce procédé consiste à coller et emplir des couches découpées. Un cutter ou un laser découpe la feuille qui est ensuite collée grâce à un rouleau chauffant.

Schéma de principe :

- 1 Source d'énergie (laser) ou système mécanique de découpe
- 2 Système de récupération de la matière non utilisée (chutes)
- 3 Rouleau de lamination
- 4 Plateau support
- 5 Pièce à fabriquer
- 6 Rouleau chargeur

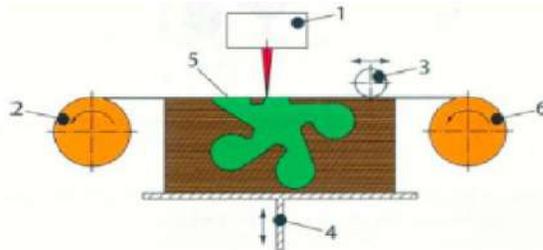


Figure 25 : Principe d'assemblage de couche à partir de feuilles, source [2]

Exemples et matériaux :

Les matériaux utilisés sont des rouleaux ou des plaques de papier, il peut aussi y avoir des polymères et de l'aluminium.



Avantages et limites :

Ces procédés sont robustes et performants surtout pour obtenir des modèles. Il faut cependant concevoir en ayant en tête le retrait des parties intérieures.

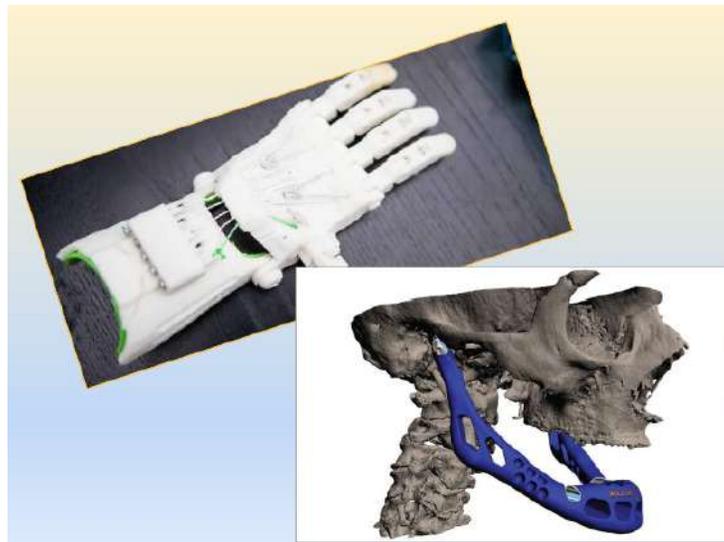
Exemples de machine :

IRIS de MCOR, coût : plusieurs dizaines de milliers d'euros



Figure 27 : Machine à assemblages de couches, IRIS de MCOR, source [3]

Exemple de pièces réalisées



Comparaison des différentes familles de procédés

Pour contrôler les pièces, il existe les moyens classiques comme la machine à mesurer tridimensionnelle et le scanner 3D, mais également la tomographie [7] qui permet de reconstruire couche par couche la pièce pour constater les défauts et connaître la porosité.

| Type de procédé | Qualité de finition | Nombre de matériaux | Outillages | Taille des pièces |
|----------------------------------|---------------------|---------------------|------------|---------------------|
| Assemblage de couche | Bonne | Important | Bon | Moyennes et grandes |
| Fusion de fils | Moyenne | Limité | Moyen | Petites et moyennes |
| Projection de poudre | Moyenne | | Bon | Moyennes et grandes |
| Solidification de poudre | | Correct | Correct | Petites et moyennes |
| Projection d'un liant de poudre | Moyenne | Limité | Moyen | Petites et moyennes |
| Projection de goutte de matériau | Correcte | Limité | Moyen | Petites et moyennes |
| Polymérisation d'une résine | Bonne | Limité | Moyen | Petites et moyennes |

Figure 28 : Comparaison des différentes familles de procédés

Glossaire

- **ABS** : Acrylonitrile – butadiène – styrène. c'est un copolymère
- **Carbonate** : sel ou ester de l'acide carbonique.
- **Monomère** : constitué de molécules simples.
- **Photopolymérisation** : substance synthétique qui subit une transformation moléculaire sous l'action de la lumière.
- **PLA** : Acide Polylactique, c'est un homopolymère d'acide lactique. Il s'agit en réalité d'un polymère de type polyester. Le PLA est un bioplastique compostable.
- **Plasma** : fluide constitué de particules ionisées correspondant à un quatrième état de la matière
- **Polyester** : nombreuses molécules d'ester
- **Polymérisation** : union de plusieurs molécules d'un composé pour former une grosse molécule.



SOUISSI Omar
Ingénieur, Docteur

Professeur à l'Institut National des Postes
et Télécommunications
Rabat, Maroc

Intelligence Artificielle et Machine Learning

S'il est présenté comme un concept radicalement nouveau, La réalité Etendue est en réalité l'aboutissement logique de technologies existantes comme la réalité augmentée, la réalité virtuelle, et les solutions cloud. L'une des premières perspectives d'applications de la réalité étendue dans le secteur industriel consiste, d'une part, à créer des espaces de collaboration virtuels pour des réunions plus engageantes et plus productives et, d'autre part, à favoriser la coopération à distance sur des projets, des revues de design ou encore des opérations de maintenance.

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET MACHINE LEARNING

1/ Intervention

Le secteur de l'industrie est indiscutablement l'un des secteurs les plus importants en termes de création d'emploi. Par ailleurs, dans un contexte où le phénomène d'inflation atteint plusieurs pays, il est nécessaire de posséder une industrie forte permettant d'un côté de répondre au besoin local. En effet, l'objectif est d'être moins dépendant de l'extérieur notamment en termes de produits finis qui coutent le plus cher. Par ailleurs, il s'agit aussi de se positionner comme un acteur fort en termes d'exportation visant ainsi à terme une balance commerciale plus équilibrée voire positive. Dans ce contexte les experts s'accordent sur l'importance de l'industrie 4.0 comme étant un impératif en vue de réussir la politiques d'industrialisation.

Avant de mettre la lumière sur l'apport des domaines de l'intelligence artificielle et notamment le machine learning comme étant un des éléments clé de l'industrie 4.0, prenons le temps d'abord pour rappeler les révolutions industrielles qui ont précédé l'industrie 4.0.

La première révolution industrielle date de la fin du 18ème siècle et est nul doute fortement marquée par la fameuse machine à vapeur de James WATT. Il s'agit, pour être juste, du fruit d'un cumul de savoir et de travaux antérieurs tels que ceux du fameux savant Ismail ALJAZARI ou encore Thomas NEWCOMEN. Concrètement, la machine à vapeur permet de transformer l'énergie thermique de la vapeur d'eau en énergie mécanique. Il s'agit ainsi d'une technologie disruptive permettant la transition de l'atelier vers l'usine permettant ainsi de productivité. Il est à noter aussi que les secteurs de textile

et de métallurgie ont connu aussi des progrès notables dans cette même période grâce à diverses inventions permettant la mécanisation de la production.

Ensuite, la deuxième révolution industrielle est marquée par l'utilisation désormais du Pétrole ainsi que de l'électricité. En effet, l'utilisation du Pétrole permettra sans exagération aucune de révolutionner le monde des transports impactant de manière directe le fonctionnement de l'usine. Par ailleurs, l'électricité grâce à une série de découvertes scientifiques devient la base d'un nouveau système technique générant une nouvelle structuration des usines ainsi que les performances de celles-ci. Désormais il est possible d'abandonner l'alimentation centralisée avec la machine à vapeur et d'alimenter chaque machine de manière individuelle en électricité. Un point non moins important qui a aussi marqué la deuxième révolution industrielle consiste en l'émergence d'un nouveau mode de production à savoir le Fordisme fruit d'un cumul de savoir incluant le Taylorisme. Il s'agit concrètement de la production de masse connue par son coût faible et son organisation linéaire de la fabrication composée de tâches répétitives.

Quant à la 3ème révolution industrielle, celle-ci est marquée par les avancées en électronique aboutissant à la transformation notamment des télécommunications, la radio diffusion, les ordinateurs ainsi que les automates. Par ailleurs, l'émergence de l'informatique a constitué un réel tournant ayant permis l'optimisation de la performance des usines sur toute la chaîne de valeur (de la gestion des commandes clients et des commandes en matière première jusqu'à la gestion des stocks et l'acheminement des produits finis et en passant par les procédés de fabrication).

Enfin un point non moins important de la troisième révolution industrielle est sans doute l'automatisation. En effet, la production de masse automatisée est désormais rendue plus flexible et efficace tout en étant moins coûteuse.

Avant d'aborder désormais l'industrie 4.0 rappelons d'abord qu'il existe une large diversité terminologique. En effet, on parle d'industrie du futur, de la 4ème révolution industrielle, l'industrie intelligente, l'industrie numérique... et ce ne sont ici que des exemples de termes parmi les plus utilisés pour désigner l'industrie 4.0.

Il est à noter que le terme « industrie 4.0 » a été employé pour la première fois en 2011 lors de l'élaboration d'un plan stratégique horizon 2020 sur les nouvelles technologies à la demande du gouvernement Allemand.

Maintenant pour la définition de l'industrie 4.0, je souligne d'abord qu'il y a une multitude de définitions. En effet, déjà en 2013 pas moins de 100 définitions de l'industrie 4.0 ont été répertoriées par l'association des télécommunications Allemande BITCOM.

Concrètement quand on parle de l'industrie 4.0, il s'agit de l'intégration d'un côté du monde réel et concret des équipements industriels et des machines et d'un autre côté du monde virtuel de l'information et d'internet. Les experts s'accordent aujourd'hui sur le fait que l'industrie 4.0 est due à l'émergence de nouvelles technologies principalement à faible coût et à forte valeur ajoutée. Parmi les technologies clés de l'industrie 4.0 nous pouvons citer :

- **L'intelligence artificielle et notamment la branche machine learning**
- **La réalité augmentée**
- **L'internet des objets**
- **La simulation**
- **La fabrication additive**
- **La cybersécurité**
- **Le traitement de données massives, le fameux Big data**
- **Cloud computing**
- **Robots autonomes**

L'industrie 4.0 présente une multitude d'avantages tel que la performance et l'accès en temps réel à l'information permettant de générer automatiquement des livrables à partir de l'information échangée avec les clients, les fournisseurs ainsi que les informations communiquées à partir du site industriel.

Ensuite, nous pouvons citer l'agilité et l'adaptabilité. En effet, l'une des promesses majeures de l'industrie 4.0 est la personnalisation avec une capacité accrue de répondre aux besoins multiples et évolutifs de la clientèle.

Par ailleurs, un avantage essentiel de l'industrie 4.0 est la gestion des risques. L'industrie 4.0 ultra connectée permet de limiter les erreurs et tirer profit de la traçabilité pour chercher la source desdites erreurs en vue d'y apporter rapidement une réponse adéquate.

Enfin, un élément qui revient de plus en plus concernant les avantages de l'industrie 4.0 concerne l'efficacité énergétique. Aujourd'hui le client s'intéresse de plus en plus à consommer de manière éco-compatible et par ailleurs de nouvelles réglementations émergent continuellement et visent notamment à limiter les émissions en CO2. Dans ce contexte, l'industrie 4.0 présente un réel avantage, en effet, la transition vers l'industrie 4.0 permet une vue globale sur les indicateurs énergétiques et écologiques permettant ainsi d'agir de manière efficace en vue d'optimiser lesdits indicateurs.

Ceci étant dit, la transition vers l'industrie 4.0 n'est pas tâche facile. Bien au contraire une manière non structurée de mener ladite transition non seulement pourrait se solder par un échec mais encore pire conduire à des pertes conséquentes. Ainsi, il est essentiel avant tout déploiement de l'industrie 4.0 d'étudier dans un premier temps le besoin spécifique de l'entreprise en question en répondant à un certain nombre de questions tels que :

- **Quel est le degré de maturité digital de l'entreprise ?**
- **Quelles sont les problèmes rencontrés actuellement et que l'industrie 4.0 permettrait de surmonter ?**
- **Quels sont les actions prioritaires et quels sont les moyens disponibles à court, moyen et long terme en vue de déployer la transition vers l'industrie 4.0 ?**

En effet, il n'est pas question d'appliquer une même stratégie, bien au contraire, le besoin dépend de l'industrie étudiée ainsi que du contexte industriel comme suscité.

Par ailleurs, un volet nécessaire est nul doute la formation. En effet, les employés doivent être prêts pour passer d'un travail routinier à des tâches de coordination de robot impliquant inévitablement une montée en compétence notamment sur le volet IT. Par ailleurs, les employés doivent être formés en vue d'acquérir et améliorer les capacités analytiques.

Enfin, l'agilité est indiscutablement, un élément facilitant fortement un déploiement plus aisé de l'industrie 4.0. En effet, l'idée ne consiste certes pas à concevoir un plan de travail figé et l'appliquer ensuite à la lettre contre vent et marrées. Mais plutôt tenir en compte du besoin évolutif en étudiant par ailleurs de manière continue les retombées des différentes actions engagées.

Dans le présent article nous nous intéressons à l'une des briques les plus importantes de l'industrie 4.0, à savoir l'intelligence artificielle. Selon l'Encyclopédie Larousse, il s'agit de « L'ensemble des théories et des techniques mises en œuvre en vue de réaliser des machines capables de simuler l'intelligence humaine ». Marvin Lee Minsky*, l'un des pères fondateurs de l'intelligence artificielle donne quant à lui la définition suivante : « La construction de programmes informatiques qui s'adonnent à des tâches qui sont, pour l'instant, accomplies de façon plus satisfaisante par des êtres humains car elles demandent des processus mentaux de haut niveau tels que : l'apprentissage perceptuel, l'organisation de la mémoire et le raisonnement critique. »

**** Marvin Lee Minsky 1927 – 1916 avec John McCarthy, il a été l'un des organisateurs de la conférence de Dartmouth qui est considérée comme l'acte de fondateur de l'intelligence artificielle en tant que champ de recherche autonome.***

Avant d'exposer les dernières avancées en intelligence artificielle, prenons le temps d'abord de revenir sur l'histoire de celle-ci. L'un des précurseurs est indiscutablement l'incontournable Alan TURING dont les travaux ont porté sur la mathématisation de l'intelligence humaine. Il réalise alors son célèbre test de Turing en 1950 permettant d'évaluer la capacité d'une machine à entretenir une conversation humaine.

Un peu plus tard, en 1956, John Mc CARTHY avec ses acolytes notamment Alan TURING et Marvin MINSKY, le nom intelligence artificielle est cité pour la première fois, il s'agit désormais d'une nouvelle discipline académique visant à modéliser l'intelligence humaine. Deux ans plus tard en 1958 John Mc CARTHY crée le langage d'intelligence artificielle LISP au sein de la prestigieuse université MIT

Toujours au sein de MIT, le programme ELIZA, considéré comme l'ancêtre du Chatbot a vu le jour entre 1964 et 1966 grâce aux travaux de Joseph WEIZENBAUM. Il s'agit d'un programme informatique permettant de simuler un psychologue américain en reformulant la plupart des affirmations du « patient » en questions et en les lui posant.

Des années plus tard, la victoire du programme Deep Blue sur le champion du monde des échecs Garry KASPAROV en 1997 marque une étape cruciale de l'histoire de la confrontation homme-machine concernant un jeu communément considéré

comme le jeu de l'intelligence.

Le concept d'apprentissage profond, le fameux deeplearning est nul doute l'une des raisons principales du retour en force de l'intérêt porté à l'intelligence artificielle (IA). Ayant pris forme en 2010, c'est précisément en 2012 où les yeux des spécialistes se sont tournés vers le deeplearning. En effet, dans l'une des compétitions les plus prisées en intelligence artificielle ImageNet organisée le 30 Septembre 2012, le réseau AlexNet surpasse l'ensemble des participants. Pour dire à quel point ce fut marquant, durant le défi qui a suivi, les participants ont opté pour le deeplearning en délaissant les autres approches.

En 2016, le programme AlphaGo développé par DeepMind (rachetée par Google) réussit à battre le meilleur joueur au jeu de Go, le fameux Lee Sedol. C'est un fait marquant, puisqu'il s'agit d'un jeu non seulement avec un nombre important de possibilités mais en plus Go est réputé pour faire appel à la créativité des joueurs.

Et pour voir à quel point l'IA est bien un domaine où il y a sans cesse de l'innovation, pas plus tard qu'en début d'année 2022, toujours la fameuse DeepMind dévoile désormais une IA compétitive capable d'obtenir un classement meilleur que 50 % des participants dans des compétitions de développement.

Concernant les domaines d'applications, nous pouvons avancer au jour d'aujourd'hui sans hésitation que l'IA est appliquée un peu partout.

Intéressons-nous à présent de plus près aux techniques de l'IA. Depuis les débuts de l'IA dans les années 1950, deux approches ont été employées :

Dans la première approche, la programmation symbolique, vous programmez des règles et résolvez un problème à travers une série d'étapes, une approche très appréciée par les pionniers de l'IA, qui pour la plupart sont des logiciens. Ladite approche a connu un franc succès dans les années 1980 avec le développement des systèmes experts, programmes dont le but est d'intégrer une base de connaissance et un moteur de décision venant de spécialistes de domaines pointus.

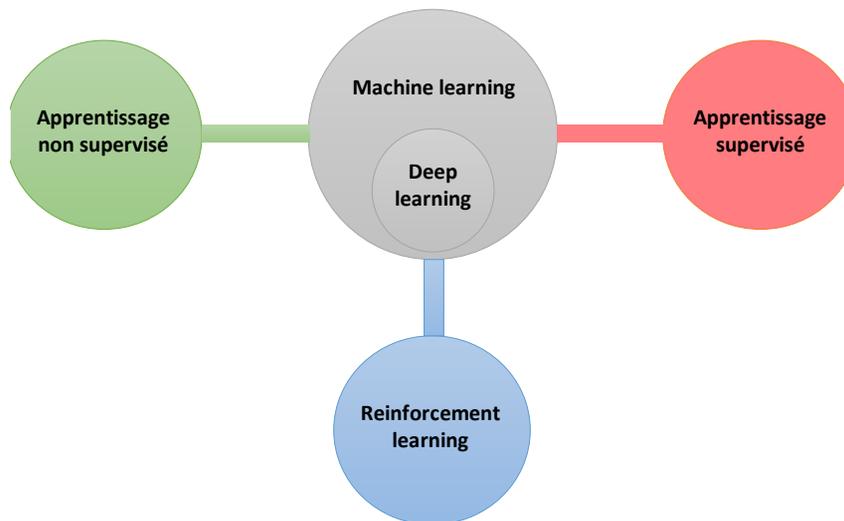
La programmation symbolique se compose de deux catégories principalement. La Programmation Impérative, il s'agit de décrire les opérations en séquences d'instructions exécutées par l'ordinateur pour modifier l'état du programme. La dite approche est nul doute la plus utilisée. Il existe néanmoins une autre catégorie : les langages déclaratifs. Dans un langage déclaratif, l'activité de programmation consiste à décrire le rapport qui existe entre les données et les résultats que l'on souhaite obtenir.

Le problème avec de tels systèmes est que dans la pratique des règles précises et écrites sont très difficiles voire impossibles à généraliser d'un problème à un autre. Et même pour un problème spécifique les règles évoluent souvent induisant ici la nécessité de développer de nouveaux modèles pour éviter d'obtenir des résultats biaisés.

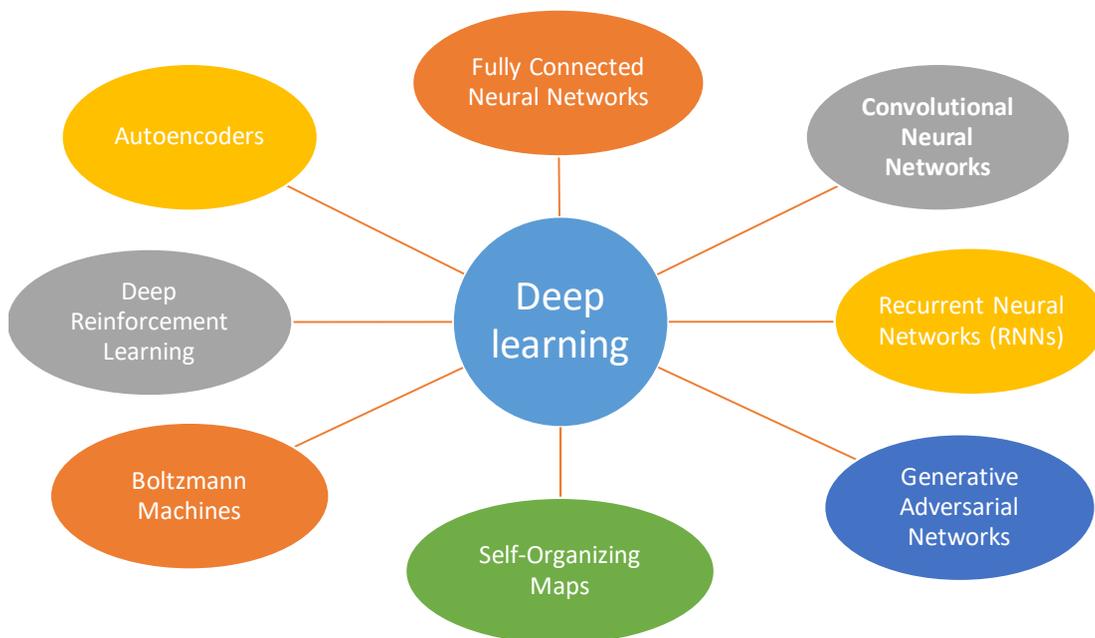
Concernant la deuxième approche, il s'agit de développer un modèle général laissant l'ajustement des paramètres du modèle à l'ordinateur qui utilise et ajuste les données qu'on lui fournit. C'est de nos jours l'approche la plus populaire, on parle ici du fameux « Machine learning ».

Le Machine learning se compose de trois grandes familles :

- **L'apprentissage supervisé**
- **L'apprentissage non supervisé**
- **L'apprentissage par renforcement**



Pour chacune des catégories suscitées, il existe une multitude d'approches utilisées, mais dans le présent article, nous nous intéressons uniquement aux deeplearning et nous introduirons par ailleurs les principes de l'apprentissage par renforcement.



Dans ce qui suit nous présenterons quelques-unes des techniques les plus prisées du deeplearning, à savoir :

- **Auto-encodeurs**
- **RNN**
- **CNN**
- **GAN**

Commençons sans tarder par les Auto-encodeurs, il s'agit sans doute de l'une des techniques les plus en vue en deeplearning. L'objectif de l'auto-encodeur est de reconstruire ses entrées : prédire une valeur cible X' la plus proche des entrées X (plutôt que de prédire une valeur cible Y étant donné les entrées X). Ainsi, un auto-encodeur est un modèle d'apprentissage non supervisé.

Les types d'auto-encodeurs, fonctionnent mieux dans le cadre des problèmes de :

- **Détection de fonctionnalités**
- **Mise en place d'un modèle de recommandation convaincant**
- **Ajout des fonctionnalités à de grands ensembles de données**

Une autre technique très utilisée en deep learning est le RNN réseau neuronal récurrent, il s'agit d'un type de réseau neuronal artificiel utilisant des données séquentielles ou des données de séries chronologiques. Ces algorithmes d'apprentissage en profondeur sont couramment utilisés pour les problèmes ordinaux ou temporels, tels que :

- **La traduction linguistique,**
- **Le traitement du langage naturel (nlp),**
- **La reconnaissance vocale et le sous-titrage d'images ;**

Les RNN sont intégrés dans des applications très populaires telles que Siri et Google Translate.

L'une des spécificités des RNN est la «mémoire» permettant de garder des informations d'entrées précédentes pour influencer l'entrée et la sortie actuelles. A la différence des réseaux de neurones profonds classiques supposant que les entrées et les sorties sont indépendantes, la sortie des RNN dépend des éléments antérieurs de la séquence.

Un autre type avancé des techniques deep learning est le CNN, réseau de neurones convolutif. Ce dernier est conçu pour s'attaquer à une plus grande complexité, au prétraitement et à la compilation de données. Les CNN peuvent être considérés comme l'un des modèles flexibles les plus efficaces pour se spécialiser notamment dans les données de type image.

Les CNN sont largement utilisées y compris pour :

- **la reconnaissance d'images,**
- **l'analyse et la segmentation d'images**
- **l'analyse vidéo**
- **le traitement du langage naturel.**

Les avancées ne cessent de paraître concernant les techniques de deep learning. L'une des approches les plus innovantes est le fameux GAN, réseau de neurones antagonistes génératifs. Les GAN ont été qualifiés par Yan LECUN, l'un des pères fondateurs du deep learning comme « L'idée la plus intéressante au cours de ces dix dernières années en Machine Learning ».

Concrètement, il s'agit d'une combinaison de deux techniques d'apprentissage en profondeur des réseaux de neurones - un générateur et un discriminateur. Alors que le réseau générateur produit des données artificielles, le rôle du discriminateur est de discerner entre une donnée vraie et une donnée fautive.

Les deux réseaux sont compétitifs, car le générateur continue de produire des données artificielles identiques aux données réelles - et le discriminateur détecte de manière continue les données réelles et irréelles.

Les GAN sont utilisés notamment pour :

- **Génération d'images et de textes**
- **Amélioration d'images**
- **Processus de découverte de nouveaux médicaments**

Sans tarder, intéressons-nous à présent à l'une des familles d'approches de machine learning les plus en vue. Inspiré des approches de commande optimale, le Reinforcement learning consiste à étudier et optimiser le comportement d'un agent en fonction du retour d'information de l'environnement. Plutôt que de simplement recevoir des instructions sur les actions à entreprendre, les actions les plus avantageuses sont déterminées à partir des retours sur les actions entreprises. On parle alors d'apprentissage par essais, erreurs et récompense différée.

L'utilisateur est ainsi orienté vers le meilleur résultat via une série de décisions succinctes permettant de « renforcer » le processus le plus adéquat pour résoudre le problème étudié.

Le Reinforcement learning (RL) constitue désormais aujourd'hui l'une des approches les plus prisées en machine learning et en IA. Et désormais des mathématiciens mais aussi des chercheurs dans divers domaines tels que la psychologie ou encore la théorie du contrôle s'allient en élargissant ainsi les champs d'application du RL.

Aujourd'hui, le RL est désormais adopté pour diverses utilisations telles que :

- **Conduite de véhicules autonomes.**
- **Gérer un portefeuille d'investissement**
- **Mise en place de stratégie Marketing**
- **Conception de robots intelligents**

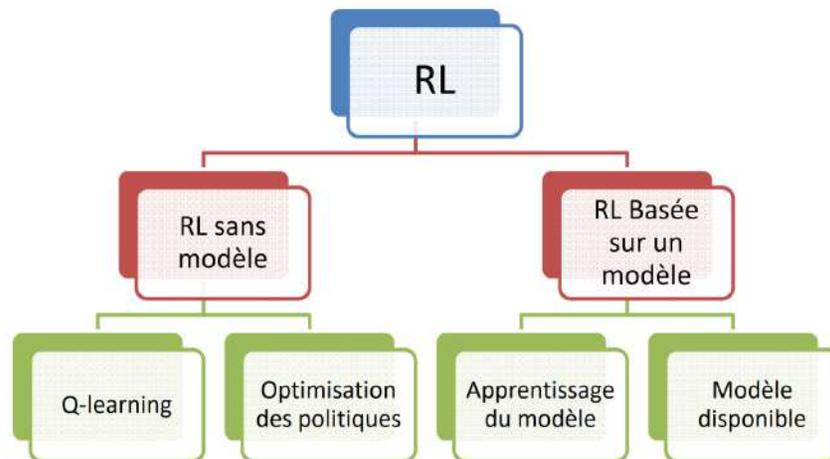
Notons par ailleurs que des géants tel que Amazon, Facebook ou encore Microsoft font du RL une priorité parmi leurs axes de recherche en IA.

Le principe du RL est basé sur une interaction itérée de l'agent décisionnel avec l'environnement, sous la forme de l'exécution à chaque instant « t » d'une action $A(t)$ depuis l'état courant $S(t)$, qui conduit au nouvel état $S'(t)$ et qui fournit la récompense $R(t)$.

En itérant sur ce type d'interaction, la politique de l'agent décisionnel s'améliore petit à petit en vue d'atteindre l'objectif souhaité. La majorité des algorithmes RL adoptent plus précisément l'approximation itérative d'une fonction de valeur issue de la théorie des Processus de Décision de Markov MDP.

Nous pouvons retrouver dans la littérature plusieurs taxonomies concernant les approches RL. Ici, nous mettons en exergue les deux principaux types d'approches adoptées en RL : « RL basée sur un modèle » et « RL sans modèle ».

- **La RL basée sur un modèle** fait référence à l'apprentissage d'un modèle à partir de l'environnement en prenant des mesures et en observant les résultats qui incluent l'état suivant et la récompense immédiate. Les modèles prédisent alors les résultats des actions et sont utilisés à la place (ou en plus) de l'interaction avec l'environnement pour apprendre des politiques optimales.
- **La RL sans modèle** n'utilise pas la distribution de probabilité de transition (et la fonction de récompense) associée au processus de décision de Markov (MDP). Un algorithme RL sans modèle peut être considéré comme un algorithme d'essai et d'erreur. Un exemple d'algorithme sans modèle est Q-learning.



Les approches de Machine learning exposées et notamment les fameuses techniques de Deep learning ont besoin d'une quantité très importante de données, on parle de données massives ou encore le fameux BIG DATA.

La définition initiale donnée par le cabinet McKinsey mettait en lumière la célèbre règle des 3V :

- **Volume (grand) de données,**
- **Variété (importante) de données**
- **Vitesse de traitement des données (s'apparentant parfois à du temps réel)**

Ces qualificatifs ont évolué, avec une vision davantage économique

- **Valeur**
- **Véracité des données (disposer de données fiables pour le traitement).**

Dans le cadre global qui nous intéresse dans cette étude, à savoir l'industrie 4.0. La BIG DATA est sans aucun doute un élément clé. Grâce aux différents capteurs installés, l'information liée aux sites industriels se multiplie, se complexifie et est désormais massive. En effet, cette digitalisation des usines augmente de manière exponentielle le flux de données relatives à la dématérialisation massive d'activités et l'interconnexion objets-machines-hommes.

Les outils BIG DATA, offre ainsi de nouvelles possibilités :

- **Considérer des objectifs évolutifs**
- **Avoir différentes sources de données**
- **Traiter des données semi ou non structurées**

- **Lancer des projets en équipe avec des objectifs et des retombés importants**
- **Réaliser des pré traitements complexes**
- **Tirer profit des machines de calcul**

A noter que des sondages récents montre que Python reste leader en termes de langage préféré par les data scientists. Ainsi pour les volets analyse et visualisation de données ainsi que Machine learning, Python, avec une communauté importante d'utilisateurs est en évolution continue, offre des possibilités fort intéressantes tout en étant un langage simple à apprendre et à utiliser.

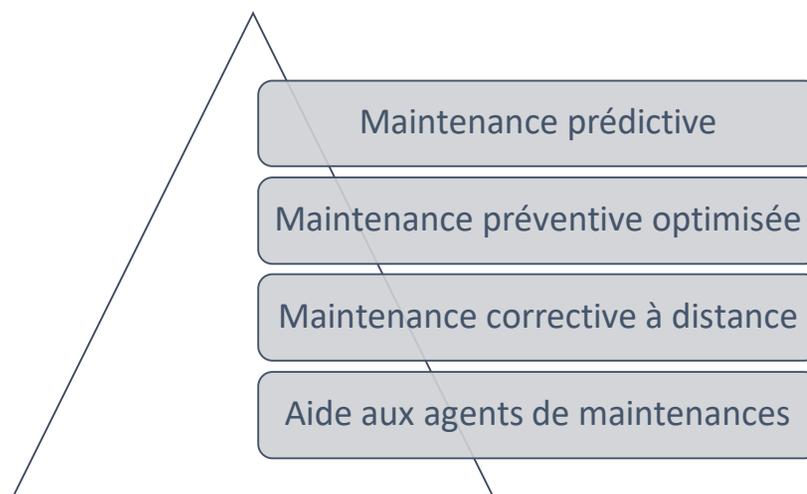
Par ailleurs, l'acquisition de données se fait via les systèmes SCADA Système de Contrôle et d'Acquisition de Données permettant de traiter en temps réel un grand nombre de mesures et de contrôler à distance des installations industrielles.

Sans tarder, exposant à présent trois champs d'application de l'IA pour la transition vers l'industrie 4.0 :

2/ Production

- **Améliorer la maintenance :**

En effet, de l'aide aux agents de maintenance jusqu' la maintenance prédictive et en passant par la maintenance corrective à distance ainsi que l'optimisation de la maintenance préventive, l'IA permet d'agir à tous les niveaux. Ainsi, une gestion optimisée de la maintenance permet entre autre de réduire de manière significative les arrêts de production non planifiés causés par des pannes.



- **Automatiser l'inventaire :**

Au sein même de l'Institut National de Postes et Télécommunications, nous avons développé une solution économique d'inventaire optimisé en utilisant un drone que nous avons équipé avec une caméra monoculaire. L'IA nous a permis de munir notre solution de la capacité de lecture de QR codes ainsi que l'évitement d'obstacles. L'inventaire se fait habituellement uniquement sur des périodes importantes, parfois de manière annuelle et imposant généralement la fermeture de l'entreprise et l'arrêt de la production. Sans oublier les risques relatifs à l'inventaire réalisé par des opérateurs. Ainsi grâce à notre solution dotée d'IA les bénéfices sont nombreux, en plus d'éviter l'arrêt de la production et les risques d'inventaire manuel, celle-ci offre la possibilité aussi de réaliser l'inventaire avec une fréquence hebdomadaire voire quotidienne permettant ainsi une meilleure gestion de l'entrepôt.



3/ Qualité

- **Manipulation et tri automatisé :**

Grâce aux algorithmes de vision par ordinateur, l'IA offre désormais la possibilité de réaliser de manière automatisée les opérations suivantes :

- > Détecter la non-conformité par exemple : détecter (avec les approches de traitement d'image) des anomalies, telles que : des rayures, salissement, décoloration et bavures sur les textures.
- > Déterminer les rebus
- > Retirer les produits non conformes et les rebuts

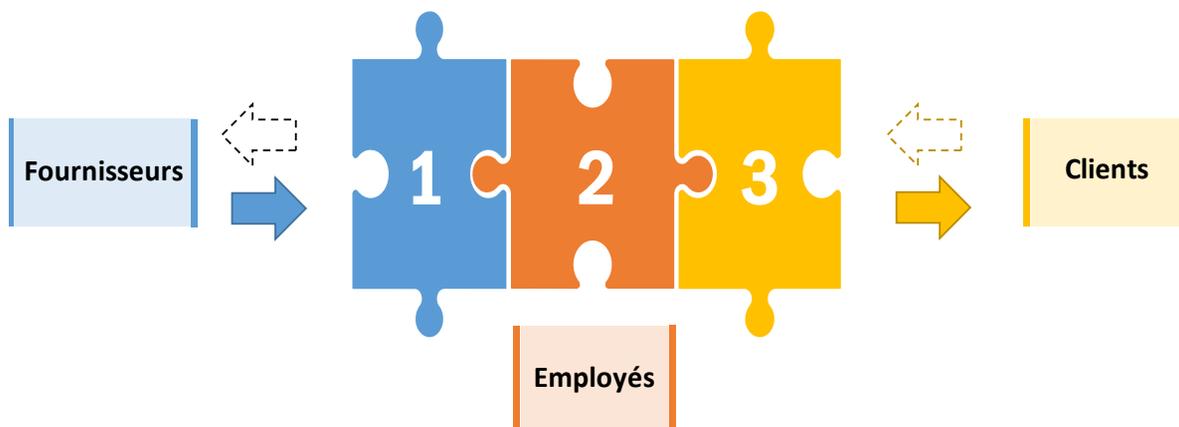
4/ Déploiement du Lean Six Sigma

- **Encore la QUALITE avec les cartes de contrôle :**

Désormais l'utilisation massive des capteurs élargit de manière significative le champ du possible. En effet, il est possible de contrôler chaque pièce et ne plus être obligé de se limiter à un échantillon. Par ailleurs, la maîtrise statistique des procédés ainsi que les corrections engendrées pourraient être automatisées grâce à l'IA.

- **Le fameux Juste A Temps :**

Grâce à l'IA, il est possible d'optimiser de manière significatives les flux matériels et d'informations et viser ainsi le fameux juste à temps.



A noter par ailleurs, que les approches de l'IA permettent aussi de se munir d'outils permettant de :

- > Prévoir les tendances de consommation.
- > Prévoir la demande client.
- > Prévoir les dates de livraison.

Dans cette article nous avons mis en exergue les avantages et la nécessité de la transition vers l'industrie 4.0. Par ailleurs, nous sommes revenus sur l'histoire et l'évolution de l'IA et exposer son rôle central dans l'industrie 4.0. Enfin, nous avons présenté quelques exemples permettant de réaliser des gains significatifs en termes de réduction des coûts liés à la production et la non qualité ainsi que la satisfaction client.

Nous n'omettrons pas de souligner qu'il ne s'agit dans cette article que d'une petite introduction à l'immense champ de possibilités et avantages qu'offre l'IA pour rendre nos usines intelligentes.



MALEH Yassine

Docteur

Professeur à l'Ecole Nationale des Sciences
Appliquées Khouribga, Maroc

Cyber Physical Systems et Communication M2M

L'avenir des systèmes industriels, représenté principalement par l'industrie 4.0, dépendra de la convergence des travaux de recherche récents dans les domaines des architectures de contrôle, des systèmes cyber-physiques (CPS) et de l'Internet des objets (IoT). Les systèmes cyber-physiques (CPS) sont des systèmes embarqués sophistiqués qui interagissent avec leur environnement de manière continue et dynamique. Ils comprennent l'informatique, la communication et les dimensions physiques. Ils sont cruciaux pour les réseaux intelligents, les réseaux de circulation des véhicules, les bâtiments intelligents, la robotique coopérative, l'automobile et les systèmes avioniques. Blockchain (BC) est une méthode réaliste pour produire un grand registre public sécurisé et décentralisé, permettant une variété de nouvelles applications technologiques intéressantes dans les systèmes cyber-physiques tels que l'Internet des objets (IoT), le manufacturing, le transport et la chaîne d'approvisionnement, parmi beaucoup d'autres. Ce papier présente un examen et une discussion approfondis de nombreuses applications et uses cases de blockchain pour systèmes cyber-physiques. De nombreuses applications, dont les soins de santé, le transport et la cybersécurité, peuvent bénéficier de la technologie blockchain, comme nous l'explorerons dans ce document.

BLOCKCHAIN POUR LES SYSTÈMES CYBER-PHYSIQUES : DÉFIS ET APPLICATIONS

1/ Introduction

La croissance des systèmes cyber-physiques (CPS) et l'internet industriel des objets nécessitent la résolution de plusieurs problèmes d'échange et de traitement des données, notamment le stockage, l'accès, la sécurité, etc. De plus, il existe une tendance contemporaine à développer des systèmes distribués plutôt que des systèmes centralisés. L'une des caractéristiques les plus essentielles de l'internet des objets est l'autonomie de ses nœuds et leur capacité à interagir les uns avec les autres. [1]. Il s'agit d'une interaction basée sur les services dans laquelle des nœuds spécialisés fournissent des services aux autres nœuds du réseau. Certaines implémentations de blockchain utilisent un mécanisme de contrat intelligent pour permettre une telle interaction.

La technologie blockchain est très générale ; nombre de ses applications sont désormais utilisées dans divers domaines de l'activité humaine [2]. Pour utiliser efficacement tous les avantages de la technologie blockchain dans le développement de CPS et l'Internet industriel des objets, il est nécessaire de concevoir la topologie idéale du réseau blockchain en fonction

des tâches à accomplir et de sélectionner les outils (logiciels et matériels) les plus pertinents.

Un système cyber-physique (CPS) résulte de l'intégration du calcul avec les processus physiques. D'autre part, certains affirment qu'il s'agit d'un système qui combine des éléments environnementaux avec la partie computationnelle. Les données acquises de l'environnement et les actions dans l'environnement correspondent aux éléments environnementaux. À partir du moment où il y a une traduction des données de l'environnement dans le monde numérique, il est de la responsabilité de l'informatique de traiter ces données. Les CPS surveillent et contrôlent le monde physique, avec la possibilité de disposer de réseaux de capteurs ainsi que d'actionneurs associés [3]. Ainsi, ce type de systèmes dépend de la synergie entre les composants physiques et informatiques. D'autre part, et contrairement aux systèmes embarqués traditionnels, les CPS mettent l'accent sur une vision holistique du système, c'est-à-dire qu'ils le considèrent comme un tout, et pas seulement comme plusieurs modules isolés. La figure montre l'architecture de base d'un CPS.

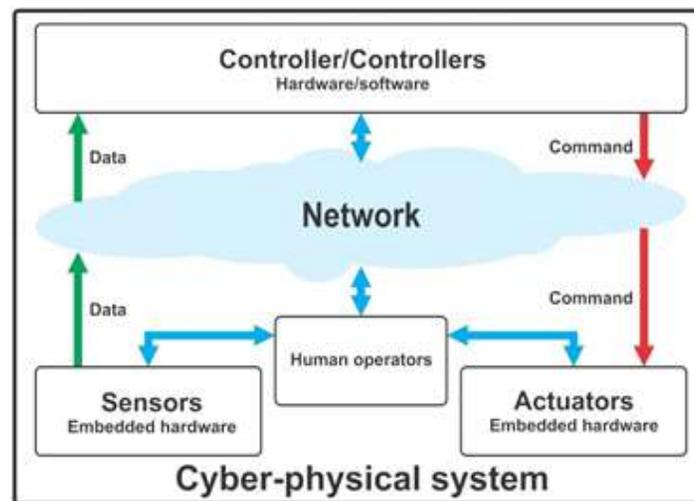


Figure 1. Architecture des systèmes cyber-physiques

Les CPS ont des applications dans une grande variété de domaines, notamment les systèmes et dispositifs médicaux et de maintien des fonctions vitales à haute fiabilité, le contrôle et la sécurité du trafic, les systèmes automobiles avancés, le contrôle des processus, la conservation de l'énergie, le contrôle environnemental, l'aviation, l'instrumentation, la robotique distribuée (téléprésence, télé médecine), les systèmes de défense, la fabrication, les structures intelligentes et le contrôle des infrastructures critiques (par exemple, les réseaux électriques, les ressources en eau et les systèmes de communication) [4].

Ainsi, après un examen détaillé des concepts d'internet industriel des objets et de systèmes de production cyber-physiques, nous pouvons passer directement à la mise en œuvre de la technologie blockchain dans leur structure.

La technologie blockchain était principalement utilisée pour protéger les systèmes de stockage, les contrats intelligents, les transactions financières et les notaires. D'autres applications, comme les soins de santé, la chaîne d'approvisionnement, le transport et la cybersécurité, ont rapidement reconnu ses avantages, car le secteur a compris qu'il pouvait accroître son efficacité en mettant en œuvre la blockchain. Cela a donné lieu à un champ d'investigation actif, les chercheurs et les scientifiques se penchant actuellement sur les diverses utilisations de cette technologie. Parmi les utilisations les plus fréquemment citées figurent les soins de santé, les transports et la cybersécurité. Les principales contributions de ce document sont les suivantes :

- Fournir une analyse détaillée et approfondie des applications dans les systèmes CPS où la blockchain est mise en œuvre.
- Identifier les différents défis et limites des applications blockchain.

Ce chapitre est organisé comme suit : Les applications de la blockchain dans les systèmes CPS, notamment les soins de santé, le transport et la cybersécurité, sont abordées dans la section 2. La section discute des limites de la blockchain et propose des suggestions pour l'avenir. La section 4 conclut ce travail.

2/ Développement

La technologie blockchain fait l'objet de nombreux débats scientifiques dans le monde. Selon Gupta [5], la blockchain est un système d'enregistrement d'informations personnalisé avec des caractéristiques de sécurité qui rendent impossible le piratage ou la tricherie dans le système. Abadi et Brunnermeier [6] indiquent un système de grand livre qui décentralise les enregistrements en les distribuant sur tous les réseaux blockchain. Les transactions dans le système blockchain sont distribuées à tous les participants du système, ce qui rend difficile la tricherie ou le vol. Ils indiquent en outre que l'exactitude, la décentralisation et la rentabilité de la technologie en font un excellent système de tenue de registres. Leur comparaison du système avec le système centralisé traditionnel met en évidence la formidable révolution que la blockchain a apportée au secteur de la tenue des registres. L'une des caractéristiques essentielles de la blockchain réside dans les algorithmes qui permettent aux responsables de la tenue des registres de revenir en arrière et d'annuler les faux rapports dans les enregistrements historiques du grand livre. Outre le secteur financier, le système est très utile pour les marchés publics, les applications Internet et d'autres secteurs où la transparence est indispensable.

La Blockchain est sans aucun doute l'innovation majeure. Nous avons assisté à une croissance massive de l'application de Blockchain dans l'industrie. Non seulement elle a conduit à la transformation d'entreprises comme Airbnb et Dropbox, et bien d'autres. Ce changement dans la façon dont les entreprises fonctionnent contribuera à stimuler la croissance et à améliorer l'efficacité de l'entreprise. Il aidera également le gouvernement à obtenir plus de personnes employées, la meilleure qualité des services. Elle a joué un rôle essentiel pour les entreprises en offrant une alternative rentable et efficace aux paiements en espèces. La technologie blockchain permet au système de paiement de fonctionner. Elle est également utile dans plusieurs applications, notamment l'identité numérique, le commerce électronique, les assurances, la gestion des biens, les paiements électroniques et le crowdfunding. Le fait qu'elle facilite le flux de données et d'informations. La possibilité de vérifier chaque transaction effectuée sur un réseau. La capacité de faire des choses qui sont impossibles dans les institutions financières conventionnelles et les entreprises et les entreprises peuvent réaliser en moins de deux secondes. La vitesse à laquelle les entreprises et les industries peuvent créer de nouveaux produits et services.

La technologie Blockchain repose sur le consensus, qui est le principe de fonctionnement de la Blockchain. Blockchain a eu un impact significatif sur les entreprises et les industries dans plusieurs secteurs. Par exemple, la plus grande entreprise informatique d'Amérique, Accenture, a déclaré qu'elle explorait une mise en œuvre de Blockchain pour construire des applications basées sur la blockchain. Comme pour toute technologie, il existe plusieurs utilisations de Blockchain - par exemple, pour permettre des enchères automatisées et à faible latence par le biais de systèmes de contrats automatisés ou de systèmes d'enregistrement pour les grandes entreprises complexes ou pour rendre certaines formes de transactions plus sûres et efficaces.

Ce document se concentre principalement sur les applications blockchain émergentes pour les systèmes cyber-physiques, à savoir les dossiers médicaux, les transports, le commerce électronique, la finance et la cybersécurité. Le tableau 1 énumère les différents systèmes couverts par l'étude, ainsi que leurs domaines d'application respectifs.

Tableau 1. Domaines d'application du CPS

| Systèmes | Applications | Avantages |
|-----------------------|---|---|
| Transport | Électronique automobile, systèmes ferroviaires, réseaux routiers, aviation et gestion de l'espace aérien | <ul style="list-style-type: none"> - Facilitation de la gestion complexe de la conformité des flux et des équipements - Simplification des procédures de paiement - Traçabilité des flux - Logistique inverse |
| e-commerce | Surveillance et suivi de la chaîne d'approvisionnement pour garantir l'ouverture du marché, Refonte du système de paiement, Plateforme de commerce électronique sécurisée, Témoignages de produits pour la vraie vie. | <ul style="list-style-type: none"> - Méthodes de paiement alternatives - Meilleur traitement des commandes - Sécurité renforcée des paiements - Des transactions plus rapides |
| Soins de santé | Électronique automobile, systèmes ferroviaires, réseaux routiers, aviation et gestion de l'espace aérien. | <ul style="list-style-type: none"> - Gestion des données médicales - Optimisation des essais cliniques - Traçabilité des médicaments et lutte contre la contrefaçon |
| Finances | Prévention de la fraude, Inclusion financière, Prévention du blanchiment d'argent, Trade Finance, Smart Assets et Smart Contracts | <ul style="list-style-type: none"> - Uberisation des services bancaires - Facilitation des transferts de fonds - Des transactions plus sûres et plus efficaces |
| Cybersécurité | Infrastructure de signature sans clé, anonymat des utilisateurs, validation des transactions dans les systèmes cyber-physiques, authentification des données. | <ul style="list-style-type: none"> - Sécurité permanente des données - La décentralisation sur une blockchain pourrait remplacer les autorités de certification - Authentification avancée |

3/ Applications dans le domaine des transports

Toutes les données de suivi et de traçage doivent être collectées, consolidées et archivées pour que la traçabilité soit assurée. Grâce aux données de suivi, je suis en mesure de savoir où se trouve mon produit à tout moment. L'historique de toutes les étapes franchies par mon objet est appelé données de suivi. Wattanakul et al. [7] ont déclaré que les données de suivi se présentent sous trois formes : les données de réglage, les conditions liées au transport et les transactions liées aux affaires. Une fréquence (en temps réel, sur événement, par lot ou hors ligne) et une méthode de collecte sont souvent spécifiées pour chacun de ces types de données. Wattanakul et al. [7] indiquent que ces données de traçabilité peuvent être divisées en trois catégories en fonction de leurs caractéristiques : (1) Master (pour les données non changeantes, telles que les identifiants) ; (2) Transactionnel (par exemple, les heures de départ et d'arrivée) ; (3) Conditions d'état ; (4) (par exemple, la température, l'humidité). Ces données peuvent également être utilisées pour faire des choix tactiques et stratégiques après avoir été collectées, nettoyées, agrégées et archivées. En ce qui concerne la traçabilité de la chaîne d'approvisionnement, la conception traditionnelle repose sur la collecte d'informations principalement par le biais d'échanges EDI, avec quelques appels à des services Web. Dans certains cas, les systèmes d'information des transporteurs sont la seule source de toutes les informations de traçabilité. Ces appels et ces échanges sont donc nécessaires. Il est possible d'obtenir ces informations en utilisant le courrier électronique, les conversations téléphoniques ou même la messagerie textuelle. Ces systèmes présentent les inconvénients suivants.

- L'impossibilité de disposer des informations de traçabilité en temps réel car il faut à chaque fois que l'information soit collectée, saisie et mise à disposition par le système d'information du transporteur, pour qu'elle puisse être récupérée par les autres participants de la chaîne logistique.

- Le stockage centralisé des informations de traçabilité par le transporteur constitue une menace sérieuse pour la disponibilité et la fiabilité de ces informations. La manière dont un transporteur collecte et transmet les informations affecte de manière significative la qualité des données.
- Comme l'information est retardée, les défauts éventuels de la chaîne d'approvisionnement ne sont pas corrigés. Cependant, même si les services web sont disponibles, le système d'information de l'opérateur logistique doit se déplacer pour recevoir l'information, ce qui entraîne des retards avant que les événements ou les problèmes dans la chaîne de transport ne soient signalés. Les obstacles suivants doivent être résolus afin de développer des systèmes de traçabilité de la chaîne d'approvisionnement qui soient fiables et réactifs.
- Le partage de la traçabilité, c'est-à-dire la mise à disposition des données à toutes les parties prenantes de la chaîne d'approvisionnement, apportera de la transparence aux opérations et au traitement au sein de la chaîne d'approvisionnement.
- La possibilité de disposer de systèmes réactifs permet de recevoir des notifications d'événements survenant dans les chaînes d'approvisionnement et de s'adapter à ces événements. Les événements peuvent être, par exemple, des changements dans les besoins des clients ou un événement imprévu qui se produit dans la chaîne d'approvisionnement et qui nécessitera une décision rapide pour qu'il n'y ait pas de retard dans la livraison, ou du moins, s'il y a un retard, pour le minimiser autant que possible. Cela nécessiterait de mettre en œuvre des actions qui seraient déclenchées de manière réactive par des événements survenant dans la chaîne de transport.
- Vérification de la fiabilité et de la qualité des informations transmises par le système.

L'architecture nationale des STI du ministère américain des transports est présentée à la figure 3.

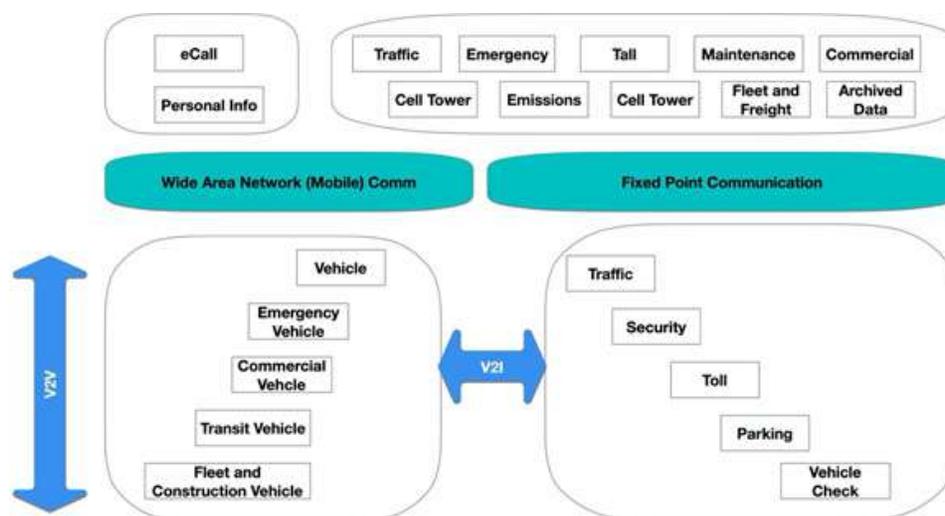


Figure 3. Systèmes de transport intelligents (US DOT)

Les éléments de capteurs intégrés dans les automobiles connectées leur fournissent une image à 360 degrés de leur environnement et leur permettent de le surveiller. Par exemple, les systèmes de navigation, les caméras, les capteurs de proximité, les capteurs de lumière et les capteurs de radiofréquence ne sont que quelques exemples de ce qu'ils peuvent faire. Pour informer les véhicules et les infrastructures en cas d'accident, la fusion de capteurs synchronise les données de plusieurs capteurs avec les données en temps réel de la route. C'est grâce à cela que les technologies d'assistance au conducteur, comme les avertisseurs de franchissement de ligne, et les techniques de prévention des accidents deviennent plus courantes. Tous ces aspects ont fait que les automobiles modernes sont équipées d'un large éventail de dispositifs et de protocoles de communication qui facilitent le partage des données entre les véhicules. Le protocole DSRC (Dedicated Short Range Communications) est le seul protocole actuellement approuvé pour une utilisation dans les systèmes de transport intelligents (ITS) à 5,9 GHz. [8]. Le protocole de messagerie IEEE 1609.2-4 et les services de sécurité permettent d'utiliser des scénarios de communication V2V tels que les feux de freinage d'urgence électroniques, l'alerte de collision avant et la détection des angles morts. Exigences de sécurité de base selon la norme SAE J2735 La transmission d'informations entre les véhicules sur la route s'effectue par l'utilisation de messages (BSM). Les BSM indiquent aux autres voitures leur emplacement, leur taille et leur vitesse, afin qu'elles soient toujours conscientes de leur environnement. Des certificats basés sur l'ICP sont utilisés pour crypter les données, garantissant que le message de sécurité reste intact.

La protection décentralisée des capteurs et des canaux de communication a été proposée par Rathore et al. [9]. En utilisant une architecture basée sur la blockchain, ils échangent en toute sécurité des communications entre des automobiles reliées. La communication entre véhicules intelligents est mise en œuvre à l'aide de la méthode de la chaîne de blocs et d'un système de récompense par Trust Bit. [10]. Il récompense une communication efficace en échangeant des bits de confiance. Ces bits de confiance sont échangés dans le nuage du véhicule à l'aide de la technologie blockchain, qui enregistre et préserve la documentation historique de ces transactions. Ainsi, les voitures peuvent accéder en toute sécurité à toutes les informations contenues dans les bits de confiance, quel que soit le temps ou l'espace dont elles disposent. Chaudhary et al. [11] ont présenté un système de blockchain ramifié qui explore les concepts de blockchain dynamique locale et de blockchain maître. Les points de confiance des véhicules intelligents sont des identifiants cryptographiques qui garantissent la sûreté et la sécurité des automobiles en s'assurant qu'il n'y en a pas deux identiques. Les véhicules communiquent entre eux en utilisant la blockchain dynamique locale pour vérifier les identifiants. Calvo et al. [12] ont présenté un tout nouveau système sécurisé de communication entre véhicules connectés, basé sur la blockchain. Un système basé sur la signature en anneau est utilisé pour vérifier l'identité des nouvelles voitures avant de les autoriser à rejoindre le réseau.

Afin de partager les informations fournies par les contrats intelligents multipartites, des canaux de communication sécurisés sont utilisés pour parvenir à un accord entre les voitures en utilisant une méthode basée sur la blockchain. Il y a eu une proposition en [13] pour une blockchain multi-signatures. De nouveaux services automobiles, comme les mises à jour logicielles à distance, sont fournis sans divulguer d'informations personnelles sur les voitures dans lesquelles ils sont utilisés. Selon Yuan et al. [14] un paradigme conceptuel à sept couches basé sur la blockchain pour le transport intelligent a été développé, permettant un environnement décentralisé sûr et fiable. Des contrats intelligents basés sur Ethereum ont été intégrés aux technologies de réseaux automobiles par Leiding et al. [15]. Lorsque les voitures deviennent de plus en plus dépendantes des logiciels, une question critique se pose : comment les mises à niveau logicielles seront-elles gérées à mesure que de nouvelles fonctionnalités seront ajoutées ?

Comme l'ont montré Steger et al. [16] la technologie de superposition peut être utilisée à cette fin. Un réseau de superposition en nuage est utilisé dans cette stratégie pour transporter les données entre les fournisseurs de logiciels, les systèmes de stockage en nuage et les interfaces automobiles. La technologie blockchain et les mécanismes de distribution de logiciels utilisent tous deux ces messages. Aguirre et al. [17] ont présenté un système de véhicule doté d'un ensemble de CPU pour exécuter des fonctions axées sur les données, comme la création de rapports. Le protocole de crypto-monnaie est utilisé pour créer un enregistrement de monnaie numérique spécifique au véhicule pour ces activités. Chaque fois que vous effectuez un achat, la valeur de cette monnaie numérique change. Elle est conservée en mémoire et envoyée sur le réseau lorsque vous effectuez une transaction. Rowan et al. [18] ont présenté une nouvelle méthode de blockchain pour sécuriser la lumière visible et la communication par canal latéral auditif dans les automobiles. Il est proposé dans [19] d'utiliser la blockchain pour sécuriser l'exécution du remplissage d'énergie pour les voitures électriques à conduite autonome. Chaudhary et al. [11] ont présenté un système de communication intelligent de véhicule à véhicule basé sur la blockchain et basé sur la récompense. Il renforce la sécurité et la confidentialité tout en permettant une communication rapide et sûre entre les automobiles sur la route. Le tableau 2 énumère les utilisations de la blockchain liées au transport.

Tableau 2. Application de la blockchain dans les transports

| Domaine d'application | Applications | Contributions |
|---|---|---|
| Systèmes de transport intelligents [14] | Systèmes de transport intelligents | Examinez les nouveaux modèles commerciaux et les situations d'application pratique, ainsi que les raisons qui les motivent. |
| Charge it up [19] | Systèmes de mobilité intelligents : canaux de retard, de latence, de sécurité et d'état des coûts | Les canaux d'État peuvent être utilisés pour les journaux de contrôle et les connexions dans les systèmes de mobilité intelligents. |
| TangleCV [20] | Vehicular edge computing (VEC) | Mettre à jour les procédures d'authentification pour résoudre les problèmes de communication entre de nombreuses voitures et un seul nœud informatique périphérique digne de confiance. |

| | | |
|--|--|--|
| Trustbit [10] | Communication intelligente entre véhicules | Identifier et résoudre les problèmes liés à la fiabilité et à l'exactitude des données reçues et diffusées par le canal de communication. |
| Intelligent vehicle trust point [21] | Véhicule intelligent (IV) | L'accent est mis sur la fiabilité, l'exactitude et la sécurité de la communication IV sur le trajet de la communication, qui constituent des défis majeurs. |
| CUBE [13] | Réseau de voitures autonomes | Prévenir les agressions nuisibles en utilisant l'intelligence artificielle (IA). |
| Fast and secure multihop algorithm for IVC[22] | Intervehicular communication (IVC) | L'injection d'informations sans fil entre véhicules entraînant des pertes de vie et d'argent ou tout autre type d'égoïsme hostile est une question à traiter (par exemple, la réorientation du trafic au profit de la partie adverse). |
| BEST [11] | Système de transport intelligent | La création d'un environnement d'échange d'énergie sûr pour la charge et la décharge du réseau intelligent est un bon point de départ. |
| Privacy-preserving blockchain-based electric vehicle charging [23] | Chargement des véhicules électriques | Les clients doivent rechercher les stations de recharge dans leur région pour trouver la meilleure offre tout en préservant leur vie privée. |
| Blockchain for ITS [24] | Système de transport intelligent | Posez la question de la récupération des données pertinentes et de la suppression des faits et statistiques non pertinents lors de la description de scénarios particuliers, comme un accident. |

4/ Blockchain dans le secteur de la santé

Grâce à son mécanisme de stabilisation et de sauvegarde de l'ensemble des données avec lesquelles les utilisateurs peuvent interagir par le biais de divers types de transactions, la technologie blockchain offre d'énormes possibilités pour les applications biomédicales, génomiques, de télémédecine, de télésurveillance, de santé en ligne, de neurosciences et de soins de santé personnalisés en général (voir la figure 4).

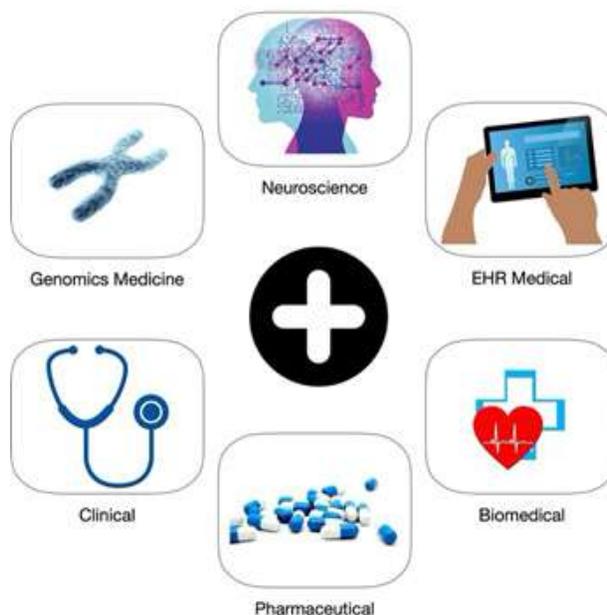


Figure 4. Blockchain dans le secteur de la santé

Voici quelques domaines de la santé et de la médecine où la technologie blockchain est extrêmement prometteuse. Biométrie, blockchain et DSE (EHR) Les médecins, les hôpitaux et les dispositifs médicaux ont tous poussé à la numérisation des dossiers médicaux au cours de la dernière décennie, car la numérisation de ces données facilite leur accès et leur partage et constitue une base pour une prise de décision meilleure et plus rapide. L'une des applications les plus courantes de la technologie blockchain dans les soins de santé est le dossier médical électronique.

Les patients qui se séparent plus tard des données d'un prestataire de soins de santé peuvent facilement perdre l'accès à leurs données passées s'ils utilisent des dossiers médicaux électroniques (DME), qui ne sont pas destinés à conserver les dossiers de plusieurs établissements médicaux et patients. De nombreux universitaires ont envisagé l'utilisation de la technologie blockchain pour la maintenance des DSE, car il est vital de découvrir une approche innovante pour administrer les DSE afin d'encourager les patients à accéder à leurs données de santé actuelles et historiques. Un prototype de «MedRec» utilise des avantages spécifiques pour gérer l'authentification, le secret, l'intégrité et l'échange facile de données, le tout en un seul paquet. Il offre aux patients un historique complet et immuable ainsi qu'un accès simple à leurs informations de santé à partir de différents médecins ou établissements de traitement par le biais d'un système décentralisé de gestion des dossiers [25]. Le «MedRec» ne conserve aucune trace de vos soins médicaux et n'a pas besoin d'être adapté. Il alerte le patient, qui est responsable de la localisation du dossier, et enregistre une marque sur une blockchain. Cette marque sert à garantir que vous avez acheté une réplique du document. De même, elle donne aux patients un plus grand contrôle sur leur santé en leur transférant la charge des soins de l'organisation. Les associations d'administrateurs remplissent la fonction d'agent des patients pour les patients qui ne veulent pas que leurs informations soient traitées. Aujourd'hui, les entrées de patients par les utilisateurs sont de conception complexe, demandent plus de travail et ont des interfaces utilisateur différentes selon la fondation. Une interface est incluse dans l'architecture du MedRec pour aider à maintenir les connexions avec les dossiers médicaux lorsqu'ils voyagent entre les organisations (<https://medrec.media.mit.edu/>). Avec la mise en œuvre du DSE, le partage des données médicales se heurte généralement à d'importantes restrictions telles que la perte de données contrôlées et la fiabilité, la vérification et la sauvegarde sûre des informations médicales. Partage de données médicales MeDShare, développé par Xia et al. [26] est un système sûr qui garantit la transmission de données médicales entre des parties qui ne sont pas de confiance. MeDShare peut être utilisé par les fournisseurs de services en nuage, les hôpitaux et la recherche sur la santé pour partager des données médicales et gérer les dossiers médicaux électroniques. Des sources de données plus importantes, un contrôle d'audit personnalisé et un minimum de dangers pour la vie privée et la sécurité sont autant de caractéristiques des organisations de bonne gouvernance (GRO).

En général, les dossiers médicaux électroniques (DME) contiennent des données très confidentielles sur les patients qui doivent être partagées entre les médecins, les radiologues, les infirmières, les pharmaciens, les chercheurs et d'autres intervenants du secteur de la santé afin de fournir un diagnostic et un traitement précis. Tant que ces informations extrêmement sensibles sur les patients sont stockées, transmises et diffusées entre de nombreuses organisations, elles représentent un danger important pour la santé des patients et la préservation de leurs dossiers médicaux. L'incidence de ces dangers peut devenir plus importante que l'historique des traitements précédents et ultérieurs, du suivi et des procédures de réadaptation des patients atteints de maladies chroniques (comme le cancer ou le VIH). Afin de fournir une thérapie réussie, il est essentiel de conserver les antécédents médicaux actuels du patient. Une architecture basée sur la blockchain pour organiser, stocker et partager les informations électro-médicales des patients atteints de cancer a été développée par Dubovitska et al. [27] pour contourner ces restrictions. Pour accéder, gérer et stocker les données cryptées des patients, ils se sont tournés vers la technologie blockchain à autorisation. Ces cadres peuvent être utilisés pour mettre la technologie blockchain en pratique dans les activités de soins de santé, comme l'accès et le contrôle de la confidentialité et de la sécurité des données des patients. Des défis allant de la confidentialité et de la sécurité des patients à la confidentialité et à l'intégrité des données de soins de santé, en passant par la tenue des dossiers et l'inscription aux essais cliniques. La blockchain, la nouvelle génération d'Internet, a le potentiel de résoudre ces problèmes. Les experts de la santé utilisent la technologie blockchain pour tenter de trouver des solutions à ces problèmes. La blockchain, l'intelligence artificielle (IA) et l'apprentissage automatique vont bientôt envahir le secteur de la santé. Le protocole autorisé d'Ethereum décrit par Timothy et al. [28] fournit des capacités de contrat intelligent sur la blockchain, qui est employée dans les cliniques avec les systèmes d'administration des données. L'objectif principal de l'étude était de trouver une solution au défi que représente le recrutement des patients. À la suite des résultats de l'étude, il a été recommandé d'utiliser les smart contracts d'Ethereum dans les essais cliniques pour la transparence du système de gestion des données afin de rendre les transactions plus efficaces. Par conséquent, l'une des utilisations actuelles de la technologie blockchain dans la recherche clinique est le recrutement des patients. Le consentement éclairé des patients peut être rendu sûr, vérifiable publiquement et peu pratique par Benchoufi et al. [29] menant une recherche pour développer son processus, ils se sont tournés vers la technologie blockchain. L'utilisation des blockchains pour détecter la fraude médicale La gestion de la chaîne d'approvisionnement en médicaments est une utilisation majeure des blockchains dans le secteur médical. Dans de nombreux secteurs, la gestion de l'approvisionnement est vitale, mais elle l'est encore plus dans les soins de santé en raison de la complexité croissante de l'industrie. Toute défaillance dans la chaîne d'approvisionnement des soins de santé

a un impact direct sur la santé des patients. [30]. En raison des nombreux éléments mobiles et individus impliqués, les blockchains sont extrêmement peu sûres et comportent plusieurs failles de sécurité que les pirates peuvent exploiter. En raison d'une plus grande ouverture des données et d'une meilleure traçabilité des produits, les blockchains offrent une plateforme sécurisée pour éliminer ce problème et prévenir la fraude dans certaines circonstances. La manipulation de la blockchain est difficile car la chaîne de la blockchain ne peut être confirmée ou modifiée à partir du contrat intelligent. Le tableau 3 présente les différentes applications de la blockchain dans le domaine des soins de santé.

Tableau 3. Applications de la blockchain dans le secteur de la santé

| Domaine d'application | Applications | Contributions |
|--|---|---|
| MedRec [25] | Dossier Medical Electronique | Donnez aux patients l'accès à tous leurs dossiers médicaux, rendez les soins vérifiables et partagez leurs données. |
| MISore [31] | Partage des informations sur les soins de santé à des fins administratives ou économiques | Développer un système de stockage des données d'assurance médicale basé sur la blockchain. |
| GAA-FQ [32] | Contrôle d'accès granulaire aux dossiers médicaux électroniques (DME) | Autoriser des niveaux de granularité d'autorisation variés tout en gardant la structure de données de la blockchain sous-jacente compatible. |
| BlockHie [33] | Interopérabilité des données personnelles de santé et des dossiers médicaux électroniques | Stockage et vérification de la confidentialité et de la sécurité hors chaîne et sur chaîne. |
| Analytical methods in healthcare [34] | Collecte, stockage et partage des données de santé | L'analytique dans les soins de santé à l'aide de la blockchain et de l'intelligence artificielle (IA). |
| Blockchain and Internet of Things (IoT) powered [35] | Intégration de grandes quantités de données dans le processus d'exploitation minière | La validation des transactions nécessite un mécanisme de consensus, ce qui réduit le coût de calcul des blocs miniers. |
| MedShare [26] | Modèle de stockage partagé en nuage pour les données | Réduire le délai de traitement et d'anonymisation des données en réduisant la latence. |
| MedBlock [36] | Informations sur les soins de santé qui sont partagées à des fins de recherche et de thérapie | Il est difficile pour les professionnels de la pharmacie de mettre au point des remèdes précis à partir de données recueillies selon des règles différentes, car les systèmes de DME actuels ne disposent pas d'une stratégie standard de gestion et de partage des données. Prenez des mesures dès maintenant pour résoudre ce problème. |

5/ Applications de la blockchain dans le domaine de la cybersécurité

Une tendance relativement nouvelle en matière de cybersécurité est le développement de mécanismes et de systèmes de protection basés sur la technologie blockchain.

La blockchain garantit l'intégrité des transactions en l'absence d'un hub central fiable. Les actifs corporels et incorporels des utilisateurs du système font l'objet de transactions spécifiées comme des activités spécifiques prises dans une liste prédéterminée. Les blocs contenant les informations relatives aux transactions sont reliés entre eux par hachage pour constituer une chaîne. Pour qu'il soit plus difficile pour un attaquant de miner la blockchain, une méthode spécifique connue sous le nom d'algorithme de consensus est employée pour distribuer des copies identiques des blocs à tous les membres du système.

Le principal avantage de la blockchain, qui rend la technologie intéressante pour diverses applications de protection des données, est la difficulté de porter atteinte à l'intégrité des transactions stockées. Toute modification d'un seul bloc peut avoir des conséquences désastreuses pour le reste de la chaîne, et celle-ci devra être reconstruite à partir de zéro. Toutefois, la complexité informatique de cette tâche minimise la probabilité de piratage de la blockchain. [37].

À l'heure actuelle, la technologie blockchain est activement utilisée dans les systèmes cyber- physiques à diverses fins. Comme indiqué précédemment, le principal avantage de cette technologie est la possibilité de vérifier une variété de transactions qui seraient autrement impossibles dans un environnement non fiable. Selon plusieurs études, la technologie blockchain est cruciale pour la prochaine quatrième révolution industrielle (Industrie 4.0).

En outre, la blockchain est promue aux côtés d'autres technologies prometteuses de notre époque dans le cadre de l'industrie 4.0 [38]. L'Internet des objets [39]le big data [40]l'informatique en brouillard [41]et la réalité augmentée [42] en sont des exemples. En général, Dans l'Internet industriel des objets, la blockchain est largement considérée comme une technologie clé, contribuant à transformer les usines traditionnelles en usines intelligentes modernes qui utilisent les dernières percées de la technologie numérique.

Mentionnons quelques exemples de recherches actuelles qui offrent des solutions scientifiques et techniques spécifiques à l'application de la technologie blockchain pour résoudre les problèmes de sécurité dans les systèmes cyber-physiques.

La gestion sécurisée de divers actifs, y compris ceux des systèmes cyber-physiques, est un élément important des ouvrages connus. La technologie blockchain a été initialement utilisée en conjonction avec le bitcoin. C'est donc ce qui s'est passé. Avec l'avancement de la technologie blockchain, l'industrie des crypto-monnaies s'est développée et joue aujourd'hui un rôle essentiel dans les activités quotidiennes de la société.

Au fil du temps, le nombre d'applications de la technologie blockchain a considérablement augmenté. Par exemple, un article récent [43] analyse l'utilité de la blockchain pour résoudre les problèmes de sécurité de la ville intelligente, qui est un exemple de système cyber-physique à grande échelle. Les auteurs examinent les composantes du fonctionnement des villes intelligentes telles que les transports, les soins de santé, les réseaux intelligents, les systèmes financiers, la gestion de la chaîne d'approvisionnement et les réseaux de centres de données, discutent des capacités de la technologie blockchain par rapport à ces composantes et suggèrent des orientations de recherche futures.

En général, la recherche sur la technologie blockchain peut être classée en plusieurs catégories principales.

Le premier groupe d'études est lié à la gestion de la chaîne d'approvisionnement à l'aide de la technologie blockchain. Ce groupe est principalement constitué de recherches générales, qui ne se concentrent pas sur un domaine spécifique ou une classe spécifique de systèmes cyber- physiques, mais proposent plutôt une solution générale pour la gestion sécurisée de la chaîne d'approvisionnement basée sur la blockchain et discutent de certains aspects du problème. Dans certains cas, les solutions proposées sont conçues pour être utilisées dans des systèmes cyber- physiques à des fins différentes. Dans certains cas, elles ne sont pas explicitement spécifiées dans un tel champ d'utilisation.

Ainsi, Saberi et al. [44] ont présenté la classification des obstacles qui empêchent la mise en œuvre de la technologie blockchain dans la gestion de la chaîne d'approvisionnement. Aceto et al. [38] ont discuté de certains des défis à relever pour surmonter ces obstacles. L'actif précis n'est fourni dans aucun des deux scénarios. Un large éventail de services et d'articles de la chaîne d'approvisionnement est également inclus dans cet ensemble de recherches. Kshetri et al. [45] ont décrit des applications réelles de blockchain pour le suivi des matières premières, des ingrédients ou des pièces de rechange dans diverses industries. Dans de nombreux systèmes cyber-physiques, l'accent est mis sur l'exploitation de la technologie blockchain combinée aux technologies de l'Internet des objets.

S'il n'y a pas lieu de les classer plus en détail, le premier groupe comprend les études consacrées aux tâches connexes découlant de l'organisation et de la gestion de la production. Par exemple, l'ouvrage [46]qui présente une solution architecturale pour la protection de l'intégrité des données dans les systèmes de production cyber-physiques utilisés en coproduction.

Le deuxième groupe d'études vise à aborder le problème de la gestion sans risque d'un certain actif ou service, y compris la gestion de la chaîne d'approvisionnement des actifs associés. Aujourd'hui, il existe une pléthore d'applications de ce type parmi lesquelles choisir. La blockchain est utilisée pour contrôler les ventes ou la distribution d'électricité. [47]de carburant [48]de ressources informatiques [49]et de logiciels.

Toutes les études précédentes ont un point commun : elles impliquent toutes l'échange de matières premières contre de l'argent. Par conséquent, les solutions basées sur la blockchain empruntent largement aux concepts de crypto-monnaie.

Le groupe suivant comprend les recherches consacrées au problème de l'organisation de l'interaction de confiance entre plusieurs dispositifs. Les tâches spécifiques liées à la garantie de l'intégrité de certaines ou d'autres données exploitées par ces dispositifs peuvent différer.

De nombreux articles traitent de l'interaction de dispositifs IoT arbitraires sans faire référence à des types spécifiques de systèmes cyber-physiques. Voici quelques exemples de travaux récents dans ce sens [50]–[52].

La plupart de ces travaux se concentrent sur l'efficacité énergétique des solutions architecturales destinées à être utilisées dans les systèmes IoT, et proposent différents moyens d'atteindre cette propriété.

En termes de tâches à résoudre, les travaux considérés peuvent être divisés en ceux qui assurent uniquement l'intégrité des transactions. Ceux qui, en plus, assurent la confidentialité des données contenues dans les transactions. Par exemple, dans une étude [53], les données sur la localisation des appareils de l'Internet des objets sont considérées comme l'objet de la protection. Les auteurs soulignent la nécessité d'assurer la confidentialité de ces données, donc dans le schéma qu'ils proposent, la blockchain est combinée avec le chiffrement.

Si l'on passe des solutions générales pour l'application de la technologie blockchain à la protection des données dans les systèmes cyber-physiques, qui sont basés sur la technologie de l'Internet des objets, à des cas particuliers, il est nécessaire de noter une telle classe de systèmes cyber-physiques que sont les véhicules connectés, y compris les véhicules sans équipage [54]– [56]. En 2019-2021, il y a une croissance « explosive » du nombre de publications de revues consacrées à la recherche pertinente, de sorte que nous pouvons dire que la sécurité de cette classe de systèmes cyber-physiques utilisant la technologie blockchain est un exemple de direction prometteuse dans le domaine problématique considéré.

Authentification des données dans les systèmes cyber-physiques

Les preuves numériques peuvent faire l'objet d'un processus médico-légal complet, comprenant les étapes suivantes : identification, collecte, examen, analyse, documentation et présentation. [57]. La préservation des preuves numériques est un principe essentiel qui doit être pris en compte à toutes les étapes de ce processus. À cette fin, la blockchain joue un rôle important en garantissant l'intégrité et la preuve d'origine des preuves collectées. D'autre part, la complexité existant dans les scénarios d'exploitation des systèmes cyber-physiques impose, aux solutions et méthodes de sécurité utilisées, des exigences non fonctionnelles restrictives concernant l'évolutivité, les performances de calcul, l'utilisation du réseau de communication, entre autres.

Plusieurs techniques de blockchain ont été proposées dans la littérature pour assurer l'authentification des données et prévenir les attaques cyber-physiques. Evsyutin et al. [58] fournissent un aperçu des stratégies d'intégration d'informations dans les données numériques dans l'Internet des objets applicables à la fin de 2018. Par conséquent, la présente revue se concentre sur les nouvelles recherches qui ont vu le jour ces dernières années. Dans le même temps, nous devons souligner que seules les méthodes d'intégration de filigrane numérique seront abordées dans le cadre de cette étude. En revanche, les méthodes de stéganographie numérique sont souvent sans rapport avec l'intégrité des données.

D'emblée, il est essentiel de distinguer plusieurs projets de recherche axés sur le développement de méthodes et d'algorithmes permettant de dissimuler des informations dans des photographies numériques (ainsi que dans d'autres objets numériques), afin de garantir la sécurité des données sensibles dans les systèmes cyber-physiques. Voici quelques exemples de travaux dans ce domaine [56], [59]. Bien que leurs auteurs affirment que leurs solutions visent à assurer la sécurité des données dans l'Internet des objets, ils ne présentent aucun exemple de la manière dont leurs algorithmes peuvent être utilisés dans d'autres domaines. Dans nombre de ces recherches, les auteurs s'inquiètent des failles de sécurité des systèmes de télémédecine.

Comme ces études sont très répandues, elles devraient être classées dans une autre catégorie. Cependant, les travaux de cette classe ne dépassent pas les limites de l'intégration traditionnelle dans les données multimédia et ne seront pas étudiés plus avant.

L'ensemble des travaux suivants porte également sur l'intégration traditionnelle de données dans des produits multimédias. Les auteurs identifient les situations uniques de transmission de données propres à ces systèmes et expliquent les limites qui leur sont associées tout en soulignant l'applicabilité de leurs solutions dans les systèmes cyber-physiques.

Les œuvres de ce groupe ne sont pas aussi largement représentées, mais elles doivent être séparées de celles du premier groupe.

Une solution pour la transmission sécurisée d'images dans les systèmes de télémédecine est également présentée dans [60]. Les images confidentielles cryptées sont placées dans des photographies contenant du matériel non confidentiel. En outre, l'empreinte digitale (hachage perceptif) de l'image secrète est incluse dans le conteneur d'image pour une authentification supplémentaire. Le suivi de la séquence de transmission de l'image est une caractéristique distinctive de cette approche. À cette fin, les auteurs proposent le concept d'une chaîne d'empreintes digitales d'images par analogie avec la technologie blockchain.

La recherche de Zhang et al. [61] est assez unique dans la mesure où elle implique l'intégration de pièces jointes secrètes dans des graphiques utilisés dans des articles imprimés. D'autre part, cette recherche décrit explicitement les applications potentielles de l'approche proposée dans les systèmes IoT et les situations associées. Ces scénarios comprennent, par exemple, l'authentification des données afin de protéger les produits contre la contrefaçon. Il faudrait mettre l'accent sur l'endurance de l'intégration du filigrane numérique dans la discussion des auteurs sur l'intégration stéganographique.

Les travaux suivants ne sont pas liés au multimédia et traitent de l'insertion de filigranes numériques dans les données créées et transférées par des systèmes cyber-physiques. Une partie importante des travaux de ce groupe concerne l'insertion de filigranes numériques dans les données des réseaux de capteurs sans fil pour le contrôle d'intégrité.

Une approche comparable est proposée, entre autres, dans les articles de l'un des auteurs de cette revue [57]. La possibilité de modifier le degré de distorsion généré par l'intégration est une caractéristique distinctive de cette approche. Par conséquent, elle s'applique aux données de capteurs de nombreux types physiques.

Hoang et al. [62] incorporent des filigranes numériques dans les données des réseaux de capteurs sans fil afin de se protéger contre les attaques des nœuds de capteurs clones. L'incorporation est basée sur une modification de l'alphabet binaire de type gamming. Ils affirment que la légèreté de l'algorithme constitue un avantage.

Les algorithmes intègrent les composants du filigrane numérique dans les données sensorielles de manière cohérente et indépendante puisqu'ils ne dépendent pas des valeurs de ces données sensorielles ou de certaines de leurs caractéristiques. Si les méthodes et algorithmes traditionnels de filigrane numérique et le problème des réseaux de capteurs sans fil et de l'Internet des objets peuvent créer un filigrane numérique à partir de données protégées, la notion est excessivement large.

Dans l'exemple le plus simple, les composants du filigrane numérique sont créés uniquement sur la base des valeurs des éléments de données du capteur. L'approche d'incorporation fournie dans [63] en est un exemple. Cette approche génère le bit de filigrane numérique inséré dans la valeur de capteur suivante en fonction des valeurs de capteur précédentes.

Les filigranes peuvent être utilisés pour dissuader certains types d'attaques dans certains cas. Rubio-Hernan et al. [64] ont proposé une technique adaptative de théorie du contrôle pour détecter les tentatives de réplique cybernétique sur les systèmes industriels de contrôle en réseau. Il s'agit de l'effort d'un intrus pour altérer le contrôle du système en répliquant des séquences de données précédemment interceptées. La contribution fondamentale de ce travail n'est pas la technique d'intégration, qui est empruntée à des publications antérieures, mais plutôt l'approche permettant d'employer cet algorithme pour se prémunir contre un intrus. Huang et al. [65] proposent une technique permettant d'intégrer des signes aériens réversibles dans des signaux véhiculés dans des systèmes de contrôle industriels en temps réel «durs». Les auteurs choisissent les systèmes de contrôle des navires comme domaine d'application le plus important. Une clé secrète doit être fournie à l'avance par un canal de communication sécurisé avant que l'incorporation ne puisse commencer. L'approche décrite ici permet de détecter les attaques qui visent à provoquer un retard et une distorsion du signal.

Enfin, des expériences intégrant la blockchain avec la technologie des filigranes numériques ont commencé à voir le jour, comme indiqué dans la section précédente. La blockchain et les filigranes numériques répondent à différents problèmes de sécurité dans les systèmes cyber-physiques. Leur utilisation combinée peut produire un meilleur niveau de sécurité que chacune de ces méthodes seules. Ce concept a déjà été exploré dans des travaux antérieurs, mais principalement sous un aspect, à savoir la question de la gestion des droits numériques [56]. La mise en œuvre collaborative de ces technologies dans d'autres domaines [4] est un domaine de recherche prometteur dont l'avancement sera bénéfique pour la cybersécurité. Le tableau 4 résume les nombreuses utilisations de la blockchain en cybersécurité.

Tableau 4. Applications de la blockchain dans le domaine de la cybersécurité

| Domaine d'application | Applications | Contributions |
|---|--|--|
| Quantum-Inspired Blockchain [66] | Services publics intelligents en périphérie des villes intelligentes | Résister aux assauts potentiels des ordinateurs numériques et quantiques. |
| Lightweight Blockchain-based Cybersecurity (LBC) [67] | IoT environments | Répondre aux exigences de calcul intensif et à la surconsommation de bande passante. |
| Blockchain Empowered Cooperative Authentication [67] | Vehicular Edge Computing | Protéger et préserver la vie privée et la confidentialité des données tout en veillant à ce que l'authentification mutuelle soit en place (par exemple, attaque en réponse, etc.). |
| BloCyNfo-Share [68] | Cybersecurity Information Exchange (CYBEX) | Décrire comment partager des informations privées avec d'autres organisations ou fournir un accès à des informations privées à d'autres organisations. |
| BBDS [69] | Electronic Medical Records in Cloud Environments | Viser à diffuser les données médicales en dehors du cloud des institutions protégées. |
| Ancile [70] | Electronic Medical Records | Préserver la confidentialité des informations sensibles des patients |
| Secure and decentralized sharing [71] | Partage d'images entre domaines Les données de santé personnelles peuvent être traitées par lots à l'aide d'un système arborescent Hyperledger fabric. | Permettre aux parties de parvenir à un accord sans s'appuyer sur une autorité unique. |
| BlockChain [16] | Interconnected smart vehicles | S'attaquer aux menaces pour la sécurité et la vie privée auxquelles les véhicules intelligents sont confrontés, telles que la localisation et le détournement de véhicules à distance. |

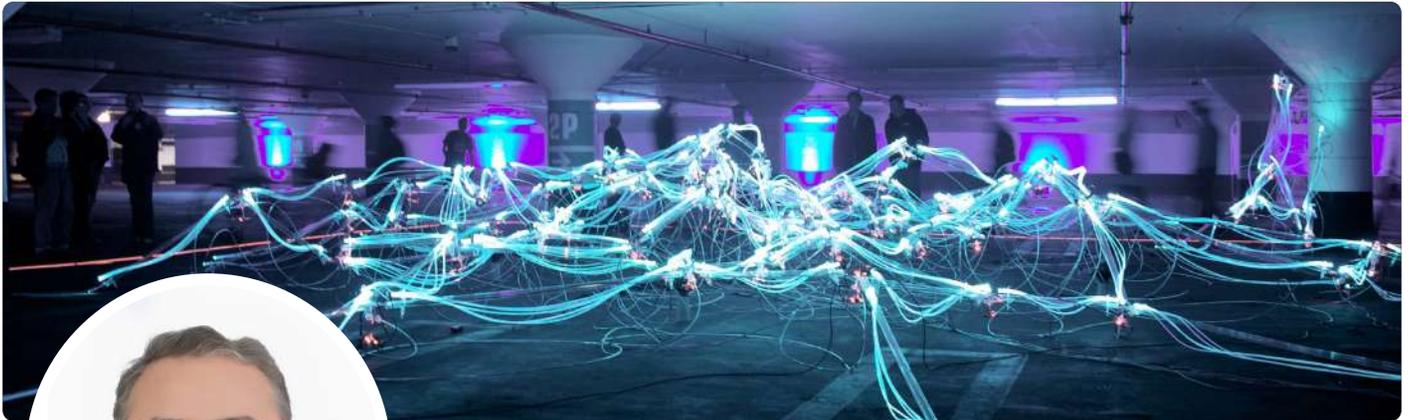
6/ Perspectives d'avenir

Malgré l'intérêt généralisé pour la blockchain, il faut reconnaître que les registres distribués ne sont pas une panacée. La blockchain n'est pas encore adaptée au traitement rapide de grandes quantités de données, notamment vidéo et audio, et à une utilisation dans un environnement à évolution rapide. Pour une utilisation dans des environnements à évolution rapide. La blockchain est idéale pour le long terme et la plus fiable possible pour stocker des informations qui changent peu fréquemment. Par conséquent, cette technologie est prometteuse pour la saisie des données des clients des banques, des établissements médicaux, des compagnies d'assurance et des entreprises de logistique [72]. Un registre distribué des transactions profitera aux offices de brevets et aux bureaux du cadastre. La technologie convient aux autorités policières et fiscales pour enregistrer les données personnelles. Les sociétés de courtage et d'investissement bénéficieront de la blockchain en tant que registre des transactions. Les capacités actuelles de la technologie ne sont qu'un entre-deux. L'amélioration continue de la blockchain ouvre des perspectives d'application dans des secteurs nouveaux et inédits. Dans son évolution, toute technologie doit surmonter la méfiance des conservateurs et des personnes peu habituées à changer rapidement. La blockchain a déjà dépassé ce stade et, par conséquent, elle continuera à évoluer.

7/ Conclusions

Un aperçu des diverses applications de la blockchain dans les protocoles de contrôle des systèmes cyber-physiques est présenté. Bien que l'utilisation de la blockchain présente des avantages pour chaque industrie, elle comporte également des défis. Cependant, la blockchain est bien connue et adoptée pour ses différents avantages dans diverses industries.

Ce chapitre contribue au domaine thématique en fournissant des informations sur un sujet peu documenté dans la littérature scientifique. Il s'est imposé au cours du développement du travail et méritait une investigation théorique plus approfondie. L'analyse des résultats montre que le thème abordé s'est développé chaque année et est devenu d'une grande pertinence pour l'émergence et le développement de nouvelles applications utilisant la blockchain pour les systèmes cyber-physiques. Il est encore trop tôt pour dire si la technologie Blockchain est plus appropriée dans le contexte des applications des systèmes cyber-physiques et pour la comparer avec d'autres technologies déjà utilisées.



ESSAIDI Mohamed

Docteur d'Etat

Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure
d'Informatique et d'Analyse des Systèmes
Rabat, Maroc

Education 4.0

The fourth industrial revolution (e.g. industry 4.0) and the current amazing and profound accompanying societal transformation, mainly driven by the state of the art digital technologies such as AI, Big Data, IoT, Cloud Computing, 5G, VR/AR, etc., requires a reinvention of education systems. This reinvention is a straightforward consequence of the profound digital transformation of modern society and its amazing impact on new generations of students (i.e. generation Z and Alpha) at different levels: social, emotional and intellectual. This talk will cover several aspects related to Education 4.0, with special focus on Engineering Education 4.0, such as skills, pedagogic paradigms, EdTech, best practices, etc.

FUTURE OF EDUCATION: EDUCATION 4.0 / SMART EDUCATION

1/ Introduction

Emerging disruptive technologies such as AI, IoT, Big Data, 5G, Digital Twins, Metaverse, etc. are having amazing impact at different levels on modern society and they are behind a new industrial revolution, namely, the fourth industrial revolution (a.k.a. Industry 4.0). Actually the disruptions driven by these technologies and their inherent socioeconomic impact, promises a major transformation of education that leverages these technologies to improve the efficiency of education systems worldwide in accordance with the requirements of industry 4.0 and Society 4.0.

There is also another important driver for Education 4.0, which is related the profound societal transformation driven by the increasing digital transformation of all aspects of our daily lives including education, culture, healthcare, commerce, work, administration, communication and socializing, entertainment, etc. More specifically the connected new generations of students (Generation Z and Alpha) accessing schools and universities, connected schools and universities and the digital learning and teaching platforms they have access to, the myriad supporting technologies enabling and supporting the Digital Transformation such as IoT, Big Data, AI, etc. Furthermore, Covid-19 pandemic has played an amazing role in accelerating the digital transformation of society and the convergence toward Society 4.0. The new normal will certainly not be the same as before, especially after more than two years of this pandemic and the profound impact it has on different activities of our society at a global scale.

On the other hand, the new trends of education based on innovative pedagogical approaches (e.g. flipped-classrooms, active learning, project based learning, serious games, etc.) and education technologies "EdTech" (e.g. MOOCs, IoT, VR/AR,

Metaverse) are also considered among the other outstanding drivers and enablers for Education 4.0.

The impact of AI and automation on the job market is also another important factor to consider when it comes to education reinvention. Many prospective studies on AI impact on job market predict huge disruptions. In fact, there are many jobs that are poised to disappear owing to AI based automation and there will be many others that will be created as well. Consequently, there are some specific skills that are highly required for 21st Century that education and training programs should address. Paradoxically soft skills like emotional intelligence, complex problem solving, critical thinking and creativity seem to be key for industry 4.0, Society 4.0 and for the UN Sustainable Development Goals agenda as well as.

This paper presents an in-depth insight on the features, drivers, enablers, opportunities and challenges of Education 4.0 in the light of Covid-19 pandemic impact and recovery process and industry 4.0 ecosystem and requirements.

2/ Covid-19 Impact on Education

Covid-19 pandemic has created unprecedented global crisis at different levels in all sectors: social, health, education, work, business, industry, economy, etc [1]. As far as education is concerned, most countries have been compelled to close schools, colleges and universities in the framework of the measures taken to fight this pandemic and to mitigate its impact on society. According to UNESCO, almost 70% of the world's students population has been affected with it and which represent 1.1 billion students worldwide [2]. The best alternative available for schools and universities to ensure the continuity of the learning and teaching activities during this pandemic is based on remote online education platforms. Many schools and universities were not prepared for this crisis. There have been also many students and teachers that were not prepared either especially owing to the lack of internet connectivity or computers or other devices required to access online learning platforms.

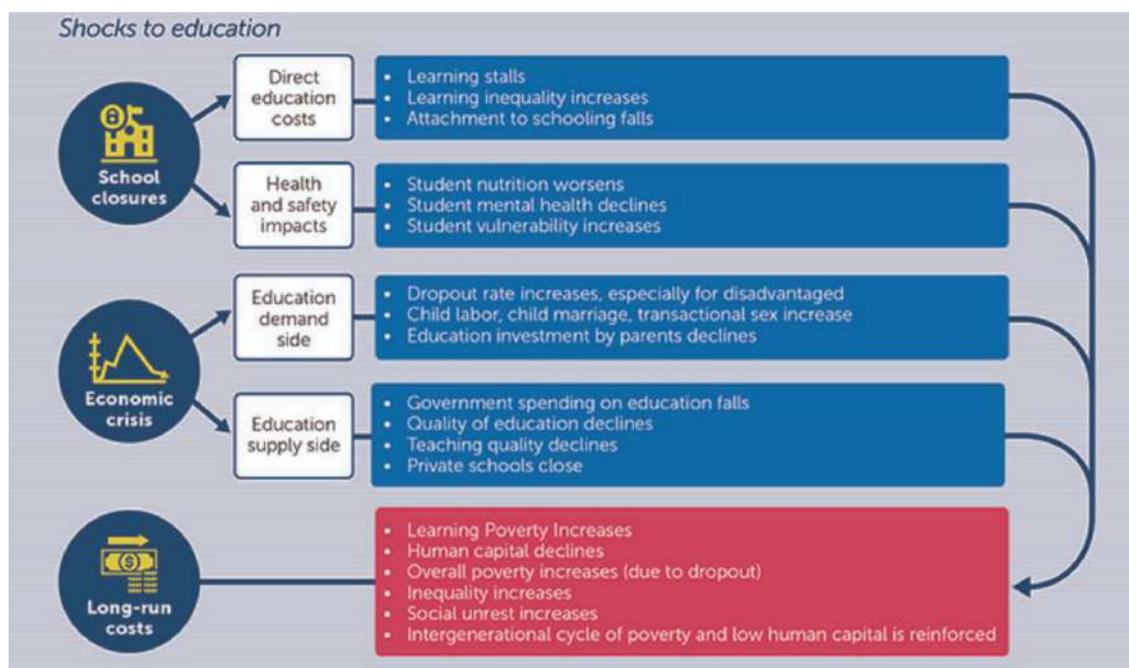


Figure 1. Covid-19 Shocks to Education and Policy Response (Source: World Bank [1]).

According to the World Bank [1], Covid-19 shocks to education (Figure 1) concern 4 areas, namely:

- Direct education cost
- Health and safety impact
- Education demand side
- Education supply side



Figure 2. The three overlapping phases of education response [1].

In order to overcome or even mitigate the impact of Covid-19 pandemic, there were three overlapping phases of education response, namely:

- Coping while schools were closed
- Managing continuity as schools reopen
- Improving and accelerating the system for the long term in the new normal (Table 1, [1]).

| Features | Traditional education system | An education system embodying the “new normal” |
|--|--|--|
| Education system | Education system is an independent entity | Education system is part of a larger eco-system |
| Responsibility and stakeholders engagement | Decisions made based on a selected group of people and thus they become held accountable and responsible for the decisions made Division of labour (Principals manage schools, teachers teach, students listen to teachers and learn) | Decision-making and responsibilities shared among stakeholders, including parents, employers, communities, and students Shared responsibility (everyone works together and assumes responsibility for a student’s education and students also learn to be responsible for their own learning) |
| Approach to effectiveness and to quality of school experience | Outcomes most valued (student performance, student achievements are valued as indicators to evaluate systems for accountability and for system improvement) Focus on academic performance | Valuing not only “outcomes” but also “process” (in addition to student performance and student achievements, students’ learning experiences are in and of itself recognised as having intrinsic value) Focus on not only academic performance but also on holistic student well-being |
| Approach to curriculum design and learning progression | Linear and standardized progression (the curriculum is developed based on a standardised, linear learning-progression model) | Non-linear progression (recognising that each student has his/her own learning path and is equipped with different prior knowledge, skills and attitudes when he/she starts school) |
| Focus of monitoring | Valuing accountability and compliance | System accountability as well as system improvements (e.g. continuous improvement through frequent feedback at all levels) |
| Student assessment | Standardised testing | Different types of assessments used for different purposes |
| Role of students | Learning by listening to directions of teachers with emerging student autonomy | Active participant with both student agency and co-agency in particular with teacher agency |

Table 1. The new normal in education [1].

3/ Challenges to be addressed by Engineering Education

There are several challenges facing our society that need to be addressed in the framework of Engineering Education, and especially in the framework of Smart Education / Education 4.0. Several international organizations identified several challenges for humanity such as the UN Agenda for 2030 with its 17 Sustainable Development Goals (SDGs) [4] as shown in Figure 3. The US National Academy of Engineering has also identified what it refers to as “Engineering Grand Challenges” presented in Figure 4 [5].



Figure 3. UN Sustainable Development Goals (SDGs) [4].



Figure 4. Grand Challenges For Engineering [5].

There's a very important overlap between the Grand challenges of Engineering and the UN SDGs as can be seen in Figure 5 [6].

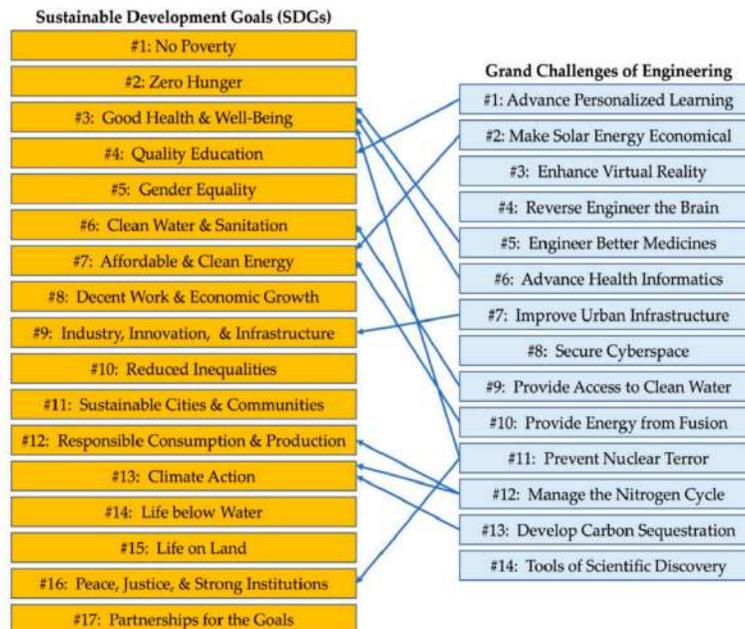


Figure 5. Grand Challenges of Engineering and Sustainability Development Goals.

4/ Smart Education / Education 4.0

While traditional education paradigms (Education 1.0) were based on lectures, rote learning and memorization, relatively modern paradigms were based on internet-enabled learning and knowledge-based education (Education 2.0 and Education 3.0 respectively). A more recent and emerging paradigm, namely, Education 4.0 or Smart Education is an innovation-based education (Figure 6) [7].

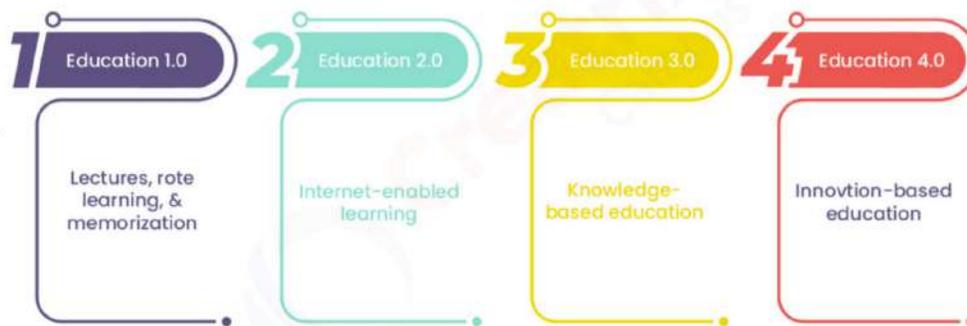


Figure 6. Education paradigms evolution [7].

Innovation-based education or Education 4.0 consists upon 6 trends (Figure 7):

1. A more personalized learning: leveraging data and AI for a personalized learning experience.
2. More remote learning experiences: based on all kind of technologies such as e-learning platforms, MOOCs, Webinars, etc.
3. The plethora of education tools: such as e-learning platforms, MOOCs, Webinars, VR/AR, Metaverse, etc.
4. Data at the fingertips: Data from different sources (e.g. e-learning platforms, social media, etc.) are leveraged for a better learning experience using Artificial Intelligence (AI) algorithms.
5. Easy and accurate assessment: using AI algorithms and chatbots.
6. Project-based learning: pedagogic approach among other innovative pedagogic approaches such as serious games
7. and flipped classroom.



Figure 7. Major trends of Education 4.0.

Education 4.0 or Smart Education leverages smart learning environments allowing to (Figure 8) [8]:

1. Adapt learning contents
2. Recommend learning tools or strategies
3. Detect the real world contexte
4. Interact with users through ubiquitous or pervasive computing devices

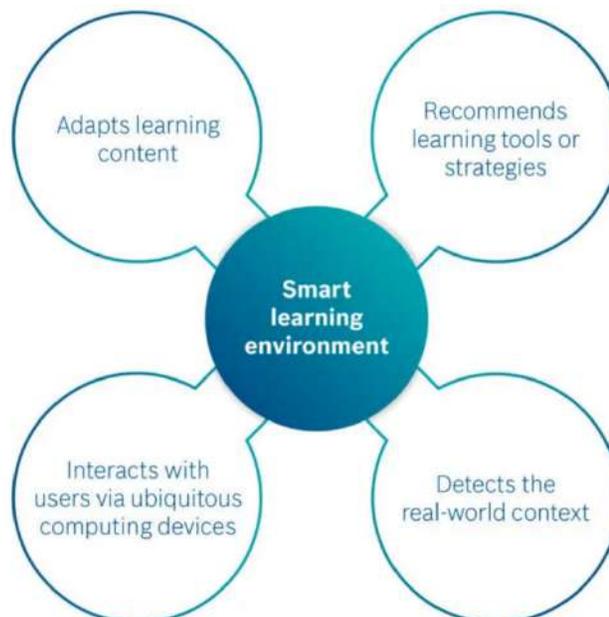


Figure 8. Smart learning environments [8].

There are also 5 other mega trends characterizing Education 4.0 (Figure 9) for higher education [9], namely,

1. Democratization of knowledge access based facilitated by the internet and the online learning and knowledge platforms.
2. Global mobility of students facilitated by the globalization and knowledge based economy.
3. Digital technologies in the framework of the digital society and industry 4.0.
4. Integration with industry in the framework of digital society and industry 4.0.
5. Competition among higher education institutions for research funding, students, and in the framework of international rankings of universities (e.g. THE, Shanghai University Ranking, etc.).

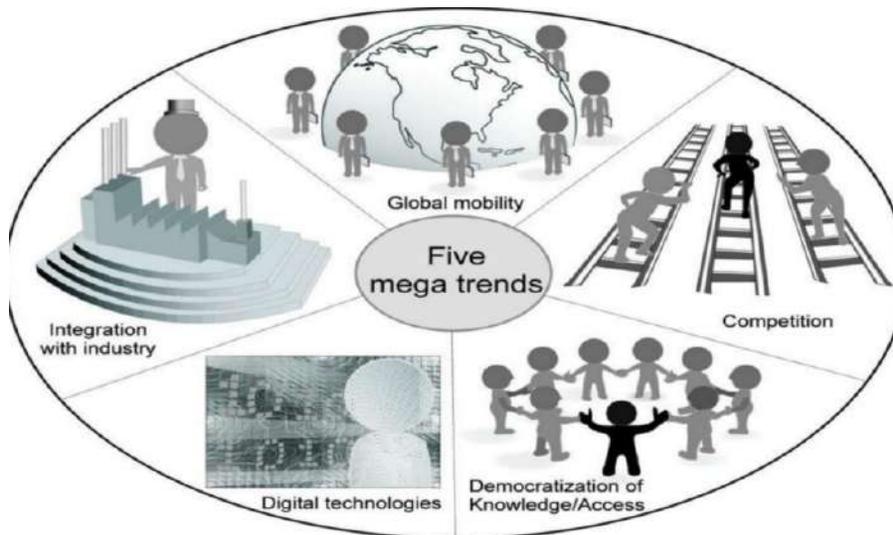


Figure 9. Five mega trends for Education 4.0 [9].

There is an interesting framework for Education 4.0 proposed by the World Economic Forum (Figure 10) that proposes a set of skills, considered as the 21st century skills, and some innovative pedagogic approaches[10].

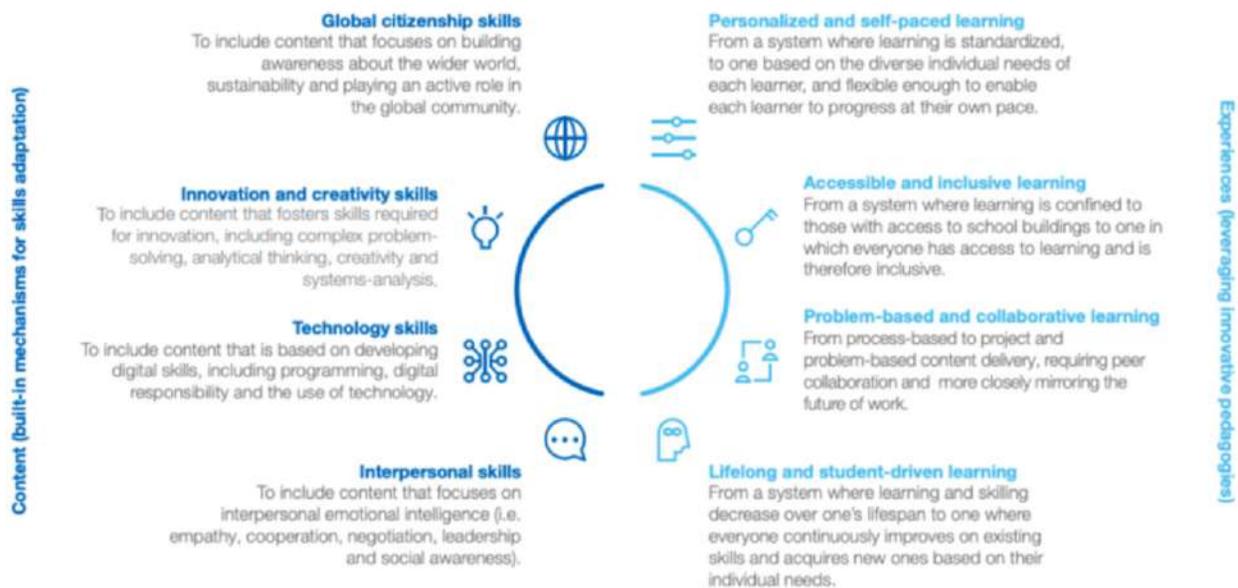


Figure 10. Education 4.0 Framework [10].

5/ Society 5.0 for Industry 5.0

In addition to industry 4.0 that is mainly based on Cyber-physical systems, there is another industrial revolution coming with is based on mass customization and cyber-physical cognitive systems, referred to as Industry 5.0 [11] or the 5th Industrial Revolution (Figure 11).

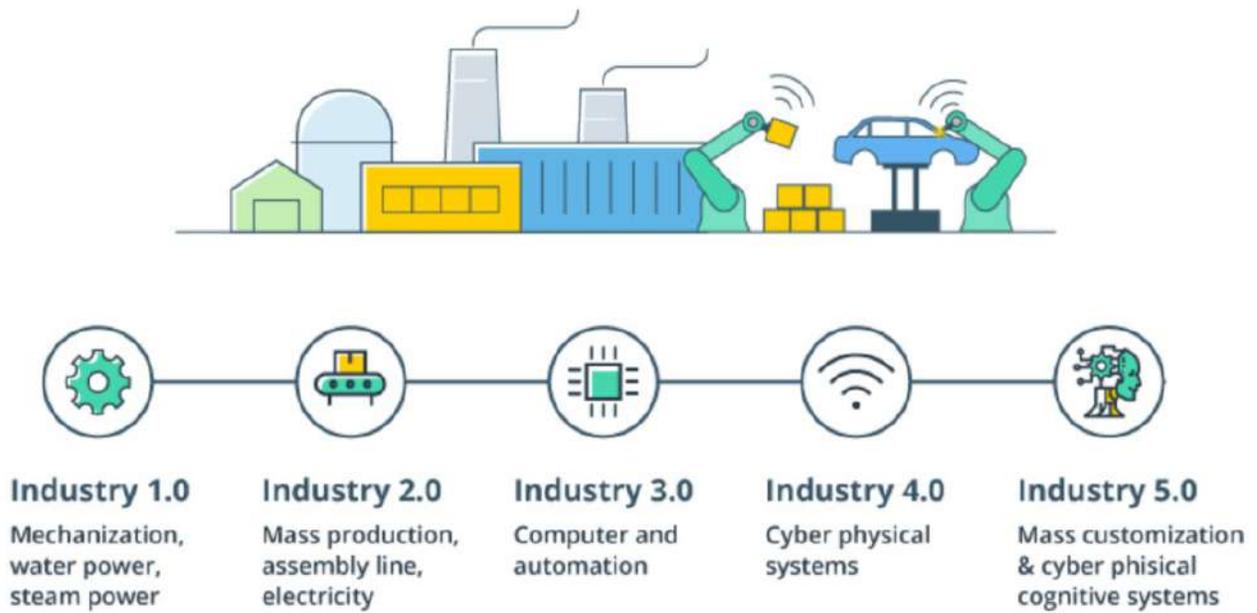


Figure 11. Industry revolutions through history[11].

Industry 5.0 is also enabled by Society 5.0 [12], a super smart society (Figure 5.0), which is defined as a "Super Smart Society which aims at creating a society where people can resolve various social challenges by incorporating innovations such as AI, robots and big data into society".

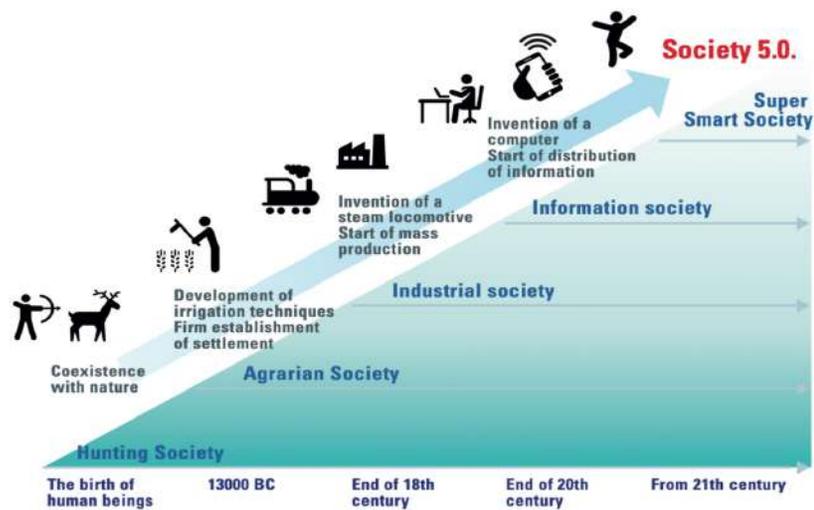


Figure 12. Evolution toward Society 5.0 [12].



Figure 13. Society 5.0 and SDGs [13].

Society 5.0 is also considered as a society that enables the achievement of the UN SDGs (Figure 13) by leveraging all kind of digital technologies [13] such as AI, Big Data, IoT, Robotics, etc. and applications as diverse as EdTech, e-Health, AgriTech, FintTech, etc.

6/ Artificial Intelligence job market disruption

The advent of Artificial Intelligence is predicted to cause a dramatic impact on the job market. According to many predictions, there are many jobs that will be destroyed by AI enabled automation but there are many others that will be created as well. For instance, manufacturing jobs will suffer the most important losses followed by transportation and storage, public administration and defense, financial and insurance, etc. However, there are other jobs that will benefit from AI in terms of increasing demand like health, scientific and technical, communications, hospitality and education (Figure 14).

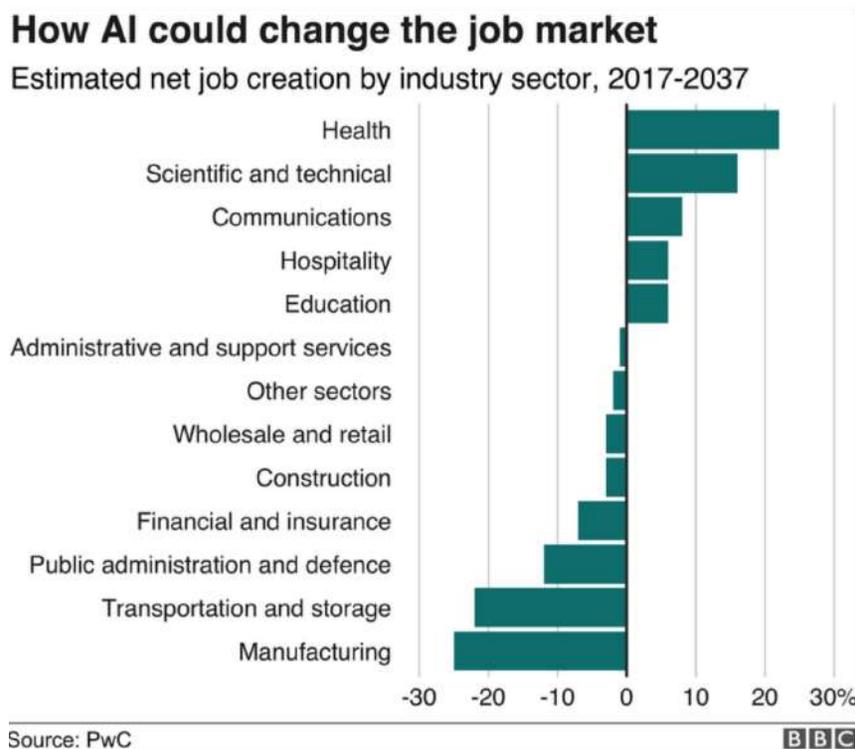


Figure 14. AI impact on the job market.

On the other hand, 14% of jobs in OECD countries present a highly risk of automation and 32% will be radically transformed as illustrated in Figure 15 [14].

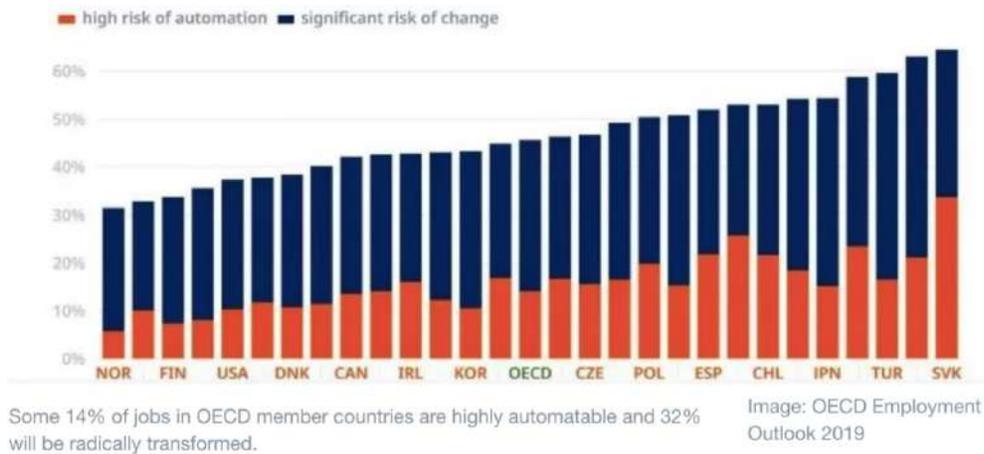


Figure 15. Jobs at risk of automation or significant change [14].

Furthermore, there are many new jobs that will be created in the AI era [15] involving all kind of skills required for industry 4.0 and Society 4.0 (Figure 16).

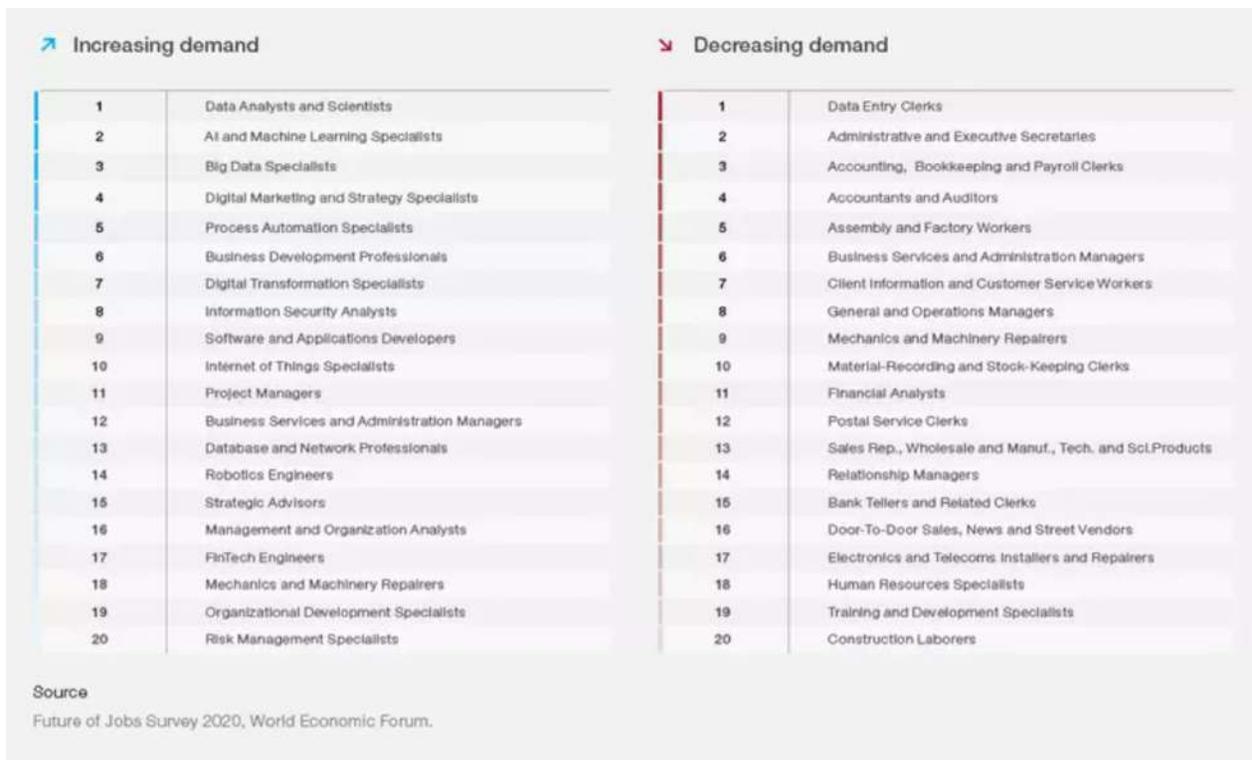


Figure 16. New and emerging jobs for Industry 4.0.

In addition to these jobs, there are many other emerging jobs related to the Metaverse [16], such as

- Metaverse designers
- Metaverse Cybersecurity Expert
- Metaverse Storytellers

7/ Skills for Industry 4.0

For all the emerging jobs, social and emotional skills are increasingly recognized as outstandingly essential.

As far as engineering curriculum is concerned, the 21st century required skills (Figure 17) are mainly based on critical thinking [17] which includes:

- Interdisciplinary and systems thinking
- Innovation and entrepreneurial behavior
- Rigorous engineering: Technology literacy, Data literacy and Human literacy.
- Engineering ethics, cultural agility and creativity.

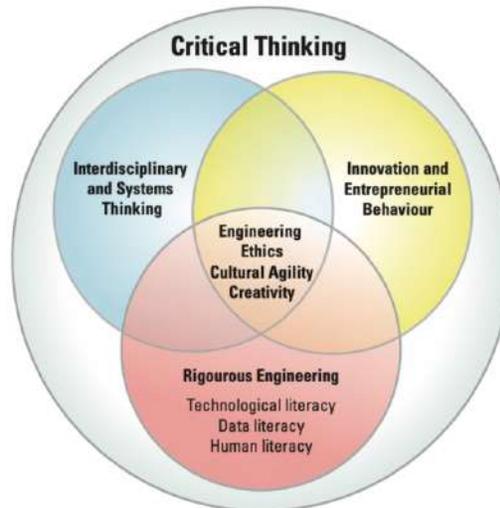


Figure 17. Key Aspects of a 21st Century Engineering Curriculum [17].

Among the top 10 skills [18]needed for Industry4.0, there are several soft skills such as complex problem solving, critical thinking, creativity, people management, etc. (Table 3), which are the most important skills compared to 2015.

| in 2020 | in 2015 |
|---------------------------------|---------------------------------|
| 1. Complex Problem Solving | 1. Complex Problem Solving |
| 2. Critical Thinking | 2. Coordinating with Others |
| 3. Creativity | 3. People Management |
| 4. People Management | 4. Critical Thinking |
| 5. Coordinating with Others | 5. Negotiation |
| 6. Emotional Intelligence | 6. Quality Control |
| 7. Judgment and Decision Making | 7. Service Orientation |
| 8. Service Orientation | 8. Judgment and Decision Making |
| 9. Negotiation | 9. Active Listening |
| 10. Cognitive Flexibility | 10. Creativity |

Table 3. Top 10 skills needed for Industry 4.0 [18].

8/ New trends of Engineering Education

The main new trends of engineering of education that are mainly triggered and motivated by industry 4.0 requirements, information society or Society 5.0, are outlined in Table 4 below [19]. Most of these trends are common to Education 4.0 or Smart Education that harness:

- innovative pedagogical approaches such as flipped classrooms, active learning, project-based learning, serious games, etc.
- Education Technologies (EdTech) such as e-learning and MOOCs platforms, e-Labs, immersive technologies (VR/AR/ Metaverse), etc.

| Traditional Concepts in Engineering Education | New trends of Engineering Education |
|--|--|
| Instructors deliver course content | Shift from instructor to an orchestrator who creates opportunities to learn |
| Students are passive learners | Students are active learners, i.e., take charge of their own learning |
| Learning goals are fixed by the instructor | Learning goals are defined by the students in collaboration with the orchestrator |
| Focus on lower levels of learning | Focus on higher levels of learning |
| Individual learning | Learning communities |
| Rigid course structure | Embed flexibility in the course including multiple opportunities for learning from various experiences |
| Ignore diversity | Leverage diversity |
| Learning process unclear to the students | Make students aware of the learning process, and scaffold student learning |

Table 4. New trends of Engineering Education[19].

9/ Concluding remarks

Covid-19 pandemic has accelerated adoption of digital transformation of education thanks to the amazing EdTech tools and platforms available today.

The future of education is mainly based on Education 4.0 / Smart Education that harnesses the 4th industrial revolution and technologies such as IoT, Big Data, AI, VR, AR and Metaverse and innovative pedagogic approaches like Project-Based Learning, serious games, flipped-classrooms, etc.

However, the advent of Artificial Intelligence and Industry 4.0 will have a dramatic impact on the job market especially for an important number of jobs that will disappear owing to AI automation in a number of sectors led by manufacturing and transportation. There are also many other emerging jobs that will be created. There is also a need to address the 21st century skills in the framework of Education 4.0 which is mainly based on soft skills like emotional intelligence, critical thinking, and complex problems solving. Society 5.0 is supposed to nurture these skills and to provide a wonderful ecosystem for Education 4.0 and Industry 4.0.



BOURHIM El Mostafa

Docteur

Ecole Mohammedia d'Ingénieurs
Rabat, Maroc

Réalité Augmentée et Virtuelle

S'il est présenté comme un concept radicalement nouveau, La réalité Etendue est en réalité l'aboutissement logique de technologies existantes comme la réalité augmentée, la réalité virtuelle, et les solutions cloud. L'une des premières perspectives d'applications de la réalité étendue dans le secteur industriel consiste, d'une part, à créer des espaces de collaboration virtuels pour des réunions plus engageantes et plus productives et, d'autre part, à favoriser la coopération à distance sur des projets, des revues de design ou encore des opérations de maintenance.

LA RÉALITÉ ETENDUE UN NOUVEAU PARADIGME TECHNOLOGIQUE POUR LES INDUSTRIELS

1/ Introduction

La réalité virtuelle n'est pas arrivé par hasard. Comme toute nouvelle technique, elle a été esquissée par des antécédents qui ne s'appelaient pas <réalité virtuelle> .La réalité virtuelle a été employée généralement dans les simulateurs de transport qui ont permis à des professionnels d'interagir avec un environnement virtuel semi immersif. Depuis 50 environ on faisait de la réalité virtuelle sans être conscient. la réalité virtuelle implique par nature de nombreux domaines :

Dans le domaine des sciences et des techniques : la réalité virtuelle dépasse le domaine du STIC (sciences et techniques de l'information et de la communication). Toutefois, le cadre de la réalité virtuelle ne se limite pas à celui de l'information et de la communication, puisqu'il s'agit d'une interaction dans un monde virtuel. De nombreuses disciplines contribuent à produire de nouvelles avancées dans le secteur de la réalité virtuelle (l'ergonomie, la téléopération et l'informatique, la mécanique etc.).

Dans le domaine des sciences humaines et des sciences du vivant : l'objectif ultime de la réalité virtuelle est de faire percevoir à l'homme un monde artificiel ressemblant au monde réel avec la possibilité d'interaction, donc l'utilisateur est placé au cœur du processus de développement des technologies de la réalité virtuelle, ce qui implique une forte synergie avec de multiples disciplines de ce domaine. Citons ainsi à titre d'exemple :

- L'ergonomie met en avant des objectifs fondamentaux qui vise à développer des méthodes et des connaissances prenant en compte des facteurs humains dans la conception et l'évaluation des

environnements de la réalité virtuelle afin que ceux-ci soient en adéquation avec les objectifs des utilisateurs, l'efficacité, les conditions d'utilisation, les exigences de confort et de sécurité, etc.

- La psychologie cognitive s'intéresse à la nature des processus cognitifs du sujet plonge dans une activité s'évoluant dans un univers virtuel.
- La physiologie, la neurologie, etc.

Pour cette raison, la réalité virtuelle occupe, par l'enchevêtrement de plusieurs disciplines, une position spéciale au sein du monde scientifique. Cette position représente un avantage par l'interdisciplinarité intrinsèque du domaine et en même temps une difficulté à affronter pour la maîtrise de ce domaine multidisciplinaire par les divers disciplines qui la fécondent.

2/ Développement

2.1. Généralités sur la réalité virtuelle

a. Les origines de la réalité virtuelle

Le Cinéorama est présenté pour la première fois à l'exposition universelle de 1900 par Raoul Grimoin-Sanson peut être considéré le premier coup d'essai de la réalité virtuelle. Les utilisateurs se trouvaient dans une nacelle artificielle d'où ils avaient l'impression de survoler Paris à l'aide de 10 projecteurs sur un écran de 100 mètres de longueur en forme de cercle. Après seulement quelques représentations, le ballon Cinéorama a été interdit à cause de son niveau de risque qui était très élevé[1].

La réalité virtuelle a pu voir le jour avec l'Américain Edwin Albert Link en 1928 qui a développé le premier simulateur de vol mécanique « le simulateur Link ». Ce simulateur est breveté en 1929, Link servira de son expérience acquise à l'usine de fabrication de pianos et d'orgues de son père. Pour arriver à reproduire les mouvements d'un avion, il eut l'idée d'utiliser des soufflets d'orgue. Malgré son intérêt, l'armée américaine ne disposait pas du budget nécessaire pour acquérir les simulateurs Link. Il fallut attendre 1934 pour l'utiliser dans des simulations de vol.

Morton Heilig (1926-1997) invente le Sensorama (figure1) Simulator en 1960[2]. Ce dispositif simulait l'illusion d'être sur un motocycle dans les rues de New York par l'utilisation d'un environnement contenant un écran couvrant le champ visuel de l'utilisateur. Cette impression d'immersion repose sur odeurs, sensations de température, et mouvements.

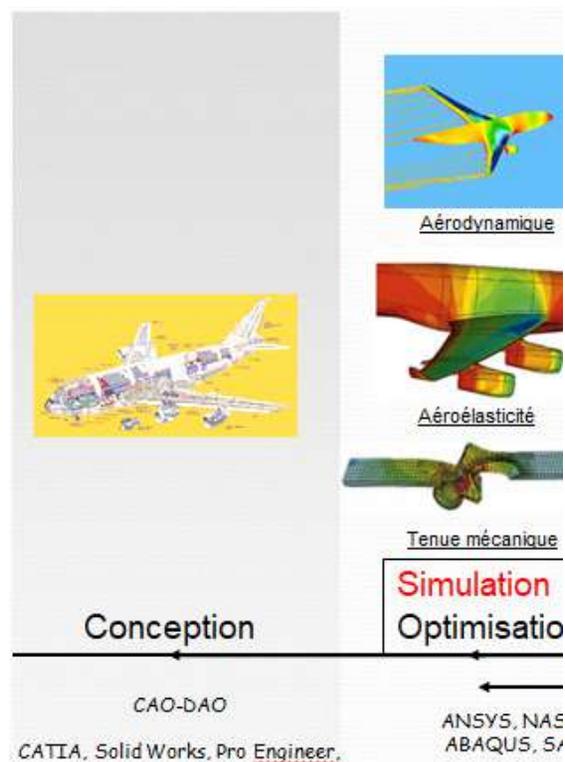


Fig1. L, H.M., Sensorama simulator. 1962, Google Patents

La même année la naissance de l'informatique 3D par la création d'un modèle informatique d'humain en 3D par William Fetter[3] pour la conception des cockpits de Boeing.

La première interface graphique a été mise par Edward Sutherland en 1963 sur laquelle on peut dessiner des schémas techniques via un stylo optique.

Sutherland invente le premier casque de réalité virtuelle en 1966 en prenant le modèle de Morton Heilig. Ce casque possède deux écrans supportés par un bras mécanique en raison de leur poids encombrant et il fonctionne grâce à un jeu de miroirs [4].

Le premier travail sur la modélisation 3D eut lieu en 1967 par M.Evans et M.Sutherland et qui porte sur la numérisation de la coccinelle (la voiture). En 1968, ils instaurent la compagnie Evans & Sutherland. Ils développent ensuite le premier GUI (interface utilisateur graphique), les scènes comportaient au plus 200 à 400 polygones et la vitesse de génération des images est d'environ 20 images par seconde.

Au milieu des années 1970, Myron Krueger a créé un laboratoire de réalité artificielle appelée "Videoplace"[5]. L'objectif de ce laboratoire était la création d'une réalité artificielle interactive et qui prendraient en considération les mouvements et les actions des utilisateurs en limitant l'encombrement des dispositifs tels que les lunettes et les gants. Ce travail donnerait lieu à un livre nommé "Artificial Reality" et à un projet nommé "Videoplace". Ce projet permettrait à ses utilisateurs des expériences immersives. et depuis la réalité virtuelle ne cesse de s'émerger dans tous les domaines jusqu'aux années 1998 où les interfaces de réalité virtuelle sont devenues accessibles au public [6].

b. Définition de la réalité virtuelle

Selon P. Fuchs [7], « la RV est un domaine scientifique et technique exploitant l'informatique et les interfaces comportementales en vue de simuler dans un monde virtuel le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel, entre elles et avec un ou des utilisateurs en immersion pseudo naturelle par l'intermédiaire de canaux sensori-moteurs. Cette définition introduit une terminologie nécessitant quelques explications permettant de mieux la situer » :

- La création d'un environnement virtuel interactif en s'appuyant sur l'outil informatique (matérielles et logiciels) qui puisse être interfacé avec l'utilisateur.
- Exploiter interfaces comportementales de la RV qui sont principalement composées d'interfaces sensorielles et d'interfaces motrices. Les interfaces sensorielles donne une idée à l'utilisateur de l'évolution du monde virtuel. Les interfaces motrices indique à l'ordinateur des actions motrices.
- La création d'un plan virtuel interactif et en temps réel.
- L'utilisateur ne doit pas percevoir un décalage temporel entre ses actions et le feedback sensorielle qui provient de l'environnement virtuel (interaction en temps réel).
- l'immersion doit être identique au réel dans la mesure du possible.

c. Paradigmes de réalité virtuelle et continuum de virtualité

Une simulation virtuelle implique l'intervention d'un niveau variable de virtualité dans une scène. Les différents niveaux de virtualité donnent place à quatre paradigmes principaux au niveau de l'immersion.

Ces paradigmes, bien que limités en un nombre restreint, peuvent être positionnés sur un axe horizontal dénommé continuum de virtualité. Ce dernier a originellement été proposé par Paul Milgram (figure 2). On y fait souvent annotation sous la dénomination de continuum de Milgram [8].



Fig2 .Le continuum de Milgram

d. Architecture d'un système de réalité virtuelle

La communication entre l'utilisateur et le système de réalité virtuelle se fait à deux niveaux : L'utilisateur agit sur le système à travers des interfaces motrices et le système réagit à son tour sur l'utilisateur via des interfaces sensorielles. Les interfaces à retour d'effort sont des interfaces dites sensori-motrices dont la mesure où elles ont comme entrée (la position) et comme sortie (la force) (figure3) [9].

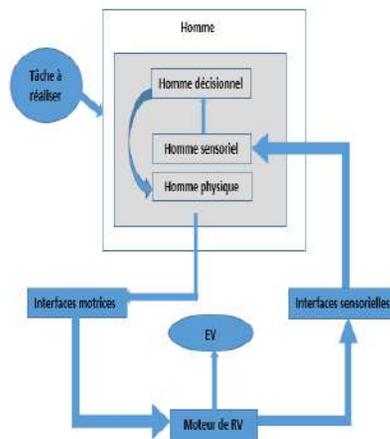


Fig3 .Architecture d'un système de réalité virtuelle

3/ Dispositifs de réalité virtuelle

Un environnement de la réalité virtuelle peut être assuré par un ensemble de composants matériels qui se divisent en deux catégories :

Les interfaces de sortie : ce sont les dispositifs qui permettent de transmettre l'information à l'utilisateur et qui l'immerge dans le monde virtuel (visiocasque, plan de travail virtuel, cave, etc.).

Les interfaces d'entrée : ce sont des dispositifs d'interaction avec l'environnement de réalité virtuelle et qui transmettent les informations de mouvement pour créer la simulation (les gants de données, les souris 3D).

a. Les gants de données

Gary Grimes en 1981 [10], est le premier qui avait breveté un dispositif de saisie à base de gant qui faisait appel à de petits contacteurs placés à chaque articulation des doigts (figure4). Ensuite le nouveau modèle de gant inventé par Thomas Zimmerman [11] nommé « le gant optique » à base de fibres optiques plus légères et plus précises qui étaient employées à la place des tubes de plastiques. Chaque fibre était incisée au niveau des articulations. L'importance de la flexion de chaque phalange influait donc directement sur l'intensité de la lumière qui atteignait un dispositif qui capte les signaux situé en bout de fibre, grâce à ces entailles calibrées. James Kramer [12], un ingénieur de l'Université de Stanford a développé un troisième type de gant à capteurs d'effort convertissant des mots épelés à l'aide des doigts en phonèmes vocaux, au profit des sourds-muets et des sourds-aveugles.

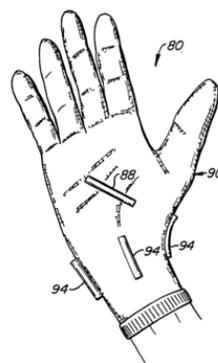


FIG. 9.

Fig4 . US4414537 to Grimes/Bell Telephone Laboratories

b. Les visiocasques

Pour recréer l'environnement 3D, le casque de réalité virtuelle, aussi appelé visiocasque, est un dispositif d'affichage qui permet à la personne qui le porte de vivre une expérience sensorielle dans un monde virtuel numérique, grâce à la stéréoscopie, qui consiste à reproduire la perception du relief grâce aux images devant chaque œil afin de permettre au spectateur de percevoir la distance des objets proches. Les premiers casques de réalité virtuelle sont inventés par Texas[13],Smyth[14],Schwerdtner[15].

4/ les composantes de la réalité virtuelle

Une application en RV sera définie par ses trois composantes principales : immersion, interaction et autonomie. Graphiquement, une application sera représentée par un point dans un repère à trois dimensions immersion/interaction/autonomie(figure5).Zeltzer(Zeltzer1992)[16] a cité trois ingrédients de base de la réalité virtuelle : l'autonomie, la présence et l'interaction. Quant à Tisseau [17], il s'est basé sur les notions de présence et d'autonomie.

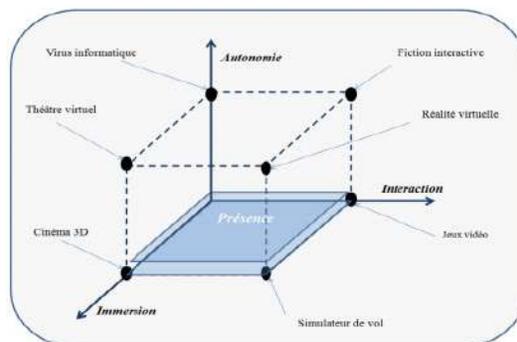


Fig5. Présence et autonomie en réalité virtuelle (Tisseau 2001)

a. Environnement virtuel

Au début des années 90, la notion de L'environnement virtuel (Virtual environment) a été introduite par les chercheurs du MIT (Massachusetts Institute of Technology).Comme étant l'environnement idéal pour exécuter certaines tâches avec le sentiment d'être dans un plan similaire au réel.

On peut classer ces environnements selon le degré d'immersion fourni : environnement virtuel non-immersif (Non-Immersive Virtual Environment NIVE), environnement virtuel semi-immersif (Semi-Immersive Virtual Environment SIVE), environnement virtuel totalement immersif (Fully Immersive Virtual Environment FIVE(figure6)) .(Kalawsky, 1996)[18]. Le tableau 1 met en évidence les performances de chaque environnement.



Fig6. Environnement virtuel totalement immersif (FIVE)

| Caractéristiques principales | NIVE | SIVE | FIVE |
|------------------------------|--------|------------|---------------|
| Résolution | Haute | Haute | Basse-moyenne |
| Echelle | Basse | Basse | Haute |
| Compétences de navigation | Faible | Moyen | Elevé |
| Champ de vision | Petit | Moyen | Grand |
| Décalage | Bas | Bas | Moyen-haut |
| Sens d'immersion | Bas | Moyen-haut | Moyen-haut |

TABLE 1 . Les différentes performances qualitatives des systèmes de RV (Traduit de Kalawsky, 1996)

b. Immersion

L'immersion est un ingrédient nécessaire dans la conception de toute application en RV. En effet, la réussite de ces applications dépend du degré d'immersion que nous souhaitons avoir, du choix du mode d'immersion et d'une bonne utilisation des différents dispositifs.

L'immersion est étroitement liée à la perception de l'utilisateur de son monde virtuel, elle est assurée en remplaçant le maximum de sensations naturelles par leurs équivalents dans l'univers virtuel (Mestre and Fuchs, 2006)[19]. Selon Bowman (Bowman, 1999)[20], un utilisateur est dit « immergé » lorsqu'il sent que le monde virtuel qui l'entoure a remplacé le monde physique avec un certain degré. Autre que la perception, la présence d'un utilisateur dans un monde virtuel est un concept qui joue un rôle important pour une meilleure sensation de l'immersion. En effet, la présence procure à l'utilisateur un sentiment d'être « à l'intérieur » de l'environnement virtuel. Le premier type de présence correspond à la sensation que l'on cherche à donner à l'utilisateur de faire partie du monde virtuel et que les objets qui l'entourent sont réellement présents (Burkhardt et al, 2003)[21](Mestre and Fuchs, 2006)(Stoffregen et al, 2003)[22]

L'immersion peut être divisée en deux classes: une classe dite immersion cognitive est, en général, caractérise le sentiment que l'utilisateur a lorsqu'il exécute sa tâche au sein de l'environnement virtuel. En effet, l'utilisateur est immergé cognitivement lorsqu'il est totalement concentré sur sa tâche. Une autre appelée L'immersion sensorimotrice concerne la sensation que l'utilisateur a d'être à l'intérieur de l'environnement virtuel. En RV l'immersion sensorimotrice est beaucoup plus avancée, puisqu'elle prend en considération les informations concernant l'utilisateur (position, vue, toucher, l'ouïe) (Gerber, 2004)[23].

c. Autonomie

La notion d'autonomie en réalité virtuelle est liée aux différents éléments du cadre virtuel. L'utilisateur appartient activement à cet environnement et sa place n'est pas la même qu'en simulation scientifique ou interactive (Tisseau 2001). En simulation scientifique, il est essentiel de fixer au préalable les paramètres avant de commencer le travail et ensuite vient l'étape de l'analyse des résultats. En simulation interactive l'utilisateur entre en interaction durant la simulation mais il ne fait rien d'autre que changer les paramètres de la simulation. Néanmoins, dans une simulation en réalité virtuelle l'utilisateur est immergé dans un cadre autonome plus libre où il a la possibilité d'évoluer, changer les propriétés de l'environnement virtuel, et interagir avec ces composantes sans avoir recours à une fixation des paramètres avant ou pendant la simulation. L'autonomie de l'utilisateur est dans sa capacité à communiquer et à coordonner son comportement au cours de l'interaction avec les autres entités.

d. Interaction

L'interaction comme étant la composante motrice de tout système interactif. Elle est définie comme le moyen de communication entre l'utilisateur et l'environnement virtuel via des interfaces sensorielles, motrices, et de techniques d'interactions (Sternberger 2006). Par contre dans une application virtuelle l'interaction est la capacité de traduire les actions de l'utilisateur dans le monde réel en des tâches spécifiques dans l'espace virtuel.

Les techniques d'interaction sont très diverses pour les classer selon un critère bien défini. Par contre il existe plusieurs classifications de ces techniques d'interactions 3D. La première classification est proposée par (Mine 1995) axée sur quatre critères : la navigation, la sélection, la manipulation, et la mise à l'échelle selon (Bowman, 1999) ces techniques peuvent être classées selon quatre tâches essentielles : la navigation, la sélection, la manipulation et le contrôle d'application. (Sternberger, 2006) adopte la même classification à laquelle elle rajoute l'entrée de symboles. Coquillar quant à lui propose une classification totalement différente. Ce dernier décompose chaque application en des tâches élémentaires appelées primitives comportementales virtuelles (PCV) qui peuvent être regroupés à leur tour en quatre catégories : observation,

déplacement, action, et communication avec autrui ou avec l'application pour son contrôle.

5/ Perspectives d'avenir

Application à la simulation de trafic routier : D'après une étude menée par IBM en 2011, un passage de 8% en 2010 à 28% en 2011 de New-Yorkais ayant confirmé que les transports auraient gravement créé une perturbation à leur travail ou études. Le trafic routier est devenu extrêmement important en l'espace de quelques années, ce qui avait une répercussion sur la vie quotidienne des habitants en termes de temps, argent, santé, sécurité, et qualité environnementale. Alors, une politique de gestion du trafic routier s'avère indispensable afin d'administrer ce handicap, proposer des modèles intelligents permettant à la fois la simulation, la diffusion d'informations, et la réduction de tout type de pollution.

Grâce à la réalité virtuelle, on peut créer un environnement de trafic routier similaire à celui vécu réellement par les habitants où une variété de conditions peut être simulée en changeant les différents paramètres tels que : le flux de trafic, la longueur du signal, le temps et la vitesse, le type de véhicule, et ainsi de suite, ce qui permet de déterminer les conditions du véhicule sur la route et prévoir l'élaboration du plan de contrôle du trafic. D'ailleurs plusieurs projets basés sur la réalité virtuelle ont été élaborés dans cette direction comme 'Zhongshan Road' qui avait pour objectif la simulation du trafic routier sous plusieurs paramètres.

Une conception basée sur prototypage virtuel : la conception d'un nouveau produit passe par la réalisation de plusieurs prototypes qui ont pour but la validation, l'évaluation, et la réalisation des tests. Cette nécessité de dupliquer les prototypes a pour conséquence la surexploitation des ressources naturelles, les ressources énergétiques, et l'accumulation des déchets. Afin de diminuer ces problèmes (temporels, matériels, environnementaux, et financiers), l'industrie spécialement le secteur automobile s'oriente de plus en plus vers le prototypage virtuel. Les principaux apports de ce prototypage sont:

Matière première : pas de ressources naturelles à utiliser, donc on aura besoin ni de transport ni de logistique.

Duplication des prototypes : la duplication des prototypes simple, rapide et se fait virtuellement, donc ni coût supplémentaire ni épuisement des ressources.

Outillage : pas d'outillage nécessaire, tout se passe dans un environnement virtuel en temps réel.

Si la recherche de nouveaux moyens innovantes représente un des enjeux essentiels pour une industrie caractérisée par : une production énergétique efficace, durable, et propre. Parfois ils peuvent être très coûteux sans une garantie des résultats. Les techniques de prototypage virtuel offrent donc actuellement de nouveaux moyens plus économes de tester et de favoriser l'efficacité des produits industriels, tout en diminuant l'effet environnemental du processus de production

6/ Conclusions

Les applications de la réalité virtuelle précédemment citées montrent son intérêt plus particulièrement dans les phases amont de la conception de produits. Se servir de l'environnement virtuel permet un investissement moins lourd et une analyse plus approfondie, plus préventive dans le processus de conception. De plus, par leur rapidité de réalisation, les modèles virtuels permettent d'imaginer un ensemble de scénarios réalistes avant de sortir l'expérience au réel, ce qui contribue directement à une exploitation efficiente des ressources ainsi qu'une vision plus préventive, plus écologique, et plus durable. Les techniques de la réalité virtuelle permettent une immersion complète dans l'environnement virtuel. Toutefois, cette immersion représente un obstacle à l'utilisateur de percevoir et d'interagir avec le monde réel, en conséquence, un nouveau paradigme de la réalité virtuelle, on y fait annotation sous le nom de 'la réalité augmentée', qui est capable de faire coexister spatialement et temporellement un monde virtuel avec l'environnement réel paraît plus intéressant dans la vie quotidienne des habitants d'une ville intelligente.

La réalité augmentée est interdisciplinaire et se base sur la synthèse d'images, les technologies portables, et les interfaces homme-application, et la connexion en réseau, afin de les intégrer dans tout objet du quotidien, favorisant ainsi l'accès aux informations partout et à tout moment. La réalité augmentée concerne un large éventail d'applications et dans tous les domaines, la défense, l'architecture, la médecine, le web etc. A tel point qu'on parle d'un concept parallèle à celui de la ville intelligente, il s'agit de la ville augmentée[31] qui désigne le croisement de la ville et des technologies en référence à la notion de la réalité augmentée. En résumé, la réalité augmentée n'a pas vocation à remplacer la réalité virtuelle mais chacune d'entre elles intervient à un stade différent, et peuvent toutes les deux contribuer à rendre la ville de demain plus intelligente, plus économe, et plus durable



TKATEK Said

Docteur

Professeur à l'Université Ibn Tofail
Kénitra, Maroc

Science des données et big data et leurs applications dans les secteurs actifs

L'exploitation des données internes et externes à l'entreprise est clairement d'actualité. Les entreprises sont conscientes du vrai potentiel qu'offrent ces données pour l'aide à la prise de décision. La Data Science et le Big Data sont au cœur de cette transformation précieuse pour atteindre cet objectif dans un temps court et très acceptable. Le lien entre les deux apparaît alors : afin d'analyser les amas de données, le Big Data repose sur les algorithmes développés par la Data Science. Notre présentation porte alors sur la science des données et le Big Data avec un accent mis sur les algorithmes d'apprentissage automatique (Machine Learning), l'optimisation prédictive et les outils de big data pour transformer les systèmes actuels en systèmes intelligents capables d'explorer et d'analyser les données volumineuses notamment issues de secteurs les plus actifs (l'industrie, la médecine, l'agriculture pour la prise de bonne décision. En fin, nous présenterons nos thèmes de recherche d'actualité de Big data et Data science et leurs applications proposés dans les secteurs les plus actifs : l'agriculture, la médecine et santé, la finance, l'éducation, la commerce et marketing et le freinage de propagation de COVID19.

BIG DATA ET SCIENCES DES DONNÉES ET LEURS APPLICATIONS DANS LES SECTEURS ACTIFS

1/ Introduction

Ces dernières années, le Big Data, la Data Science et l'intelligence artificielle sont devenus deux technologies importantes, inextricablement liées à l'intelligence du Big Data. Avec l'avancée rapide des technologies de l'information et de la science, la Data Sciences le Big Data et l'intelligence artificielle sont en train de remodeler la science, l'ingénierie, l'agriculture, l'industrie, la médecine, la santé, la finance, les affaires et la société. Ces trois disciplines sont une branche de l'informatique visant à créer des machines intelligentes qui peuvent simuler, soutenir, renforcer ou même améliorer l'intelligence humaine. Une grande partie de la croissance de l'IA a eu lieu au cours de la dernière décennie. Avec les tendances du big data, le monde pourrait voir de nombreuses nouvelles applications de l'IA et de Big Data se développer et mieux correspondre aux exigences réalistes des applications du monde réel. La prochaine décennie sera marquée par la plus grande révolution technologique de l'histoire de l'humanité.

Avec la croissance explosive des données issues de différentes sources et applications contrairement aux ensembles de données traditionnels, le Big Data offrent également de nouvelles opportunités pour découvrir de nouvelles valeurs [1].

Ils nous aident à obtenir une compréhension approfondie des valeurs cachées et à apporter de nouveaux défis, tels que l'organisation et gestion efficace de ces ensembles de données.

La science des données peut être vue comme l'incorporation de plusieurs disciplines parentales, notamment l'analyse de données, le génie logiciel, l'ingénierie de données, l'apprentissage automatique, l'analyse prédictive, l'analyse de données, etc. Cela inclut la récupération, la collecte, l'ingestion et la transformation de grandes quantités de données, appelées collectivement big data. La science des données est chargée de structurer les mégadonnées, de rechercher des modèles convaincants et de conseiller les décideurs d'apporter les modifications efficacement pour répondre aux besoins de l'entreprise

Dans ce document, nous mettons l'accent sur l'utilisation de Big data et data sciences pour la prise de décision dans différents secteurs actifs et nous présentons quelques axes de recherche de Big data et Data science d'actualités sur lesquels nous travaillons.

2/ Big Data et la prise de Décision

2.1. Dimensions de Big Data

Avec la croissance explosive des données mondiales, le terme du Big Data est utilisé principalement pour décrire de grande quantité de données. Contrairement aux ensembles de données traditionnels, les Big Data sont généralement une énorme quantité de données non structurées qui nécessitent davantage d'analyse en temps réel. De même, les Big Data offrent également de nouvelles opportunités pour découvrir de nouvelles valeurs [2]. Ils nous aident à obtenir une compréhension approfondie des valeurs cachées et à apporter de nouveaux défis, tels que l'organisation et gestion efficace de ces ensembles de données.

Le Big Data comme une nouvelle génération de technologies et d'architectures, visant à extraire de manière économique de la valeur de grandes quantités de données pour réaliser la capture, la découverte et l'analyse [3]. Avec cette définition, les caractéristiques de Big Data peuvent être résumées en 5V, à savoir le grand volume, la variété, la vitesse, la variété et la valeur, comme montre la figure (1).

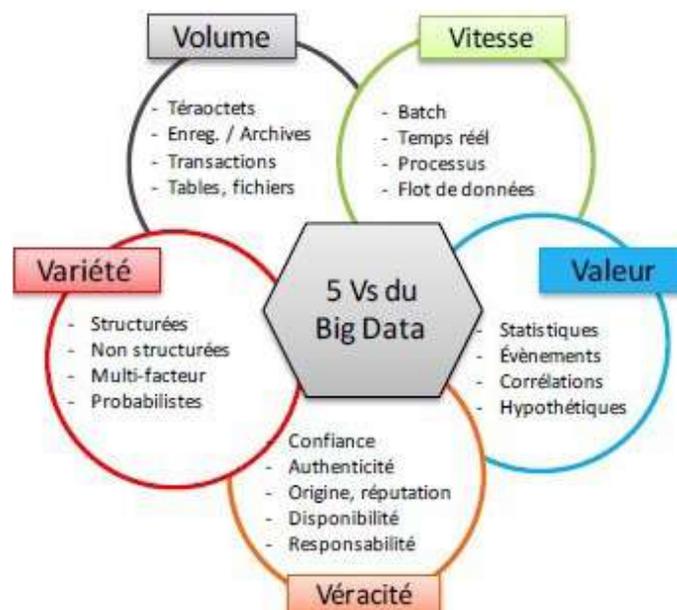


Figure 1 : Les quatre «V» de Big Data

2.2. Processus d'analyse prédictive

L'analyse prédictive ne se contente pas de prédire ce qui se passe, mais elle peut également prédire ce qui se passera dans le futur, ce qui est très précieux pour une meilleure planification et préparation. Plutôt que de simplement expliquer qui, quoi, où et quand, l'analyse prédictive prévoit le meilleur plan d'action qui générera le rendement le plus optimal sur la base d'un algorithme, tel qu'une équation de régression [4]. L'objectif de l'analyse prédictive est d'analyser les données et de manipuler les variables pour extraire des capacités prédictives des données existantes. Les techniques d'analyse prédictive s'appuient sur des variables qui peuvent être mesurées, en manipulant des paramètres pour prédire un comportement

ou des résultats futurs sur la base d'une variété d'approches quantifiables. Les modèles d'analyse prédictive combinent plusieurs prédicteurs ou variables quantifiables dans un modèle prédictif [5][6]. Cette approche permet de collecter des données et de formuler ensuite un modèle statistique, auquel des données supplémentaires peuvent être ajoutées au fur et à mesure deviennent disponibles. Le processus de prédiction comprend les étapes suivantes, décrites dans la figure 2

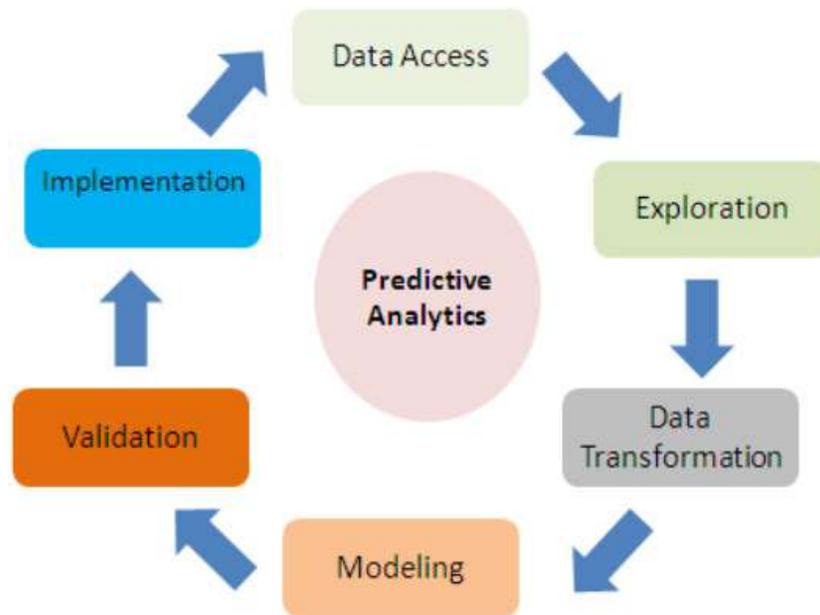


Figure 2 : Processus d'analyse prédictive

2.3. Processus décisionnel via le Big data

La prise de décision s'accompagne d'une grande quantité de données et de logiciels pour leur analyse [7]. En conséquence, des solutions doivent être étudiées et fournies afin de gérer et d'extraire la valeur et les connaissances de ces ensembles de données. En outre, les décideurs doivent être en mesure d'obtenir des informations précieuses à partir de ces données en évolution rapide, de grand volume, de vitesse, de variété, de véracité et de valeur en utilisant l'analyse de Big Data. Cette section vise à rechercher comment l'analyse des Big Data peut-être intégrée dans le processus de prise de décision ?

L'analyse documentaire a permis aux auteurs d'explorer les différentes façons dont le Big Data joue un rôle essentiel f fournir des informations pour la prise de décision et d'améliorer aussi la capacité pour prendre de meilleures décisions. La figure 2 illustre clairement la structure conceptuelle usuelle qui mène des données importantes à la prise de décision. Le cadre conceptuel illustré à la figure 3 représente une relation entre cinq constructions.



Figure 2 : Structure conceptuelle sur les données importantes et la prise de décision

L'analyse technique prédictive est une sous-branche de la BD également appelée logique prédictive ou analyse avancée, elle rassemble des techniques analytiques et statistiques avancées pour établir des scénarios prédictifs sur des événements futurs. L'analyse prédictive utilise des méthodes spécifiques issues de la ML et de la théorie des jeux. Grâce à des algorithmes complexes, la combinaison de ces techniques permet de générer des modèles qui prédisent avec précision des événements futurs [8][9].

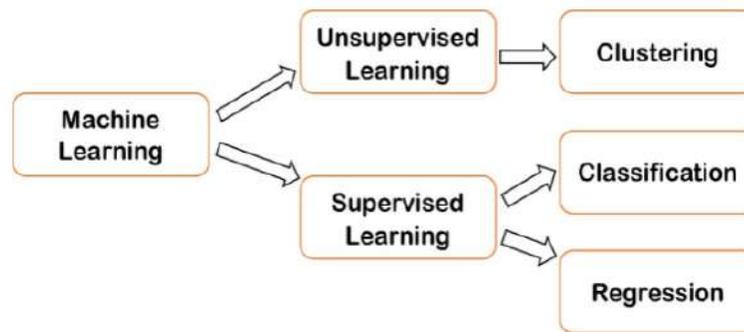


Figure 4 : Type d'algorithmes d'apprentissage machine [10].

Les algorithmes de la ML sont classés selon le type d'apprentissage supervisé ou non supervisé décrit dans la figure4

a. Apprentissage supervisé

Pour ce type d'algorithme, les données d'entrée sont étiquetées et chacune est indiquée par la cible correspondante. L'objectif de l'algorithme est de fournir un label à chaque nouvelle entrée, puis d'apprendre à partir des données initiales, tout en calculant une fonction qui représentera le meilleur modèle trouvé après cet apprentissage, et de faire des prédictions sur les données non étiquetées. Dans ce type de formation, il faut distinguer deux types d'algorithmes : les algorithmes de classification et les algorithmes de régression [12][13].

- **Algorithmes de classification** : Lorsque les variables de sortie sont discrètes, c'est-à-dire numériques et dénombrables. Le problème est alors de prédire la catégorie de données. La classification peut être binaire si nous avons deux classes ou multinomiale si le nombre de classes est supérieur à deux.

- **Algorithmes de régression** : différents types de régression peuvent être appliqués dans la prédiction des données comme le modèle de régression linéaire et le modèle de régression polynomial parmi les modèles qui seront appliqués dans ce travail pour prédire un exemple de données Covid-19. Dans cette application, les valeurs de sortie à prédire sont des variables numériques continues.

b. Apprentissage non supervisé

Ce type d'apprentissage consiste à analyser des données non étiquetées, puis à extraire un modèle de ces données afin de pouvoir générer des prédictions. L'apprentissage non supervisé fait référence au regroupement ou au partitionnement des données en groupes homogènes, en calculant une mesure de similarité, lorsque le système ne dispose que d'exemples, et que le nombre de classes et leur nature n'ont pas été prédéterminés. C'est ce que l'on appelle l'apprentissage non supervisé ou le regroupement [14].

c. Principaux algorithmes pour l'apprentissage automatique

Dans ce projet de recherche, l'équipe a choisi de travailler avec le type d'apprentissage supervisé et plus précisément avec les algorithmes les plus utilisés dans l'analyse et la prédiction des données de santé.

- **La Régression logistique** :

La régression logistique est l'un des algorithmes de ML les plus utilisés pour la classification binaire. Comme beaucoup d'autres techniques de ML, elle est obtenue dans le domaine des statistiques, non pas comme son nom l'indique, ce n'est pas un algorithme pour les problèmes de régression, dans lesquels on souhaite prédire une sortie continue. Au contraire, la régression logistique est la méthode de référence pour la classification binaire [15].

- **La machine à vecteurs de support (SVM)** :

La machine à vecteurs de support (SVM) est un algorithme de classification des données par analyse prédictive qui attribue de nouveaux éléments de données à l'une des catégories étiquetées. L'algorithme SVM est, dans la plupart des cas, un classificateur binaire. Il suppose que les données en question contiennent deux valeurs cibles possibles [16].

- **L'Arbre de décision** :

L'arbre de décision est un modèle prédictif qui permet de passer des observations sur un élément aux conclusions sur ses valeurs cibles. C'est l'une des approches de modélisation prédictive utilisée en statistique, en exploration de données et

en ML. Les modèles d'arbre, dans lesquels la variable cible peut prendre un ensemble discret de valeurs. Ils sont appelés arbres de classification. Dans ces arbres, les feuilles représentent des étiquettes de classe et les branches représentent des conjonctions d'entités menant à ces étiquettes de classe.

Par exemple, dans le domaine de la santé, nous avons trouvé un travail qui utilisait la régression logistique pour traiter les données sur les congés de maladie passés et les variables démographiques pour prédire les absences pour cause de maladie, d'autres travaux [17] [18] utilisaient également la régression logistique pour mesurer les facteurs psychosociaux et prédire la capacité de travail des travailleurs des cimetières.

- **Le Gradient Boosting :**

Le Gradient Boosting est une technique d'apprentissage automatique des problèmes de régression et de classification [19], qui produit un modèle de prédiction sous la forme d'un ensemble des modèles de prédiction faibles, généralement des arbres de décision. Il construit le modèle de manière progressive.

- **Les réseaux de neurone :**

s : L'algorithme du réseau de neurones est largement utilisé pour la classification des données. Les réseaux neuronaux traitent les données passées et actuelles pour estimer les valeurs futures, révélant toutes les corrélations complexes cachées dans les données d'une manière similaire à celle utilisée par le cerveau humain. Dans le reste du système expert en cours de développement, la structure d'un algorithme de réseau neuronal est constituée de trois couches :

La couche d'entrée alimente les valeurs des données passées dans la couche suivante (cachée). La couche cachée encapsule plusieurs fonctions complexes qui créent des prédicteurs ; la couche de sortie rassemble les prédictions faites dans la couche cachée et produit le résultat final qui est la prédiction du modèle comme le montre la figure 5.

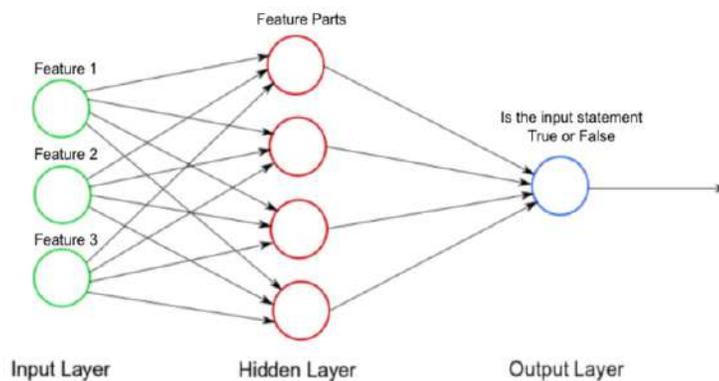


Figure 5. Principe de fonctionnement de du réseau de neurones [44]

Le Deep Learning DL est une approche de la famille d'apprentissage de la représentation du ML. L'apprentissage de la représentation est aussi souvent appelé apprentissage des caractéristiques [20]. Ce type d'algorithme tire son nom du fait qu'il utilise des représentations de données plutôt que des caractéristiques de données explicites pour effectuer des tâches.

3/ La Data science au cœur des secteurs actifs

3.1. Définition

La Data Science est la science des données. C'est la discipline qui permet à une entreprise d'explorer et d'analyser les données brutes pour les transformer en informations précieuses permettant de résoudre les problèmes de l'entreprise.

C'est un mixage disciplinaire entre la data inférence, le développement d'algorithme et la technologie, dont l'objectif est la résolution de problèmes analytiques complexes. Au cœur de ce grand mixage, on retrouve les données, les quantités massives d'informations brutes stockées dans les data Warehouse des entreprises. Concrètement, la science des données permet d'utiliser les données de façon créative pour générer une valeur pour les entreprises

Tout d'abord, la Data Science permet de découvrir des insights au sein des données. En plongeant dans ces informations à un niveau granulaire, l'utilisateur peut découvrir et comprendre des tendances et des comportements complexes. Il s'agit de faire remonter à la surface des informations pouvant aider les entreprises à prendre des décisions plus intelligentes.

Data Science Is Multidisciplinary

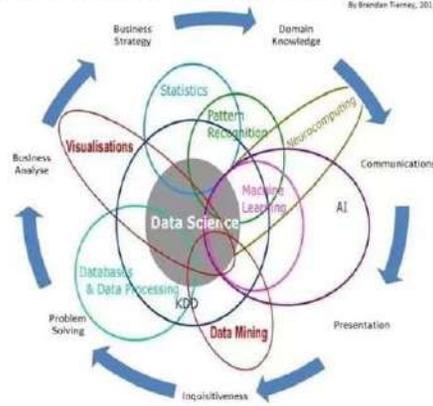


Figure3: la data science comme contexte générale du projet

3.2. Clés de Data Science

- **La Data science :**

les mathématiques avancées sont exigées :De nombreuses personnes commettent l'erreur de penser que la data science est entièrement liée aux statistiques. Les statistiques sont importantes, mais ne sont pas la seule forme de mathématiques utilisée. De nombreux algorithmes de machine Learning repose par exemple sur l'algèbre linéaire. De façon générale, un bon data Scientist doit avoir des connaissances solides en mathématiques.

- **La Data science et Machine Learning :**

La science des données et l'apprentissage automatique sont deux mots à la mode aujourd'hui. Ces deux termes sont souvent associés mais ne doivent pas être confondus avec des synonymes. Bien que la science des données englobe l'apprentissage automatique, il s'agit d'un vaste domaine comportant de nombreux outils différents.

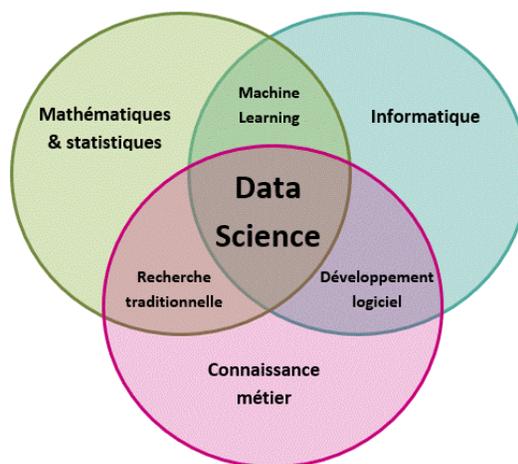


Figure 6:Disciplines de Data Sciences

La Data Science permet de créer un Data Product :Un data Product est un asset qui repose sur des données et les traite pour générer des résultats à l'aide d'un algorithme pour générer des recommandations personnalisées basées sur ces données.

3.3. Utilisation de Big Data et Data Science dans les secteurs actifs

Ces dernières années, le Big Data, la Data Science et l'intelligence artificielle remodelent plusieurs secteurs actifs : l'agriculture, l'industrie, la médecine, les soins de santé, la finance, les affaires. Les outils de ces deux disciplines transforment les systèmes actuels en systèmes intelligents capables d'explorer et d'analyser les données massives liées aux secteurs. Nous présentons les secteurs concernés par l'utilisation de BD, DS et AI comme suit :

- **Agriculture et système intelligent d'irrigation :**

L'eau devient de plus en plus rare à mesure que la population mondiale approche les 8 milliards d'habitants. L'irrigation représente jusqu'à 70 % de la consommation mondiale d'eau. Il n'est pas surprenant que ce soit également ici que la majorité de l'eau soit gaspillée. La gestion intelligente d'irrigation permet d'apporter aux agriculteurs de prendre les bonnes décisions d'irrigation afin d'améliorer leur productivité et réduire leur consommation d'eau

- **Industrie 4.0 :**

L'industrie 4.0 fait référence à la quatrième révolution industrielle, bien qu'elle concerne des domaines qui ne sont généralement pas classés comme des applications industrielles à part entière, tels que les villes intelligentes. De manière générale, l'industrie 4.0 décrit la tendance croissante à l'automatisation et à l'échange de données dans les technologies et les processus de l'industrie manufacturière, notamment : L'internet des objets (IoT), l'internet industriel des objets (IIoT), les systèmes cyber-physiques (CPS), la fabrication intelligente, les usines intelligentes, le Cloud Computing et l'Intelligence artificielle

- **Smart cities :**

Smart city utilisent les nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC) pour progresser l'efficacité opérationnelle, partager des informations avec le public et fournir une meilleure qualité de service gouvernemental et de bien-être aux citoyens.

L'objectif principal de Smart city est d'optimiser les activités de la ville et de promouvoir la croissance économique tout en améliorant la qualité de vie des habitants en introduisant des technologies intelligentes et l'analyse de données.

- **Santé, la médecine et la bio-informatique :**

Le plus grand avantage de l'IA et des technologies de santé est qu'elles permettent de fournir des résultats précis, plus rapidement. PathAI, une entreprise leader dans le secteur des soins de santé qui utilise l'IA, permet aux pathologistes de poser des diagnostics précis en réduisant les erreurs.

- **Logistique :**

Les systèmes de transport intelligents (STI) utilisent des technologies de l'information et de la communication telles que les planificateurs de trajet, l'appel électronique et la conduite automatisée pour rendre le transport plus sûr, plus efficace et plus durable. Les citoyens auront un meilleur accès à l'information grâce aux STI.

- **Entreprise et économie :**

L'analyse prédictive alimentée par Data Science et l'IA permet de résoudre certains problèmes liés aux prévisions économiques. Les économistes seront en mesure de quantifier plus précisément l'impact des perceptions et des comportements humains sur l'état réel des choses en intégrant les approches de l'IA à l'économie comportementale. L'analyse prédictive associe l'analyse statistique traditionnelle au nouvel environnement de l'IA.

- **Éducation :**

Le Big Data et la Data Science et l'IA sont, utilisés dans l'éducation sous la forme d'outils de développement des compétences et de systèmes de test. À mesure que les solutions éducatives de l'IA s'améliorent, on espère que l'IA pourra aider à combler les lacunes dans l'apprentissage et l'enseignement, permettant aux écoles et aux enseignants d'accomplir plus que jamais auparavant.

3.4. Quelques travaux publiés utilisant le BD et AI

Travail 1 :

Work 67 (2020) 557–572
DOI:10.3233/WOR-203309
IOS Press

557

Putting the world back to work: An expert system using big data and artificial intelligence in combating the spread of COVID-19 and similar contagious diseases

Said Tkatek^{a,*}, Amine Belmzoukia^a, Said Nafai^b, Jaafar Abouchabaka^a and Youssef Ibnou-ratib^a

^a*Department of Computer Sciences, Faculty of Science, Computer Research Laboratory, Ibn Tofail University, Kenitra, Morocco*

^b*School of Health Sciences, Division of Occupational Therapy, American International College, Springfield, Massachusetts, USA*

Received 14 June 2020

Accepted 20 August 2020

Abstract.

BACKGROUND: To combat COVID-19, curb the pandemic, and manage containment, governments around the world are turning to data collection and population monitoring for analysis and prediction. The massive data generated through the use of big data and artificial intelligence can play an important role in addressing this unprecedented global health and economic crisis.

OBJECTIVES: The objective of this work is to develop an expert system that combines several solutions to combat COVID-19. The main solution is based on a new developed software called General Guide (GG) application. This expert system allows us to explore, monitor, forecast, and optimize the data collected in order to take an efficient decision to ensure the safety of citizens, forecast, and slow down the spread's rate of COVID-19. It will also facilitate countries' interventions and optimize resources. Moreover, other solutions can be integrated into this expert system, such as the automatic vehicle and passenger sanitizing system equipped with a thermal and smart High Definition (HD) cameras and multi-purpose drones which offer many services. All of these solutions will facilitate lifting COVID-19 restrictions and minimize the impact of this pandemic.

METHODS: The methods used in this expert system will assist in designing and analyzing the model based on big data and artificial intelligence (machine learning). This can enhance countries' abilities and tools in monitoring, combating, and predicting the spread of COVID-19.

RESULTS: The results obtained by this prediction process and the use of the above mentioned solutions will help monitor, predict, generate indicators, and make operational decisions to stop the spread of COVID-19.

CONCLUSIONS: This developed expert system can assist in stopping the spread of COVID-19 globally and putting the world back to work.

Keywords: Expert system, big data, prediction, artificial intelligence, machine learning, spread of COVID-19, work

Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science
 Vol. 25, No. 1, January 2022, pp. 504-510
 ISSN: 2502-4752, DOI: 10.11591/ijeecs.v25.i1.pp504-510 □ 504

An intelligent irrigation system based on internet of things (IoT) to minimize water loss

Samar Amassmir, Said Tkatek, Otman Abdoun, Jaafar Abouchabaka
 Computer Sciences Research Laboratory, Faculty of Sciences, Ibn Tofail University, Kenitra, Morocco

| | |
|--|--|
| <p>Article Info</p> <p><i>Article history:</i> Received Jun 11, 2021 Revised Oct 29, 2021 Accepted Nov 23, 2021</p> <hr/> <p>Keywords: Arduino Intelligent IoT Irrigation Raspberry Pi3</p> | <p>ABSTRACT</p> <p>This paper proposes a comparison of three machine learning algorithms for a better intelligent irrigation system based on internet of things (IoT) for different products. This work's major contribution is to specify the most accurate algorithm among the three machine learning algorithms (k-nearest neighbors (KNN), support vector machine (SVM), artificial neural network (ANN)). This is achieved by collecting irrigation data of a specific products and split it into training data and test data then compare the accuracy of the three algorithms. To evaluate the performance of our algorithm we built a system of IoT devices. The temperature and humidity sensors are installed in the field interact with the Arduino microcontroller. The Arduino is connected to Raspberry Pi3, which holds the machine learning algorithm. It turned out to be ANN algorithm is the most accurate for such system of irrigation. The ANN algorithm is the best choice for an intelligent system to minimize water loss for some products.</p> <p style="text-align: right;"><i>This is an open access article under the CC BY-SA license.</i></p> <div style="text-align: right;">  </div> |
|--|--|

Corresponding Author:
 Said Tkatek
 Computer Sciences Research Laboratory, Faculty of Sciences, Ibn Tofail University

3.5. Quelques thèmes proposés sur l'utilisation de BD et AI

- Intelligence Artificielle pour les diagnostics médicaux : Cas de diabète de type 2.
- Système Expert à base de Big Data et Intelligence Artificielle pour limiter la propagation du COVID-19.
- Réseaux de Neurones Artificiels pour les diagnostics médicaux : Cas de Tumeur Cérébrale.
- Gestion des eaux à base des systèmes intelligents dans le domaine d'irrigation.



ESSAIDI Mohamed

Docteur d'Etat

Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure
d'Informatique et d'Analyse des Systèmes
Rabat, Maroc

Smart Homes and Cities

The digital transformation (DT) of cities and communities in the framework of what is widely referred to today as Smart Cities (SC) promises to bring in unprecedented benefits to both the citizens and cities at different levels. The bottom line is that all the services provided to the citizens can be outstandingly improved based on this DT. Moreover, this can contribute to improving the sustainability, resilience and inclusiveness of cities and communities. This talk will cover several aspects related to SC such as definitions, frameworks and architectures, best practices and standards, verticals and use cases, etc.

HARNESSING THE DIGITAL TRANSFORMATION FOR RESILIENT SUSTAINABLE SMART CITIES

1/ Smart Sustainable City

With increasing adoption of Smart sustainable Cities (SSC) and communities concept worldwide, there have been many definitions proposed by several national and international organizations describing their most important features, enablers and outcomes.

According to the United Nations [1] "A smart city approach makes use of opportunities from digitalisation, clean energy and technologies, as well as innovative transport technologies, thus providing options for inhabitants to make more environmentally friendly choices and boost sustainable economic growth and enabling cities to improve their service delivery".

For OECD, SSCs are defined [2] as "initiatives or approaches that effectively leverage digitalisation to boost citizen well-being and deliver more efficient, sustainable and inclusive urban services and environments as part of a collaborative, multi-stakeholder process".

Another widely used definition for a SSC was recommended by UN ITU [3] and which states that "A smart sustainable city is an innovative city that uses information and communication technologies (ICTs) and other means to improve quality of life, efficiency of urban operation and services, and competitiveness, while ensuring that it meets the needs of present and future generations with respect to economic, social and environmental aspects". This latter definition includes the same

definition for Sustainable development proposed in the Brundtland Report [4], namely, “Sustainable development is the idea that human societies must live and meet their needs without compromising the ability of future generations to meet their own needs”.

However, the 2030 UN Agenda for sustainable development [5](Figure 1) is really a very important framework for smart sustainable cities and communities.



Figure 1. UN 2030 Agenda: Sustainable Development Goals.

Alternatively, smart sustainable cities and communities could contribute with a very important share to the achievement of most of these SDG and to address most of the pressing urban challenges. The global urban population is poised to double by 2050 and to reach something like 6.5 billion people (Figure 2) [6]with the emergence of several megacities worldwide with all the inherent increasing challenges on all cities’ infrastructures and services.

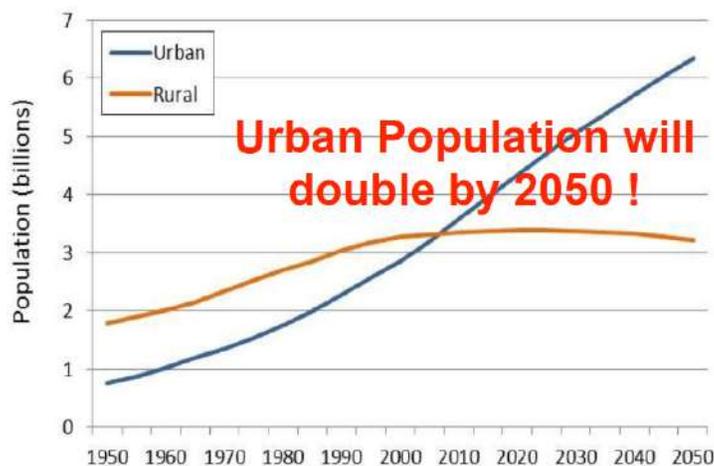


Figure 2. World's urban vs rural population evolution and prediction.

This urban demographic trend would exacerbate cities main cities’ challenges today in key areas such as housing, mobility, water and energy, pollution, and crimes (Figure 3).



Figure 3. Main urban challenges.

In the framework of the increasing digital transformation of society, SSC harness all kind of technologies such as information and communication technologies (ICTs), Big Data, IoT, AI, and blockchain which are merged with traditional cities' infrastructures. These technologies play today very important role in SSC as it acts as the platform for the aggregation of information and data to help enable an improved understanding and operation cities in all verticals: mobility, water and energy, healthcare, administration and public services, etc. The most important benefits of SSC can be reflected in energy efficiency, operation and transparency of the urban infrastructure, resilience of road networks, efficiency of water distribution systems, wastewater management, security, among many other benefits. Furthermore, urban sensors in SSC have the potential to provide city stakeholders with access to real-time spatial, economic and environmental information about their cities.

Thus, the urban digital transformation is capable of establishing defined urban functions but also promote citizens engagement together with that of governments, private stakeholders, academia and NGOs in the process of designing and planning SSC.

2/ Sustainable Smart Cities Framework

In order to have a comprehensive insight about SSC covering all kind of aspects such as enablers, dimension focus areas or verticals, urban systems, and the strategic outcomes (e.g. High quality of life, competitive economy and sustainable environment) it is possible to refer to some of the existing frameworks such as the one proposed by ASEAN in 2018 (Figure 4) [7].

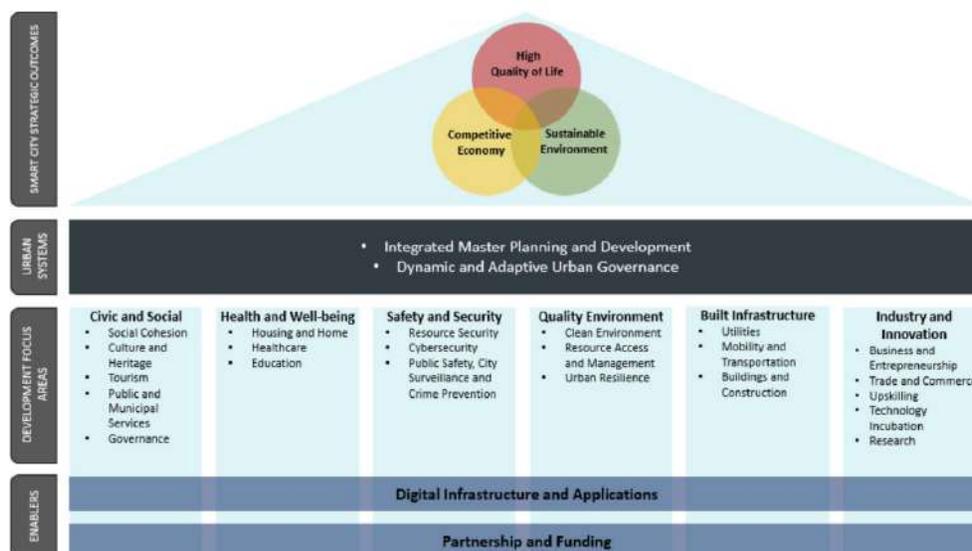


Figure 4. ASEAN Smart Cities framework (2018).

However, SSCs are not only about technology or technology centric cities. Technology is only part of the solution to the different urban problems addressed by SSC. A Human centric and citizen centric approach is key for the success of any SSC

projects and initiatives. Along with the 4th industrial revolution, there is a need for a 4th generation of society (ie. Society 4.0) and even the 5th generation of it (Society 5.0) [8]. This latter one is an “Imagination Society” in which citizens are supposed to use their imagination to identify all the needs and challenges of their cities and to propose efficient creative solutions to them harnessing digital technologies. Society 5.0 will be an “Imagination Society” blending digital transformation and creativity, based on a participative approach and a collective intelligence, for the purpose of “problem solving” and “value creation” that will enable to establish real SSC. In contrast with Society 4.0, Society 5.0 (Figure 5) is a diverse society, where anyone can have diverse abilities. It is also a decentralized society where anyone can get opportunities anytime and anywhere. Another important feature of Society 5.0 is that this is a resilient society by design in which people can live and pursue challenges in security.

Therefore, Society 5.0 can be considered as a wonderful framework for the realization of the UN SDGs. Figure 6 below presents an amazing mapping between Society 5.0 and the 17 UN SDGs through different digital technologies like Big Data, AI, IoT, drones and robots, etc. and several digital applications and technological platforms such as EdTech, AgriTech, FinTech, Etc.

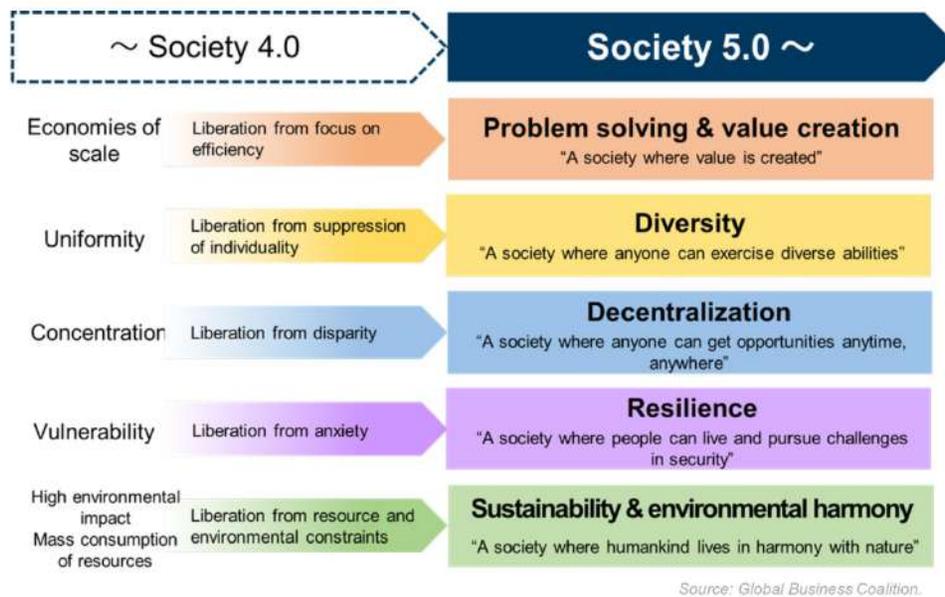


Figure 5. Society 4.0 vs Society 5.0 features.



Figure 6. Society 5.0 and UN SDGs.

3/ Resilient Smart Sustainable Cities

There are several definitions related to smart cities resilience. Two of the widely used ones can be expressed as follows:

According to OECD[9] “Resilient cities are cities that have the ability to absorb, recover and prepare for future shocks (economic, environmental, social & institutional). Resilient cities promote sustainable development, well-being and inclusive growth.”

Another definition from PricewaterhouseCoopers (pwc) [10] “Those cities that have invested in developing capabilities to deal with all stages of the threat cycle: sense, defend, respond and recover have demonstrated their resilience in dealing with the socioeconomic effects of the pandemic. Cities should adopt an integrated approach, working with all stakeholders to enhance their preparedness for future shocks.”



Figure 7. OECD Smart Cities resilience metrics .

There are several metrics proposed by OECD for Smart Cities resilience which are broken down into 4 important dimensions (Figure 7), namely,

- Society
- Economy
- Governance
- Environment

While pwc proposed a very interesting framework (Figure 8) that would allow to engineer, build and strengthen smart cities’ resilience involving all key stakeholders (i.e. citizens, government, private sector, NGOs and academia), involving the threat cycle (i.e. sense, defend, respond and recover) and involving the key cities’ domains (i.e. urban society, economy and environment) and enablers (i.e. urban innovation and technology, capacity and governance, finance and investment).

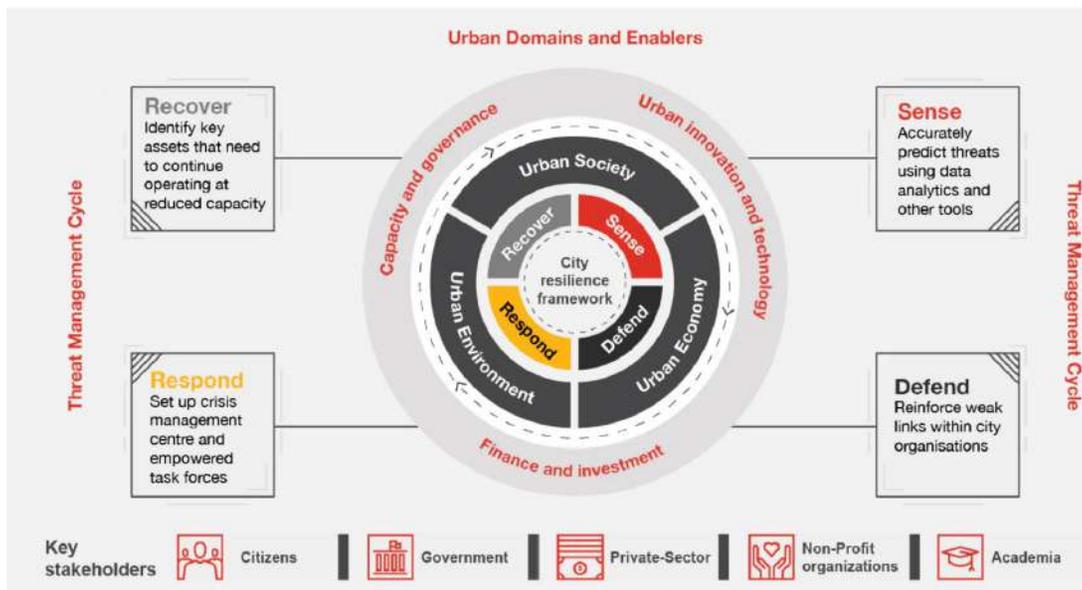


Figure 8. Smart Cities resilience framework.

4/ Smart Cities' Digital Twins

A digital twin is a real time virtual representation of a physical object based on all kind of digital technologies such as IoT, Big Data, AI, 5G, Cloud Computing, AR/VR, etc. This allows for smart cities (Figure 9) all sort of operations [11] such as executive management, city planning, marketing and sales, partnerships, etc. It can also be used for amazing urban applications as diverse as predictive maintenance, disaster risk reduction, urban planning, etc.

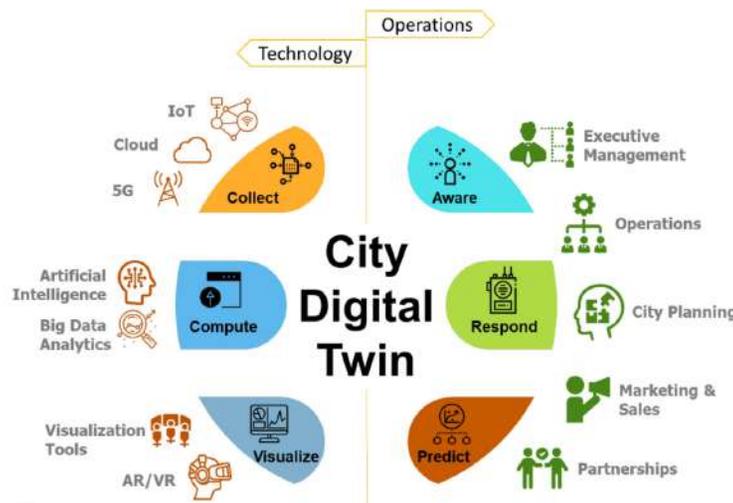


Figure 9. City Digital Twin.

Digital twins enable the planning, management and optimization of cities across a range of applications, such as mobility and sustainability. Over 500 cities are expected to deploy digital twins by 2025, according to ABI research [12]. For instance, Figure 9 illustrates Boston's (USA) Digital Twin using GIS-based 3D twin [13].

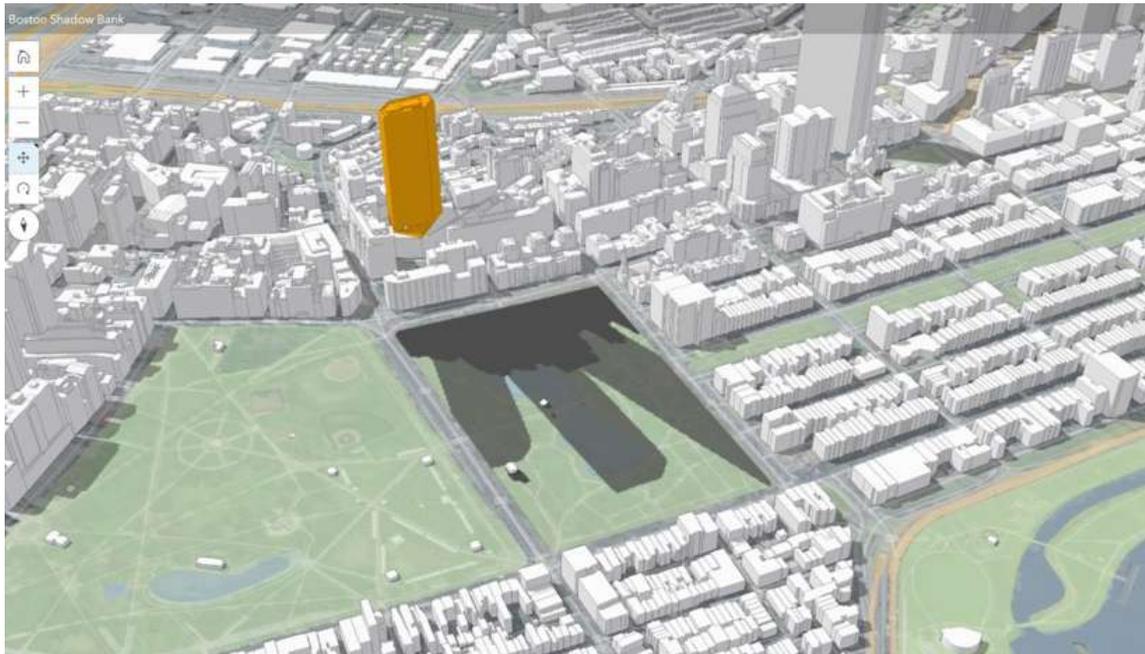


Figure 9. Boston Digital Twin [13].

5/ Conclusions

Many cities over the world are embracing the Sustainable “Resilient Smart Cities” movement to improve their operation, efficiency, livelihood and their citizens’ wellbeing as well as to achieve the sustainable development goals (SDGs) of the 2030 UN Agenda..

There are several frameworks, technologies and approaches available to attain all these goals. More specifically, cities’ sustainability could be better guided through the UN 2030 agenda’s 17 SDGs which represent a wonderful framework for cities as a comprehensive sustainability roadmap.

As far as cities’ resilience is concerned, there are several interesting frameworks and metrics proposed by several international organizations such as OECD and pwc that help cities to design, engineer and implement resilience smart cities and even to assess their performance in this endeavor in different dimensions using several metrics.

On the other hand, Digital Twins present amazing 3D virtual platforms leveraging all kind of technologies that represent unprecedented assets that would allow cities to improve drastically their operation, efficiency and even resilience.



GHASSANE Aniba

Ingénieur, Ph.D

Professeur à l'Ecole Mohammedia d'Ingénieurs
Rabat, Maroc

Renewable Energy and Smart Grid

Durant les dix dernières années, un intérêt mondial grandissant envers l'utilisation des énergies renouvelables comme une solution viable pour réduire l'effet néfaste des énergies fossiles sur l'environnement. Il existe différents types de sources d'énergies renouvelables mais les plus principales, sont les énergies solaires (Concentré ou photovoltaïque), et l'énergie éolienne. Contrairement aux énergies à sources fossiles, il y a deux paramètres principaux qui caractérisent les énergies renouvelables, à savoir: le premier est leur aspect aléatoire et imprévisible, et le deuxième aspect est qu'ils sont produits de manière distribuées à grande échelle. Ces deux aspects rendent la gestion d'un tel réseau presque impossible avec les techniques classiques, et nécessitent l'utilisation d'une plateforme de télécommunications de collecte et de contrôle de ces systèmes. Les éléments qui composent cette plateforme forment ce qu'on appelle le réseau électrique intelligent (Smart Grids).

LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES INTELLIGENTS POUR UNE MEILLEURE INTEGRATION DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

1/ Introduction

Durant les dix dernières années, un intérêt mondial grandissant envers l'utilisation des énergies renouvelables comme une solution viable pour réduire l'effet néfaste des énergies fossiles sur l'environnement (Fig. 1). C'est une solution qui est adoptée graduellement au niveau de plusieurs pays, et le Maroc est parmi les pays les plus motivés à être parmi les leaders dans ce domaine, afin de garantir une certaine autonomie énergétique surtout vis-à-vis de ses voisins géographiques. Toutefois, il y a plusieurs contraintes qui rendent l'intégration d'énergie renouvelables au réseau électrique à petite échelle assez faisable, par contre, une intégration à grande échelle n'est pas aussi facile en utilisant les mêmes techniques classiques de gestion de ce réseau.

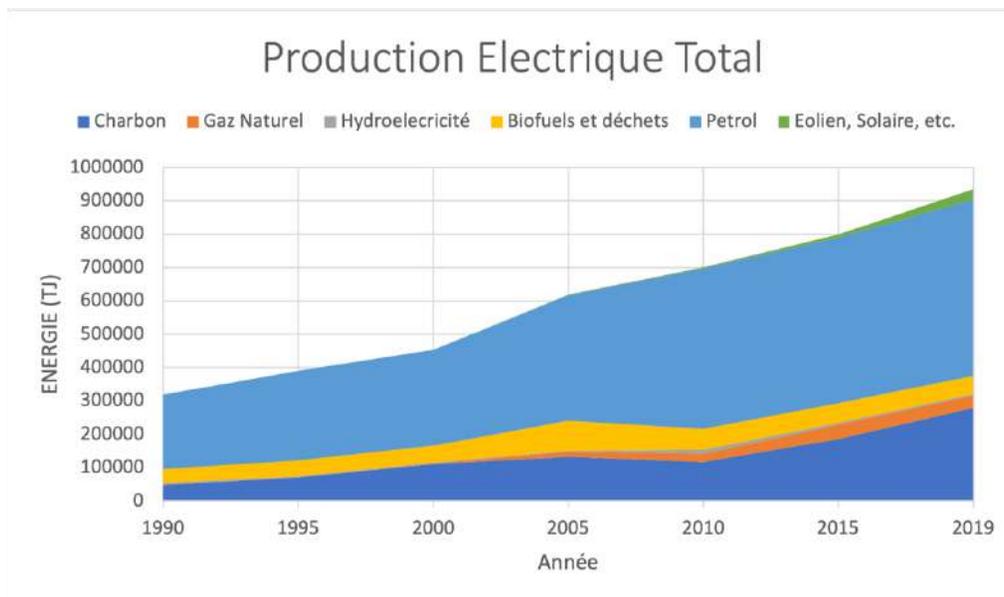


Figure 1. Production Électrique Total durant les 30 dernières années

Dans ce papier, on essaiera de vulgariser tous ces concepts afin de comprendre de manière simple et claire la problématique et les difficultés qu'on rencontre dans ce cadre, ainsi que la nécessité de mettre en place une nouvelle structure de gestion du réseau électrique. En effet, pour comprendre cette difficulté, il faudrait comprendre tout d'abord le fonctionnement normal du réseau électrique classique, qui intègre uniquement des sources à énergies fossiles à part l'énergie hydraulique, et surtout les caractéristiques et les contraintes dans un tel réseau. Par la suite, il faudrait comprendre les caractéristiques des sources à énergies renouvelables et comment ils affectent de manière drastique la gestion d'un tel réseau intégrant de manière importante un mix de sources d'énergies renouvelables. A ce stade, l'importance de mettre en place un système de gestion du réseau qui soit plus réactive, plus rapide et plus efficace surtout au niveau du réseau électrique de distribution deviendra claire. Les nouveaux outils qui formeront un tel système sont en majorité des outils et moyens de télécommunications, qui permettront ainsi de rendre le réseau électrique dans la partie distribution intelligent.

2/ Réseaux électriques classiques

Le réseau électrique classique est composé de trois grandes parties : Production, Transport et Distribution (Fig. 1). Chacune de ses parties ont des caractéristiques particulières qu'on présente ci-dessous et qu'on détaille par la suite.

En effet, pour la partie production on a les caractéristiques importantes suivantes :

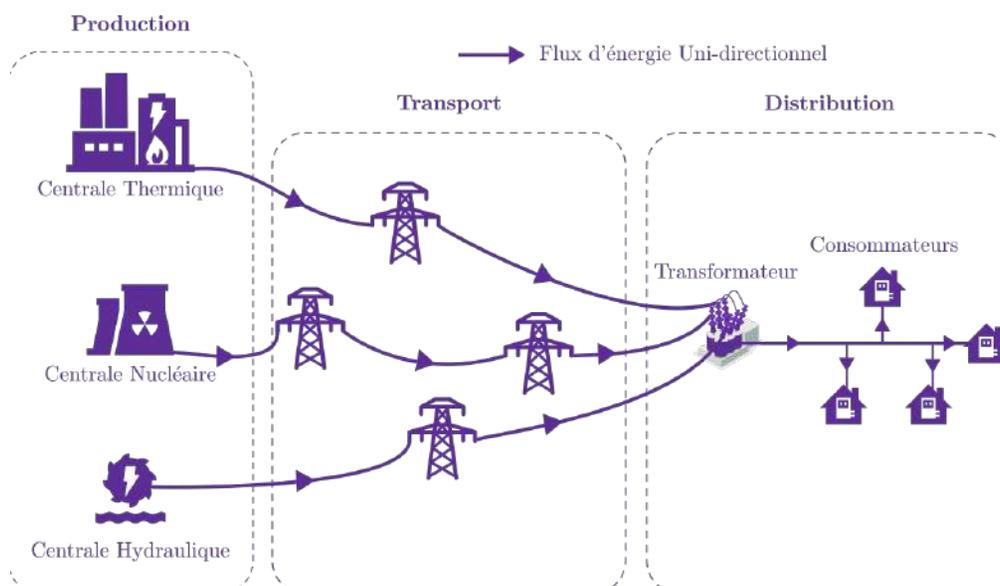


Figure 2. Réseau électrique classique

- **P1** : La production est en générale assez centralisée et limitée à un nombre réduit de points de production, distant des points de consommation.
- **P2** : La production s'adapte à la demande (la charge), i.e., l'équilibre offre demande est maintenu en tout temps et à chaque instant.
- **P3** : La production est assez contrôlable, par contre la rapidité de réaction dépend du type de la source de production (charbon, gaz, fuel)
- **P4** : Les centrales de production utilisent principalement des turbines, des machines tournantes.
- **P5** : Les centrales hydrauliques peuvent être considérées des centrales de production mais aussi un moyen de stockage via les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP)

On détaille ci-dessous chaque point ainsi que son importance dans la gestion globale du réseau électrique. Pour le point P1, la production nationale d'un pays est en générale en quelques points de productions, en générale au long de la côte ou d'une source d'eau importante vu le besoin important en eau. Ces points de production sont gérés en grande partie par une seule entité, par exemple, l'Office National de l'Électricité et de l'Eau Potable (ONEE) dans le cas du Maroc, ce qui rend le contrôle de production assez facile. Vu cette contrainte de localisation, les distances entre production et consommation est assez importante, et les pertes sur les lignes allaient être importantes si la transmission se faisait en courant continu (DC). Pour éviter cela, la transmission se fait en courant alternatif (AC) grâce à des turbines. Ce besoin affecte le point P4 qu'on traitera plus bas.

Concernant le point P2, la production est toujours égale à la demande et ceci en tout instant, c'est une contrainte physique qu'on ne peut éviter. Heureusement, dans le cas du réseau électrique classique, la demande globale est assez prévisible et peut être estimée un jour avant (J-1) assez fidèlement avec une marge d'erreur qui est en générale gérable avec les moyens de production disponible chez le gestionnaire du réseau (ONEE). La Figure 3 présente un exemple de courbes de charge au niveau du Maroc pour des jours de l'année, qui considèrent des jours fériés et d'autres non. L'ONEE base principalement ses prévisions sur deux courbes principales à savoir celle de l'Hiver et celle d'été (Fig. 4), et bien sûr, prend en compte les événements et périodes spéciaux (jour férié, match de foot, ramadan, ...). Le maintien de l'équilibre se fait via trois niveaux de réglages : primaire, secondaire et tertiaire. Les deux premiers (primaire et secondaire) se font de manière automatique avec des régulateurs PID (proportionnel, intégral, dérivé) et devraient durer quelques secondes pour maintenir l'équilibre du réseau, en termes de puissance et de fréquence, tandis que le dernier (tertiaire) se fait de manière manuelle, et devrait s'exécuter en moins de 15 à 30min.

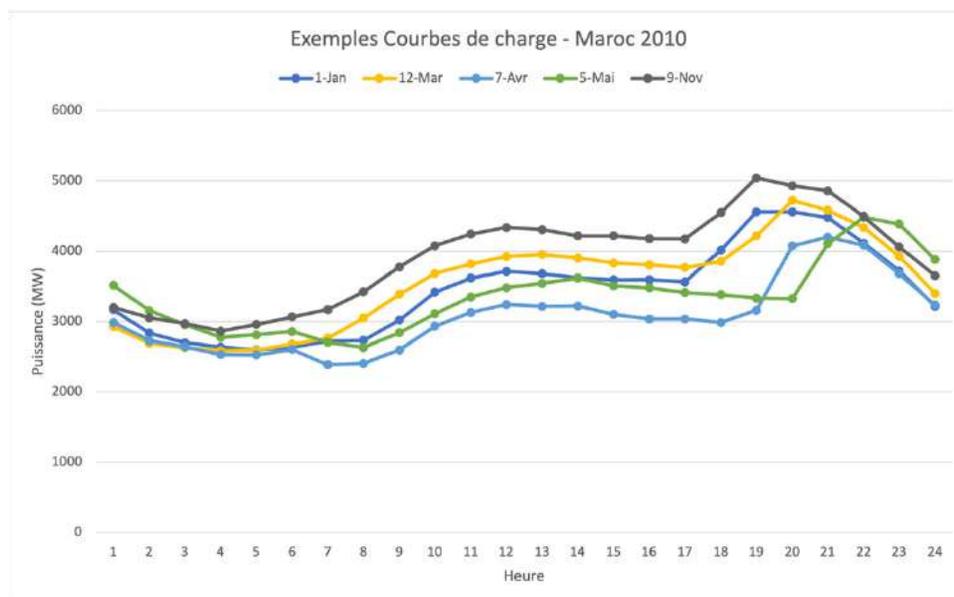


Figure 3. Exemples de courbes de charge au Maroc

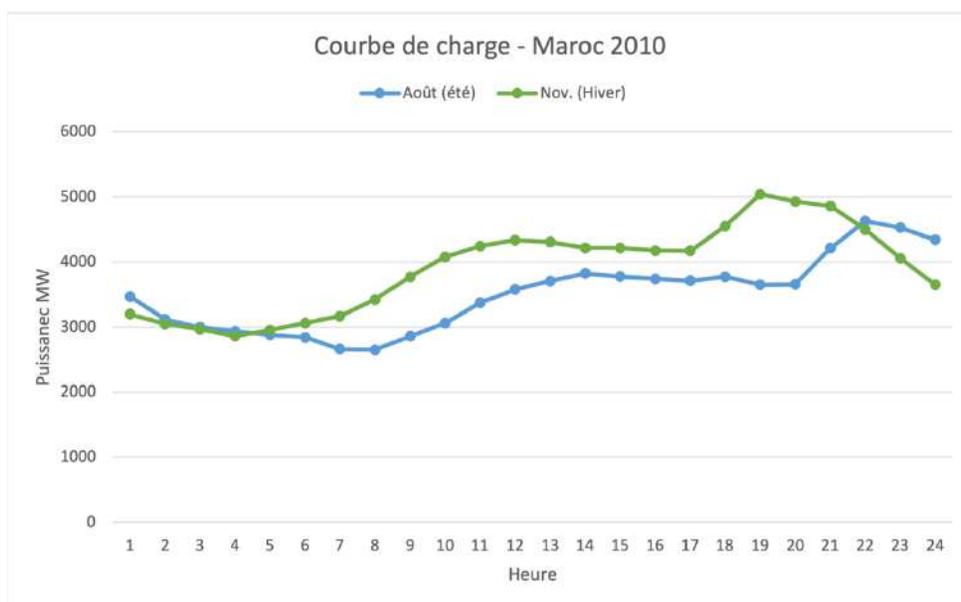


Figure 4. Courbes de charge été et hiver au Maroc

Ce dernier point de contrôle du réseau électrique, nous ramène au point P3, qui précise que la gestion du niveau de production est très faisable à un niveau important, tenant compte que le gestionnaire fait des prévisions une journée avant et aussi au cours de la journée. Toutefois, plus la prévision est exacte et plus le coût induit en cas d'erreur est minime. En effet, si l'erreur est réduite, la compensation peut se faire avec des moyens déjà existants à ce moment et qui coûterait pas cher, tel que le charbon, par contre, si l'erreur est importante et rapide on serait ainsi obligé d'utiliser des sources qui sont plus facile et plus rapide à démarrer tel que les turbines à gaz ou à fuel. Contrairement ces dernières, les turbines alimentées par des sources d'énergies à base de charbon sont les moins chers par contre elles sont les plus lentes à utiliser, car en moyenne ils nécessitent entre 6h à 8h pour les démarrer. En résumé, si on prévoit exactement la demande le plus fidèlement possible, et plus le coût globale sera réduit en choisissant la source la moins chère, à savoir le charbon dans le cas du Maroc.

Le point P4 précise l'utilisation de turbines (machines tournantes) dans la production de la grande majorité d'énergie électrique dans le réseau électrique classique. Ceci induit une caractéristique très importante, à savoir un lien direct entre la fréquence du courant et la puissance produite. C'est grâce à la mesure de la fréquence au niveau des centrales de production, que le gestionnaire déduit s'il y a un besoin d'injecter plus d'énergie dans le réseau ou bien le contraire. En effet, lorsque la charge (demande) augmente par rapport à l'énergie électrique produite, la fréquence du courant a tendance à diminuer par rapport à sa valeur nominale, 50Hz dans le cas du Maroc, et le contraire, lorsque la demande diminue par rapport à ce qui est généré ou prévu. Pour comprendre cela plus facilement, il faut comprendre que la différence entre la production et la demande est compensée par l'énergie cinétique des turbines acquise par la turbine avant même que cette dernière produise de l'énergie électrique. C'est pour cette raison, que s'il y a un besoin (demande supérieure à la production), la vitesse de rotation de la turbine diminue et cette énergie cinétique est convertie ainsi implicitement en énergie électrique. En conclusion, le lien entre fréquence et puissance produite existe à cause du fait que la grande majorité de la puissance est générée par des machines tournantes (Turbines), et il a un avantage assez important, vu qu'il permet de suivre l'équilibre de la demande et de l'offre en se basant juste sur la mesure de la fréquence, et aussi, d'avoir une énergie cinétique qui permet de compenser au besoin un manque en énergie électrique.

Le point P5 confirme que le seul moyen de stockage d'énergie à grande échelle sont les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) (Fig. 5). En effet, au lieu de libérer l'eau à travers une turbine dans les barrages classiques, la STEP est équipée d'une électropompe qui permet de pomper l'eau d'un bassin inférieur vers un bassin supérieur lorsque la production dépasse la consommation électrique. Dans le cas inverse, la production est moindre que la consommation prévue, l'énergie est restituée en faisant fonctionner la pompe en turbo-alternateur, et faire passer l'eau du bassin

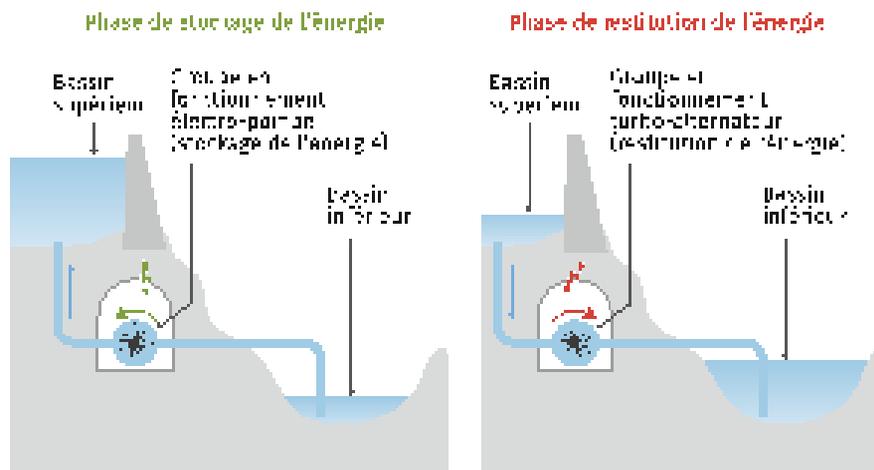


Figure 5. Principe de fonctionnement des Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP)

supérieur vers le bassin inférieur. Les STEP sont un excellent moyen de stockage d'énergie, par contre, cela coûte extrêmement cher pour la réaliser et surtout qu'il y a des contraintes géographiques très strictes sur l'emplacement de ces STEP qui sont dans des zones montagneuses.

Sur la partie transport, et vu que la production est en grande partie centralisée dans des points spécifiques, le transport de l'énergie jusqu'au consommateur final se fait à grande distance et dans unidirectionnel, de la production au consommateur. A cause de ces longues distances, et afin de minimiser les pertes d'énergie sur les lignes de transport par effet joule, le choix s'est porté sur la production de courants alternatifs (AC) au lieu de la production de courant continu (DC), car à l'époque, le seul moyen de minimiser les pertes était d'augmenter la tension et ainsi diminuer le courant, et ceci ne pouvaient se faire que par des transformateurs qui ne fonctionnent qu'au courant alternatif et non continu, surtout en grande puissance. Par contre, le problème qui paraît dans ce cas-ci est que l'opérateur doit maintenir la même fréquence et aussi le même déphasage en tout point du de contact du réseau afin d'éviter un court-circuit. En résumé, le DC ne minimise pas les pertes d'énergie sur de longues distances mais on n'a plus besoin de maintenir la fréquence en tout instant et en tout point la même. Ces dernières années, il y a même beaucoup de questionnement sur l'intérêt d'opter pour des réseaux DC au lieu de réseaux AC surtout à très grandes distance lorsque le maintien de la même phase et même fréquence devient très critique.

Enfin, sur la partie distribution, les consommateurs n'injectent aucune énergie dans le réseau, et subissent un prix fixe toute la journée pour le grand public, ou bien, deux tarifs possibles pour les clients industriels selon le créneau horaire. Le consommateur à ce stade n'a aucun intérêt ni technique ni financier à participer dans le maintien de l'équilibre électrique du réseau. En plus, sa visibilité sur sa consommation est très limitée et se réduit à une facture avec des données de consommation mensuelles ou même trimestrielles et non en temps réel, ce qui cause même parfois beaucoup de tensions dans la population quand ils découvrent après des mois des factures importantes et qu'ils n'ont aucun moyen de savoir ni la source ou la cause de tels niveaux de consommations.

3/ Les énergies renouvelables

Les deux principales sources d'énergies renouvelables au monde mais surtout au Maroc, sont l'énergie solaire, avec ses deux versions, la production à concentration solaire (CSP) et le photovoltaïque (PV), et l'énergie éolienne.



Ces deux sources de production sont aléatoires, imprévisibles surtout pour l'éolien qui est très aléatoire dans le temps et aussi dans l'espace, i.e., la production éolienne est différente d'un point à un autre point même à petite distance. Les champs éoliens ont des contraintes strictes sur leur emplacement vu qu'ils sont mis en place après une étude détaillée des courants de vents dans le pays et ils sont en générale sur les zones côtières. Au Maroc, ils sont principalement au nord à Tanger, à Essaouira et au sud. Le coût de production des champs éoliens dépend de leur emplacement, sur terre ou en mer. En effet, le coût moyen est entre 0.05US\$ (sur terre) et 0.15US\$ (en mer). Les éoliennes sont connues pour leur nuisance sonore, très bruyant et pas appréciés ni par la population qui vive à leurs alentours, ni par les écologistes qui protègent les oiseaux très fréquemment victimes des pales des éoliennes. Toutefois, leur avantage est qu'ils fonctionnent le jour comme la nuit tant qu'il y a du vent qui souffle.

La production solaire est assez prévisible mais reste comme même aléatoire. Il n'y a pas de contraintes sur l'emplacement des plateformes solaires surtout le type PV, qui peut être sur les toitures des maisons, sur un lac, au désert, etc., et aussi pas de contrainte sur la taille de l'installation, elles peuvent être petites (centaines de watts) jusqu'à des mégawatts (grandes plateformes comme celle de Noor 3 à Ouarzazate). Le coût de production du kWh est le plus bas au monde et continu de baisser. Le PV est silencieux et très apprécié par la population, ce qui le rend le premier choix ces dernières années dans la mise en place de plateformes à énergies renouvelables. Toutefois, le seul vrai soucis, est qu'il ne fonctionne que le jour tant que le soleil est présent, et non la nuit, à part si on y ajoute des batteries pour le stockage.

La Figure 6 présente des exemples de production PV d'une plateforme de 6kWe à l'École Mohammadia d'Ingénieurs (EMI), Rabat, accessibles sur le site web <http://solar.emi.ac.ma>.

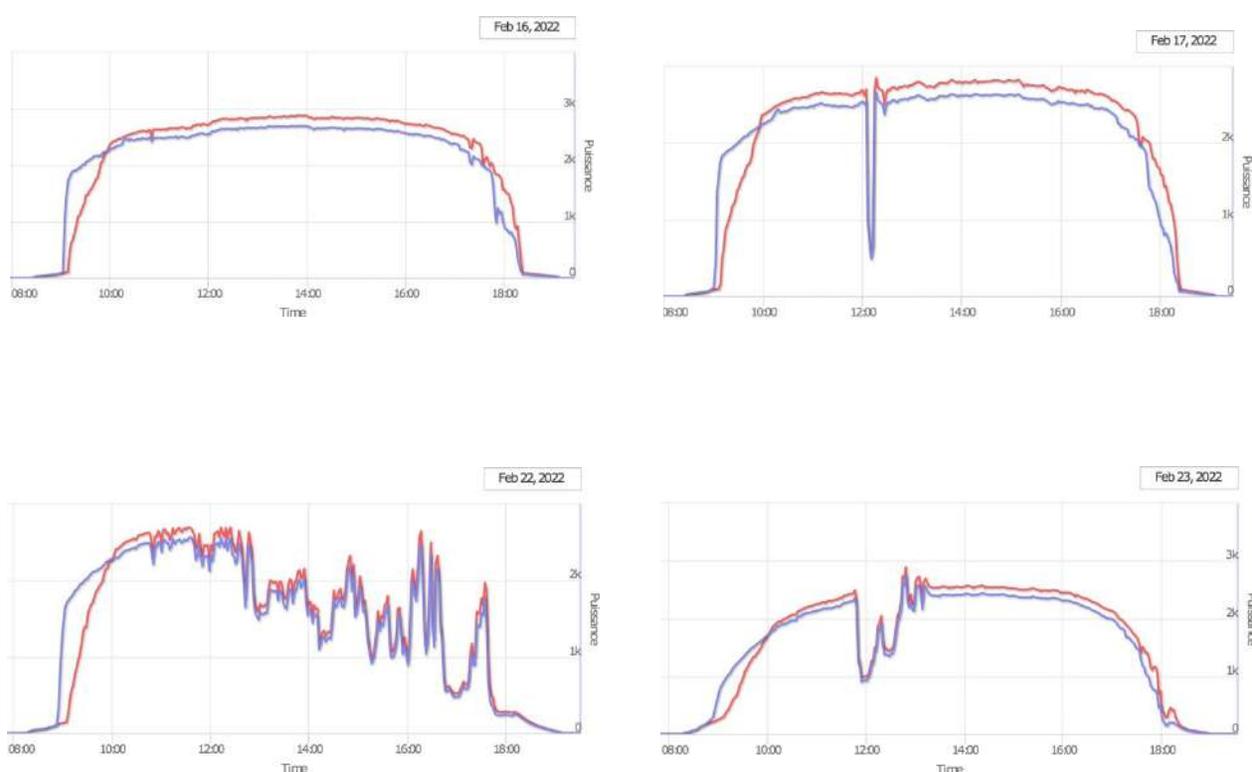


Figure 6. Production journalière d'une plateforme solaire de 6kWe à Rabat, Maroc

4/ Réseaux électriques à fort taux d'intégration d'énergies renouvelables

A long terme, on prévoit un fort taux d'intégration des énergies renouvelables dans le réseau électrique et que ceci inclu même la partie distribution à basse tension. Dans un tel scénario, plusieurs caractéristiques dans le réseau électriques vont changer et ainsi la gestion d'un tel réseau devrait s'y adapter. La Figure 7 présente la nouvelle configuration future d'un tel réseau avec les différentes directions des flux d'énergie. Le premier point à signaler est que le flux d'énergie, surtout au niveau distribution, devient bidirectionnel, et les clients ne sont plus uniquement des consommateurs mais aussi des producteurs, et ils deviennent ainsi des prosumers (producers and consumers). D'un autre côté, l'opérateur du réseau n'est

plus le seul maître du réseau et ne contrôle pas toutes les sources de productions, qui deviennent dans cette nouvelle configuration, des sources distribuées au lieu d'être centralisées. Ainsi, au lieu qu'on adapte la production à la charge, c'est la charge qui doit s'adapter à la production (DemandSide Management).

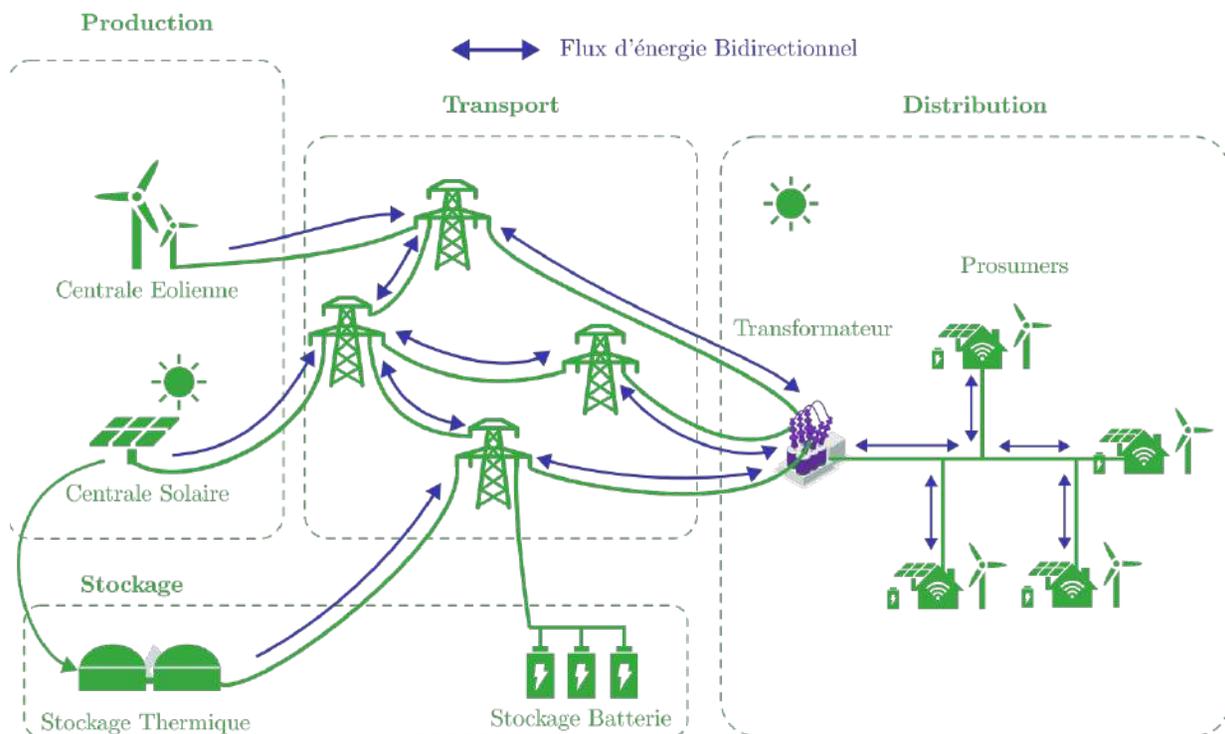


Figure 7. Réseau électrique à énergies renouvelables

La variation aléatoire de la production des énergies renouvelables induit des marges d'erreurs plus importantes sur les prévisions, ce qui cause des coûts très élevés pour compenser ces erreurs. Pour éviter cela, l'opérateur devrait connaître en temps réel les différents paramètres électriques au niveau des prosumers afin qu'il puisse procéder à de meilleures prévisions à court terme (une heure en avance) et à long terme (un jour en avance). Afin d'y arriver, l'opérateur devrait installer au niveau des prosumers des compteurs électriques intelligents (Smart Meters, SM) et des unités de mesures de phases (Phasor Measurement Unit, PMU). Ces appareils permettent non seulement de mesurer la puissance utilisées (consommée et produite) mais aussi le déphasage entre le courant et la tension au niveau des prosumers.

La majorité des énergies renouvelables utilisent des onduleurs et non des machines tournantes ce qui élimine le lien direct qui existait dans le réseau classique en la fréquence du réseau et l'équilibre de puissance. En plus, en l'absence de machine tournante, il n'y a plus le moyen de compenser le manque rapide en puissance en s'appuyant sur l'énergie cinétique des machines tournantes. Pour cette raison, il faudrait intégrer des moyens de stockage plus importants et plus rapides en réponse, comme les batteries, afin de garantir l'équilibre production consommation malgré que la production soit devenue aléatoire. C'est un vrai défi pour l'opérateur du réseau de maintenir, car le cas contraire, ceci donnerait lieu à une panne globale et à grande échelle du réseau électrique (Blackout).

En résumé, dans le réseau classique, une grande partie du contrôle pour le maintien de l'équilibre se fait de manière manuelle, et peut durer quelques secondes et même plusieurs minutes, et profiter fortement de l'inertie des machines tournantes. Cette façon de faire n'est pas acceptable dans un contexte à forte intégration des énergies renouvelables, et il y a un besoin obligatoire d'adopter un système de gestion plus rapide, incluant un système de contrôle automatisé en totalité en réduisant fortement l'intervention humaine. Un tel réseau décrit ce qu'on appelle un Réseau Électrique Intelligent (Smart Grid).

5/ Les réseaux électriques intelligents (smart grid)

Selon The European Technology Platform SmartGrids (ETPSG), un réseau électrique intelligent est un « un réseau électrique capable d'intégrer intelligemment les actions de tous les utilisateurs connectés à lui – producteurs et consommateurs et ceux qui font les deux – afin de fournir efficacement des approvisionnements en électricité durables, économiques et sûrs. Il utilise des produits et services innovants ainsi que des technologies intelligentes de surveillance, de contrôle, de

communication et d'auto-guérison ».

Smart Grid n'est pas un matériel ou un nouveau réseau qui va remplacer le réseau existant mais plutôt des caractéristiques que doit acquérir le réseau actuel en lui intégrant des outils matériels, logiciels, de contrôle et de décision. Il doit en grande partie utilisé une plateforme de télécommunications de supervision et de contrôle à distance, qui soit fiable, rapide et sécuritaire. Il permettrait ainsi de gérer des sources de production que cela soit classiques (assez déterministe) ou renouvelables (aléatoire), que cela soit centralisées ou distribuées, d'une manière efficace et presque instantanée (Fig. 8).

Le système standard d'un réseau électrique intelligent peut être réparti sur plusieurs couches : Couche d'application, couche de stockage de données, couche de l'infrastructure de communication, et couche des équipements du réseau électrique.

Chaque couche inclue différents blocs. L'interaction et l'échange d'information entre les différentes couches permet de former un système efficace de gestion du réseau en temps réel(Fig. 9).

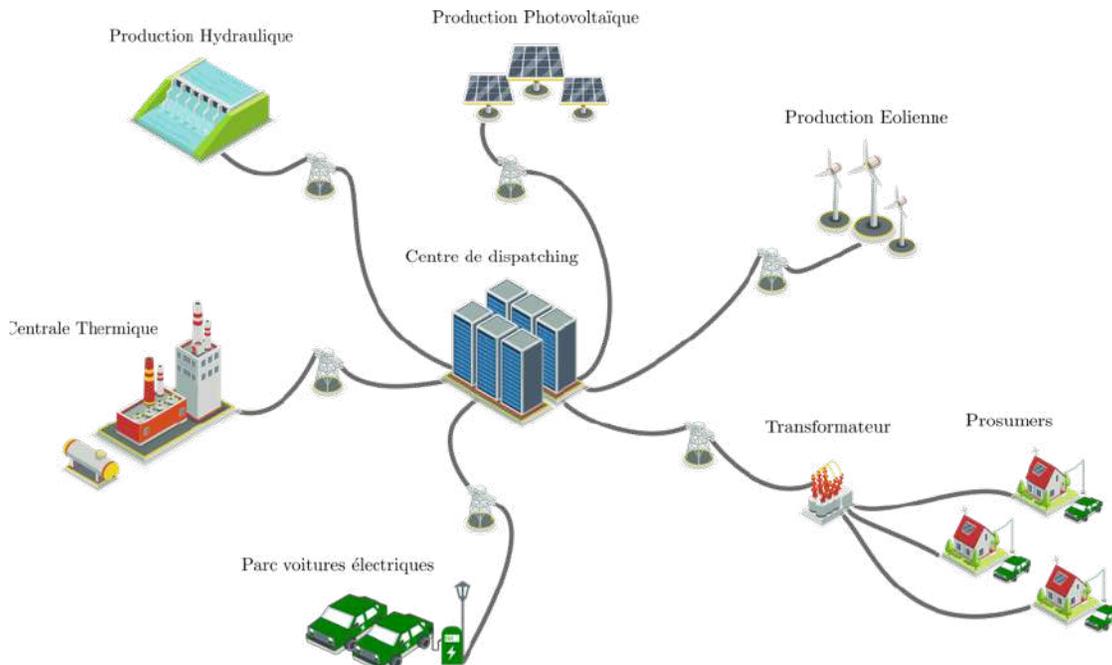


Figure 8. Réseau électrique à gestion intelligente

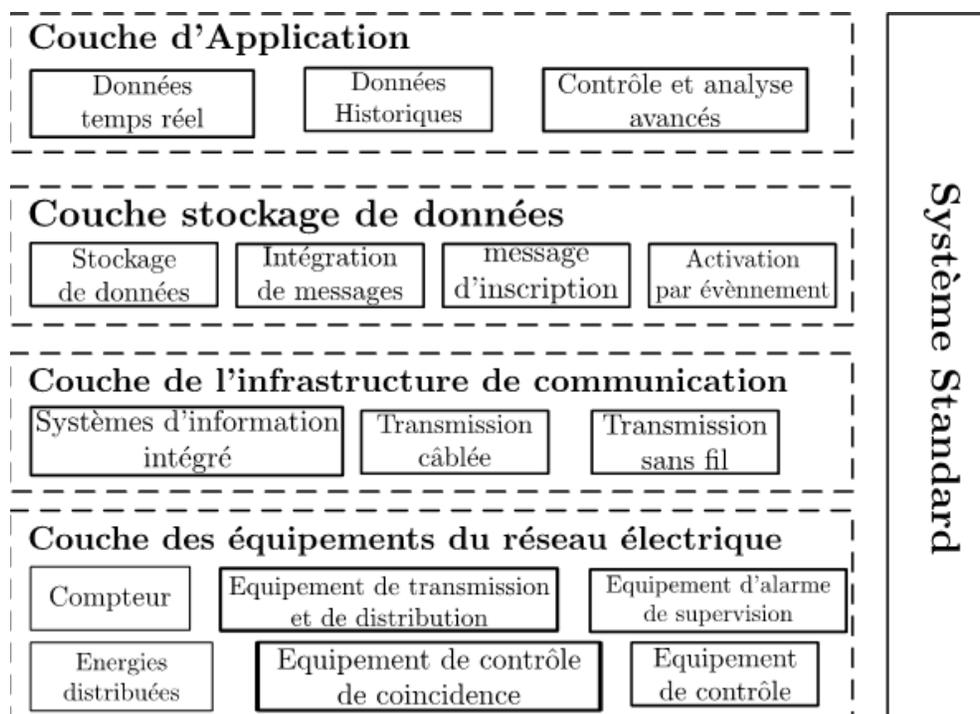


Figure 9. Architecture en couches du réseau électrique intelligent

Parmi les éléments essentiels pour le bon fonctionnement du réseau électrique intelligent, il y a le Phasor Measurement Unit (PMU). Grâce aux PMUs, installés au niveau des prosumers, l'opérateur du réseau a une vue globale sur le réseau en tout point et en tout instant. La transmission de données entre les millions de PMUs et le centre de dispatching doit se faire en utilisant un réseau rapide et très fiable (Ultra Reliable Low Latency Communications, URLLC), et permettant la connexion de millions de connexions simultanées (Massive Machine Type Communications, mMTC) similaire aux caractéristiques prévues de la 5G du réseau mobile (Fig. 10).

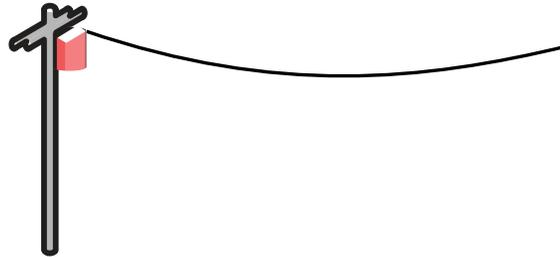


Figure 10. Canal de communication entre des composants électroniques intelligents (IED) du suivi de l'état du réseau électriques

L'opérateur peut ainsi faire du Demand Side Management (DSM), i.e., allumer ou éteindre des appareils contrôlables tels que le chauffage, le réfrigérateur, le climatiseur, etc. et ceci à distance au niveau des prosumers. Les problèmes qui existent dans la DS sont surtout sociaux. En effet, les prosumers voient leur vie privée suivie de près par l'opérateur du réseau, et n'ont aucune idée sur l'utilisation probable de ces données, et c'est pour ces raisons, que plusieurs associations sont contre ce genre d'accès assez intrusif et la collecte de données détaillées sur la vie privée des gens.

L'architecture de collecte des données peut se faire selon différentes configurations possibles : Un accès direct aux données de chaque prosumers (Fig. 11), un accès via des centres de fusion locaux, qui agrègent les données collectées dans leur zone de couverture (Fig. 12), un accès en maillage (Mesh), dans lequel les prosumers s'échangent les données entre eux pour une meilleure visibilité et interaction entre les prosumers et aussi entre les centres locaux de fusion des données (Fig. 13).

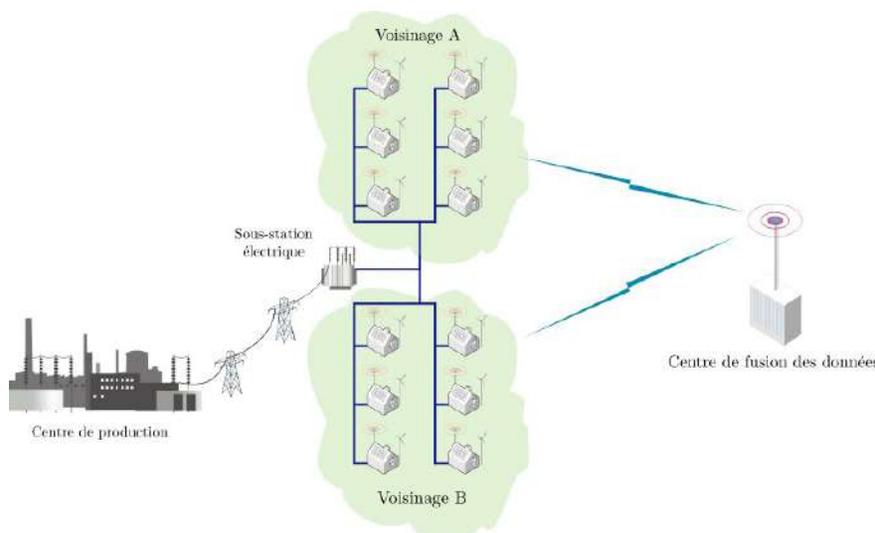


Figure 11. Architecture à connexion directe avec les prosumers

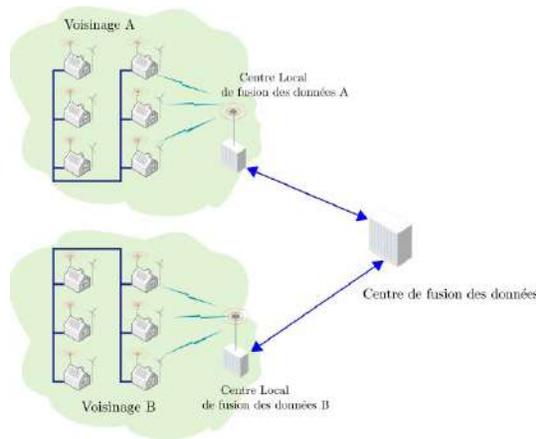


Figure 12. Architecture à connexion en étoile des centres de fusion de données locaux

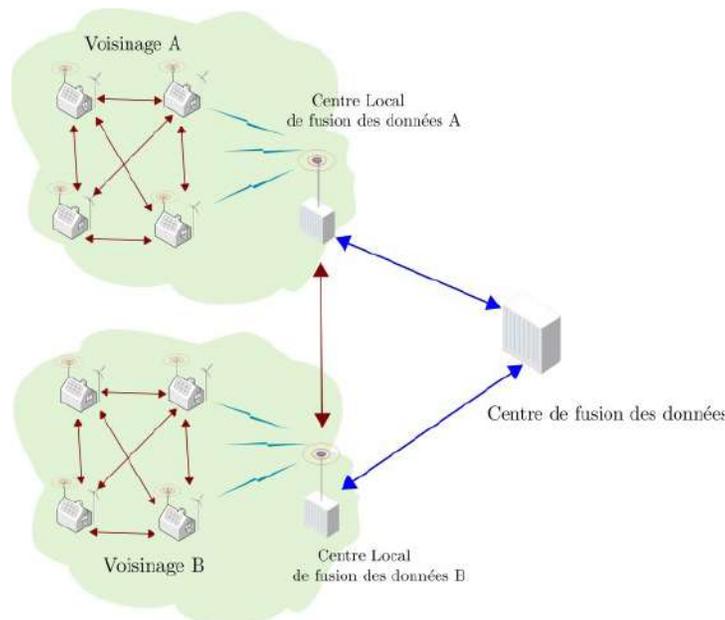


Figure 13. Architecture à connexion en maillage

Les principaux standards sont ceux développés par l'International Electrotechnical Commission (IEC) et IEEE. Une cartographie de ces standards est disponible sur le site web de la Smart Electric Power Alliance (SEPA) <http://gridstandardsmap.com/> (Fig. 14).

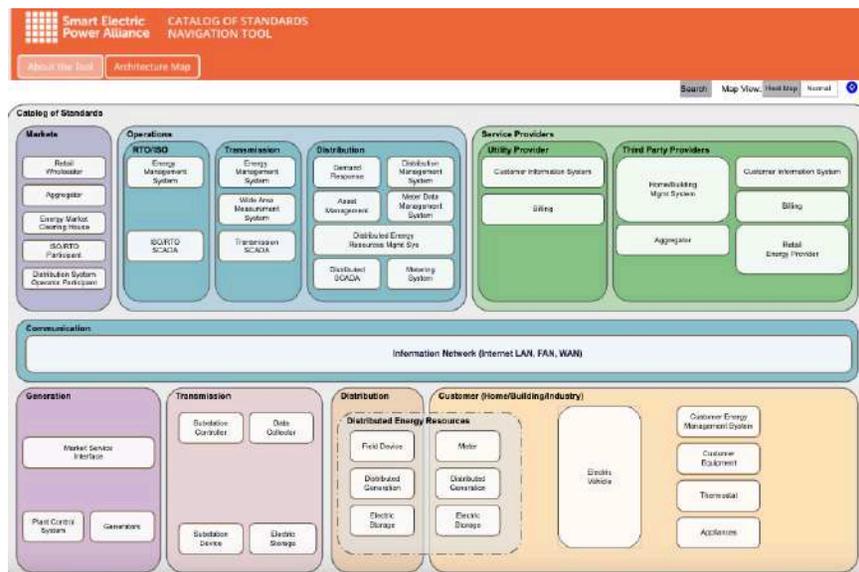


Figure 14. Cartographie des standards Smart Grid

6/ Perspectives

Les nouvelles technologies futures seront fortement liées. A titre d'exemple, la 5G des réseaux mobiles est fondamentale pour les communications dans un Smart Grid. D'un autre côté, les voitures électriques seraient utilisées comme unités de stockage distribuée de l'énergie. Après la collecte des données et mesures sur le réseau, la décision de contrôle sera principalement réalisée par des algorithmes de Machine Learning, qui devraient être déjà entraînés sur plusieurs scénarios du fonctionnement optimal du réseau électrique. Le Blockchain pourrait être utilisé pour fiabiliser et sécurisé les échanges de données à travers le réseau. Enfin, le Smart Grid sera une composante essentielle de ce qu'on appelle un Cyber Physical Systems (CPS) dans lequel des réseaux dont les éléments ne seront plus des routeurs ou des éléments de communications, mais plutôt des entités matériels et humaines, tels que les Bus, les voitures, les bâtiments, les feux de circulation, les ambulances, ... et dont la gestion sera optimale et tiendra compte de toutes ces entités. On arrivera ainsi à mettre en place un réel monde fortement connecté.



MOUNIR Hamid

Docteur

Professeur à l'Ecole Mohammeda d'Ingénieurs
Rabat, Maroc

Simulation Numérique et Digital Twin

Le « Digital Twin », ou Jumeau Numérique, est un concept de représentation qui se base sur le développement de modèles numériques très précis aidant à prédire l'attitude d'un produit, un système, un processus ou un service durant les étapes de son cycle de vie. Il s'intègre parfaitement dans la nouvelle vision industrielle 4.0. Ce concept est largement utilisé dans les domaines de l'ingénierie des systèmes, il utilise la simulation numérique comme outil de modélisation, de vérification et de développement. Dans cette présentation nous allons mettre le point sur : le digital twin, ses avantages, ses applications...etc et l'importance de la simulation numérique comme outil de développement des systèmes techniques....

LE DIGITAL TWIN ET LA SIMULATION NUMÉRIQUE

1/ Introduction

Le « Digital Twin », ou Jumeau Numérique, est un concept de représentation qui se base sur le développement de modèles numériques très précis aidant à prédire l'attitude d'un produit, un système, un processus ou un service durant les étapes de son cycle de vie. Il s'intègre parfaitement dans la nouvelle vision industrielle 4.0.

Le digital twin est le résultat d'un long processus de développement, ce processus est illustré sur la figure.1.

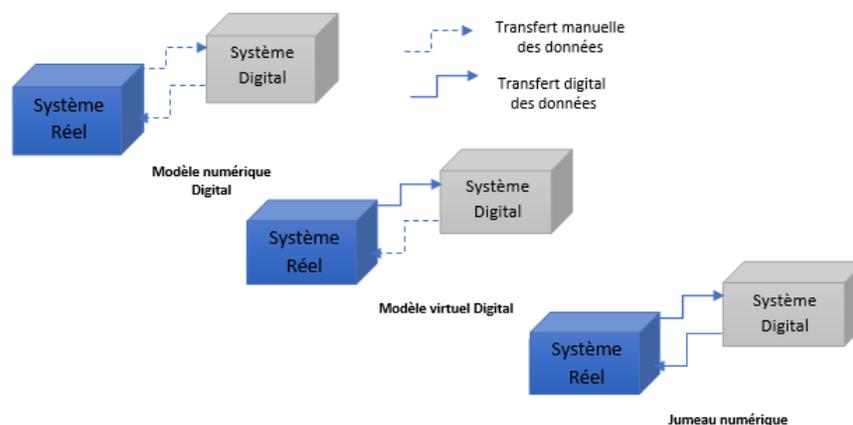


Fig.1. Chemin vers le Digital Twin [1]

Le modèle numérique Digital : Au début de ce progrès le modèle numérique n'utilise aucune forme d'échange automatisé de données entre les objets physiques et ceux numériques.

Le modèle virtuel Digital : Dans un deuxième temps, un flux de données unidirectionnel automatisé entre l'état d'un objet physique existant et un objet numérique le modèle numérique s'est installé, il a commencé dès les phases de construction.

Le jumeau Digital : récemment, on parle du Digital Twin dont les flux de données entre un objet physique existant et un objet numérique sont totalement intégrés dans les deux sens. Dans une telle combinaison, l'objet numérique peut également jouer le rôle d'autorité de contrôle de l'objet physique. Il peut également y avoir d'autres objets, physiques ou numériques, qui induisent des changements d'état dans l'objet numérique. Un changement d'état de l'objet physique entraîne directement un changement d'état de l'objet numérique et inversement.

Ce concepts'applique à plusieurs échelles et pour diverses utilisations. Ils incorporent plusieurs aspects physiques, contiennent les meilleures descriptions physiques disponibles et reflètent la vie du produit réel et son processus de production.

Les recherches récentes montrent que la DT concerne de nouveaux domaines :

Des architectures de référence Digital Twin ont été développées pour l'appliquées dans des cas industriels, notamment une maintenance planifiée intelligente, une surveillance en temps réel, un contrôle à distance et des fonctionnalités de prévision [2]. En plus, des recherches dans le domaine de la surveillance des équipements de production ou des actifs importants [3]. Les progrès de la technologie du jumeau numérique se développent rapidement et apportent des contributions viables à l'augmentation du développement des villes intelligentes même si la recherche sur le jumeau numérique des villes soit encore à ses débuts [4]. Aussi la DT prend de l'ampleur et commence à s'adopter à l'industrie Oil et Gaz à un stade précoce avec des implémentations limitées à des applications isolées et sélectives Le déploiement de cette technologie émergente permettra aux entreprises pétrolières et gazières de construire des jumeaux numériques (DT) de leurs actifs [5].

Le concept Digital Twin (DT) s'applique aussi au domaine de stockage d'énergie. Plus précisément, au stade de la R&D, le jumeau numérique peut intégrer les données de tous les domaines techniques dans un seul modèle pour optimiser les performances et le cycle de vie des batteries[6].

Le DIGITAL TWIN s'appuie sur les modes de numérisations récentes, donc il devient obligatoire de s'appuyer sur des systèmes de construction de modèles numériques ou ce qu'on appelle Building Information Modeling System (BIM). L'une des exigences est de gérer les données autour d'un système d'information commun, tel que défini par la définition de Product Life cycle Management (PLM) [7]. Des études récentes suggèrent l'utilisation combinée du PLM et du BIM pour les projets de construction linéaires.



Fig.2. Digital twin dans le domaine automobile

Le jumeau numérique comprend toutes les informations nécessaires pour prévoir en permanence les performances et l'état du produit, la durée de vie restante ou, pour certaines applications, même la probabilité de réussite de la mission. Il peut également prévoir la réponse du système aux événements critiques pour la sécurité et découvrir des problèmes inconnus avant qu'ils ne deviennent critiques en comparant les réponses prévues et réelles.

2/ Le digital twin : quelques définitions

« ...un modèle numérique qui représente exactement un produit, processus de production ou performance d'un produit ou système de production en fonctionnement... »

« ...une image numérique en temps quasi réel d'un objet physique ou un processus qui aide à optimiser les performances... »

« ...une représentation d'un objet physique qui à un niveau d'exhaustivité et de précision comprend des informations contextuelles qui permet à l'utilisateur de comprendre son comportement et les performances... »

« ... le concept de jumeau numérique combine les idées de la modélisation et l'Internet des objets (IoT)... »

« ...Les jumeaux numériques sont des répliques virtuelles de dispositifs physiques que les data scientists et les professionnels de l'informatique peuvent utiliser pour exécuter des simulations avant que les systèmes réels ne soient construits et déployés... »

- Il existe plusieurs types de jumeaux numériques:
- Le jumeau numérique du produit
- Le jumeau numérique de la production
- Le jumeau numérique de la performance

Le jumeau numérique du produit est créé dès la phase de définition et de conception d'un produit. Cela permet aux ingénieurs de simuler et de valider les propriétés du produit en fonction des exigences attendues : par exemple, le produit est-il stable et son utilisation est-elle intuitive ? L'électronique fonctionne-t-elle de manière fiable ? Qu'il s'agisse de mécanique, d'électronique, de logiciel ou de performance du système, le jumeau numérique peut être utilisé pour tester et optimiser tous ces éléments à l'avance

Le jumeau numérique de la production implique tous les aspects, des machines et des contrôleurs d'usine aux lignes de production entières dans l'environnement virtuel. Par conséquent, les sources d'erreur ou de défaillance peuvent être identifiées et évitées avant le début des opérations réelles. Cela permet de gagner du temps et de poser les bases d'une production de masse personnalisée, car même des itinéraires de production très complexes peuvent être calculés, testés et programmés avec un minimum de coûts et d'efforts en un temps très court.

Le jumeau numérique de la performance est différent. Si de nombreux fabricants utilisent déjà ceux du produit et de la production, ils n'ont pas la capacité d'activer pleinement le jumeau numérique de la performance et de créer la boucle de rétroaction nécessaire pour un jumeau numérique en boucle fermée. Cela nécessite une solution IoT basée sur le cloud qui peut non seulement surveiller à distance les actifs, mais aussi s'intégrer de manière transparente aux autres technologies utilisées dans les modèles de Produit et de Production.

3/ A quelles phases applique t'on le DT

Le concept est applicable aux différentes étapes du cycle de vie d'un produit ou d'un système (figure.3).

De la phase d'idéation, avec un jumeau numérique du produit qui aide à définir/améliorer les conceptions et à analyser les performances.

À la phase de réalisation, avec un jumeau numérique du processus de fabrication

Jusqu'à la phase d'utilisation, avec un jumeau numérique du produit en service et jusqu'à son retrait.

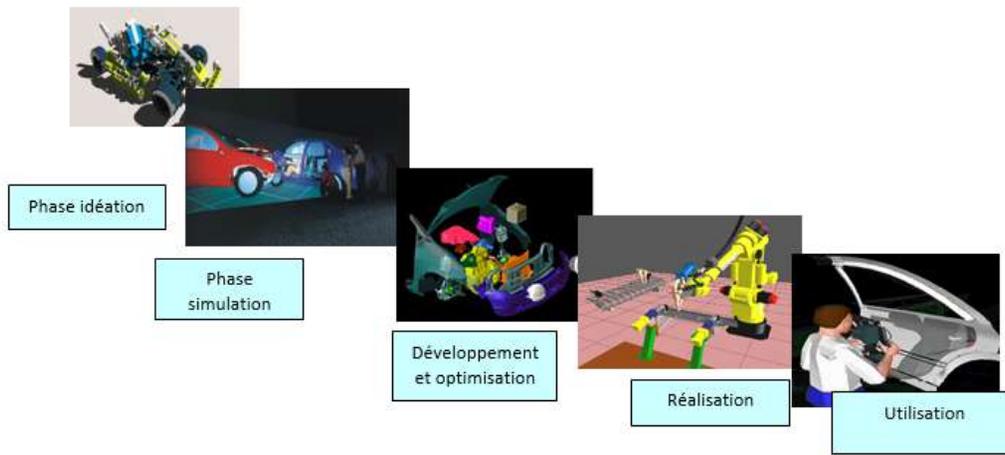


Fig.3. Le DT aux différentes étapes du cycle de vie d'un produit

Lorsque les entreprises intègrent tous ces jumeaux numériques, elles ont accès à un jumeau numérique holistique qui devient la base de leur développement de produits - capable de fournir une meilleure vision, de réduire la durée du cycle de développement, d'améliorer l'efficacité et d'accroître l'agilité du marché.

4/ Les bases du DT

4.1. Le principe du fil conducteur numérique

Le concept de fil numérique ("Digital Thread") est lié au concept de jumeau numérique [8]. Le fil numérique capture les informations sur l'ensemble des données, des modèles, des processus et des ressources, depuis les exigences jusqu'à la conception, l'ingénierie et à l'utilisation du jumeau numérique. Et ce, dans tous les domaines fonctionnels et pour toutes les parties prenantes. Ainsi, alors que le jumeau numérique peut être considéré comme l'entité virtuelle capable de prédire les performances, le fil conducteur numérique suit l'évolution du jumeau numérique et contribue à le maintenir à jour comme illustre la figure.4.

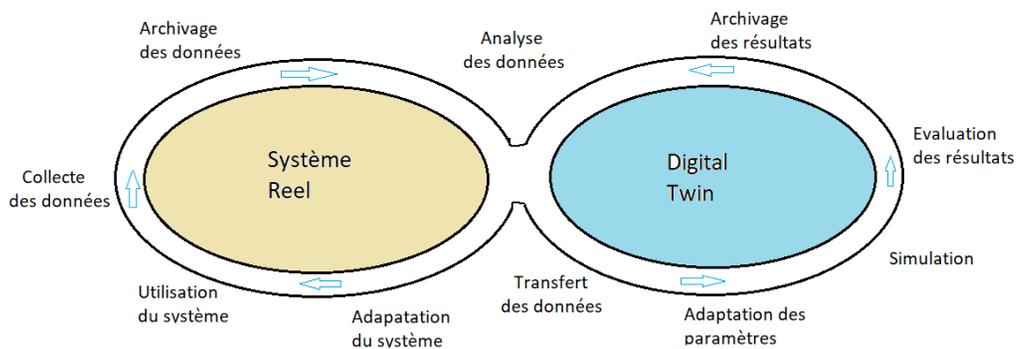


Fig.4. Transfert des données et des informations dans le concept Digital Twin

4.2. Ecosystème du concept DT en ingénierie des systèmes

Les jumeaux numériques seront la base de la création et l'innovation, grâce à leur capacité à fournir des représentations virtuelles de produits, de systèmes, de services et de villes du monde réel.

Par exemple, le jumeau numérique d'une chaîne de traction d'une voiture électrique ne se contente pas de présenter les composants de point de vue forme, mais analyse également, l'interaction entre la géométrie, le processus de réalisation et l'environnement dans lequel la composante évolue en passant par les données des capteurs, etc. En plus le jumeau numérique mis en évidence le comportement de chaque composante dans la chaîne et ses interactions avec les autres composantes, ceci grâce au flux de données, au retour d'expérience sur l'utilisation. Cela a un impact considérable sur le développement du produit.

Dans le domaine de l'ingénierie des systèmes, le système et son environnement peut être reconstruit, modélisé, simulé et testé bien avant la réalisation d'un prototype physique. Les principaux constructeurs de logiciel de conception intègrent des ateliers pour prendre en compte la chaîne complète du cycle de vie du système.

Les leaders mondiaux de construction développent des solutions IoT industrielles ajoutant le jumeau numérique de la performance au jumeau numérique du produit et au jumeau numérique de la production déjà existants. Le fil numérique complet est géré avec des logiciels intégrés de CAO, FAO, IAO, PDM et IoT, ce qui vous donne une transparence opérationnelle et un jumeau numérique en boucle fermée s'étendant à toute l'entreprise et à tout le cycle de vie du produit (figure.5). Avec tous les processus connectés et mis à jour en temps réel, vous pouvez tirer parti du jumeau numérique en boucle fermée pour alimenter une maintenance plus intelligente sur les produits, les usines, les systèmes et les machines.

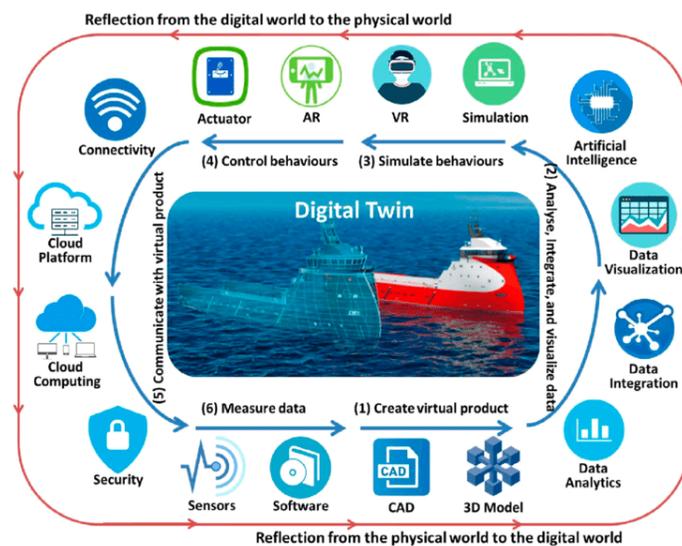


Fig.5. Les écosystèmes du Digital Twin[9]

Le concept du jumeaux numériques libèrent également la puissance des outils actuels [10] et incorpore un ensemble de compétences liées à :

- **L'intelligence artificielle** dont la fusion des Digital Twins permettra aux ordinateurs de concevoir de manière indépendante des produits avancés.
- **La production automatisée** : l'impression 3D et FAO les connaissances issues de la simulation de la forme et du comportement du processus de fabrication ont été ordonnées à des algorithmes génératifs. Ce qui permet des formes plus optimisées que tout ce qui avait été conçu auparavant. Par exemple : les robots. Il est difficile pour eux d'effectuer des tâches de fraisage car les forces importantes du processus de fabrication entraînent des mouvements imprécis. Mais avec le jumeau numérique, les forces qui éloignent le robot de la trajectoire de fraisage peuvent être calculées et compensées en temps réel, ce qui permet au robot de rester sur sa trajectoire.
- **La CAO** : Il s'agit d'un outil essentiel de construction de maquettes numériques, actuellement elle utilise des capteurs qui se connectent au produit physique afin de collecter les données et les envoyer ensuite au jumeau numérique. Cette interaction permet d'améliorer les performances du produit.
- **La simulation** : il est possible de simuler les mouvements, les écoulements, l'usure...etc et de tester le comportement de la machine, de la cellule, de l'atelier et de l'usine entière.

En ce qui concerne les opérations, les jumeaux numériques peuvent comparer les données des capteurs d'un point précis en temps réel avec la simulation de ce point. La disponibilité du point parallèlement aux opérations peut être prédite de manière fiable et les perturbations imprévues font partie du passé.

Pour le développement, la production et les opérations, le Digital Twin rompt avec les paradigmes traditionnels et ouvre des possibilités extraordinaires. C'est pourquoi les jumeaux numériques constituent l'épine dorsale de l'innovation future.

5/ La simulation numérique et le DT

Dans les conditions présentes de développement industriel, les outils de simulation virtuelle sont devenus indispensables pour construire les digital twin et offrir les concepts de la bonne prévision des performances réels des systèmes techniques. Dans le monde virtuel du modèle, le concepteur doit définir les hypothèses et maîtriser les risques associés [11].

Durant la phase de conception d'un dispositif ou d'un système quelconque, il faut créer une interaction entre le modèle virtuel et son jumeau réel, donc le concepteur doit proposer une configuration satisfaisante au mieux les besoins fonctionnels, et en même temps, viable d'un point de vue économique. La recherche de la meilleure performance d'un dispositif dans laquelle interviennent des paramètres techniques, structurels, dimensionnels et physiques est un problème difficile.



Fig.6. Modèle CAD d'un avion pour simulation du vol

Cette recherche croissante de maîtrise entraîne devient une Grande source de décision par le cumule d'information sur le comportement des systèmes.

6/ La simulation numérique comme outil de construction du jumeau digital

La construction du jumeau digital nécessite la construction des trois piliers de la simulation numérique : Le support, la physique, l'environnement, c'est la phase de construction du modèle virtuel.

- **Le support** : Les logiciels sont tellement développés, ils reproduisent le support et ses caractéristiques (géométries, dimensions et matériaux) et facilite la construction des maquettes numérique des systèmes technique parfaite (figure.6).

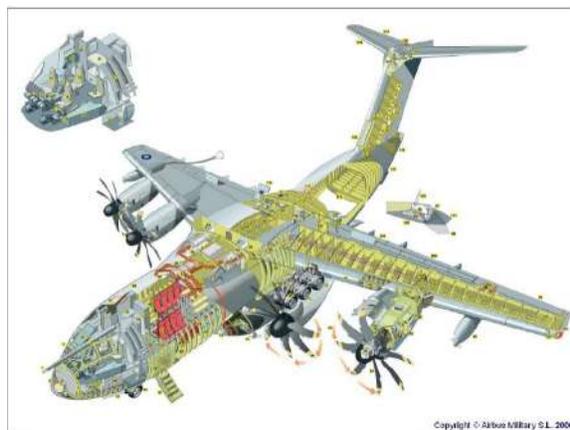


Fig.7. Maquette numérique d'un avion

- **Le comportement physique** : Les constructeurs d'outil numérique de simulation proposent des modèles physiques, chimique, électriques... et des méthodes numériques capables de simuler les comportements des systèmes, processus...ils sont en développement continu et devient moins précis si le comportement est complexe.

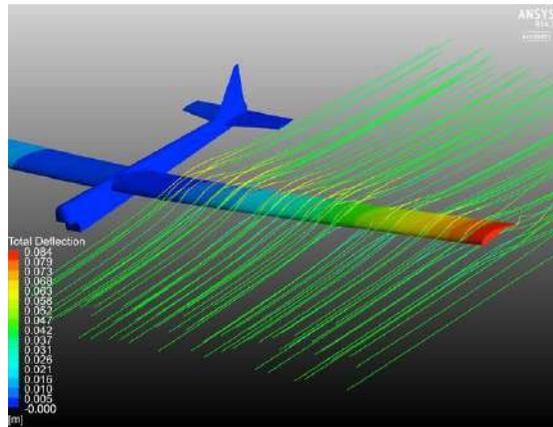


Fig.8. Modèle physique et simulation du comportement du système

Les qualités des modèles et des simulations sont principalement :

- **Robustesse** : quelle que soit la maquette numérique proposée, la simulation doit être capable de construire, si possible automatiquement, le modèle correspondant ;
- **Précision** : l'écart entre le comportement simulé et celui réel doit être minimal;
- **Capacité à évoluer** : la simulation doit être suffisamment modulable et flexible pour pouvoir engendrer des nouveautés liées aux modèles, les outils et les méthodes utilisées.
- **Rapidité** : c'est un critère qui est important et déterminant dans le coût du système et elle est liée à l'évolution des stations de traitement et post-traitement.
- **L'environnement** : Le développement intéressant au niveau des outils informatiques et l'apparition de l'intelligence artificielle ouvre de grands horizons pour construire les modèles et algorithmes capables de mettre en évidence l'interactivité du système avec son environnement et intégrer les effets mutuels.

7/ Comment La simulation numérique bénéficie du jumeau digital

Comme le digital twin est une représentation d'un actif physique qui a un niveau d'exhaustivité et de précision et comprend des informations contextuelles qui permet à l'utilisateur de comprendre son comportement et les performances, la simulation peut bénéficier du retour d'information à partir de l'utilisation du système réel et ce sur plusieurs niveaux :

7.1. Conception : Optimisation topologique

Ici nous pouvons voir comment le concept digital twin peut apporter des informations importantes sur le comportement réel d'un système à travers des capteurs installés au niveau d'un véhicule comme montre la figure.9.



Fig.9. Composante dans son environnement réel et échange d'information avec le twin digital

L'utilisation des données collectées permet une optimisation de la forme et un gain important au niveau de la matière et de la résistance de ce composant utilisé au niveau de la nouvelle génération de portail des voitures (figure.10 a, b et figure 11).



Fig.11. Gain important suite aux informations du twin réel

7.2. Reduction de l'erreur sur les déplacements

La présence du twin réel d'un robot (figure.12) signifie que concepteurs disposeront d'une base de données contenant des informations telles que les trajectoires, les erreurs, l'emplacement, la consommation, etc. qui serviront à adopter leurs simulations numériques.

La disponibilité des informations permet de surveiller et de gérer à distance les états des équipements. , ainsi que de faire des prévisions justifiées pour améliorer les indicateurs de performance.

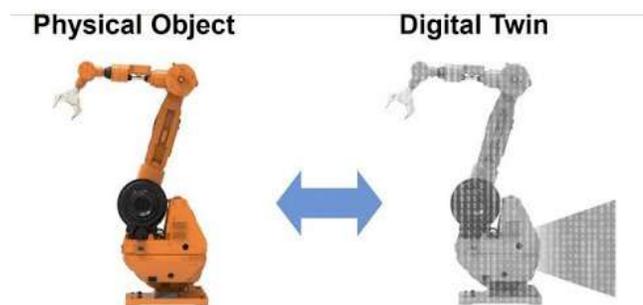


Fig.12. Optimisation sur la précision et l'exactitude des mouvements

7.3. Fabrication du modèle réel

Les retombées du jumeau réel offre des informations sur les caractéristiques des pièces produites (dimensions, spécifications géométriques et états de surfaces) à la simulation d'usinage en MOCN. Ce qui améliore le processus CAM/CAD de passage entre le design et l'usinage. Les bénéfices sont : plus de précision sur les caractéristiques des pièces, la réduction du temps de développement et assurer la sécurité de la production des pièces complexes usinées en 5 axes simultanés et à forte valeur ajoutée.

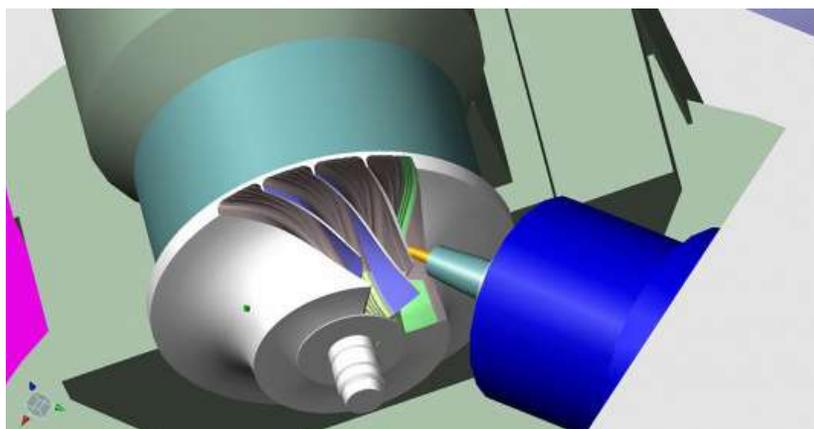


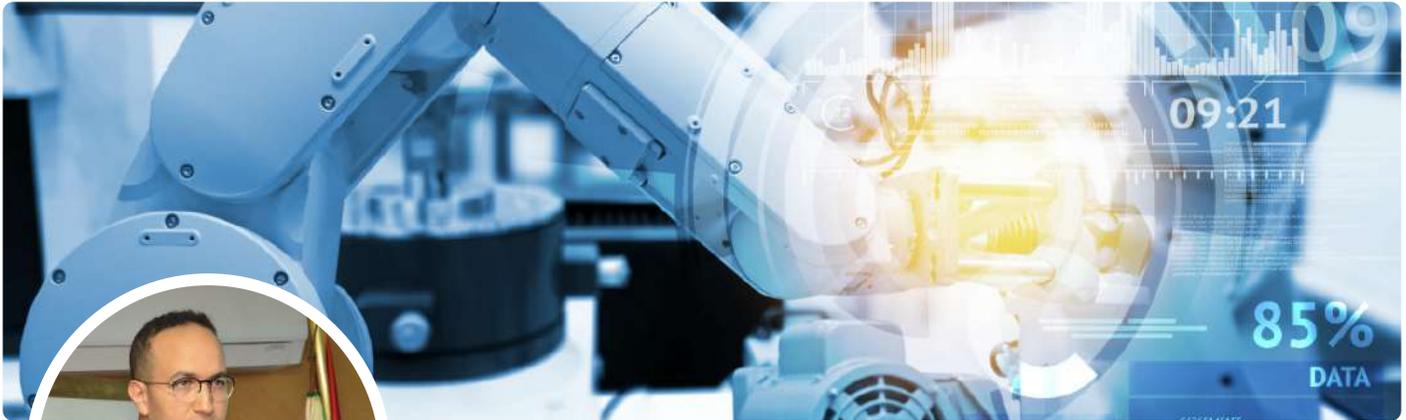
Fig.13. Optimisation sur la précision et l'exactitude des mouvements

Nous pensons qu'à plus long terme, cette solution rendra les parcours d'outils plus robustes et plus fiables. Elle permettra d'avoir un outil de simulation qui aide à l'optimisation et à l'innovation.

8/ Conclusion

Le digital twin, dans le domaine de l'ingénierie des systèmes, est la représentation virtuelle d'un système technique et son écosystème, il est utilisé pour les phases de conception, de simulation, de surveillance, d'optimisation et de maintenance. C'est un concept primordial dans la révolution industrielle actuelle. Il utilise le principe du fil conducteur numérique qui capture les informations sur le système réel et son twin numérique et les échanges sur toutes les phases de construction du modèle. Ce qui permet des avantages incontournables sur le développement, la prédiction, l'optimisation et la sûreté de fonctionnement des systèmes.

Ce concept utilise la simulation numérique comme outil sur toutes les phases ce qui permet d'apporter des modifications en temps réel. Nous obtenons donc une conception optimisée et résistante au niveau de la phase simulation du modèle, des déplacements plus précis et bien maîtrisés dans la phase simulation cinématique et dynamique et des caractéristiques dimensionnelles et géométriques plus précises obtenues dans la phase simulation de fabrication et de transformation CAD/CAM.



MEDDAOUI Anwar
Ingénieur, Docteur

Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers
Casablanca, Maroc

Maintenance 4.0

La maintenance des systèmes techniques constitue un levier important dans la performance économique d'une organisation. A l'ère de la digitalisation de l'entreprise, le management de la fonction maintenance passe du mode classique de gestion des activités en aval à un autre mode permettant l'émergence de l'intelligence artificielle et la prédiction. La maintenance prédictive est le sujet principal des chercheurs en maintenance lors de cette dernière décennie. Autrement, l'anticipation des défaillances et la prédiction des pannes avec des organes et algorithmes intelligents demeurent des éléments principaux à développer en permanence. Cette intervention dresse l'évolution de la maintenance intelligente et les différentes techniques utilisées, avec aussi des exemples concrets utilisés dans le secteur industriel.

LA MAINTENANCE INTELLIGENTE AU SERVICE DE LA PERFORMANCE DE L'ENTREPRISE

1/ Introduction

- L'industrie 4.0

La quatrième révolution industrielle est un système cyber-physique caractérisé par une sphère physique, numérique et biologique qui transforme et impacte tout le travail de la vie, y compris l'économie et les industries. Appelée aussi industrie 4.0, Elle est le résultat de l'initiative allemande visant à améliorer la compétitivité dans une industrie manufacturière, la vision du gouvernement fédéral allemand pour une stratégie high-tech pour 2020 a donné naissance au mot à la mode «Industry 4.0», voir figure 1.

- La maintenance 4.0

Afin d'accompagner le monde industriel dans son développement continu, passé d'une production en série classique à un mode plus performant basé sur des stratégies de Lean Manufacturing et d'intelligence artificielle, la maintenance industrielle doit suivre la tendance et se transformer d'une approche purement curative et préventive à des tendances prédictives et anticipative.

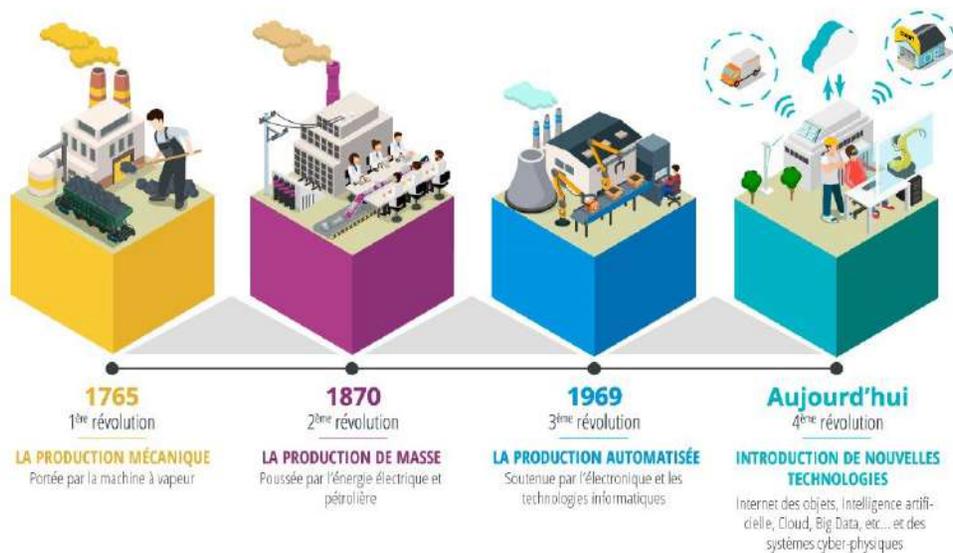


Figure 1. Evolution de la révolution industrielle

L'industrie 4.0 est une tendance actuelle dans le domaine manufacturier, basée sur le concept de «smart factory». Entre autres services organisationnels, l'Industrie 4.0 nécessite un service de maintenance rapide et efficace afin de garantir que les entreprises mettent en place un système de production efficace. L'utilisation des techniques de type Réalité Augmentée (RA) comme support d'opérations de maintenance n'est pas une idée nouvelle, comme le souligne Azuma dans un article récent [1]. Depuis le début, il était clair pour les chercheurs que l'une des applications les plus intéressantes de la RA aurait pu être le support des applications industrielles, y compris la maintenance [2]. La RA peut aider à réduire le temps et les erreurs des tâches de maintenance [3]. À cette époque, la technologie permettant la RA était coûteuse et, par conséquent, le développement d'applications nécessitait des investissements importants [1]. Après des décennies et de grandes avancées dans les technologies permettant la RA, par ex. caméras, capteurs, algorithmes de suivi et technologies de visualisation, et grâce à l'évolution des technologies de l'information et de la communication en général, la RA est désormais entrée sur le marché grand public. Dans le même temps, la RA a été reconnue comme l'une des technologies de pointe de la 4ème révolution industrielle, la soi-disant Industrie 4.0.

La maintenance peut être de différents types : tant que les pannes des machines peuvent être prédites avec précision, la maintenance prédictive permet d'avoir une fréquence de maintenance aussi faible que possible pour éviter une maintenance réactive non planifiée, sans encourir de coûts associés à une trop grande maintenance préventive, idéalement.

Malheureusement, certaines pannes ne peuvent pas être facilement prévues et dans ces cas, la maintenance nécessite une analyse approfondie du problème, puis des opérateurs de maintenance experts pour effectuer la tâche de réparation. Ce type d'intervention peut être coûteux, tant pour le propriétaire de la machine que pour l'entreprise vendant le service de maintenance, et prend parfois du temps pour que l'expert se rende à l'endroit où la tâche de maintenance doit être effectuée. Les opérateurs locaux peuvent essayer de réparer la machine en communiquant avec des experts à distance en utilisant n'importe quel support multimédia, c'est-à-dire en envoyant des photos, des vidéos, en discutant, en parlant.

L'objectif de la fonction maintenance ce n'est pas que de remettre le système industriel en état d'accomplissement du service voulu, mais plus loin encore la réduction des temps d'arrêts des lignes de production et l'amélioration de la disponibilité de ces équipements. En effet, l'objectif de la quatrième génération de la maintenance ou la maintenance 4.0 est de réduire encore le temps d'arrêt et étudier toutes les données générées d'une manière anticipée et performante. Ces techniques basées sur l'exploitation des masses de données générées posent beaucoup de questions :

- Comment collecter d'une manière fiable la masse de données?
- Comment l'exploiter pour détecter les anomalies ?
- Comment anticiper les pannes avec des contraintes multiples ?

2/ Avantages de la maintenance 4.0

L'avantage majeur de la maintenance 4.0 est de pouvoir agir pendant la période optimale de maintenance et ce, en faisant l'analyse :

- a. de l'évolution des paramètres de fonctionnement
- b. des causes racines et de risque
- c. du coût de l'intervention comparé au cout de la perte de production

L'autre avantage est de pouvoir réduire le temps d'arrêt en faisant :

La simulation de l'intervention en réalité augmentée

- d. L'assistance de l'opérateur durant l'intervention
- e. La préparation du rapport d'intervention près de la machine (vidéo, photo, mesures, etc)

3/ Intelligence artificielle et maintenance 4.0

- **Big data et intelligence artificielle au service de la maintenance :**

Jusqu'à récemment, il n'y avait aucune raison pour que l'analyse de masse de données massive ou Big Data soit au viseur de la plupart des industriels. Cependant, avec l'apprentissage automatique appliqué à la maintenance prédictive, le sujet est devenu important, le Big Data a pu avoir un rôle primordial. Les données issues des capteurs de la machine peuvent être analysées pour détecter l'évolution des défaillances de la machine à l'aide de l'intelligence artificielle avancée.

On ne peut pas s'attendre à ce que les professionnels de la maintenance et de la fiabilité deviennent des experts dans ce domaine. Le défi pour eux est de comprendre comment le Big Data peut être utilisé sans acquérir une expertise directe de la discipline. Nous ne pouvons pas parler au nom de tous les fournisseurs de solutions, mais chez SKF fabricant mondial des solutions de roulement, toutes les analyses des données des capteurs sont effectuées hors site à l'aide d'une solution basée sur le Cloud. Nous ne nous attendons pas à ce que les techniciens deviennent compétents en Machine Learning. Au lieu de cela, nous fournissons des alertes pour l'évolution des pannes, ainsi, les responsables peuvent prendre des décisions rapides et économiques.

- **Réalité augmentée au service de la maintenance :**

Depuis plusieurs années, la réalité augmentée (RA) a été reconnue comme étant un support intéressant dans l'industrie pour les applications de maintenance, d'assemblage et de réparation de machines. Par exemple, Feiner et al. [5] décrivent KARMA (figure 2), un prototype d'un système de réalité augmentée qui présente une application simple de maintenance d'imprimante laser pour l'utilisateur final basée sur un écran transparent monté sur la tête. L'un des principaux avantages de l'utilisation d'une application AR par rapport à la documentation traditionnelle est que l'opérateur peut accéder aux informations nécessaires pour effectuer les activités directement dans la zone de travail, sans avoir besoin de se référer au manuel traditionnel imprimé. Le type d'informations à afficher dans AR afin de permettre une tâche de maintenance efficace est toujours un problème ouvert, comme l'ont également démontré un travail récent de Radkowski et al. [6].

La RA, telle que décrite dans [7], permet également une modalité de formation efficace pour la maintenance et le montage qui accélère l'acquisition par les techniciens de nouvelles compétences sur les procédures de maintenance. Haritos et al. [8] décrivent une application AR mobile pour la formation dans le domaine de la maintenance des avions, pour remplacer la modalité traditionnelle de formation, c'est-à-dire la formation en cours d'emploi. Le système de formation AR peut être utile à la fois pour la formation aux tâches professionnelles et pour l'orientation des tâches professionnelles pour les techniciens novices dans un environnement de travail réel.



Figure 2. Projet KARMA [5]

Regenbrecht et al. dans [9] présentent quelques exemples d'application, où la RA est utilisée dans l'industrie automobile et aérospatiale. Cet article présente des applications industrielles potentielles qui montrent les domaines d'application industriels possibles de la RA, notamment l'utilisation de cette technologie pour la maintenance et l'assemblage de produits.

4/ Modèle de la maintenance 4.0

Dans cette section, nous proposons un modèle sur lequel le laboratoire AICSE de l'ENSAM Casablanca se penche pour aborder la recherche et développement dans l'axe de la performance économique de l'entreprise via la maintenance 4.0, voir figure 3 ci-après. Nous proposons par la suite un modèle simplifié pour les petites structures comme les PME.

Ce modèle est basé sur les concepts de la collecte de données, la consolidation et la visualisation, puis l'analyse informatique et métiers, par la suite la simulation et la planification et enfin l'exécution.

Certaines étapes sont importantes mais pas toujours nécessaires selon la fréquence et la complexité de la défaillance.

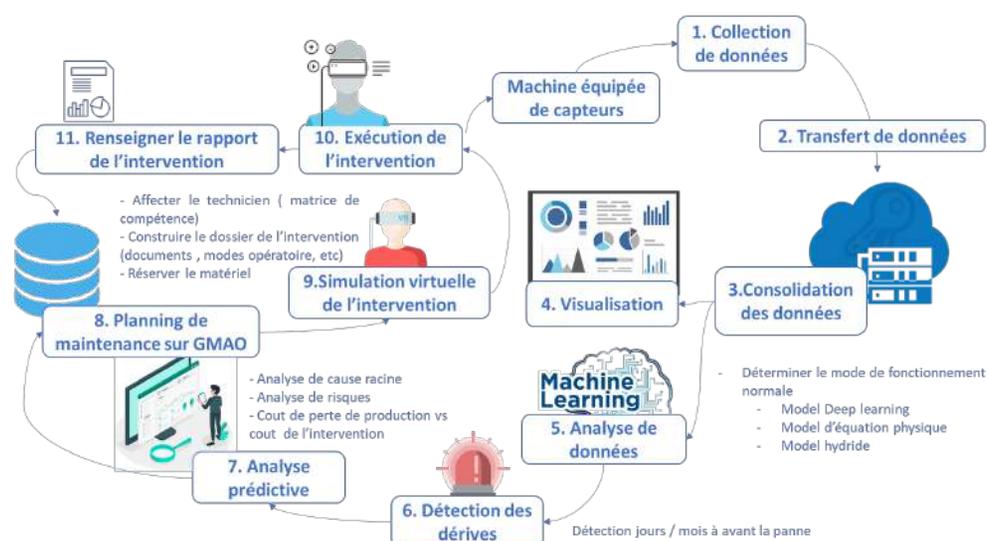


Figure 3. Modèle global de la maintenance 4.0

5/ Modèle simplifié de la maintenance 4.0

Le modèle simplifié comporte 8 étapes, voir figure 4. Ce modèle est basé sur la collection, le transfert, la consolidation et l'analyse, la GMAO et l'exécution.

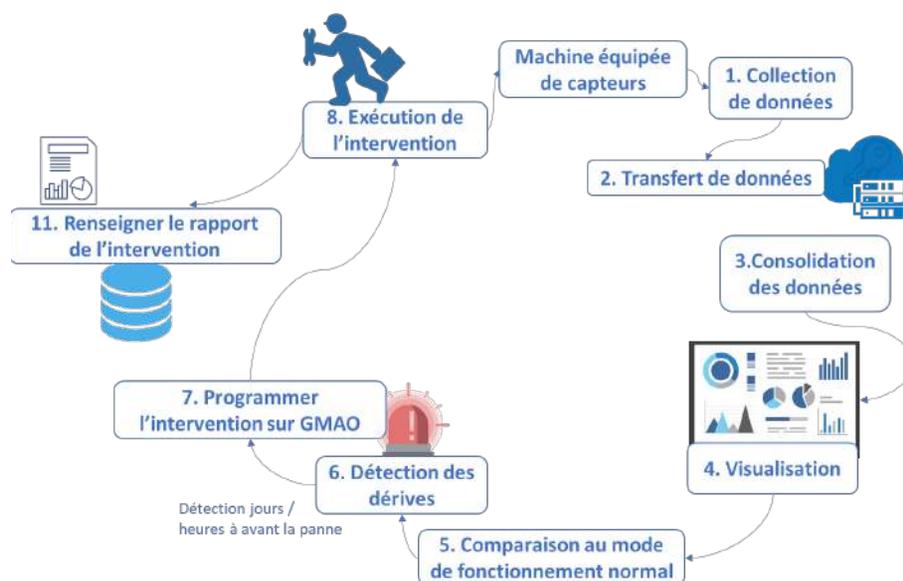


Figure 4. Modèle simplifié de la maintenance 4.0.

6/ Perspectives d'avenir

Le grand défi de la maintenance 4.0 à nos jours, c'est de pouvoir simplifier le modèle l'implémentation aux PME et de pouvoir proposer des technologies hardware abordables et des techniques software intelligente, facile à utiliser et économique aux utilisateurs non-initiés.

L'utilisation des techniques comme la réalité augmentée ou la réalité virtuelle dans la maintenance industrielle reste encore limitée aux grandes entreprises et aux laboratoires de recherches, la simplification des technologies liées à l'intelligence artificielle pourrait faciliter la tâche aux utilisateurs normaux en maintenance.

Parmi les raisons pour lesquelles la RA n'a pas encore été introduite dans la pratique industrielle, comme probablement la communauté des chercheurs s'y attendaient il y a quelques années, beaucoup sont liées au faible rapport performances/coût des technologies logicielles et matérielles disponibles sur le marché. La technologie ne semble toujours pas assez précise comme l'exigent les applications industrielles. Il souffre souvent des conditions d'éclairage. De plus, malgré plusieurs lunettes abordables ont été mis à disposition sur le marché, ils ne peuvent toujours pas être utilisés pendant une longue période. Les batteries, par exemple, ne permettent pas une longue durée d'utilisation, l'ergonomie a été améliorée par rapport aux écrans portables encombrants d'il y a quelques années, mais il reste encore de nombreux problèmes ouverts principalement liés à la perception visuelle des informations mixtes (réel plus virtuel). Quoi qu'il en soit, l'intérêt industriel pour une telle technologie est élevé, et ces dernières années, de nombreuses tentatives d'utilisation de la RA comme support de maintenance ont été faites par des groupes de recherche de longue date et émergents, des groupes de conseil, de nouvelles startups, etc. Les grandes entreprises investissent également dans cette direction. La Réalité Augmentée comme support de maintenance, n'est qu'un exemple de ce que l'on peut faire en introduisant la RA dans l'industrie.

7/ Conclusion

La mise en place de la maintenance 4.0 était chère et compliquée, Il fallait programmer tout une architecture pour collecter les données et le programme pour les analyser en partant de zéro et à la moindre mise à jour d'un des systèmes, il y avait un risque de devoir refaire un bout. Les changements demandaient des heures de programmation également.

De nos jours l'application de la maintenance 4.0 est désormais plus facile, la disponibilité des plateformes existent pour collecter, nettoyer, stocker, contextualiser et mettre à disposition les données. Les applications de maintenance prédictive sont paramétrables, il ne reste que le modèle à construire ou selon la méthode, l'apprentissage à faire. Des entreprises spécialisées que vendent des solutions complètes clés en main



SOULHI Aziz
Docteur d'Etat

Ecole Nationale Supérieure des Mines
Rabat, Maroc

Supply Chain 4.0

Les révolutions industrielles successives ont totalement transformé nos vies en innovant et en repensant les modes de fonctionnement usuels. À l'heure actuelle, nous sommes engagés dans la quatrième révolution industrielle, qui se caractérise par l'intégration totale de toutes les informations entre le monde physique et le monde numérique dans le cadre des processus industriels. Actuellement, la machine peut fabriquer son propre produit en fonction de paramètres spécifiés, détecter les erreurs, les risques et communiquer avec les personnes et d'autres équipements. Dans ce contexte, la Supply Chain 4.0 se doit d'implanter la dernière technologie dans tous ses processus afin de créer un réseau logistique plus souple et efficace.

SUPPLY CHAIN 4.0 : LA TRANSFORMATION DIGITALE DE LA SUPPLY CHAIN

1/ Introduction

« L'économie moderne est un système dynamique de développement caractérisé par l'utilisation généralisée des technologies de l'information pour promouvoir le changement mondial » [1]. Ces changements sont liés à des innovations technologiques telles que l'utilisation active de robots, la production d'additifs, les technologies de l'information électronique, les tests virtuels, les utilisateurs d'Internet, etc., et ont modifié les principes et la conscience économique de la création de produits physiques.

« La notion d'organisation des processus commerciaux, les relations entre producteurs et consommateurs et d'autres aspects sociaux et commerciaux » [1]. Ainsi, une nouvelle économie appelée « économie numérique » est en train de se mettre en place, à savoir l'industrie 4.0.

Étant donné que la logistique est un domaine d'activité économique et une fonction globale de la structure de l'entreprise, il est urgent d'étudier l'évolution de la logistique dans l'économie numérique et de déterminer l'orientation de son développement [1].

La logistique 4.0 est également appelée « la quatrième révolution industrielle ». Mais qu'est-ce que cela signifie exactement ? Ce terme est né suite à l'industrie 4.0 et a été entendu pour la première fois lors du salon IAA d'Hanovre en 2011. Il décrit une logistique moderne intégrant la mise en réseau, la numérisation ainsi que le Cloud computing.

Les missions d'un logisticien ne se limitent plus seulement au simple transport, mais aussi à la fonction de coordination au sein de l'entreprise [2].

La supply chain 4.0 se décline à toutes les étapes, « depuis les fournisseurs jusqu'aux clients en passant par la fabrication, le stockage ou le transport dans le but d'enrichir la chaîne globale en collectant des informations pour la rendre plus agile » [3], plus fluide et plus efficace. Elle est donc une nouvelle manière d'organiser les processus et les méthodes de travail. C'est une conséquence inévitable de la mondialisation et de l'internationalisation des entreprises.

Elle reste plus complexe à traiter que les logistiques 2.0 et 3.0. En effet, cette dernière se base davantage sur la robotisation et la standardisation des procédés, qui sont devenues indispensables avec l'expansion du commerce international.

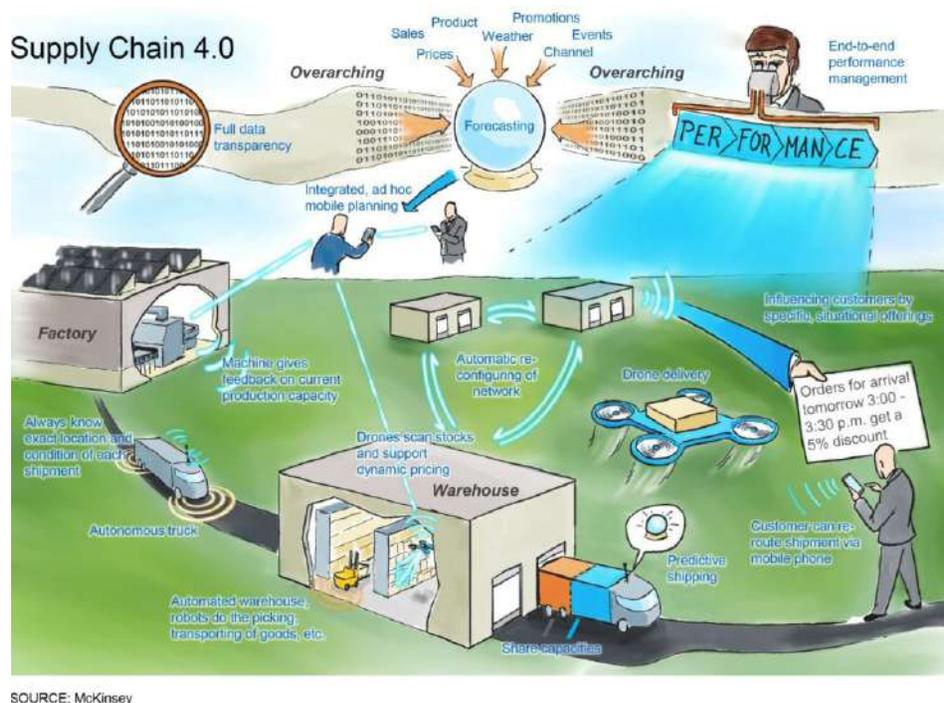


Figure 1 : Une supplychain du futur [3].

« Dès lors, il est nécessaire de donner aux acteurs une méthode et des outils afin d'accompagner les entreprises d'une chaîne logistique dans leurs transformation 4.0 » [4]. A ce jour, il n'existe pas de méthode de transformation organisationnelle pour aider les entreprises à se positionner et définir une stratégie leur permettant de prioriser la transformation de leur chaîne logistique vers le 4.0 [4]. L'objectif de cet article est de proposer une méthode et des outils permettant aux entreprises participantes à une chaîne logistique donnée de réussir leur transition vers « Industrie du futur ». Dans un premier temps nous présentons les différents domaines de la transformation 4.0 dans les entreprises industrielles ainsi que le modèle e d'évaluation de la performance de l'entreprise faisant partie d'une chaîne logistique pour les accompagner dans la transformation vers le 4.0 [4].

2/ Etude de la littérature : domaines stratégiques de la transition 4.0

La transition progressive vers la supply chain 4.0 concrétise la promesse d'une organisation plus flexible et plus autonome pour les entreprises en quête de productivité. Celles-ci investissent dans de nouveaux outils d'autonomisation et d'automatisation de leurs moyens de production. Big data, objets connectés et intelligence artificielle s'invitent à tous les niveaux de la chaîne de production.

La transformation numérique d'une chaîne de valeur ne peut être plus forte que son maillon le plus faible. Il est donc important que les organisations appliquent les principes de l'industrie 4.0 à tous les niveaux de leur chaîne de production, y compris à la gestion des stocks et, par extension, des achats. Il est donc temps pour elles de repenser la gestion de leur supplyChain 4.0 [5].

« La transition vers le numérique offre aux entreprises de nouvelles possibilités en termes de gestion des stocks, de réduction des coûts de production, de gains de temps, entre autres » [5]. Grâce à une alliance optimale des solutions de l'industrie 4.0 (objets connectés, IoT, collecte et analyse des données terrain, etc.), les organisations peuvent désormais

placer le client au cœur de la supply chain en adaptant la production à leurs besoins. En d'autres termes, l'adoption d'une nouvelle stratégie de digitalisation de la supply chain 4.0 constitue aujourd'hui une étape nécessaire pour appréhender le paysage technologique émergent, en tirer les bénéfices, et ainsi renforcer sa position face à la concurrence.

« C'est dans ce contexte que ce numéro spécial « supply chain 4.0 » de la revue Logistique & Management présente un aperçu tant académique que managérial des changements induits par la prise en compte du concept de l'industrie 4.0 » [5] dans la supply Chain. Les sept articles retenus pour ce numéro sont complémentaires et représentatifs des travaux de recherche sur des nouveaux concepts encore très peu traités dans la littérature [5], comme par exemple : l'entrepôt du futur, la blockchain, la mutualisation logistique 4.0, etc.

Dans le premier article de ce numéro, Ioana Deniaud, François Marmier et Jean-Louis Michalak s'intéressent à la stratégie de transition 4.0 que doit adopter chaque maillon de la supply chain afin de l'optimiser globalement. Dans ce contexte, ils proposent un outil d'aide à la décision permettant de déterminer et prioriser la stratégie de développement à adopter pour une transformation vers la chaîne logistique 4.0 [5].

Puis, dans le deuxième article, Fabienne Fel, Jennifer Cayla et Valentina Carbone s'interrogent sur le rôle de l'industrie 4.0 dans la relocalisation de la production en France. Ils démontrent que le développement de l'industrie 4.0 est susceptible de favoriser les relocalisations, et identifient tant les facteurs favorables que les freins à ce mouvement. Ils analysent également les conséquences d'un tel mouvement sur la supply chain.

Dans le troisième article, Anne-Lise Antomarchi, Séverine Durieux et Emmanuel Duc analysent l'impact de la fabrication additive sur la supply chain. Les auteurs démontrent à travers une analyse circonstanciée de la littérature que l'utilisation de la fabrication additive à l'échelle industrielle nécessite une réorganisation de la production ainsi qu'une évolution de toute la supply chain vers la supply chain 4.0.

C'est ensuite le concept de l'entrepôt du futur qui est abordé dans le quatrième article par Dmitry Kucharavy, David Damand, Samia Chehbi-Gamoura, Marc Barth et Stéphane Mornay. Ils se sont focalisés plus spécialement sur la planification stratégique des entrepôts du futur. Les auteurs proposent une méthode d'aide à la décision basée sur l'extraction et la formalisation de l'ensemble des problèmes sous forme de règles de conception contradictoires.

Quant à Nassim Mrabti, Nadia Hamani et Laurent Delahoche, ils s'intéressent dans le cinquième article à la mutualisation logistique 4.0. Les auteurs proposent un modèle de simulation générique pour une supply chain 4.0 mutualisée. Ils démontrent à travers un exemple d'illustration que des meilleurs résultats sont obtenus en évaluant les indicateurs économiques et les indicateurs environnementaux sous forme d'émissions de CO₂.

Dans le sixième article, c'est le concept de la chaîne logistique hybride qui est exploré par Najat Bara, Frédéric Gautier et Vincent Giard. Ils analysent cette supply chain particulière à travers la création d'un jeu de quatre composants génériques. Ils démontrent que la solution proposée a été utilisée avec succès pour la simulation du plus gros complexe industriel de l'industrie du phosphate.

Enfin, dans le septième article de ce numéro spécial, Samuel FossoWamba et Cameron Guthrie étudient l'adoption du nouveau concept de la blockchain dans la chaîne logistique. Ils proposent un modèle de recherche qui lie l'adoption de la blockchain dans la chaîne logistique à la performance concurrentielle. Les résultats d'une étude réalisée auprès de 344 professionnels de la chaîne logistique confirment que l'innovation organisationnelle régit la relation entre l'adoption de la blockchain par une entreprise et sa performance concurrentielle.

La diversité des thèmes abordés dans les sept articles sélectionnés dans ce numéro spécial montre d'ailleurs que l'agenda de recherche sur la supply Chain 4.0 ne fait que commencer et qu'il est encore largement ouvert et à compléter.

3/ La transaction vers la « supply chain » 4.0

a. Avantages (et inconvénients) de la Supply Chain 4.0

« De la capacité à doter d'intelligence un entrepôt par le biais de l'IoT à la garantie de l'intégrité des informations partagées par le blockchain, voici les principaux avantages de la chaîne d'approvisionnement 4.0 » [6].

- **Une prise de décision plus rapide** : de meilleurs systèmes de communication permettent aux entreprises d'interagir davantage les unes avec les autres et de manière plus fluide. Cela améliore et accélère la prise de décision.

- **Efficacité et productivité** : la mise en place d'équipements de production, de systèmes de stockage, de préparation des commandes et de transports autonomes (tels que les drones, les robots mobiles ou les camions futuristes sans conducteur) permettra à une entreprise d'atteindre son rendement maximal.
- **Suppression des erreurs** : l'utilisation de logiciels spécialisés, permet de supprimer les erreurs dans la gestion des marchandises. Cela se traduit par un service beaucoup plus rapide et satisfaisant.
- **Intégration des processus** : une chaîne d'approvisionnement digitale permet à toutes les entreprises d'avoir une visibilité sur les données relatives aux marchandises à n'importe quel stade, assurant ainsi une traçabilité totale **des produits**.

En définitive, la Supply Chain 4.0 améliore l'exécution des méthodes de fabrication telles que le **just-in-time** ou bien permet une gestion plus intelligente de l'espace (grâce aux techniques de **slotting**), ce qui entraîne une diminution des coûts de fabrication et de stockage.

Cependant, le choix d'une chaîne d'approvisionnement 4.0 représente un coût important. Il n'est pas facile d'automatiser et de digitaliser l'ensemble de la chaîne. Bien qu'à long terme, le retour sur investissement et les avantages en termes de flux de travail l'emportent sur ces dépenses, de nombreuses entreprises préfèrent appliquer ces changements de manière progressive.

b. Les quatre piliers de la supply chain 4.0

#IoT, #machineLearning, #bigdata, #blockchain, #RPA... que cachent ces buzzwords et peuvent-ils vraiment améliorer le pilotage de la Supply Chain ? Les données ont toujours joué un rôle clé dans la performance de la Supply Chain : la maîtrise de la demande, des stocks, des lead-times, des en-cours sont des facteurs clés de la performance. Les innovations digitales permettent véritablement de franchir un nouveau cap dans le pilotage des données et ouvrent ainsi quatre grands champs d'usage concrets. La Supply Chain 4.0 peut ainsi être décrite à travers quatre caractéristiques, chacune étant liée à un aspect du traitement des données :

- **Connectée**: La technologie « Internet-of-Things » permet d'extraire des données à très bas coût et de manière simple. Ces données viennent enrichir les informations déjà disponibles dans les systèmes et éliminent les zones opaques de la Supply Chain : flux longs et non maîtrisés comme les flux maritimes, points de stockage externes. À la clé, une visibilité améliorée, des lead-times réduits, un meilleur pilotage et un service client amélioré;
- **Prédictive**: La technologie « Big Data, Machine Learning, Data Sciences... » Permet d'exploiter les données disponibles afin de mieux prédire l'avenir. Il est ainsi possible de mieux prévoir les ventes et de mieux définir les assortiments en point de vente grâce à une connaissance plus fine des comportements client. Il est aussi possible de mieux anticiper les ruptures et les niveaux de qualité en production afin de fiabiliser les approvisionnements [7] ;
- **Sécurisée**: « La technologie « Blockchain » permet de sécuriser les données et les flux, notamment dans des écosystèmes décentralisés, à grande échelle et sans confiance préalable [7] ». Les cas d'applications concernent la traçabilité des produits, la sécurisation des transactions et des flux et la désintermédiation dans les écosystèmes complexes.
- **Automatisée**: « La technologie « Robotic Process Automation » permet d'automatiser le traitement des données et les tâches répétitives » [7]. À la clé, des gains de productivité, une réduction des erreurs et la concentration des équipes sur les tâches à valeur ajoutée. Un autre type d'automatisation est également possible avec la technologie « Entrepôt 4.0 » qui repose entre autres sur un traitement optimisé des données de commandes et de stockage. Les gains concernent l'efficacité, l'agilité et l'amélioration des conditions de travail [7].

Ces quatre grands champs d'usage sont décrits dans ce numéro d'ADD et structurent l'enchaînement des articles.

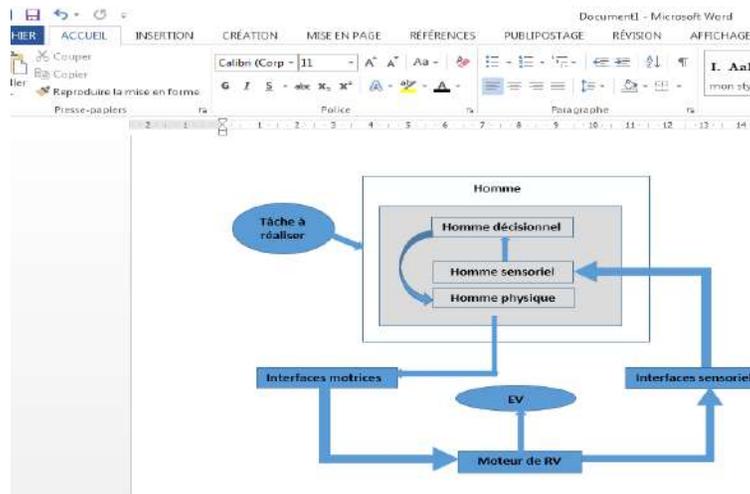


Figure 2. Les quatre piliers de la supplychain 4.0 [7].

c. Les enjeux de la supply chain 4.0

« La supplychain est apparue il y a quelques décennies dans les entreprises et ne cesse d'évoluer » [8]. Auparavant, les entreprises traitaient de manière indépendante leurs flux. A présent, les flux sont interconnectés. Cette supply chain vit actuellement une révolution 4.0, comme d'autres activités, telles que les activités industrielles avec l'avènement de l'industrie 4.0 ou encore des métiers qui évoluent dans l'entreprise et qui conduisent, par exemple à digitaliser la maintenance [8].

Découvrons quels sont les enjeux de cette supply chain nouvelle génération :

- **Les marges:** La supply chain informatisée de bout en bout vise notamment à améliorer les marges de l'entreprise [8].
- **La traçabilité:** « Le suivi de la marchandise et la traçabilité des données d'un bout à l'autre de la chaîne, de la prise de commande à l'assurance de la livraison entière et à temps » [8].
- **La gestion des stocks:** L'optimisation des stocks est une problématique croissante de la supply chain, qui doit maîtriser ses stocks au maximum.
- **L'automatisation du processus:** « Face à la croissance de la demande et à la diversification des types de commandes, le processus se doit d'être de plus en plus automatisé » [8].



Figure 3. L'automatisation est l'un des axes de la chaîne d'approvisionnement 4.0. Sur la photo, un transstockeur pour bacs ou miniload [6].

- **L'analyse:** Avec l'explosion des données et le big data, leur analyse devient de plus en plus complexe et représente, de ce fait, un enjeu clé.

- **La flexibilité et l'agilité de la supply chain 4.0:** Il faut pour cela maîtriser les prix et les marges, ainsi que les stocks et les temps de livraison. Il faut également une grande précision dans la prévision des ventes.
- **La livraison prédictive:** Elle repose sur des données de livraison et représente une réponse à la demande.
- **Le contrôle qualité:** A chaque étape, en temps réel, le contrôle qualité doit être irréprochable pour livrer, en temps et en heure, sans aucune marge d'erreur.
- **L'automatisation de l'entrepôt:** Celle-ci s'avère essentielle pour réduire les coûts et présenter de la souplesse dans l'activité de l'entreprise.



Figure 4. L'aménagement de postes de travail modernes est un exemple d'entrepôt 4.0 [6].

d. Défis de la logistique 4.0

Bien que la logistique 4.0 fasse déjà partie de certaines étapes de la Supply Chain, nous vous recommandons de suivre nos 5 conseils afin que votre gestion d'entrepôt s'adapte totalement au numérique :

- **Réduisez vos délais de production et de livraison:** « Le secteur du commerce de détail travaille de plus en plus avec des productions en flux tendus, ainsi qu'une forte rotation des références en magasins et sur les boutiques en ligne » [9]. Désormais vous traitez des commandes plus petites et vos délais de livraison doivent être réduits. Pour ce faire, vous devrez être plus flexible : vos produits doivent s'adapter aux exigences du consommateur sans que cela ait des répercussions sur l'efficacité de vos processus ou sur votre gestion de volumes importants [9].
- **Adopter une logistique intelligente:** Intégrer la logistique 4.0 au fonctionnement quotidien de l'industrie, implique de profiter de toutes les technologies disponibles sur le marché [9].
- **Utilisez une stratégie omnicanale:** De nos jours, « la stratégie multicanale fait partie intégrante du service client. Toutefois, il existe toujours un risque qu'une information délivrée par des canaux distincts soit traitée différemment ; les commandes sont traitées de manière inégale » [9]. En adaptant la conception d'entrepôt à une stratégie omnicanale logistique, cela permet de mettre fin à ces irrégularités et à unifier la gestion des flux de marchandises tout en accélérant votre processus de préparation de commandes.



Figure 5. La logistique 4.0 favorise l'hyper connectivité et l'usage d'appareils électroniques qui améliorent la gestion des

flux de travail entrepôt [9].

- **Anticiper les besoins du client:** En logistique, le Big Data aide à prévoir les besoins des clients, à les anticiper et à gérer les approvisionnements en se basant sur des prévisions fiables de la demande. Les nouveaux outils d'analyse développés pour la logistique 4.0 partagent leurs historiques de ventes, leurs prévisions météorologiques, l'actualité locale, et même les conversations des utilisateurs sur les réseaux sociaux afin de mieux comprendre leurs attentes.
- **Gérer la traçabilité des produits tout au long de la Supply Chain:** Gagner en efficacité implique la maîtrise de la traçabilité des produits tout au long de la chaîne logistique 4.0. Pour ce faire, il est par exemple primordial d'étiqueter les marchandises avec des codes-barres afin de surveiller leur emplacement à distance, et que vous utilisiez des logiciels logistiques intégrés à votre Supply Chain.

e. La digitalisation de la chaîne logistique

Aujourd'hui, « l'Internet joue un rôle de plus en plus important dans notre vie quotidienne. Ces dernières années, le réseau est devenu une partie indispensable de nos entreprises » [10]. En fait, les technologies de l'information et de la communication offrent une certaine souplesse dans l'interaction avec les partenaires et tous les acteurs de l'entreprise. Elles offrent de nouvelles possibilités d'échange de données entre les différents systèmes informatiques, et c'est dans ce contexte que ces évolutions ouvrent de nouvelles perspectives à l'industrie. L'information est essentielle pour comprendre le passé, voir le présent, réagir et prévoir l'avenir afin d'optimiser les coûts de fonctionnement. Une grande partie des données produites par les entreprises manufacturières peuvent être transformées en informations [10], puis observées, analysées, liées et appliquées dans des modèles d'aide à la décision, c'est ce qu'on appelle la Big Data. La Big Data représente toutes les données numériques produites au moyen des nouvelles technologies. Avec l'augmentation du nombre de données à traiter, ce concept est devenu plus courant. « Aujourd'hui, l'industrie 4.0 est souple et reliée à l'intelligence. Certains algorithmes gèrent des processus de manière indépendante. Il s'agit d'un secteur qui cherche à satisfaire les besoins en matière d'environnement » [10]. La digitalisation est une permutation qui devrait être utilisée avec réserve (Wade et Marchant, 2014). La digitalisation repose sur la collaboration de tous les services afin d'apporter une solution adéquate. (Bughin, et al., 2015).



Figure 6. Seule la numérisation permet de garantir le bon déroulement des livraisons de commandes [6]

Les nouvelles technologies modifient d'une manière considérable l'environnement commercial et social des entreprises. Parmi les principaux progrès technologiques qui impact la chaîne logistique on trouve :

- **Big Data :** Le Big Data englobe un ensemble de technologies et de pratiques destinées à stocker de très grandes masses de données et à les analyser très rapidement (Fernandez, 2016). Il se caractérise par la règle 3V : - Volume : désigne une quantité importante de données brutes - Variété : les données sont structurées ou non structurées - Vitesse : les données sont produites de manière «rapide», ce qui implique un traitement rapide. Les big Data utilisent la technologie informatique pour assurer un traitement rapide de la grande quantité de données et de formats [10]. Ils reposent en fait sur des technologies différentes dont : Hadoop, mapreduce, Server - Cluster, in Memory... de grandes données sont souvent associées à des nuages car leur capacité de traitement et de stockage est limitée par les services de commercialisation du fabricant.
- **L'internet des objets :** En 1999, l'Ingénieur britannique Kevin Ashton a utilisé pour la première fois le terme Internet des Objets. Le système est utilisé pour spécifier un système dans lequel un objet est connecté à Internet. Il comprend également des systèmes qui créent et transmettent des données utiles aux

utilisateurs par le biais de divers services (polymérisation, analyse...). Selon l'UIT (Union Internationale des Télécommunications), l'Internet des Objets est défini comme une infrastructure mondiale pour la société de l'information, qui permet de disposer de services évolués en interconnectant des objets physique ou virtuels grâce aux technologies de l'information et de la communication interopérables existantes ou en évolution. Il contient 5 composants essentiels :

-Les objets -Les réseaux -Les données – Les applications.

L'internet des objets ou les objets de connexion génèrent une quantité importante de données, dont le stockage est important. Sur le plan logistique, on peut parler des capteurs utilisés pour suivre les actifs de gestion des stocks et de transport. Cela signifie également, qu'un nombre important d'objets sont connectés à Internet pour pouvoir communiquer entre les objets physiques et leurs mémoires numériques.

« Capteurs et géo localisations C'est une solution pour les entreprises désireuses de contrôler leurs activités. Les compagnies de transport routier » [10], les compagnies de distribution logistique, les sociétés ayant des équipes de vente et des sociétés de services sur place peuvent contrôler leurs processus ce qui va améliorer automatiquement la productivité, la rentabilité et la qualité du service. C'est un équipement composé d'un GPS et d'un module de communication qui permet de surveiller l'état de tous les véhicules et les marchandises [10]. Il assure la livraison en temps voulu des produits et des marchandises est essentielle à la rentabilité de l'industrie.

4/ Conclusion et les pistes de recherche

Le but de cet article était d'esquisser les principaux sujets de recherche récente sur la Supply Chain 4.0. Cependant, la mise en concept du terme Digital Supply Chain, les technologies de la supply chain 4.0 ainsi que les répercussions de cette digitalisation ont été examinées. Nous remarquons également que la recherche sur la Digital Supply Chain jusqu'à présent est encore caractérisée par une prédominance d'articles conceptuels, justifié par à la fois par la thématique en quête, la nouveauté du sujet et l'adoption limitée qui en résulte par les entreprises. L'un des principaux défis pour les futures recherches en Supply Chain 4.0 est donc de mener des enquêtes empiriques ainsi que des analyses de données à grande échelle permettant d'expliquer l'intersection théorique rarement constatée entre l'adoption des technologies numériques et la supply chain, ainsi que l'impact empirique des outils technologiques sur la supply chain en matière de la performance, l'agilité, la résilience et de la visibilité. De plus qu'il est aussi indispensable d'approfondir les recherches théoriques dans ce domaine en raison de l'absence des théories expliquant le phénomène, ainsi que des modèles conceptuels théoriques dont les chercheurs peuvent s'inspirer pour aboutir à des recherches surtout empiriques.



CHERKAOUI Abdelghani
Ingénieur, Ph.D

Professeur à l'Ecole Mohammedia d'Ingénieurs
Rabat, Maroc

Robots et Cobots

Un système cobotique comprend un robot et un humain collaborant en synergie pour réaliser une tâche dans le contexte d'un poste de travail. Afin de caractériser un système cobotique, il est nécessaire de s'intéresser à l'opérateur humain, à la tâche, aux interactions homme-système et au robot. Nous présentons d'abord une caractérisation des systèmes cobotiques, puis nous proposons une approche méthodologique et ergonomique pour introduire des systèmes cobotiques sur des postes de travail. Elle est basée sur plusieurs étapes de complexité croissante : Analyse de l'activité, conception de base, conception détaillée et réalisation. Une attention particulière est accordée aux facteurs humains et aux interactions homme-système. Différents niveaux de simulation sont nécessaires pour assurer la flexibilité et l'adaptabilité. Des cas d'utilisation d'un poste de travail cobotique illustreront cette approche.

DESIGN D'UN SYSTÈME COBOTIQUE CENTRÉ SUR LE FACTEUR HUMAIN

Les robots font appel à des domaines d'expertises couvrant la mécanique, l'automatique, l'informatique, les mathématiques, la vision, l'IA, la CAO, la mécatronique, la cognitive, etc. grâce à l'évolution de ces disciplines, les robots sont passés de machines stupides, grandes et dangereuses à une variété d'appareils intelligents qui utilisent des capteurs et des commandes sophistiquées pour réaliser un nombre toujours croissant de nouvelles applications.

Les robots d'aujourd'hui travaillent dans l'espace, sous l'eau, aident à la chirurgie avancée, font de la recherche en génomique et pharmaceutique, assemblent et testent l'électronique grand public, cueillent des fruits et se déplacent d'un travail à l'autre. Les robots de demain prendront-ils soin de nous à la maison?

Pour l'histoire, Les premiers automates (Horloges et fontaines) ont fait leur apparition entre le IX^{èmes} et le XIII^{èmes} siècle: en l'an 809, le sultan Haroun Al-Rachid offre à Charlemagne le premier automate mécanique (horloge) ; Ismail Al-Jazari, l'inventeur des premiers robots de l'Histoire qui à la fin du 12^{ième}, a conçu Des pompes à eau en passant par des automates musicaux, les extraordinaires machines étaient pratiques ou ludiques, et ravissaient paysans et rois. Un autre engin fantastique d'Al-Jazari intéresse tout particulièrement les historiens des sciences, car nombre d'entre eux pensent qu'il s'agit du premier « robot » programmable de l'histoire. À l'image d'une boîte à musique, cette invention en forme de bateau transportant à son bord quatre « musiciens » (un harpiste, un flûtiste et deux joueurs de tambour) a été conçue pour jouer de la musique à des fins de divertissement. Le mécanisme animant les joueurs de tambour pouvait être programmé pour jouer différents rythmes.

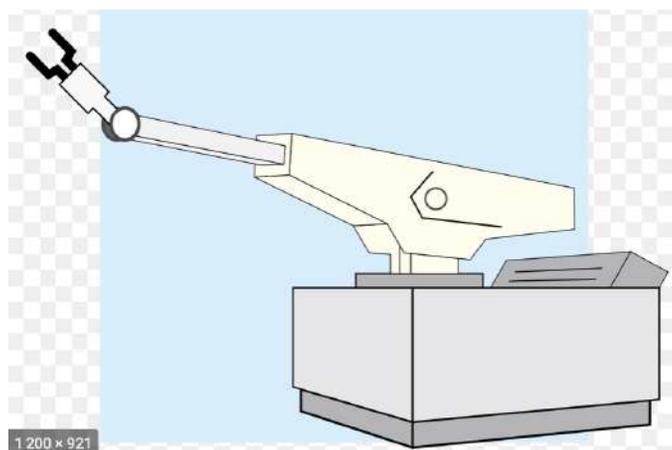
1/ Définitions d'un robot

- 1.1. Selon la norme internationale ISO 8373, un robot industriel est un manipulateur multi-application
- 1.2. reprogrammable commandé automatiquement, programmable sur trois axes ou plus, qui peut être fixé sur place ou mobile, destiné à être utilisé dans des applications d'automatisation industrielle. Selon cette même norme, un manipulateur est une « machine dont le mécanisme est généralement composé d'une série de segments, articulés ou coulissants l'un par rapport à l'autre, ayant pour but de saisir et/ou de déplacer des objets (pièces ou outils) généralement suivant plusieurs degrés de liberté ». La partie extrême du manipulateur qui porte l'outil (préhenseur, pince de soudage, etc.) s'appelle l'effecteur du robot.
- 1.3. Appareil automatique capable de manipuler des objets ou d'exécuter des opérations selon un programme fixe ou modifiable.» Petit Larousse
- 1.4. Un manipulateur reprogrammable multifonctionnel conçu pour déplacer des matériaux, des outils, des pièces ou des composants spécialisés à travers une série de mouvements programmés pour effectuer une tâche précise. RIA Institut de robotique d'Amérique, 1979
- 1.5. A robot is a machine designed to execute one or more tasks repeatedly, with speed and precision." whatis.com
- 1.6. A robot is a computer that can sense, reason, and act on the physical world," Brian Carlisle
- 1.7. Le mot cobot désigne une catégorie de robots (non autonomes) « dédiés à la manipulation d'objets en collaboration avec un opérateur humain ». Plus généralement, il peut s'agir d'un système automatisé impliqué dans des tâches ou relations cobotiques. Colgate et Peshkin le définissent comme « robot conçu pour une interaction directe avec un opérateur humain, dans un espace de travail partagé » (wikipédia)

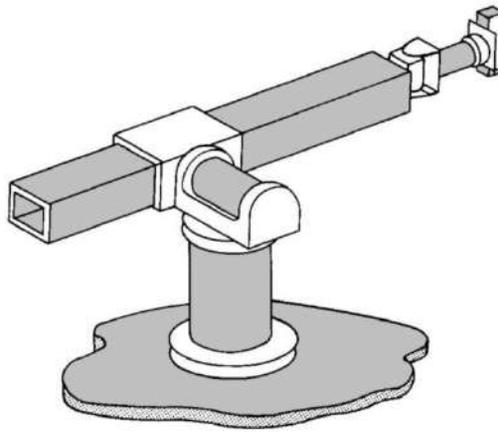
2/ Chronologie robotique au XX^{ème} siècle

- 2.1. 1921 Karel Capek (écrivain tchèque, 1890-1938) invente le mot «Robot» (Robota, travail forcé, tâche pénible, servitude). La pièce RUR, les Robots Universels de Rossum décrit la révolte de robots !
- 2.2. 1941 Isaac Asimov, invente le terme «Robotique», prédit l'augmentation de la robotique industrielle. Il recadre les robots en tant que machine servant l'homme et non dangereuse.
- 2.3. 1947 premier manipulateur électrique télé-opéré.
- 2.4. 1954 premier robot programmable.
- 2.5. 1961 apparition d'un robot sur une chaîne de montage de General Motors.
- 2.6. 1961 premier robot avec contrôle en effort.
- 2.7. 1963 utilisation de la vision pour commander un robot.
- 2.8. Les robots mobiles, les robots volants, les robots sous-marins, les bipèdes, les hexapodes, les quadripodes, les micros robots, les nano robots, les robots sériels, les robots parallèles, les robots à câbles, les robots industriels, les robots hospitaliers, les robots d'exploration spatiale, les robots à usage de sécurité et militaire, les robots de services, les humanoïdes

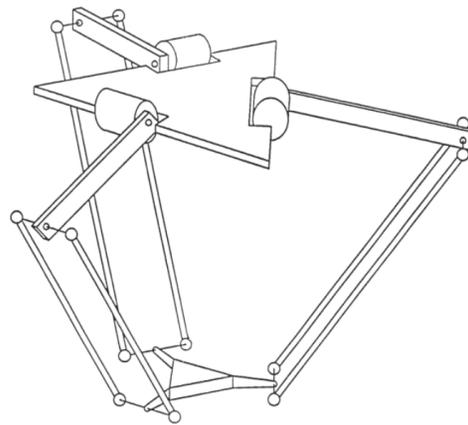
Exemples de robots qui ont eu beaucoup de succès



Robot Unimate

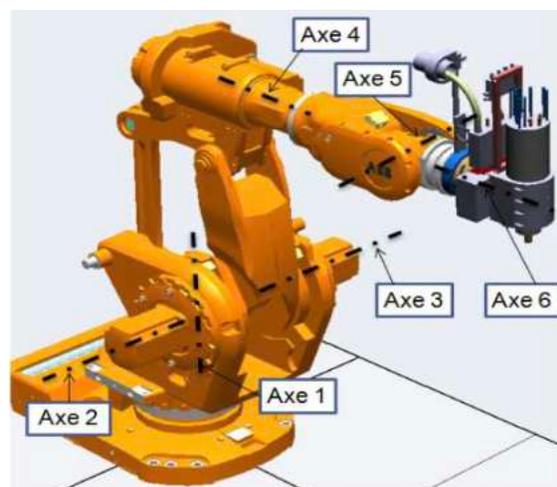


Robot Stanford



Robot parallèle

3/ Modèle mathématique d'un robot



La conception et la commande des robots nécessitent le passage par certains modèles mathématiques, tels que les modèles de transformation entre l'espace opérationnel et l'espace articulaire (Les modèles géométriques direct et inverse, les modèles cinématiques direct et inverse, les modèles dynamiques définissant les équations du mouvement du robot, qui permettent d'établir les relations entre les couples ou forces exercés par les actionneurs et les positions, vitesses et accélérations des articulations.

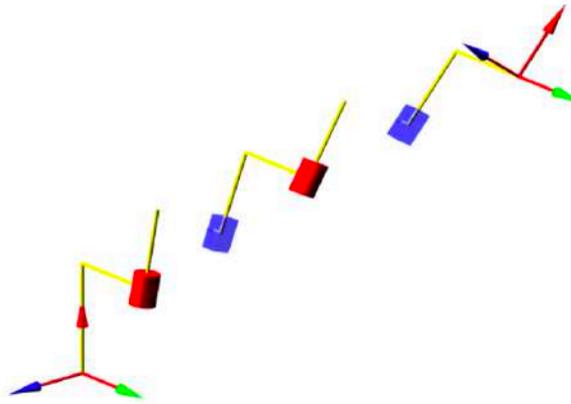
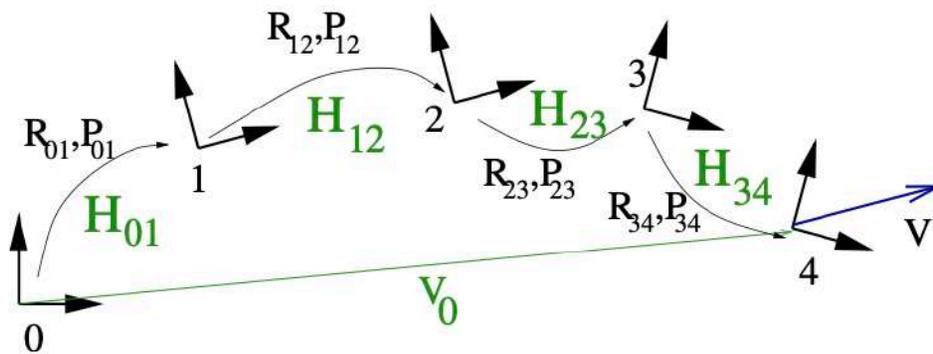


Figure: Chaîne cinématique RPRP

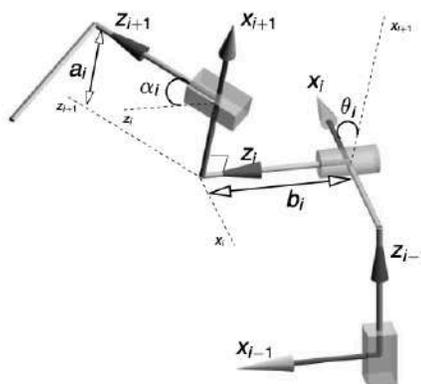


3.1. Le Modèle Géométrique Direct :

$$X = F(q_1, q_2, \dots, q_i, \zeta)$$

Le formalisme mathématique fait appel aux matrices de transformation homogènes de dimension (4x4) et, en particulier les matrices de transformation de Denavit-Hartenberg :

$$H_i = \mathcal{R}(\theta_i, z_i) \cdot \mathcal{T}(b_i, z_i) \cdot \mathcal{T}(a_i, x_{i+1}) \cdot \mathcal{R}(\alpha_i, x_{i+1})$$



$$H_{0n} = H_0 \cdot H_1 \dots H_n$$

Il faut résoudre l'équation $H_{0n} = X = [Tx, Ty, Tz, Rx, Ry, Rz]$

Pour la position on aura :

$$T_x = H_{0n}^{-1} \cdot X$$

$$\mathbf{T}_y = \mathbf{H}_{0n2,4}$$

$$\mathbf{T}_z = \mathbf{H}_{0n3,4}$$

Pour l'orientation on aura Rx, Ry, Rz

Sachant que :

$$R = \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \psi & -\cos \theta \sin \psi & \sin \theta \\ \sin \phi \sin \theta \cos \psi + \cos \phi \sin \psi & \cos \phi \cos \psi - \sin \phi \sin \theta \sin \psi & -\sin \phi \cos \theta \\ -\cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi & \cos \phi \sin \theta \sin \psi + \sin \phi \cos \psi & \cos \phi \cos \theta \end{pmatrix}$$

3.2. Le Modèle Géométrique Inverse

Déterminer: $[\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \dots, \mathbf{q}_n] = F(\mathbf{X}, \zeta)$

1 Développer l'ensemble des équations possibles

$$\begin{aligned} H_X &= H_{0,1} \cdot H_{1,2} \cdot H_{2,3} \cdot H_{3,4} \cdot H_{4,5} \cdot H_{5,6} \\ H_{1,0} \cdot H_X &= H_{1,2} \cdot H_{2,3} \cdot H_{3,4} \cdot H_{4,5} \cdot H_{5,6} \\ H_{2,1} \cdot H_{1,0} \cdot H_X &= H_{2,3} \cdot H_{3,4} \cdot H_{4,5} \cdot H_{5,6} \\ H_{3,2} \cdot H_{2,1} \cdot H_{1,0} \cdot H_X &= H_{3,4} \cdot H_{4,5} \cdot H_{5,6} \\ H_{4,3} \cdot H_{3,2} \cdot H_{2,1} \cdot H_{1,0} \cdot H_X &= H_{4,5} \cdot H_{5,6} \\ H_{5,4} \cdot H_{4,3} \cdot H_{3,2} \cdot H_{2,1} \cdot H_{1,0} \cdot H_X &= H_{5,6} \end{aligned}$$

$$\text{avec } H_{i,j}^{-1} = H_{j,i}$$

3.3. Le Modèle Différentiel Direct

$$d\mathbf{X} = \mathbf{J}(\mathbf{q})d\mathbf{q}$$

$$\Delta\mathbf{X} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\Delta\mathbf{q}$$

$$\Delta\mathbf{q} = \mathbf{J}^{-1}\Delta\mathbf{X}$$

Le calcul de la matrice jacobienne J peut se faire par dérivation, $\mathbf{X} = \mathbf{f}(\mathbf{q})$, à partir de la relation suivante :

$$\mathbf{J}_{ij} = \partial \mathbf{f}_i(\mathbf{q}) / \partial \mathbf{q}_j \text{ où } \mathbf{J}_{ij} \text{ est l'élément } (i, j) \text{ de la matrice jacobienne } \mathbf{J}.$$

Pour éviter les singularités et les obstacles une solution consiste à augmenter le nombre de degrés de liberté du mécanisme. Il est courant d'utiliser dans ce cas la pseudo-inverse \mathbf{J}^+ de la matrice \mathbf{J} : $\Delta\mathbf{q} = \mathbf{J}^+ \Delta\mathbf{X}$ ou de façon plus générale, on aura

$$\Delta\mathbf{q} = \mathbf{J}^+ \Delta\mathbf{X} + \alpha(\mathbf{I} - \mathbf{J}^+ \mathbf{J}) \nabla \Phi$$

$\Phi(\mathbf{q})$ une fonction scalaire définie positive de l'état \mathbf{q} du mécanisme et soit $\nabla \Phi$ le gradient de cette fonction

$$\text{en } \mathbf{q} : \nabla \Phi = [\partial \Phi / \partial q_1 \dots \partial \Phi / \partial q_n]^T$$

3.4. Modèle statique

Le modèle statique décrit les couples et forces τ que doivent fournir les actionneurs d'un robot pour que l'organe terminal puisse exercer un effort statique \mathbf{F} sur son environnement : $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}^T \mathbf{F}$

3.5. Modèle dynamique

Forme générale des équations dynamiques :

$$\boldsymbol{\Gamma} = \mathbf{A}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{Q}(\mathbf{q}) + \mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{H} \text{ signe}(\dot{\mathbf{q}})$$

- $\boldsymbol{\Gamma}$ efforts actionneurs
- A matrice d'inertie
- C efforts centrifuges et de coriolis

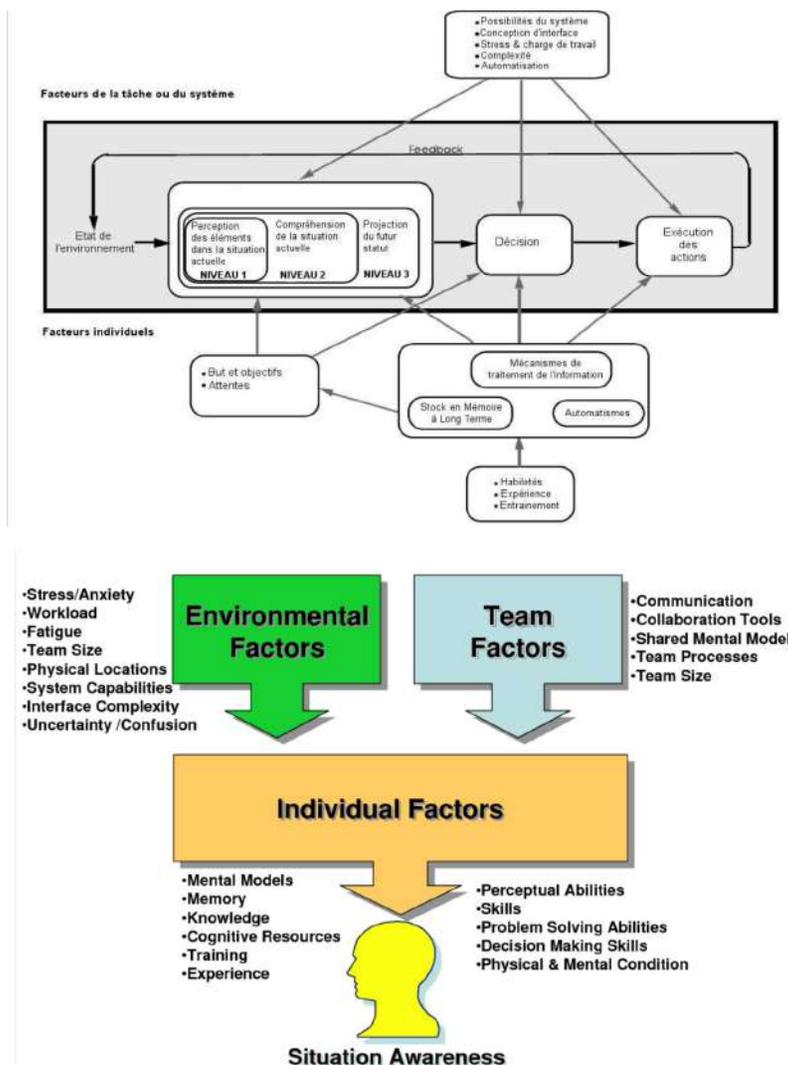
- Qcouple/forces de gravité
- Frottements visqueux
- H frottements secs

4/ Modèle cognitif de l'opérateur

Le concept de conscience de la situation a d'abord été mis en avant par les pilotes militaires afin de qualifier leur capacité d'adaptation aux contraintes de leur environnement de travail. Rasmussen, [2000].

"La conscience de la situation est fondée sur l'intégration des connaissances résultant d'évaluations récurrentes de la situation".

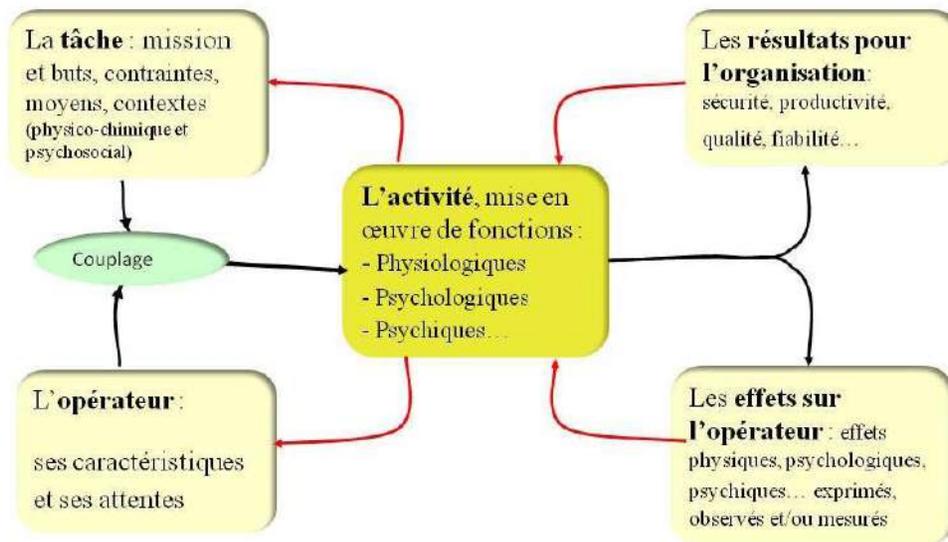
Dans ce cadre, le modèle cognitif proposé par Endsley (1995) est certainement l'un des plus complets quant aux stratégies et processus cognitifs en jeu. Au cœur du modèle, nous trouvons une représentation mentale symbolique ou conceptuelle dans laquelle circulent continuellement des informations ascendantes et des connaissances descendantes :



modèles de la conscience de la situation (endsley)

5/ Modèle d'analyse d'une situation de travail

L'analyse d'une situation de travail consiste à analyser l'activité de travail des opérateurs dans un lieu donné. L'activité de travail est composée de plusieurs phases de travail et chaque phase est caractérisée par un ensemble de tâches qui exposent, chacune, à des risques bien individualisables.



6/ Systèmes cobotiques



Pendant de nombreuses années, les ingénieurs ont essayé de concevoir des robots pour aller le plus vite possible dans des applications allant du soudage par points à l'emballage de divers produits.

Au fur et à mesure on a développé de meilleurs mécanismes et contrôles, les robots pourraient atteindre des vitesses d'outil de 10 mètres par seconde, ce qui est terrifiant et très dangereux.

Par conséquent, les robots devaient être isolés des personnes, car toute collision risquerait de blesser gravement les opérateurs.

Cette séparation forcée entre les robots et les humains nécessitait beaucoup d'ingénierie, d'espace au sol et de dépenses chaque fois que quelqu'un voulait installer un robot.

Historiquement, les robots et les gens n'étaient jamais mélangés sur la même ligne de fabrication. Cependant, dans de nombreuses applications en usine, la plupart des robots n'utilisaient pas leur vitesse maximale.

De nombreuses cellules de travail robotisées ont un temps de cycle de 5 à 10 secondes, et les robots se déplacent à un ou deux mètres par seconde, et non à 10 mètres par seconde.

Pour un robot donné, pour réduire le temps de cycle et la trajectoire, il faut quatre fois plus d'énergie, et nous ne voulons pas faire fonctionner des robots à des vitesses qui gaspillent de l'énergie.

Par conséquent, il y a quelques années, on a commencé à concevoir une nouvelle génération de robots dans le but d'essayer de les rendre aussi efficaces et sûrs que possible.

On s'attend à ce que cette prochaine génération de robots puisse travailler à une vitesse d'un à deux mètres par seconde à l'échelle humaine. Il sera également possible de heurter une personne sans la blesser. Nous appelons ces nouveaux robots plus sûrs, robots collaboratifs.

Dans cette communication, vous allons découvrir la grande variété de robots et d'applications de robots en cours de développement.

Nous allons apprendre les normes de sécurité qui s'appliquent aux robots et aux applications robotisées. Nous allons voir comment concevoir des cellules de travail sûres pour les robots traditionnels, puis nous introduirons des robots collaboratifs. Nous expliquerons les nouvelles normes de sécurité pour les robots collaboratifs et comment tester ces nouveaux robots émergents pour nous assurer qu'ils répondent aux normes.

Nous expliquerons également quelques techniques de conception clés pour réduire les forces de collision dans les robots collaboratifs.

Ces techniques de conception permettent aux développeurs de créer des robots collaboratifs qui pourraient déplacer une charge utile donnée plus rapidement tout en restant en sécurité en cas de collision avec la personne.

Nous allons ensuite montrer quelques exemples simples et très élaborés d'applications robotiques collaboratives. Ils vous donneront une idée des différentes cellules de travail de robot collaboratif.

Enfin, nous fournirons quelques lignes directrices sur la conception d'applications robotisées collaboratives.



BOUAMI Driss

Ingénieur, Docteur d'Etat

Président du Directoire de l'Ecole Marocaine
d'Ingénierie
Rabat, Maroc

Lean Management 4.0

L'intervention porte sur les applications des technologies de l'industrie 4.0 (big data, data science, cloud computing, intelligence artificielle, simulation numérique, RFID, réalité augmentée et virtuelle etc) dans le domaine du lean management notamment en ce qui concerne le Just in time et ses différentes méthodes, le jidoka, la value stream management, la continuité des flux, la standardisation, la stabilité des flux, la suppression des mudas, muris et muras, le kaizen etc.

LEAN 4.0

Le lean est une approche visant à réduire les gaspillages à tous les niveaux et à éliminer les activités sans valeur ajoutée.

L'industrie 4.0 est un ensemble de technologie visant la digitalisation de l'entreprise, l'interconnexion de ses différentes entités, le traitement intelligents des données qui y sont collectée pour une amélioration des performances de l'entreprise.

On constate que les deux approches ont le même objectif: l'amélioration de performance de l'entreprise. Il est évident que bien appliquées et bien conjuguées ces deux approches vont ensemble améliorer plus les performances. On estime que:

si lean est appliqué seul: on obtient une amélioration de performance de 10 à 20%

si l'I4.0 est appliquée seule on obtient une amélioration de performance de 10 à 15%

si le lean et l'I4.0 sont appliqués ensemble on obtient une amélioration de performance de 20 à 40%

Lean management:

Le Lean est un ensemble intégrant de nombreux principes, outils et techniques dans le but de réduire toutes les sources d'inefficacité des chaînes de valeurs tout en comblant les écarts entre la performance réelle et les exigences des clients et actionnaires.

Cette approche est basée sur les trois blocs suivants (Figure 1):

- les 5 principes du lean
- la maison du lean
- les 3M

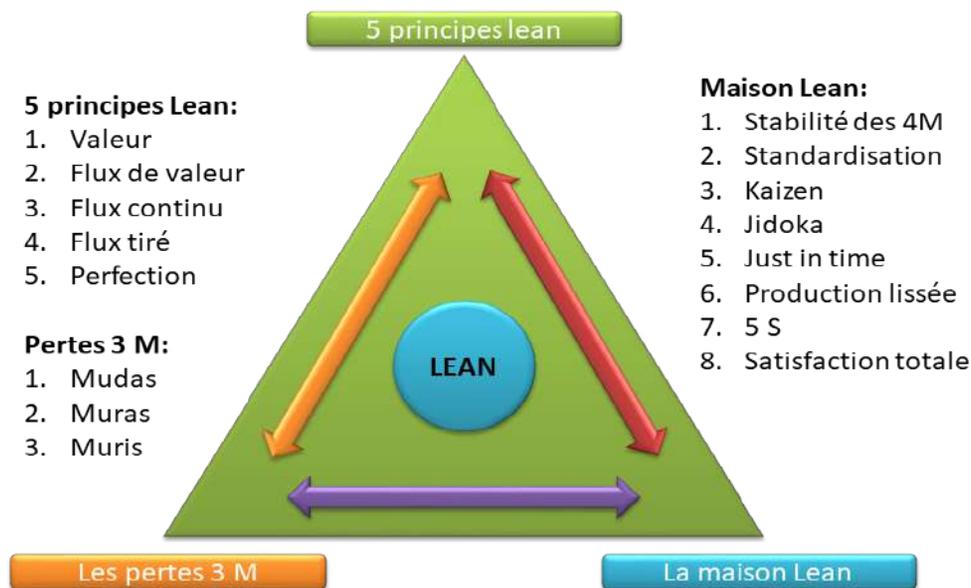


Figure 1: Déterminants du lean management

5 principes lean:

Cette conceptualisation a donné naissance à 5 principes fondateurs du Lean (Figure 2):



Figure 2: Les cinq principes du Lean management

• La Valeur (valeur ajoutée) :

« La valeur est ce que le client est prêt à payer. Il est primordial de découvrir les besoins réels ou latents du client aussi bien en termes de produit que des services associés. Les tendances sont bel et bien à plus d'individualisation, de personnalisation dans la consommation, vers un plus large choix de gammes de produits et vers une bonne expérience client. La Cartographie du flux de valeur : Pour réaliser le produit et ses services associés, il faut créer des processus avec des flux, physiques et d'information qu'il importera d'optimiser en termes de temps coût et qualité. Pour cela, il convient notamment d'identifier les activités à valeur ajoutée et celles qui ne le sont pas. Ces dernières doivent être supprimées ou au moins optimisées si elles sont utiles. Il importe aussi de supprimer tous les gaspillages (mudas, muris et muras) autant que possible sinon en réduire l'impact négatif.

- **La Production à flux continu :**

Le flux de valeur doit être continu. Il ne doit pas s'arrêter ou ralentir car cela induit des pertes en temps et en coût. Les attentes et les stocks, constituent des pertes d'efficacité qu'il importe d'éliminer. L'idéal serait un flux unitaire ou one piece flow où des pièces de référence différentes peuvent se suivre selon la demande. Il est évident que cela exige notamment une maîtrise et stabilité des 5M et un changement rapide de réglages et d'outils (ce qui est obtenu grâce à la méthode SMED et aussi grace aux poka yoke.

- **Mettre en place le Flux Tiré:**

Les stocks sont considérés parmi les plus gros gaspillages de tout processus de production. L'objectif d'un système à flux tiré consiste à ne produire que lorsque le client (interne ou externe) commande. Cela exige que les matériaux et les informations requis sont disponibles pour une bonne fluidité du travail. Cela exige aussi une bonne maîtrise et stabilité des 5M.

- **Chercher la Perfection (améliorer, s'améliorer en permanence) :**

Pour satisfaire le client et lui apporter toute la valeur qu'il cherche qu'il soit interne ou externe, il faut améliorer sans cesse (amélioration continue). Pour cela, on exploite la démarche kaizen qui est basée d'une part, sur le gemba (identification des problèmes sur le terrain) et, d'autre part sur des méthodes de résolution de problème (8D, DMAIC, 3A, CSP etc)

La maison du lean:

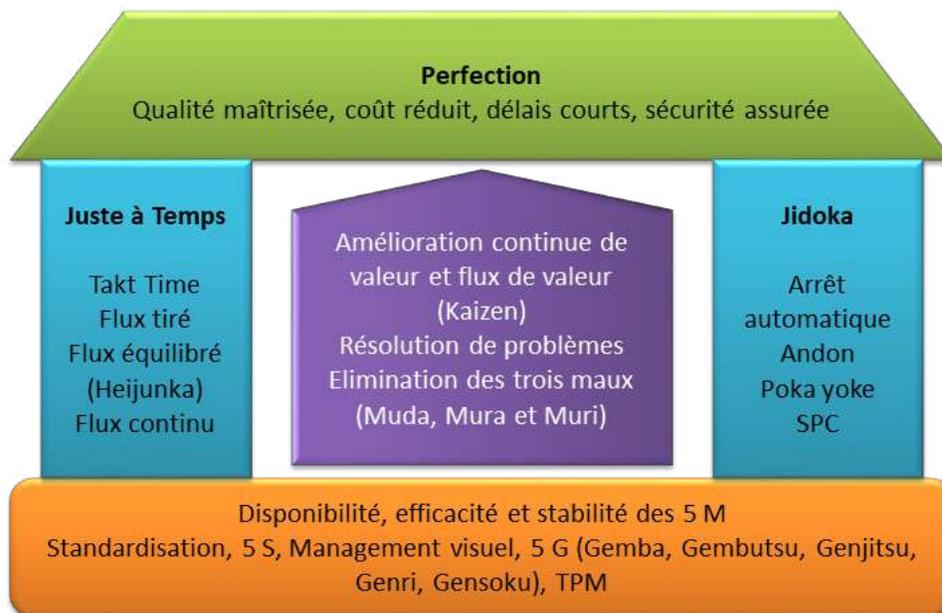


Figure 3: Maison lean ou TPS house

Le lean management est souvent représenté sous la forme d'une maison constitué d'une fondation et de deux piliers principaux (Figure 3):

- Le Juste-A-Temps
- Le Jidoka ou autonomation

- **Juste-A-Temps**

C'est une démarche "pull" qui consiste à ne produire que ce qui demandé au moment où c'est demandé. Les méthodes et outils principaux utilisés par cette démarche sont les suivants:

- Le Takt Time : la production est organisée pour s'ajuster à la cadence requise pour répondre à la demande
- Le Heijunka ou lissage de la production : le lissage permet d'éviter les effets "coups de fouet" des commandes importantes ou creux de charge
- Le pièce à pièce : la production ne se fait pas par batch mais en flux continu unitaire
- Le Kanban qui permet de tirer un flux de production de l'aval vers l'amont

- Le changement rapide d'outils (SMED)

- **Jidoka:**

Le Jidoka consiste à détecter l'anomalie avant qu'elle ne donne lieu à une non conformité ou avant qu'elle ne se propage vers l'aval. Elle consiste à arrêter automatiquement la machine et à donner un signal à l'opérateur qui doit alors intervenir pour réparer rapidement et trouver la cause du problème pour l'éliminer. L'homme dispose ainsi des informations pour agir rapidement et efficacement.

Les méthodes et outils associés au Jidoka sont les suivants:

- L'Andon : la machine s'arrête dès le premier défaut afin d'éviter de dégrader trop de pièces et se signale elle-même à l'opérateur.
- Le Poka-Yoke ou détrompeur : ce sont des techniques et moyens permettant d'éviter l'erreur de l'opérateur ou la manifestation d'un problème (d'exécution ou de sécurité)
- les méthodes d'analyse et résolution de problèmes

- **Amélioration des processus:**

L'amélioration peut être:

- incrémentale: Il s'agit du Kaizen est une démarche visant l'amélioration de processus de façon progressive à petits pas avec la participation du personnel de l'entreprise.
- De rupture: C'est le Kaikaku qui introduit un saut qualitatif important et une modification importante dans le processus. Il exige plus d'investissement et des compétences plus élevées.

L'amélioration est d'autant meilleur qu'elle part du terrain et reste attaché au terrain au niveau de l'identification et caractérisation des problèmes et au niveau des solutions à mettre en oeuvre. C'est Le gemba, Genchi Genbutsu et le Gemba.

- **Standardisation du travail:**

Elle consiste à établir les bonnes pratiques dans des standards élaborés, vérifiés et validés et veiller à les appliquer scrupuleusement pour la réalisation des opérations concernées. La standardisation contribue l'amélioration de la réalisation des opérations et partant à la stabilité des processus.

- **Stabilité du système:**

Le système doit être stable en ce sens qu'il demeure réactif aux variations (agilité) et qu'il y réponde de façon adaptée (robustesse) afin d'éviter qu'elle ne donne lieu à des conséquences indésirables. La stabilité concerne tous les processus à travers la stabilité de leur 5M (men, matrial, machine, methods, media). Elle est synonyme de maîtrise.

- **Démarche 5 S:**

La démarche consiste en cinq blocs d'actions permettant de mettre en place les conditions de fonctionnement de base des ateliers (Tableau 1).

| Mot japonais | Actions associées |
|--------------|---|
| Seiri | Trier les objets, garder ceux qui sont utiles, évacuer ceux qui ne le sont pas et les traiter (recyclage, revente, destruction etc). |
| Seiton | Ranger, classer de manière à limiter les déplacements physiques, repérer facilement les objets ou le port d'objets lourds, optimiser l'utilisation de l'espace. |
| Seiso | Nettoyer et éliminer les sources de salissure. |
| Seiketsu | Assurer un management visuel de bon aloi |
| Shitsuke | Être rigoureux, appliquer les quatre opérations précédentes et les maintenir dans le temps. Il faut donc standardiser et appliquer les standards. |

Tableau 1: Méthode des 5 S

Les 5S ont été inventés, au début, pour les ateliers, mais ils s'appliquent aussi bien dans les services et les bureaux.

Les gaspillages 3M: Mudas, muras et muris

1.1. A – Les Mudas

Les Mudas sont des éléments du processus de production qui n'apportent pas de valeur particulière au client, et qui sont donc superflus et à éliminer afin d'éviter de gaspiller des ressources inutilement. Les Mudas sont au nombre de sept.

1. Surproduction
2. Surstockage ou Stocks Inutiles
3. Transports et Déplacements Inutiles
4. Surprocessing ou traitements inutiles
5. Mouvements Inutiles
6. Erreurs, Défauts et rebuts
7. Temps d'Attente et Délais

1. Surproduction

- Produire plus que la quantité demandée par le client.
- Produire avant la date de livraison demandée.
- Réaliser une qualité supérieure à ce qui est voulu par le client

Exemple: un repas dépassant ce que peuvent consommer les convives.

2. Surstockage ou Stocks Inutiles

Stocks de matière première, de produits semi finis, d'en-cours et de produit fini dépassant le besoin. Tout ce qui n'est pas indispensable à la réalisation de la tâche, au bon moment.

Exemple de surstockages:

stocks de pièces de rechange réputées non mouvementées

3. Transports et Déplacements Inutiles

Transport de produits ou d'hommes pouvant être longs et/ou pouvant être évités

Exemples de transports et déplacements inutiles :

Transport de produits entre postes éloignées les uns des autres et dont l'implantation n'a pas été optimisée.

4. Traitements Inutiles ou Surprocessing

Faire plus que ce qui nécessaire pour satisfaire le client

Exemples: Trop de contrôles dans le processus de fabrication.

Utilisation d'opérateurs plus nombreux que nécessaires.

5. Mouvements Inutiles

Mouvement de personnes inutile et qui n'apporte pas de valeur au client en raison d'une mauvaise ergonomie, de mauvais rangement, désordre, désorganisation.

Exemples de mouvements inutiles : Recherche de pièces, matière, outils situés en des endroits éloignés.

6. Erreurs, Défauts et Rebuts

Défauts qui nécessitent une retouche, une réparation, un contrôle supplémentaire, une mise au rebut ou un déclassement ou un retour au fournisseur

Exemples d'erreurs, défauts et rebuts : Erreurs dans la saisie de données, casses de produits, accidents

7. Temps d'Attente

C'est l'attente de la disponibilité des 5M

Exemples de temps d'attente : Opérateurs inactifs lors de panne machine; Attentes pour épuiser un stock avant de

changer de lot

7.1. B – Muri

Le terme japonais Muri signifie « surcharge » et implique que les machines ou les employés sont surexploités, risquant ainsi d'entraîner des dysfonctionnements, des accidents de travail, des ralentissements au niveau du flux de production... La gestion Lean peut ainsi intervenir en favorisant un cadre de travail sécuritaire et en instaurant un ensemble de standards afin d'éviter ce type de surcharge.

7.2. C – Mura

Enfin, Mura est synonyme d'irrégularité, c'est-à-dire les périodes où les employés ou les machines doivent être opérationnels de manière intensive afin de répondre à un pic de demandes ou respecter certains critères de performance. Les flux de travail ne sont pas réguliers et il y a donc des zones d'attente et de travail intensif et cela a un impact sur le fonctionnement harmonieux de l'entreprise.

Les 5P:

L'approche lean est basée aussi sur les « 5P »: le Produit, le Processus, le Personnel, la Performance et le Pilotage.

1. Le Produit:

ce premier point consiste en la conception au plus juste par l'entreprise d'un produit ainsi qu'en une implantation la plus optimisée possible. L'ensemble de la conception, mise en production et commercialisation doit être articulé ensemble pour garder une cohérence et rationaliser les coûts.

2. Le processus:

maîtrise de procédés, amélioration des performances, réduction des temps de changement de séries et verrouillage de processus. En fait, cet aspect de la philosophie Lean met l'accent sur la maîtrise opérationnelle.

Le Personnel: maintenir un espace de travail ordonné et efficace (5S). S'organiser en équipes autonomes.

3. La Performance:

résoudre les problèmes (démarche de résolution de problèmes : DMAIC, 5 pourquoi, 8D...) , mesurer le progrès (communiquer les résultats qu'ils soient bons ou mauvais) et motiver le personnel.

4. Le Pilotage:

décloisonner au maximum l'entreprise, formaliser les relations internes (affichage management visuel), passer dans une (juste à temps) et réviser les processus (ré-ingénierie des processus).

Intégration lean- technologie 4.0

Aujourd'hui le monde est caractérisé par l'utilisation de deux grandes disciplines: le lean management et l'industrie 4.0. Il est naturel de se poser la question d'intégration des deux. Etant donné que l'industrie 4.0 est surtout un ensemble de technologies visant à mieux réaliser les processus de l'entreprise, il est logique d'étudier l'impact de ces technologies sur la démarche lean et comment en faire des leviers de performance. Or, la démarche lean est basée sur les approches suivantes:

- les 5 principes
- les pertes 3 M
- la maison lean

Relation entre les cinq principes du Lean et I4.0

Les cinq principes lean sont les suivants:

- Valeur
- Flux de valeur
- Flux continu
- Flux tiré
- Perfection

Valeur:

En approche lean manufacturing, le fabricant doit créer la valeur pour le client en lui fournissant un produit satisfaisant ses besoins selon toutes les dimensions: qualité fonctionnelle, temps de livraison, coût du produit et services associés. L'entreprise doit être en mesure de connaître fidèlement et précisément les attentes actuelles du client et même les anticiper (approche proactive). Pour cela,

l'entreprise 4.0 exploite l'IoT, les Big Data et le Cloud computing. Grâce au Big Data et aux informations en temps réel qui sont partagées par les clients avec différents sources (telles que les systèmes informatiques et les produits interconnectés intelligents), l'entreprise sera en mesure de déterminer les besoins des clients, de prédire leur demande future, et de révéler les nouvelles tendances ce qui lui permet d'arriver plus rapidement sur le marché. Il faut développer le marketing et la CRM afin de mieux cerner les clients et leurs besoins. Pour créer une véritable valeur et la pérenniser, l'entreprise doit fournir un package au client composé du produit et de ses services associés. Elle doit permettre au client de vivre une expérience client satisfaisante à tout égard depuis l'approche, l'achat jusqu'à la fin de vie en passant par l'exploitation du produit.

Le marketing digital désigne toutes les techniques marketing utilisées sur des supports et canaux digitaux pour promouvoir des produits et services. Dans le marketing digital ressort une notion essentielle, l'interactivité notamment via internet. Pour mieux définir les besoins des clients et, partant, la valeur qui doit leur être apportée, plusieurs méthodes sont exploitées: le CRM (Customer Relationship Management), la VOC (Voice Of Customer) et le diagramme de Kano.

Le CRM ou gestion de la relation client (Customer Relationship Management):

La gestion de la relation client (GRC), ou Customer Relationship Management (CRM) est l'ensemble des outils et techniques destinés à capter, traiter, analyser les informations relatives aux clients et aux prospects, dans le but de les fidéliser en leur offrant le meilleur service. C'est un processus permettant de traiter tout ce qui concerne l'identification des clients, la constitution d'une base de connaissance sur la clientèle, l'élaboration d'une relation client et l'amélioration de l'image de l'entreprise et de ses produits/services auprès du client. La GRC doit être envisagée comme une stratégie d'entreprise où deux buts essentiels sont poursuivis : augmenter les bénéfices et accroître la satisfaction du client. Conquérir un prospect coûte beaucoup plus cher que de fidéliser un client !

Les différentes fonctions de la CRM sont portées par la figure 4:

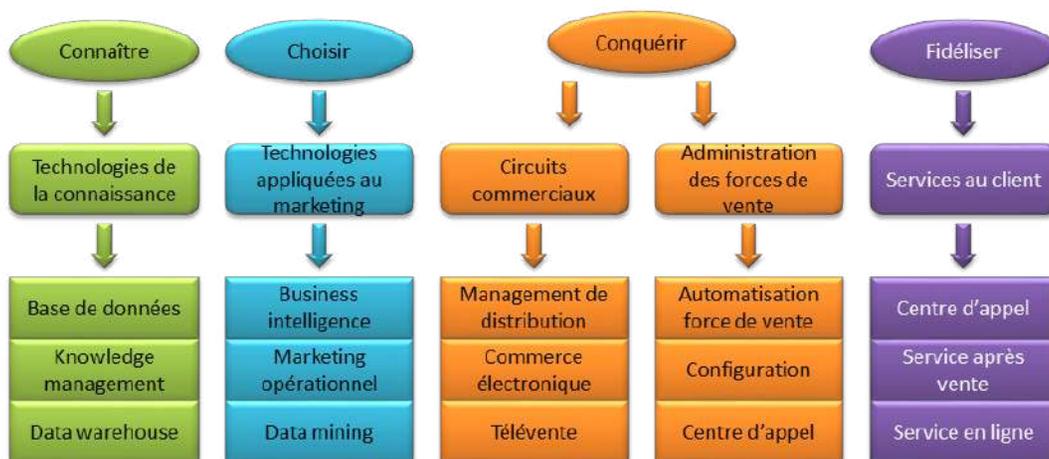


Figure 4: Fonctions de la CRM

Le Voice of Customer :

Pour mieux satisfaire les besoins des clients, Il est nécessaire d'écouter ceux-ci pour déterminer fidèlement et précisément leurs attentes. Les informations et données concernant les utilisateurs sont collectées via les smartphones, les médias sociaux, la navigation internet etc. L'écoute client permet de personnaliser les produits. Les technologies présentées ci-après améliorent la relation clients, recueillent des informations sur les tendances, besoins et permettent le développement de nouveaux produits.

Le Voice of Customer (VoC ou Voix du client en français) est une méthodologie de collecte des besoins et ressentis du client vis-à-vis d'un produit ou d'un service, et ce, à chaque étape de son parcours d'achat. Cette méthodologie pourrait

être informatisée et profiter de l'interconnection, de l'identification du client, de l'IoT et de questionnaires automatisés.

Les données peuvent être collectées par le biais d'entretiens téléphoniques par exemple mais aussi d'avis publiés sur les réseaux sociaux ou de messages envoyés au SAV (Figure 5).

Elles font l'objet d'une analyse par l'entreprise avec comme objectif de déployer des corrections qui augmenteront la satisfaction des clients et prospects ainsi que le chiffre d'affaires.

Elles peuvent être très volumineuses (big data) et nécessiter leur stockage et analyse (cloud computing) afin d'identifier les attentes des clients et leur tendances au moyens d'algorithmes adaptés dont ceux de l'intelligence artificielle. Ainsi, là où les sondages se caractérisaient par un décalage temporel important entre l'expérience du client, la collecte de l'avis et son analyse, la VoC 4.0 propose une approche en quasi temps réel adaptée au numérique.

De plus, elle permet une analyse holistique de chaque point de contact et une identification fine de ce qui contente le visiteur autant que de ce qui le déçoit.

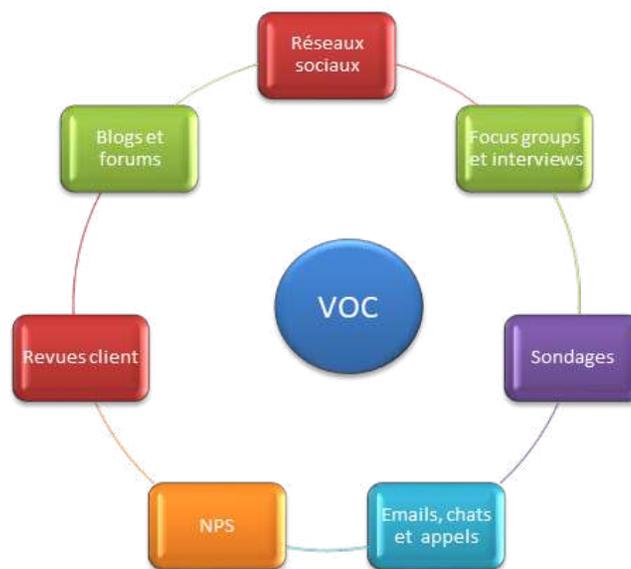


Figure 5: Les méthodes de VoC

Cartographe la chaîne de valeur:

Après avoir défini la valeur du point de vue du client, il est nécessaire de concevoir et réaliser un processus capable de fournir le produit désiré selon les fonctionnalités et les services requis, selon le temps fixé et le coût le plus bas possible. Dans ce cadre, on peut créer un jumeau numérique afin d'identifier les activités à valeur ajoutée et celles qui ne le sont pas. Ce jumeau est doté des informations recueillies dans le réel ce qui permet de faire les ajustements nécessaires. En effet, on peut modifier des éléments du processus, en éliminer des activités sans valeur ajoutée et vérifier l'impact de ces actions sur le jumeau numérique et ses résultats en terme de valeur. Pour cela, on exploite les mégadonnées, l'IoT, le cloud computing, la simulation et le jumeau numérique ainsi que l'intelligence artificielle afin de déterminer le flux de valeur optimal. Des logiciels existent pour représenter la VSM, identifier les pertes et évaluer les solutions préconisées afin d'améliorer davantage la chaîne de valeur. Ils sont grandement soutenus par les mégadonnées émanant du processus réel, des clients qui sont traités dans le cloud computing grâce à l'intelligence artificielle et par les ajustements faits sur le jumeau numérique. C'est la combinaison de tous ces éléments que le flux de valeur optimal est déterminé et mis en oeuvre.

la VSM exploite aussi l'intégration verticale et horizontale. Verticale pour les données arrivant à et émanant de logiciels de planification (GPAO, ERP, GMAO, MES) tels que les ordres de fabrication, les ordres de livraison, les rendements de postes etc). Horizontale pour les données circulant entre postes afin d'avoir une cartographie documentée entre ceux-ci en termes de temps notamment (stock, attentes, Takt time, de cycle time, throughput time et lead time).

La figure 6 montre un exemple de VSM générée par ordinateur.

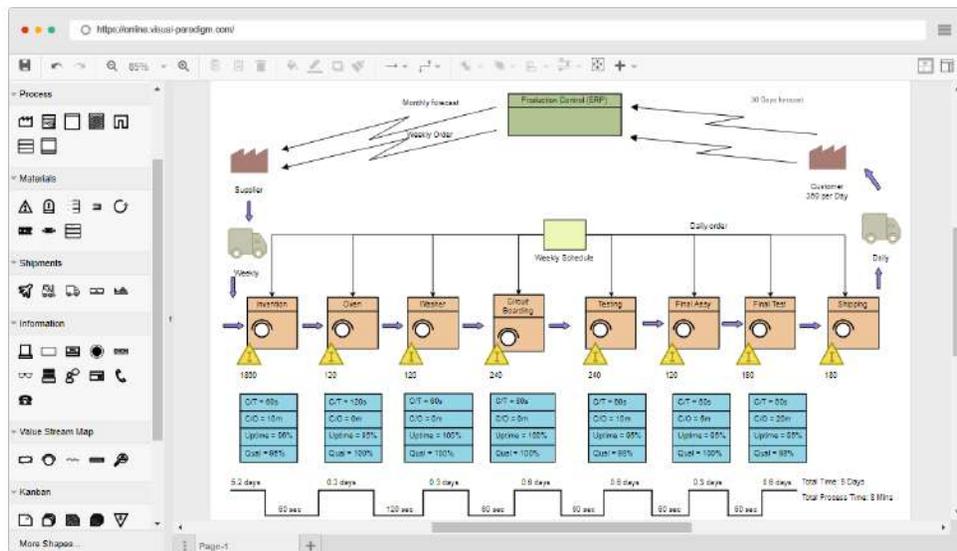


Figure 6: Exemple de VSM informatisée

Flux continu:

Pour mettre en place un flux continu, il est nécessaire de détecter la présence de goulots d'étranglement et les éliminer autant que possible. Pour cela, des capteurs judicieusement choisis pourront identifier les accumulations d'en-cours devant les postes de travail par leur RFID; accumulations qui sont révélatrices de présence de goulot en raison de l'incapacité de traiter ce qui arrive au poste avec la célérité requise. Les données envoyées par ces capteurs permettront de changer le programme de production afin de l'ajuster sur le goulot puis de déclencher les actions nécessaires pour déterminer les causes de la présence de goulot et trouver les solutions qui s'imposent. Ces solutions mises en œuvre pourraient faire en sorte qu'un goulot ne le soit plus. Les actions menées peuvent être aussi bien soft que hard au moyen des cyber physical systems CPS. D'autres apparaîtront dont il conviendra de résoudre les problèmes. C'est un processus incessant auto régulé qui cherche constamment à éliminer les goulots. Il est évident qu'avec les technologies 4.0 dont notamment le RFID, le M2M, le CPS, le big data, l'edge computing, le machine learning et l'intégration horizontale et verticale on peut gérer de façon efficace les goulots. L'intégration verticale permet notamment de gérer la production au moyen de logiciels adaptés interconnectés tels que ceux de GMAO, de GPA, MES, ERP etc. Il est évident que pour éviter qu'un poste ne soit goulot, des actions devraient être menées notamment en maintenance prévisionnelle 4.0 afin que la machine garde ses capacités et son rendement TRS suffisamment grand et permettent ainsi une plus grande production. Le suivi de la continuité de flux peut être aussi assuré par la suivi de l'état des équipements grâce aux données envoyées par les capteurs montés sur ces équipements (marche, arrêt, marche dégradée), des matières et produits circulants, des hommes grâce à leur étiquette RFID (arrêts et mouvements).

Le flux le plus continu est celui dit unitaire (one piece flow) qui consiste à produire pièce après pièce sans interruption et sans formation de lots. Les pièces qui se suivent dans le processus de production peuvent être différentes. Les pièces à fabriquer sont identifiées par les commandes faites par les clients. Chaque pièce est associée à un package de fabrication (approvisionnement, réglages, changement d'outils, gamme de fabrication etc. Dès qu'une commande est identifiée le package est déclenché. Les pièces sont identifiées par leur RFID et automatiquement des ordres sont émis d'une plate forme centrale vers les machines et entre les machines pour changer, au moyen de CPS, les outils et les réglages sur les postes concernés. Ce type de production nécessite le changement d'outils et de réglage rapide ce qui implique notamment la mise en œuvre des méthodes SMED (single minute exchange of die), poka yoke et les CPS. Ces méthodes sont grandement facilitées par l'utilisation de la simulation numérique qui permet de créer un jumeau numérique du processus sur lequel on applique les solutions envisagées et on étudie leur effet sur le temps avant de les mettre en œuvre dans le réel. Le figure 7 montre une comparaison entre productions par lot et unitaire.

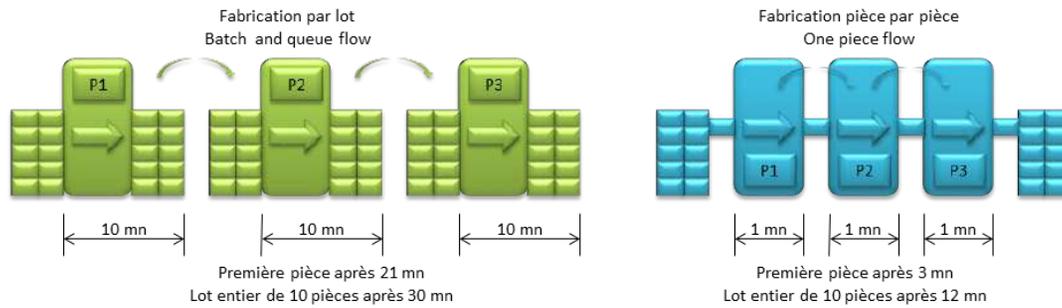


Figure 7: Exemples de productions par lot et unitaire

Flux tirés:

Le flux tiré consiste à ne produire qu'à la commande et au moment voulu. Cela implique qu'il n'y a pas de stockage. Les produits fabriqués sont immédiatement livrés. Cela concerne aussi bien les clients internes que les externes. Dans la production en mode "push", on fabrique des lots selon un programme établi et on stocke y compris les en-cours. En revanche dans la fabrication en flux tiré, on fabrique à la commande donc si possible à l'unité sans stockage ni intermédiaire ni final (Figure 8).

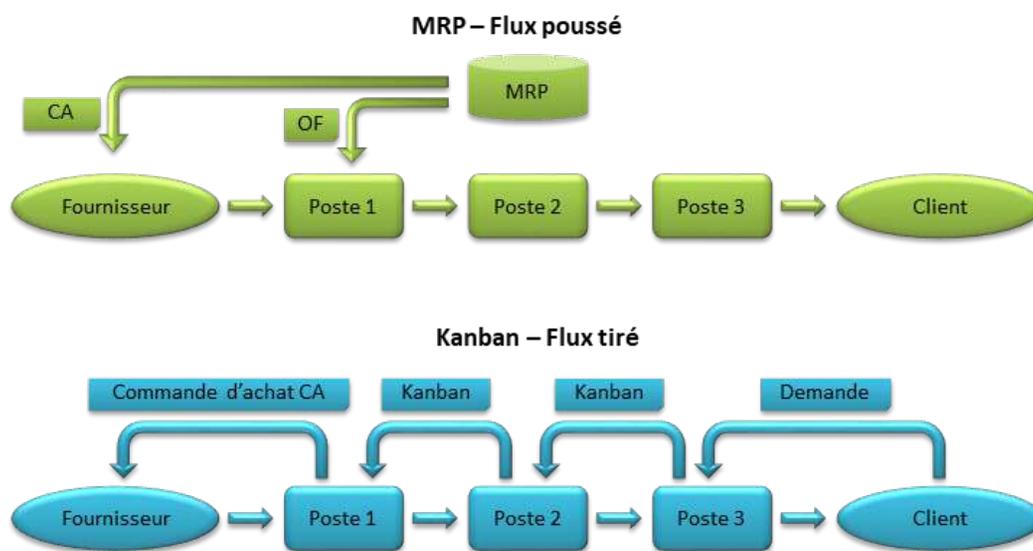


Figure 8: Flux poussé et tirés

Dans le cadre du kanban, des capteurs adaptés détectent le niveau de consommation de chaque lot de produits identifiés par leur RFID. Dès qu'un seuil est atteint détecté sur le conteneur intelligent, un ordre est émis informatiquement qui est alors pris en charge, sur le tableau kanban numérique, par un ordinateur. Dès atteinte du seuil de production, un ordre de production d'un autre lot est émis et un ordre de livraison est ensuite établi informatiquement. Les lots sont identifiés par une étiquette qui est en e-ink placées sur le container correspondant. Le papier est alors abandonné au profit d'un processus entièrement numérique. Tous les suivis sont faits au moyens des étiquettes RFID (pour la localisation et la caractérisation), par les ordres établis informatiquement et par les capteurs détecteurs de niveaux de stocks.

Quête de perfection:

La perfection n'est jamais atteinte dans l'absolu mais on peut s'en approcher progressivement par une série ininterrompue d'améliorations. En lean management, le Kaizen, d'origine japonaise, est une approche d'amélioration incrémentale continue qui est apparu au départ dans le domaine de la qualité mais qui a investi, par la suite, tous les autres domaines. Le kaizen est une véritable philosophie de développement et de résolution de problème qui doit impérativement impliquer l'ensemble des acteurs de l'entreprise. C'est est une démarche de quête permanente et collective de l'amélioration continue en utilisant au mieux les outils qualité à disposition et en gardant toujours à l'esprit le bon sens commun. Le kaizen est une démarche qui s'inscrit dans la durée dans le sens que chacun doit chercher en tous temps les voies d'amélioration pouvant être explorées.

C'est aussi un travail en équipe. On réfléchit en commun aux suggestions d'amélioration. C'est une démarche qui tire son efficacité dans le fait qu'elle commence par l'identification de problèmes à résoudre sur le terrain (gemba).

La démarche Kaizen est déclinée selon les six étapes suivantes (Figure 9):



Figure 9: Démarche Kaizen

Le kaizen 4.0 doit s'adosser à plusieurs technologies de l'industrie 4.0 comme nous l'avons précisé ci-avant dans la partie consacrée à la recherche de perfection.

Dans le cadre du Lean traditionnel, c'est le Kaizen qui est adopté soit la recherche d'améliorations incrémentales et continues. A l'inverse, l'ADN de l'Industrie 4.0 consiste à d'appliquer des technologies et des solutions intelligentes conduisant à des innovations de rupture (kaikaku ou kakushin) qui changent le modèle commercial (business model). Néanmoins, il est parfaitement possible de réaliser du kaizen par l'exploitation des technologies de l'I4.0.

Le processus kaizen commence par l'identification de problème. Cela peut être fait par la surveillance des équipements avec des capteurs appropriés afin de déterminer les anomalies: arrêts, non conformités, baisses de cadence etc. Les algorithmes de cloud computing ou d'edge computing permettent d'identifier ces anomalies. On peut recourir à un jumeau numérique qui permettrait de suivre l'état de processus et analyser les effets des anomalies. On peut alors déterminer les causes du problème avec des arbres de causes informatisée et avec l'utilisation du machine learning, imaginer des solutions en utilisant des méthodes de créativité et des bases de connaissance (KM) pour les solutions déjà existantes. Les solutions trouvées peuvent être mises en œuvre sur le jumeau numérique testées et validées avant leur mise en œuvre réelle, leur standardisation numérique (KM) et leur généralisation.

Maison lean:

Comme cela fut exposé ci-avant, la maison lean (lean house) est composé des éléments principaux suivants qu'il est primordial de mettre en oeuvre.:

- les fondations: Standardisation, kaizen, stabilité des 4 M, lissage de production, 5S dont le management visuel
- les piliers: Just in time et jidoka
- le toit: Excellence en temps, coût et qualité

Standardisation:

La standardisation consiste à lister et décrire les opérations devant être effectuées par chaque collaborateur à chaque poste de travail en termes de méthodes et ressources devant être utilisées de la façon la plus efficiente et consensuelle possible.

Les standards peuvent prendre différentes formes : procédures, instructions de travail, fiches de contrôle, spécifications techniques, consignes de sécurité etc. Elle peuvent être exploitées sous un format papier et de plus en plus sous format numérique particulièrement adapté à l'industrie 4.0 (textes, images ou vidéos).

Des logiciels d'instructions de travail digitales permettent de créer ces types de documents en respectant les normes industrielles concernées dans un environnement de travail.

La standardisation ne peut donner des résultats positifs que si les standards sont élaborés selon les meilleures pratiques existantes, s'ils sont participatifs et consensuels, s'il sont disponibles pour les utilisateurs et s'ils sont actualisés selon l'évolution des méthodes et des technologies.

L'opérateur peut avoir un accès aisé des standards sur son ordinateur, sa tablette, son smartphone ou encore au moyen de casque ou lunettes de réalité augmentée (Figure 10). C'est ce qui se développe aujourd'hui de façon rapide car on peut accéder, immédiatement, à tous les standards et de façon adaptée ce qui permet un gain de temps considérable et une grande efficacité au travail.

Dans le cas de processus automatisés, les standards sont intégrés dans les CPS et dans les machines et mis en œuvre de façon automatique.



Figure 10: Exemple de réalité augmentée

La stabilité des 4M:

Toutes les activités de l'entreprise sont quotidiennement confrontées aux imprévus au niveau des 5 M (commandes ou annulation à la dernière minute, pièces défectueuses, machines défectueuses, personnel fatigué, erreurs humaines...) (Tableau 2). Une entreprise se doit d'être stable pour faire face ces aléas et ne pas en subir les conséquences indésirables. Comme tout bâtiment, elle doit reposer sur des fondations stables.

| 5 M | Instabilités |
|--------------|---|
| Main-d'œuvre | Mouvement de personnel, absences, retards, fatigues, démotivation |
| Matière | Mauvaise qualité, délai variant, quantité variante |
| Machine | Pannes, dégradations partielles, variation de capacité, de vitesse |
| Méthodes | Changement de standard, variation de décision, instabilité de programmation |
| Milieus | Variation des conditions de travail, dégradation des installations utilitaires (facilities) |

Tableau 2: instabilités des 5 M

On ne peut faire confiance en un processus qui n'est pas stable sous l'effet de l'instabilité de ses 5M. On ne peut pas prévoir ce que sera la qualité des produits, leur quantité produite, leur temps de réalisation et de livraison ainsi que leur coût tant les 5M sont variants.

La stabilité est elle-même caractérisée par deux modèles de fonctionnement :

- L'ingénierie de la robustesse. Imaginé par le concepteur avec ses zones d'incertitudes, le système est capable d'adapter son comportement à des situations qui ont été prévues afin de s'autoréguler pour livrer un résultat conforme aux exigences du client,
- L'agilité. L'organisation est pensée, afin de traiter les situations déviantes avec les outils traditionnels de l'organisation (recherche d'une stabilité fonctionnelle, anticipation en mode dégradé, etc.) et une recherche de la causalité a posteriori (arbre des causes, arbre de défaillance). Si le modèle échoue à revenir à une situation normale, on est dans un modèle instable et un autre modèle doit être mis en œuvre : la gestion de crise.
Stabilité = robustesse + agilité

Si le système est robuste, l'entreprise sera capable de livrer aux clients les produits requis quelles que soient les conditions du milieu.

Si le système est également agile, il saura gérer les situations en dehors de tout processus préétabli, dans une perspective de satisfaction du client (Figure 11).

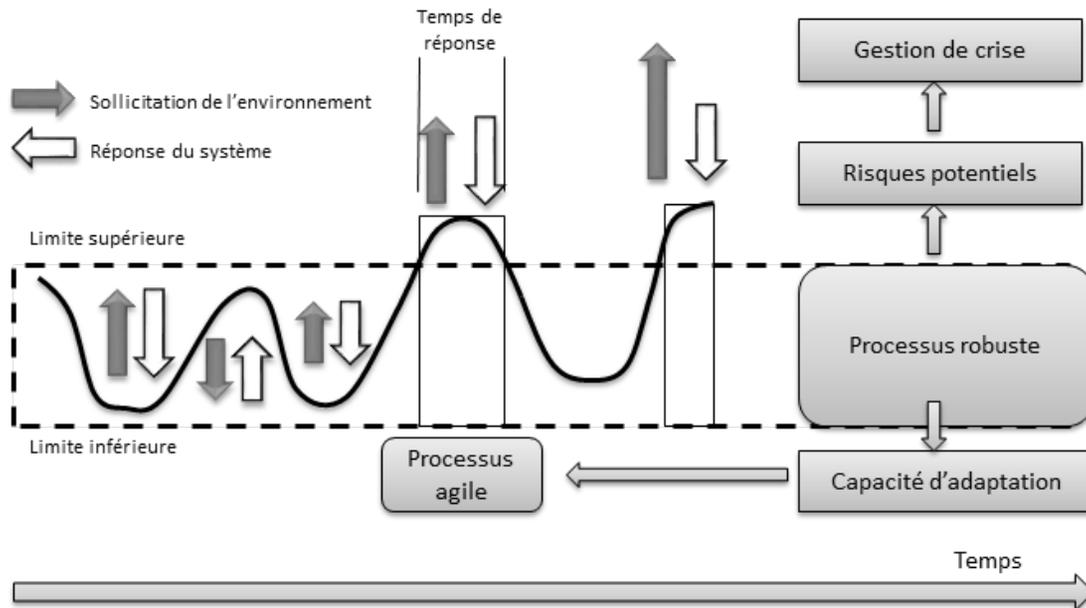


Figure 11: Processus de stabilisation

Stabilité des 5M:

L'activité oscille continuellement entre l'application de stratégies réglées (Robustesse) et le développement de savoir-faire interne (Agilité). Toute la difficulté est de rendre ces deux stratégies d'actions complémentaires et non antagonistes. Et c'est là l'intérêt du concept de stabilité car il intègre ces deux logiques en cherchant à les articuler au mieux :

- **Stratégies réglées:**

Elle consiste à appliquer un processus. Les défaillances s'expliquent par la présence de composants non fiables. Les analyses concernent donc principalement les échecs du système (erreurs, accidents, événements indésirables, ...) et les démarches de prévention s'appuyant essentiellement sur la mise en place de barrières (physiques, fonctionnelles ou incorporelles) visant à supprimer les erreurs,

- **à stratégies gérées:**

Elles stipulent que la variabilité des systèmes est normale. Face à une dérive, les actions menées par les équipes agiles ne visent pas uniquement à gérer l'anomalie mais visent également à conserver la maîtrise de la situation, en prenant des décisions de compromis sur la base d'une évaluation bénéfice/risque.

Finalement la stabilité des 4M est un concept qui repose à la fois sur la mise à disposition de règles (standard, bonnes pratiques,...) et sur les marges de manœuvre permettant à chaque équipe de déployer les réponses les plus adaptées à ses propres ressources (compétence, expérience, disponibilité, ...).

Pour assurer la stabilité, il est d'abord nécessaire de faire un état des lieux et de déterminer dans quelle mesure le système est stable ou non. Le plus simple pour évaluer la stabilité est de mesurer le taux de « bon du premier coup ». S'il n'est pas à 99,73% (les fameux 6 sigma) c'est qu'au moins un des 4M empêche le système d'être stable.

Pour stabiliser les 4M, il est recommandé de mener les actions suivantes (Tableau 3):

| 5 M | Actions de stabilisation |
|---------------------|--|
| Main-d'œuvre | Bonne gestion des ressources humaines (GRH 4.0) avec notamment l'utilisation de cobots, de standards digitalisés, de formations et de réalité augmentée. |
| Machines | Bonne maîtrise des équipements (Poka yoke 4.0, SMED 4.0, 5S 4.0, TPM 4.0 et SPC 4.0) |
| Matière | Bonne gestion des stocks et des approvisionnements (logistique 4.0). Utilisation du kanban 4.0 et du jidoka 4.0 |

| | |
|-----------------|---|
| Méthodes | Bonne planification et préparation, standardisation 4.0, jumeau numérique |
| Milieus | Bonnes gestion des conditions et locaux de travail (aménagement, ergonomie). Interconnexions, Utilisation de jumeau numérique et de la réalité augmentée |

Tableau 3: Actions de stabilisation des 5M

Méthodologie 5S et industrie 4.0:

Dans ce qui suit, on fait état de l'application de technologies de l'industrie 4.0 pour réaliser les 5 S:

- **Débarrasser:**

on identifie les objets par leur RFID et le repère numérique de leur emplacement et on détermine leur utilisation ou non par leur historique informatisé portant les données traçant leur usage.

- **Ranger:**

Pour ranger, il convient de relier l'emplacement et les objets identifiés selon leur étiquette RFID. On peut ainsi mettre en place un poka yoke simple qui permet d'éviter que les objets ne soient pas à leur emplacement (lumière rouge ou signal sonore etc). Des caméras peuvent détecter les encombrements et les objets déposés hors de leur emplacement.

- **Nettoyer:**

l'opération de nettoyage peut être actée par des caméras détectant la présence de salissures et évaluant le degré de nettoyage.

- **Standardiser:**

voir la standardisation exposée ci-avant. On trouve ici aussi le mangement visuel qui est détaillé ci-après.

- **adopter la rigueur:**

Il est évident que toute amélioration et maîtrise des espaces de travail nécessite que les actions mises en œuvre soient pérennes. Pour cela, Il est nécessaire d'élaborer et appliquer des standards digitaux (de débarras, rangement et nettoyage) et veiller à la continuité de leur utilisation effective par des actions d'audit et de vérification informatisée. utiliser les moyens informatiques pour vérifier que les travaux sont réalisés, que les hommes sont disponibles et que les standards sont bien appliqués. Dans cas, les outils à utiliser peuvent être la RFID, les capteurs, l'IoT, la réalité augmentée, les logiciels de suivi(intégration verticale) et, si besoin, la fabrication additive. Avec la conjugaison de ces éléments, on peut vérifier la bonne réalisation des opérations selon les standards établis. Cette vérification peut être réalisé sur le jumeau numérique du produit ou processus concerné.

Management visuel:

Compte tenu de son importance capitale pour la performance de l'entreprise, nous traitons le mangement visuel plus en détail ci-après.

Le management visuel est un ensemble de techniques permettant d'apporter l'information pertinente à l'utilisateur rapidement et efficacement. Il porte sur:

le repérage facile et efficace: couleurs différentes de canalisations, de zones au sol, de chemins de déplacement, de containers, de zones sur cadrans, affiches, profils d'outils etc)

l'information sur le processus (Tableaux andon) et sa gestion (tableaux d'Obeya)

Les principaux buts du management visuel sont les suivants :

- Présenter un état des lieux simple à comprendre
- Identifier rapidement les anomalies
- Guider et aider visuellement les opérateurs dans l'accomplissement de leurs tâches

Appliqué à l'industrie, le management visuel est employé pour aborder suivre l'état de fonctionnement d'un processus, d'une ligne de production ou d'un ateliers au moyen d'indicateurs clés judicieusement choisis. Ces indicateurs peuvent concerner la production, la qualité, la maintenance ou la sécurité. Ils peuvent être présentés sur des tableaux dans une obeya par exemple ou sous forme numérique sur ordinateurs et tablettes ou smartphones.

Les schémas et d'autres formes de présentations graphiques des indicateurs permettent au collaborateur d'avoir sous les

yeux les éléments nécessaires d'aide à la décision.

Pour être efficace, le management visuel choisi doit avoir un contenu « vivant » et dynamique, dans le sens où il doit être régulièrement mis à jour si des améliorations sont apportées dans le processus, notamment sur la base d'observations et de suggestions du personnel de terrain.

Il faut veiller à ce que les informations qu'il véhicule soient pertinentes et peu nombreuses car un contenu surchargé ou inadapté rend la méthode totalement inefficace, voire contre-productive.

Les éléments graphiques les plus simples sont plus efficaces en termes de communication que les textes les plus élaborés. Le visuel est plus efficace car il colle le mieux au fonctionnement de la pensée humaine. Lorsqu'on pense à quelque chose, on le met en image, on le visualise. C'est dans la nature de l'homme que d'intégrer les éléments visuels en priorité par rapport aux textes.



Figure 12: Exemples d'andons

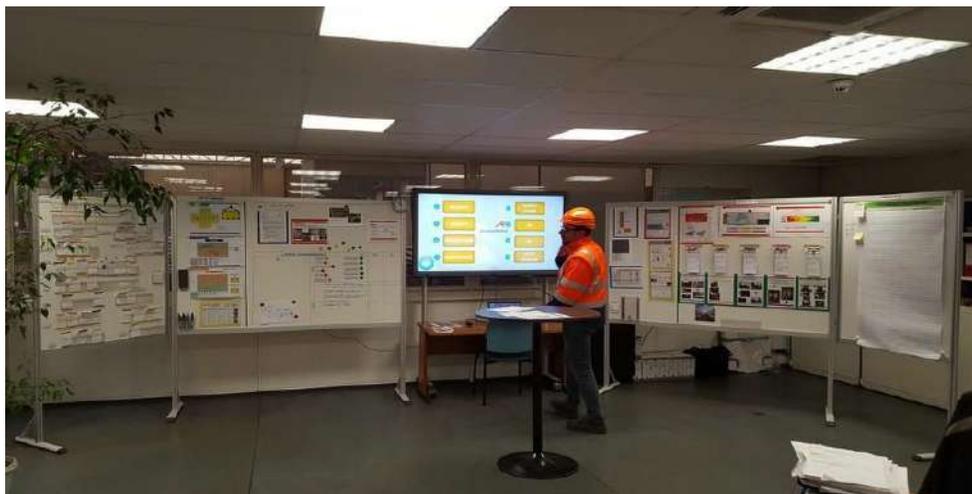


Figure 13: Exemple d'obeya et de management visuel

La numérisation communique au quotidien et en temps réel une masse importante d'informations émanant de CPS, de capteurs via les réseaux informatiques de l'usine et l'IoT. Dans cette situation, le management visuel digital permet de regrouper les informations de façon claire et pertinente. Ainsi, cette source d'information permet d'informer rapidement les équipes en présentant des données de façon immédiate, catégorisée, lisible et concise (Figures 12 et 13).

Afin de gagner en performance, associer le management visuel au numérique peut être judicieux car cela permet une actualisation de l'information en temps réel et plus précise que sur des tableaux physiques. On peut ainsi utiliser un même support pour présenter différents points, apporter des précisions sur des indicateurs en passant à un écran plus détaillé, ainsi qu'une personnalisation des données via des écrans tactiles. Ces écrans vont pouvoir permettre d'organiser des brainstormings, des plannings, d'ajouter le listing des collaborateurs absents ou en déplacement et même d'utiliser une application pour smartphone afin d'accéder aux écrans à distance. On peut organiser ainsi des e-meetings avec partage de toutes les informations nécessaires.

Dans le cadre de l'industrie 4.0, les opérateurs peuvent recevoir les informations pertinentes sur leur ordinateur, tablette, smartphone ou sur leur casques ou lunettes AR. Il disposent ainsi en permanence des informations requises pour leur prise de décision.

Heijunka:

Heijunka est un mot japonais qui signifie nivellement. En Lean, il s'agit du nivellement de la production ce qui permet d'améliorer le flux d'un processus pour mieux répondre à la demande des clients, réduire le gaspillage et diminuer ou arrêter le traitement par lots qui présente les inconvénients de stockage d'en-cours et de pertes de temps en attente de traitement de tout le lot. Dans l'application de la technique Heijunka, la demande des clients est satisfaite par de petits lots pouvant aller à l'unité (one piece flow), un travail standardisé et / ou un échange rapide d'outils (Single Minute of Exchange of Die SMED).

Aucun système ne peut être stable avec des niveaux de production inégaux et variants. Il y a plusieurs raisons à l'inégalité dans la production:

- Différentes activités prennent différentes quantités de temps à effectuer
- Différents produits prennent des activités et des temps différents pour terminer
- Différentes personnes et différentes machines ont des capacités, des temps de travail et de configuration différents Les gens ont tendance à déprioriser les tâches qu'ils n'aiment pas faire, ce qui repousse certains éléments de leur date d'achèvement prévue.

Exemple: Une usine a trois clients pour trois lignes de produits différentes. Au cours d'une semaine typique, le client A commande 15 carrés, le client B commande 3 cercles et le client C commande 1 triangle. Le calendrier de production correspondant ressemblerait à celui de la figure 14:



Figure 14: Calendrier de production

Les 15 carrés prennent 2 jours à faire puisque l'équipe peut faire 8 carrés par jour. Le produit circulaire prend 1 jour à fabriquer, ce qui signifie que l'équipe de production doit travailler pendant le week-end pour terminer la commande triangulaire, ce qui prend une journée complète à compléter. Un praticien Lean examinerait à la fois le fonctionnement de cette équipe et la façon dont les clients passent leurs commandes (nivellement de la demande). Grâce aux actions SMED, l'usine pourrait commencer à produire un cercle en une demi-journée et un triangle en un peu moins d'une journée. En parlant avec les clients, il peut constater que le client A n'a besoin que de 3 du produit A par jour, mais commande à l'avance juste pour être en sécurité. Le client B a besoin d'un cercle tous les deux jours et le client C utilise un triangle tous les 4 jours (Figure 15).

Grâce à ce nivellement structuré de la production, l'équipe peut désormais produire trois carrés, un cercle et 1/4 de triangle en une journée. Ils font de même les jours 2 et 3, et le 4ème jour sont faits avec les triangles et peuvent satisfaire à la fois la demande des clients B et C. Les besoins du client A sont couverts par le travail effectué quotidiennement, et sa capacité à ne commander qu'au besoin a amélioré ses flux de trésorerie. Cette démarche est le heijunka.

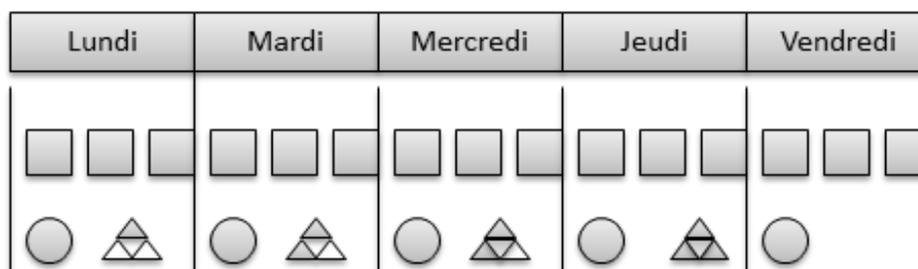


Figure 15: Exemple d'application du Heijunka

En conséquence, l'équipe de production et l'entreprise se sont améliorées: elles peuvent expédier des produits à des clients payants tous les jours, répondre à leur demande et éviter toute heure supplémentaire coûteuse. Dans les scénarios de fabrication, il est courant d'utiliser une boîte Heijunka - un outil construit à partir de cellules ressemblant à des tableaux avec de la place pour les cartes Kanban représentant différents types de commande et leur montant. La même chose peut être montrée sur un tableau Kanban virtuel avec des couloirs de nage - rangées horizontales. Une équipe peut utiliser des colonnes pour les jours de la semaine et des lignes pour différents types de produits, et placer le nombre de cartes demandé dans chaque cellule. Bas du formulaire

Le heijunka peut profiter des techniques et technologies de l'I4.0 pour déterminer les séquences de production à adopter. Pour cela, le machine learning est bien adapté. Il permet de proposer des solutions et les vérifier pour déterminer celle qui convient. Il peut tester ces solutions sur un jumeau numérique avant de les valider et de les appliquer dans le réel. Des algorithmes existent pour optimiser le séquençage de production. Le cloud ou l'edge computing, selon ce qui est adopté, peut consulter la mémoire des cas déjà étudiés ou ceux qui sont proches. dans une base de connaissances de KM. Il est entendu que ce système peut être dynamique en s'actualisant en temps réel selon les commandes des clients qui arrivent et selon l'état des capacités des équipements et de la situation globale du processus de fabrication. Pour être aisément applicable, la heijunka nécessite une bonne maîtrise des 5M et notamment des équipements qui ne doivent pas tomber en panne (maintenance prévisionnelle 4.0) et des changements de réglages et d'outils qui doivent être réduits (méthode SMED. la communication M2M entre machines permettra une bonne synchronisation des productions des différentes références de produits avec les changements de réglages et d'outils qu'elle nécessitent.

La figure 16 montre un exemple de production avant et après application du Heijunka.

Planning de production sans heijunka (Produits A, B et C)

| | | 1 MOIS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|---|-----------|---|---|---|---|-----------|---|---|---|---|-----------|---|---|---|---|-----------|---|---|---|---|
| | | SEMAINE 1 | | | | | SEMAINE 2 | | | | | SEMAINE 3 | | | | | SEMAINE 4 | | | | |
| MT | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | B | B | B | B | B | B | B | C | C |
| | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | B | B | B | B | B | B | B | C | C | |
| | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | B | B | B | B | B | B | C | C | |
| | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | B | B | B | B | B | B | C | C | |
| | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | B | B | B | B | B | B | B | C | |
| | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | B | B | B | B | B | B | B | C | |
| | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | B | B | B | B | B | B | B | C | |
| | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | B | B | B | B | B | B | B | C | |

Planning de production avec heijunka

| | | 1 MOIS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|---|-----------|---|---|---|---|-----------|---|---|---|---|-----------|---|---|---|---|-----------|---|---|---|---|
| | | SEMAINE 1 | | | | | SEMAINE 2 | | | | | SEMAINE 3 | | | | | SEMAINE 4 | | | | |
| MT | A | A | A | B | B | C | A | A | B | B | C | A | A | B | B | C | A | A | A | B | C |
| | A | A | A | B | C | A | A | A | B | C | A | A | A | B | C | A | A | A | B | C | |
| | A | A | A | B | C | A | A | A | B | C | A | A | A | B | C | A | A | A | B | C | |
| | A | A | A | B | B | A | A | A | B | B | A | A | A | B | B | A | A | A | B | B | |
| | A | A | A | B | B | A | A | A | B | B | A | A | A | B | B | A | A | A | B | B | |
| | A | A | A | B | B | A | A | A | B | B | A | A | A | B | B | A | A | A | B | B | |
| | A | A | A | B | B | A | A | A | B | B | A | A | A | B | B | A | A | A | A | B | |
| | A | A | A | B | B | A | A | A | B | B | A | A | A | B | B | A | A | A | A | B | |

Figure 16: Exemple de mise en oeuvre de Heijunka

Juste à temps:

Juste à temps (JIT) est une démarche consistant à produire et/ou livrer uniquement les pièces nécessaires, dans le temps requis selon la quantité demandée et en utilisant le minimum nécessaire de ressources matérielles et humaines. L'une des méthodes principales du JIT est le kanban qui utilise des cartes émises en aval pour lancer la livraison ou la production en amont lorsque cela est nécessaire (voir ci-avant dans le paragraphe relatif aux flux tirés). On tire ainsi la production. Le flux est dit tiré qui est à distinguer du flux tendu qui désigne une méthode d'optimisation de la production qui permet d'éviter les stocks. On peut produire à flux tendu de deux façons : à flux poussé, ce qui signifie que l'on produit en fonction d'un

prévisionnel de ventes mais avec une bonne synchronisation des éléments de la chaîne d'approvisionnement, ou à flux tiré, lorsqu'on ne produit que sur la base des demandes effectives.

Outre son impact sur la baisse des stocks, la réduction des délais, l'amélioration du taux de service, l'avantage majeur de la méthode Kanban consiste en une bonne communication visuelle et en temps réel pour tous les acteurs concernés par le flux industriel. Le kanban permet notamment de :

- déléguer aux opérateurs de productions la réalité quotidienne de la production (programmation, fabrication, livraison)
- donner du temps à l'encadrement pour les tâches de développement futur avec des outils du Juste à Temps tels que S.M.E.D, Poka-Yoke, SPC, Kaizen, 5S etc.

Types de kanbans:

On distingue principalement trois types de kanban

- kanaban manuel ou kanban papier
- kanban électronique ou e-kanban ou kanban virtuel
- kanban informatique

Le kanban manuel ou Kanban papier:

C'est un kanban qui utilise des étiquettes ou cartes en papier. Il est efficace, mais il présente un certain nombre d'inconvénients:

- lourd à maintenir au-delà d'un certain nombre de références de produits,
- pas adapté à la gestion entre sites éloignés (perte d'étiquettes),
- ne fournit pas d'informations statistiques sur les quantités, les temps, la qualité.
- ne donne pas l'estimation des charges
- possibilité d'erreurs suite à une insertion erronée des cartes kanban
- hiérarchisation inexacte des éléments kanban (quel est le meilleur à produire ensuite ?)
- ralentissement du flux d'information parce que les kanbans sont transmis uniquement manuellement

Kanban électronique (ou virtuel) ou e-Kanban

Les Kanbans électroniques sont imprimés à proximité du « producteur ». Ils sont associés (collés) sur les cartons ou containers et consommés (détruits) lors de leur consommation. Chacune de ces actions fait l'objet d'un message qui permet de suivre le cycle de vie de l'étiquette Kanban.

Comparable au Kanban électronique, le e-Kanban permet de mettre en œuvre des boucles kanban entre Clients et Fournisseurs externes (Figure 17).

Grâce à un déclenchement informatisé, le Kanban se substitue à l'ordre de fabrication. Il offre tous les avantages du Kanban en écartant la majorité des inconvénients précédents s'il est intégré à un outil informatique complet de pilotage de la Supply Chain.

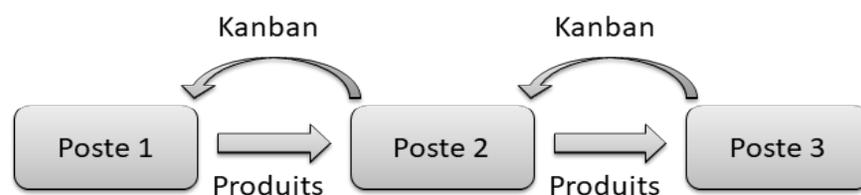


Figure 17: Circuits kanban

De nombreux fabricants ont mis en place des systèmes kanban électroniques. Ceux-ci aident à éliminer les problèmes courants tels que les erreurs de saisie manuelle et les cartes perdues. Les systèmes E-Kanban peuvent être intégrés dans les systèmes de planification des ressources d'entreprise (ERP) ce qui permet une signalisation de la demande en temps réel tout au long de la chaîne d'approvisionnement et une meilleure visibilité. Les données extraites des systèmes E-kanban peuvent être utilisées pour optimiser les niveaux de stock en suivant mieux les prospects et les temps de réapprovisionnement des fournisseurs. E-kanban est un système de signalisation qui utilise un mélange de technologie

pour déclencher le mouvement des matériaux dans une installation de fabrication ou de production.

E-Kanban 4.0 combine tous les avantages du kanban électronique avec deux technologies différentes et appariables: la technologie RFID de lecture par radiofréquence Tag, qui consiste en l'élimination des dispositifs matériels de lecture, et les étiquettes d'affichage E-ink, avec encre électronique, à la place des étiquettes papier. Grâce à l'utilisation combinée des trois systèmes, kanban électronique + E-ink + RFID, il est possible d'optimiser la gestion de produit en mode Pull et le réapprovisionnement des supermarchés, en atteignant une automatisation complète du flux et en se débarrassant des étiquettes en papier.

Le papier électronique (en anglais : e-paper), également appelé encre électronique (en anglais : e-ink), est une technique d'affichage sur support souple (papier, plastique), modifiable électroniquement, cherchant à imiter l'apparence d'une feuille imprimée et qui, comme le papier, ne nécessite pas d'énergie pour laisser un texte ou une image affiché.

Les applications vont des liseuses capables de stocker les versions numérisées de nombreux livres, aux posters permettant de changer la décoration d'une pièce, en passant par les étiquettes électroniques, la mesure industrielle ou la domotique. Les cryptogrammes dynamiques qui sécurisent les cartes de crédit récentes utilisent aussi cette technologie.

Kanban informatique:

Les règles (paramètres, déclenchement, ...) sont similaires au Kanban traditionnel et électronique, mais il n'y a plus d'étiquettes et les plannings sont remplacés par des tableaux de bord de pilotage informatiques. Tous les ordres ou informations qui étaient portés par les étiquettes kanban sont informatisées et sont véhiculées entre ordinateurs, tablette ou smartphones via les réseaux informatiques de l'usine et l'IoT. Le papier est totalement abandonné (Figure 18).

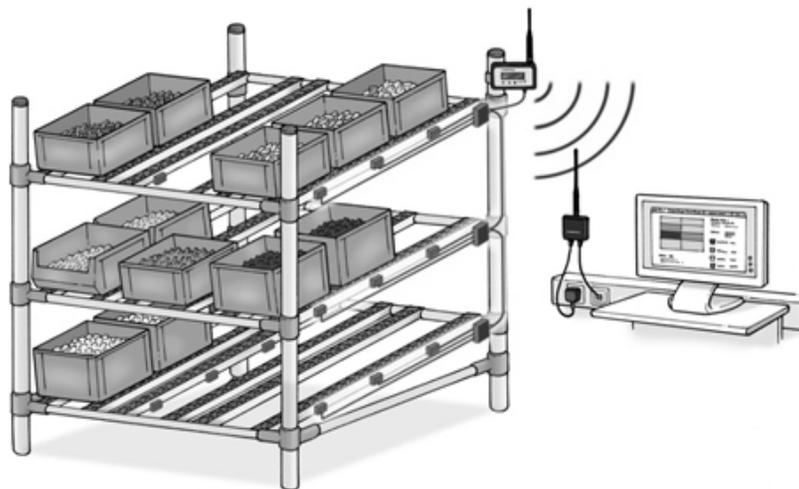


Figure 18: Exemple de Kanban informatique

Jidoka:

Par définition, Jidoka est une méthode Lean largement utilisée dans la fabrication et le développement de produits. Aussi connu sous le nom d'autonomation, c'est un moyen simple d'éviter la livraison aux clients de produits de mauvaise qualité tout en veillant à maintenir le temps de travail. Jidoka s'appuie sur quatre principes simples pour s'assurer qu'on ne livrerait que des produits sans défaut:

- Découvrir une anomalie
- Arrêter le processus
- Signaler le problème avec un andon (lampe) (Figure 19)
- Résoudre le problème immédiatement
- Enquêter et résoudre la cause première

Le Jidoka donne la possibilité à tout opérateur le pouvoir et la responsabilité d'arrêter une machine dès qu'il remarque un problème qui nuit à la qualité du produit. Cela permet d'éviter de continuer à réaliser des opérations sur un produit qui comporte déjà des non conformités. Il permet aussi de ne pas transmettre un produit défectueux à une étape située en aval.

Dans le cadre de l'industrie 4.0, cette démarche peut être facilitée et peut gagner en efficacité. En effet, grâce aux capteurs intelligents portés par les CPS et les machines, la méthode des cartes de contrôle numérisée (SPC: Statistical Process Control), l'IoT pour la transmission de données, les algorithmes d'analyse de ces données (cloud computing) et le machine learning, on peut détecter aisément et précisément les conditions anormales avant même qu'elle ne donnent lieu à des produits non conformes (méthode prévisionnelle). Sitôt les anomalies détectées, un ordre est transmis aux CPS concernés qui procèdent à l'arrêt des installations. On peut alors recourir aux standards digitaux déjà établis afin d'intervenir immédiatement pour réparer par le biais des CPS si cela est possible afin d'assurer la continuité d'activité. Par la suite, on organise un atelier kaizen afin de déterminer les causes du problème et déterminer les solutions à mettre en oeuvre. Pour cela, le KM (knowledge management), le jumeau numérique et les outils de IA peuvent être d'une grande utilité. Les solutions envisagées sont testées et validées sur le jumeau numérique avant d'être mises en oeuvre dans la réalité.



Figure 19: Exemple d'andons

Réduction des gaspillages:

L'objectif de la production au plus juste est de réduire les gaspillages et le time to market afin de devenir très réactif à la demande des clients en termes de temps, qualité et coût.

Grâce à l'Internet des objets, la collecte de Big Data et l'analyse qui s'en suit, les gaspillages peuvent être plus facilement trouvés au moyen des algorithmes avancés de traitement de données et du machine learning. Les analyses peuvent être réalisées en cloud computing ou en edge computing.

- Surproduction
- Surstockage ou Stocks Inutiles
- Transports et Déplacements Inutiles
- Surprocessing ou traitements inutiles
- Mouvements Inutiles
- Erreurs, Défauts et rebuts
- Temps d'Attente et Délais

Surproduction:

La surproduction ne doit pas exister en principe car avec, en temps réel, une planification maîtrisée, la communication entre machines (M2M) et la communication homme-machine (H2M) et au moyen de différents moyens informatiques dont l'IoT, les logiciels de gestion de production et d'approvisionnement (MES, SCM, MRP notamment), on ne peut pas produire plus que nécessaire. En outre, dans le cadre du JIT 4.0 et du flux continu (notamment le one piece flow), les quantités à produire pour chaque référence sont fixées avec une précision satisfaisante au préalable et le processus est entièrement programmé pour ces quantités. Les standards de fabrication et de changement de réglages et d'outils sont digitalisés et mis en oeuvre automatiquement à chaque changement de référence de produit.

Stocks inutiles:

Pour éviter le stockage, il importe de mettre en place le JIT 4.0 et sa composante kanban 4.0. On ne produit alors que ce qui est demandé au moment souhaité. Un continuum informationnel peut être mis en place informatiquement avec les technologies de l'industrie 4.0 (IoT, CPS, M2M) les algorithmes de traitement (cloud computing, edge computing) et avec

les logiciels de production (MES, SCM, ERP) pour relier les besoins des clients avec la fabrication et la livraison. Ces besoins peuvent être explicitement formulés par le client ou prévus de façon relativement fiable au moyen des algorithmes de l'intelligence artificielle et du machine learning. Dans le cas spécifique des stocks de pièces de rechange, il est nécessaire de faire appel à la maintenance prédictive pour déterminer les quantités à consommer et, partant, celles à stocker. Ce type de maintenance exploite l'IoT pour recueillir les mégadonnées envoyées par les capteurs et CPS via l'IoT. Elle exploite aussi les algorithmes de traitement et d'intelligence artificielle (machine learning notamment) pour déterminer de façon relativement fiable la date de remplacement de pièces sur une machine. Pour assurer le suivi, les pièces sont identifiées au moyen de leur étiquette RFID. On peut déceler, ainsi, un poste goulot par l'accumulation de pièces à son amont.

Transports et déplacements inutiles:

Ces gaspillages peuvent être identifiés par le suivi au moyen des étiquettes RFID aussi bien des hommes que des machines. Les données recueillies (distance parcourues) sur le parcours de ces éléments (diagramme spaghetti digitalisé) peuvent être alors traités (en cloud computing ou en edge computing) au moyen d'algorithmes adaptés et de logiciels d'optimisation et aussi au moyen de simulation numérique de l'atelier ou espace concerné en créant un jumeau numérique de celui-ci. Des solutions peuvent être alors envisagées pour réduire voire supprimer des déplacements jugés inutiles. Ceux-ci peuvent être détectés et validés en tant qu'inutile par l'étude de l'impact de leur suppression dans le jumeau numérique. Les solutions proposées peuvent être testées sur le jumeau numérique et validées avant leur mise en place réelle. Parmi les solutions pouvant être envisagées on peut citer: le transport de matière, outils et produits par AGV (automated guided Vehicle) ou par drone sur les longues distances et pour des quantités limitées. Dans ce cadre aussi, il est utile d'exploiter les méthodes de lean logistics (supermarché et tournée de laitier notamment).

Surprocessing ou traitements inutiles:

Normalement, si les standards de fabrication (gammes) et la planification de la production sont optimisés et maîtrisés, il ne peut pas y avoir de surprocessing. Il est donc nécessaire d'exploiter les mégadonnées, l'IoT, l'intelligence artificielle et le machine learning ainsi que les outils d'optimisation pour définir ce qui est juste nécessaire pour fabriquer. Dans ce cas aussi, l'utilisation d'un jumeau numérique permettra une simulation et une validation des processus avant sa validation et leur mise en place réelle.

Mouvement inutiles:

Pour déterminer les mouvements inutiles, on peut simuler un opérateur dans l'exercice de son travail en créant son jumeau numérique. On exploite alors la base de connaissances et de tables de l'ergonomie et de la mesure du temps afin d'inventorier les mouvements et déterminer le temps qu'ils consomment et la fatigue qu'ils génèrent. On peut alors vérifier différentes solutions sur le jumeau numérique afin de valider celles qui éliminent les mouvements jugés inutiles ou pénibles ou fatigants. Sitôt les mouvements optimisés définis, il convient de les intégrer dans les standards digitalisés et, mis en disponibilité, dans les moyens de réalité augmentée (casque, lunettes, tablettes et smartphones) à des fins d'aide en temps réel ou de formation en temps différé. Dans ce cadre, on peut également envisager l'utilisation de cobots qui optimisent eux-mêmes leur mouvements et déchargent les opérateurs de mouvements inutiles ou chronophages ou difficiles et fatigants.

Anomalies et non conformes:

Les pièces non conformes sont identifiées par leur RFID et par la méthode de contrôle permettant de mettre en évidence leur non conformité. Cette méthode exploite différents capteurs pour déterminer la non conformité (de dimension, de couleur, de forme, de surface etc) ou par l'identification de la non réalisation d'un service selon ce qui est prescrit. Les non conformes peuvent être catégorisés selon leur type (rebut, à retoucher, à réparer ou à déclasser) et ce, au moyen d'algorithmes de machine learning pour déterminer le type de traitement qu'ils doivent subir capitalisées dans une base de connaissance (KM). Pour cela on exploite les données émanant des machines et des capteurs de suivi qualité via l'IoT qui sont traitées en cloud computing ou en edge computing. L'intelligence artificielle et le machine learning sont déterminant pour identifier le type de non conformes. Par la détection précoce de non conformité, on peut alors arrêter la production et en engager des actions de correction immédiate ou d'amélioration (c'est le jidoka comme exposé ci-avant).

Il est évident que des dysfonctionnements peuvent être détectés sur les machines par des capteurs judicieusement choisis (de vibration, de température, de pression, de vitesse, de débit etc). Ces données pouvant être de masse (big data) sont alors recueillies via l'IoT et traitées en cloud computing ou en edge computing. Des algorithmes d'intelligence artificielle

et de machine learning sont appliqués pour donner la prévision de la date de manifestation de l'arrêt et de l'évolution de l'anomalie. Des interventions sont alors préconisées et réalisées automatiquement par CPS ou par un opérateur qui peut être aidé par des moyens de réalité augmentée (casque, lunettes, tablette ou smartphone) selon un standard d'intervention digitalisé. C'est ce qui est appelé predictive maintenance 4.0.

Attentes:

Les attentes peuvent concerner les 5 M (main-d'œuvre, matière, machines, méthodes et milieux). Ces éléments peuvent être identifiés et suivis grâce à leur RFID en fonction du processus concerné. Les attentes peuvent être détectées automatiquement au moyen de capteurs adaptés (de mouvement ou de fonctionnement ou de production) et de chronométrage automatique. On peut alors traiter ces données pour les catégoriser selon les 5M, déterminer les causes d'attente correspondantes et les solutions convenables pour les réduire voire les éliminer. On peut alors recourir au jumeau numérique d'un processus avec ses 5M pour identifier les attentes, leurs causes. On peut y appliquer les solutions envisagées, en vérifier les résultats et les valider avant leur mise en œuvre réelle. Les outils d'intelligence artificielle ainsi que la KM (knowledge Management) peuvent être exploités afin de déterminer les solutions pouvant être adoptées selon les types d'attentes identifiées. S'agissant de l'attente des pièces et matières requises pour la fabrication on peut utiliser les techniques de la supply chain 4.0 ainsi que les méthodes de lean logistics (supermarché, tournée de laitier, AGV etc) ainsi que les méthodes du JIT et kanban 4.0.

Les tableaux 4, 5 et 6 synthétisent ce qui fut évoqué ci-avant.

| | Valeur | Flux valeur | Flux continu | Flux tiré | Perfection |
|---------------------|--------|-------------|--------------|-----------|------------|
| IoT | x | x | x | x | x |
| Big data | x | x | x | x | x |
| CPS | | x | x | x | x |
| 3D | x | | | | |
| AR | x | | | | x |
| Cloud Computing | x | x | x | x | X |
| Edge computing | x | x | x | x | x |
| IA-Machine learning | x | x | x | x | x |
| RFID | | x | x | x | |
| Simulation | x | x | x | x | X |
| intégration | x | x | x | x | X |
| Robots et cobots | | x | x | x | x |
| Cyber sécurité | x | x | x | x | x |

Tableau 4: les cinq principes du lean et les technologies 4.0

| | Mudas | | | | | | | muras | muris | AVA | ASVA |
|---------------------|-------|---|---|---|---|---|---|-------|-------|-----|------|
| | T | S | M | A | P | F | D | | | | |
| IOT | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| Big data | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| CPS | x | | x | | | x | x | x | x | x | x |
| 3D | | x | | | | | x | | | | |
| AR | x | | x | x | | | | | | | |
| Cloud computing | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| Edge computing | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| IA-Machine learning | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| RFID | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| Simulation | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| Intégration | x | x | | x | x | x | x | x | x | x | x |

| | | | | | | | | | | |
|---------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Robots | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| Cybersécurité | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |

Tableau 5: Les gaspillages 3M et les technologies 4.0

| | JIT | Jidoka | Standardisation | Stabilisation 5M | Kaizen | 5S | TPM | Heijunka |
|---------------------|-----|--------|-----------------|------------------|--------|----|-----|----------|
| IOT | x | x | x | x | x | x | x | x |
| Big data | x | x | x | x | x | x | x | x |
| CPS | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 3D | | | | x | x | x | x | |
| AR | | | x | x | | x | x | |
| Cloud Computing | x | x | x | x | x | x | x | x |
| Edge computing | x | x | x | x | x | x | x | x |
| IA-Machine learning | x | x | x | x | x | x | x | x |
| RFID | x | x | x | x | x | x | x | x |
| Simulation | x | x | x | x | x | x | x | x |
| Intégration | x | x | x | x | x | x | x | x |
| Robots | x | x | x | x | x | x | x | x |
| Cybersécurité | x | x | x | x | x | x | x | x |

Tableau 6: La maison du lean et les technologies 4.0

Démarche de mise en œuvre:

1. Décision stratégique
2. Constitution de groupe de pilotage
3. Formation aux technologies 4.0
4. Formation au lean
5. Diagnostic numérique et évaluation de maturité numérique
6. Diagnostic lean
7. Plan d'action lean
8. Plan d'action digital I4.0
9. Intégration Lean - I4.0
10. Etude de faisabilité technique et économique
11. Mise en œuvre des plans intégrés
12. Analyse des résultats et rétro-action
13. Généralisation
14. Capitalisation

La démarche industrie 4.0 nécessite des investissements dans des solutions logicielles, dans des équipements et dans la formation de la main-d'œuvre. La valeur ajoutée que créeront les données numériques entrainera des changements dans les comportements d'opération et de gestion.

Depuis plus de trente ans, l'acquisition de technologies numériques s'est généralement faite à la pièce, l'entreprise répondant à des besoins technologiques spécifiques pour améliorer sa performance.

Il importe de ne pas oublier que l'infrastructure numérique n'est pas une fin en soi. Il s'agit d'un moyen au service des processus. Ce sont eux qui lui donnent une véritable valeur.

Les entreprises peuvent acquérir les mêmes équipements et technologies mais l'élément qui les différenciera est leur capacité à maîtriser et à intégrer ces technologies dans un portefeuille cohérent et performant intégrant le matériel et l'homme.



OUHBI Brahim

Docteur d'Etat

Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers
Meknès, Maroc

Smart Economy and Digital Business

L'avènement de plateformes numériques (collaboratives, e-commerce, places de marchés, réseaux sociaux, applications mobiles, etc.) offrent aux entreprises de nouveaux moyens de création de la valeur fournissant ainsi un avantage concurrentiel de taille et posent, cependant, un certain nombre de challenges en terme de choix de la stratégie de digitalisation, de la capacité de tirer profit de ses données et de mesure de la valeur ajoutée du patrimoine « connaissances de l'entreprise ». Dans ce travail, nous présentons deux exemples dans le domaine du marketing digital : le premier porte sur les systèmes de recommandations industriels (SRI) en considérant trois cas : les SRI collaboratifs, les SRI à base du contenu et les SRI hybrides. Ces systèmes, qui sont utilisés dans les secteurs BtoC du commerce, de la distribution et des services ; sont tributaires des données des consommateurs. Nous montrons comment résoudre le problème du démarrage à froid rencontrés dans les deux cas suivants : nouveau client et nouveau produit. Nous présentons ensuite un deuxième exemple et qui porte sur la détection des communautés sur les réseaux sociaux et ses différentes applications industrielles. Nous terminons cette étude par dresser un certain nombre de questions que pose l'avènement de tels systèmes en terme de mesure de la performance par les KPI traditionnels.

SMART ECONOMY OU ÉCONOMIE DES DONNÉES : DEUX CAS D'ÉTUDE ET QUELQUES DÉFIS

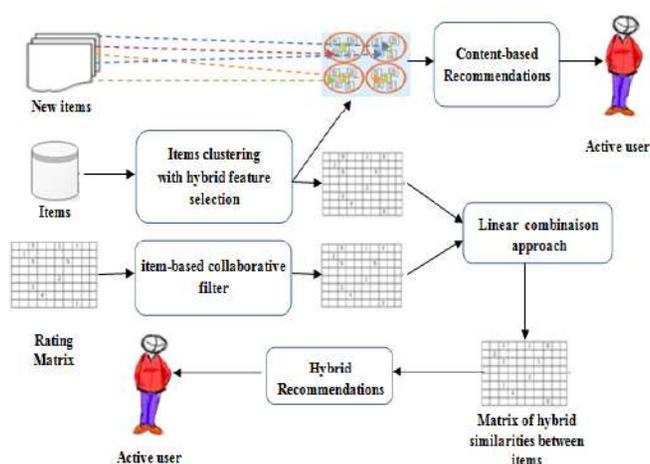
1/ Introduction

La première décennie de ce siècle a vu la naissance de l'internet et puis du datamining aboutissant à la révolution de l'IA et du Big data durant la deuxième décennie. La principale composante commune à ces révolutions est la place qu'occupe les algorithmes dans les processus de la prise de décision. En effet, Les algorithmes du machine learning, du Deep-learning ont et vont bouleverser d'avantage et en profondeur l'organisation de l'entreprise, qui devra faire face à plusieurs enjeux cruciaux : la valorisation du potentiel interne et la protection du savoir-faire, la mise en place du processus d'innovation (mémoire projet et mémoire de l'entreprise, la capacité d'absorption, la stratégie commerciale et la relation avec les clients (CRM), la protection de la propriété intellectuelle et industrielle et l'art de la prise de décision (évaluation des alternatives et simulation des scénarios). Cette révolution est également marquée par l'élargissement du business model de l'entreprise, faisant évoluer ce dernier du schéma classique de l'entreprise, qui investit un capital matériel et le fructifie pour dégager des revenus qu'elle réinjecte dans la machine de production ou qu'elle retire, vers un schéma qui intègre le capital intangible

de la connaissance et du savoir-faire individuel et collectif, qui est producteur de la valeur ajoutée et permet d'améliorer et de développer plus rapidement le capital matériel, charge à l'entreprise d'en prendre conscience et connaissance (Frikh et al. 2019). Afin de bien comprendre les bouleversements que connaît l'entreprise actuellement, il suffit de prendre l'exemple du commerce électronique et des réseaux sociaux qui ont remodelé de manière impressionnante le fonctionnement du monde des affaires (Boris Barraud 2019). En effet, l'IA et Big data deviennent de plus en plus un levier considérable de développement de la nouvelle richesse, comme en témoigne la valeur sur le marché des géants du numérique, GAFAM et BATX (Rapport du SENAT 2019), qui possèdent les principaux réservoirs de données. On assiste actuellement à la naissance de l'entreprise intelligente par l'introduction de l'IA et du Big data, dans le sens où ces outils d'intelligence permettraient de mettre en place des systèmes intelligents d'aide à la décision (Sellak et al. 2018), permettant la création de la valeur ajoutée et ouvrant des opportunités pour l'innovation (Del Giudice et al., 2018 ; Bonfanti et al. 2018 ; Nambisan et al. 2017.). L'avènement de plateformes numériques (collaboratives, e-commerce, places de marchés, réseaux sociaux, applications mobiles, etc.) offrent aux entreprises de nouveaux moyens de création de la valeur fournissant ainsi un avantage concurrentiel de taille et posent, cependant, un certain nombre de challenges en terme de choix de la stratégie de digitalisation, de la capacité de tirer profit de ses données et de mesure de la valeur ajoutée du patrimoine « connaissances de l'entreprise ». Dans ce travail, nous présentons deux exemples dans le domaine du marketing digital : le premier porte sur les systèmes de recommandations industriels (SRI) en considérant trois cas : les SRI collaboratifs, les SRI à base du contenu et les SRI hybrides. Ces systèmes, qui sont utilisés dans les secteurs BtoC du commerce, de la distribution et des services sont tributaires des données des consommateurs. Nous montrons comment résoudre le problème du démarrage à froid rencontrés dans les deux cas suivants : nouveau client et nouveau produit. Nous présentons ensuite un deuxième exemple et qui porte sur la détection des communautés sur les réseaux sociaux et ses différentes applications industrielles. Nous terminons cette étude par dresser un certain nombre de questions que pose l'avènement de tels systèmes en terme de mesure de la performance par les KPI traditionnels.

2/ Systèmes de recommandation

Les systèmes de recommandation sont devenus un important domaine d'études recherche proposant des techniques intelligentes de recherche à travers l'énorme volume d'informations disponibles sur Internet. Le filtrage collaboratif et les méthodes basées sur le contenu sont les deux approches les plus couramment utilisées dans la plupart des systèmes de recommandation. Compte tenu que chacun d'eux a des avantages et des inconvénients en fournissant des recommandations de haute qualité, un mécanisme de recommandation hybride (cf schéma 1) intégrant les composants de ces deux approches donnera des résultats meilleurs et en outre règlerait le problème de démarrage à froid d'un nouveau produit, qui ne peut être traité par le filtrage collaboratif. Nous proposons ainsi d'employer notre mécanisme de clustering pour compenser le manque des évaluations des utilisateurs via une approche hybride, ce qui permet d'améliorer les performances du système de recommandation et arrive à prédire le comportement d'un utilisateur actif envers un nouveau produit.



Framework de notre schéma Hybride

3/ Détection de communautés sur les réseaux sociaux

Les réseaux complexes sont considérés comme des outils utiles pour représenter et modéliser des systèmes du monde réel dans des divers domaines comme les réseaux sociaux, les réseaux biologiques et d'autres. Par conséquent, l'étude et l'analyse de systèmes réels en utilisant la théorie des graphes ont attiré beaucoup d'attention dans le domaine de l'apprentissage automatique. En effet, la représentation des réseaux sociaux par des graphes nous offre une vision microscopique de la structure des interactions des utilisateurs. Cette représentation nous permet de comprendre les propriétés complexes des réseaux sociaux qui sont cachés en réalité. L'une de ces propriétés critiques est l'existence des groupes contenant des membres qui partagent des caractéristiques similaires et ils sont fortement liés entre eux par rapport aux autres membres du graphe. La découverte des communautés est un axe important dans le domaine d'analyse des réseaux sociaux. Dans un premier temps, la détection des communautés a été étudiée dans les réseaux statiques dans lesquels les nœuds et les liens sont considérés comme des objets mathématiques fixes dans le temps. Ensuite, le problème est étendu aux réseaux dynamiques où des nœuds et des liens peuvent apparaître ou disparaître au fil du temps. Dans ce sens, nous nous intéressons à la détection des communautés dans les réseaux sociaux statiques et dynamiques.

Les algorithmes de la détection des communautés statique visent à découvrir la structure communautaire d'un réseau social à un moment donné. Diverses approches qui sont basées sur différents choix de la modélisation et différents aspects des réseaux sociaux ont été proposées dans la littérature. Dans ce travail, nous proposons deux méthodes. La première méthode est statique et nommée LeaDCD (Akachar et al. 2020). Il s'agit d'une approche en trois étapes qui utilise les informations locales des nœuds pour détecter les communautés et leurs nœuds influents (ou leaders). Ensuite, nous affectons les nœuds restants dans le graphe aux graines en utilisant un processus d'expansion pour étendre la structure communautaire initiale. Finalement, certaines petites communautés sont fusionnées pour former la structure communautaire finale. Dans un deuxième temps, une approche hybride fondée sur des mesures statistiques et sémantiques a été adoptée pour extraire les sujets d'intérêt des utilisateurs. En conséquence, le réseau initial est divisé en plusieurs clusters (clusters par thématiques) de sorte que chacun représente un sujet spécifique. Afin de détecter la structure communautaire finale, nous analysons les interactions des membres de la même thématique (schéma 2, cf. Akachar et al. 2021). Les méthodes de la détection des communautés dynamiques permettent d'identifier les communautés et leur évolution au fil du temps. Dans ce travail, un algorithme efficace, nommé ACSIMCD est proposé pour détecter et mettre à jour la structure communautaire dans les réseaux sociaux dynamiques. ACSIMCD est un Framework en deux étapes et une version adaptative de l'algorithme CSIMCD. Dans la première phase, nous détectons la structure communautaire initiale par l'algorithme ACSIMCD. Dans la deuxième phase, la structure communautaire initiale est mise à jour de manière incrémentale en fonction des changements du réseau. Généralement, dans l'algorithme ACSIMCD, les modifications du réseau sont modélisées par quatre événements : l'ajout de nouveaux nœuds, la création de nouvelles interactions, la disparition de nœuds existants et la suppression d'interactions existantes. Pour chaque événement, différents scénarios sont conçus pour mettre à jour la structure communautaire en douceur.

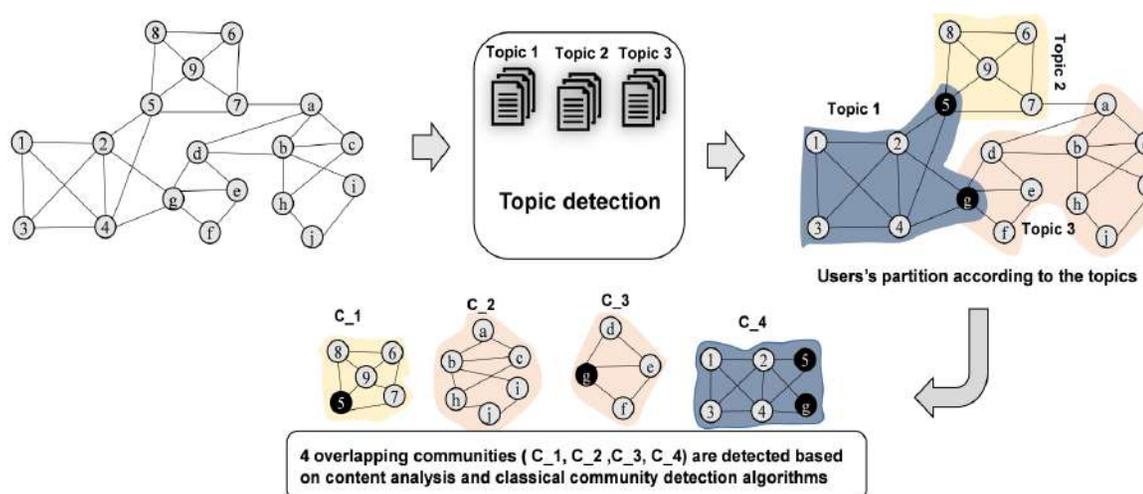


Schéma 2 : Illustration de notre approche.

4/ Mesure de la Performance

Avec l'avènement des technologies digitales, on assiste à des changements importants tant au niveau de la nature de la relation entre l'entreprise et ses clients qui est passé de la massification à la personnalisation voir dans certains cas l'hybridation qu'au niveau de la collecte des données qui est passé d'un modèle de sondage classique à un modèle d'automatisation des enquêtes aboutissant grâce aux techniques de machine learning à des processus automatisés de l'acquisition de la connaissance (3K : Knowledge acquisition, Knowledge sharing, Knowledge capitalisation). Cette transition permet , grâce aux deux systèmes précédents (Système de recommandation et algorithmes de détection de communautés permet aux entreprises qui déploient ce type de système de réaliser des avantages importants dont nous citons :

- l'aspect dynamique qui permet un gain considérable en temps de prise de décision puisqu'on passe d'un temps de latence considérable des systèmes traditionnels due au temps de sondage, de l'analyse des données et de la prise de décision à des enquêtes et prise de décision automatisées presque en temps réel.
- la décision est basée sur la connaissance acquise à partir des données massives traitées par les techniques du deeplearning permettant ainsi une complémentarité avec les experts et une meilleure valorisation du savoir-faire.
- le meilleur ciblage des segments de marché grâce aux techniques de détection de communautés présentant un intérêt particulier pour un produit donnée.
- Meilleure connaissance des préférences du client et la prise en considération des besoins clients en amont.

D'autre part, les technologies digitales posent un certains nombres de défis par rapport à la mesure de la performance dans un contexte de données massives. En effet, l'abondance des données n'est pas un gage de garantir de la bonne décision (M. Ghasemaghaei (2019),) mais il sont tributaires de la fiabilité des données récoltés, de la pertinence des algorithmes utilisés et du modèle de capitalisation utilisé (Safhi et al.2020). Dans le cas des systèmes de recommandation, plusieurs indicateurs peuvent être utilisés tel que : le taux de conversion des utilisateurs en acheteurs, la durée des visites, le nombre de clics, etc.). Cependant, ces indicateurs ne sont pas explicites et présentent une certaine limite en terme de communication avec les utilisateurs. D'autre part, leur apport en terme d'innovation et ses conséquences sur les politiques marketing ne sont pas encore traité par les scientifiques (ref.)

5/ Conclusion et Perspectives

Les systèmes de recommandations et les techniques de détections des communautés sont des outils de management de la relation avec le marché pour les entreprises qui décident de s'y mettre puisqu'ils permettent effectivement aux entreprises de développer des connaissances nouvelles sur la manière dont les consommateurs font usage des produits/services de consommation permettant à l'entreprise de mieux connaitre le marché et de cibler de manière efficace ses clients. Il est claire, de manière empirique, que ces outils ont un effet très positif sur la performance de l'entreprise qui les adoptent. Néanmoins, comme nous l'avons souligné, il reste encore beaucoup de travail à faire pour intégrer la valeur ajoutée de ces outils dans la mesure de la performance. Dans notre étude future, nous allons nous pencher sur les conséquences de ces outils sur les différents axes de la balanced Scorcard (ref 3), peu de littérature traite ce sujet qui commence à intéresser les chercheurs et à introduire de nouveaux concepts comme : DFC (Digital financial capability).