

2.

BRIQUES
TECHNOLOGIQUES
ET CAS D'USAGE



2. BRIQUES TECHNOLOGIQUES ET CAS D'USAGE

L'évolution des usines dans le cadre de l'industrie du futur est directement associée à un certain nombre de briques technologiques. Elles en sont même un pilier majeur sur les concepts d'usine 4.0 que l'on retrouve en Allemagne notamment.

Nous nous proposons d'en lister un nombre réduit comprenant l'essentiel de celles-ci. Nous avons tenté également d'intégrer des briques non technologiques liées au management. Nous avons ciblé les briques les plus répandues (sur les filières et les métiers) et les plus exploitables dans un cadre éducatif.

Ainsi, nous pourrions également nous intéresser aux briques suivantes :

- sur les procédés : le MIM (Moulage par Injection du Métal), le soudage, plasma, collage... ;
- sur les matériaux : composites (matrice céramique, hybride...), nanomatériaux, nanotubes de carbone, nouveaux alliages, matériaux auto-réparants, le bio-mimétisme ;
- sur l'électronique : la RFID (Radio Frequency Identification), les MEMS (Microelectromechanical systems), la plastronique, le Heat pipe, les batteries, l'électronique quantique, la biométrie... ;
- sur l'informatique : les API (Application Programming Interface) ouvertes, le LoRA (Réseau Long Range), le LI-FI (Light Fidelity), l'informatique quantique ;
- sur l'énergie : les smartgrids, la bioluminescence...

Pour la suite nous nous référerons à 5 catégories : les nouveaux procédés, les outils de modélisation et de simulation, le numérique, les cybersystèmes et enfin le management. Chaque brique technologique sera très brièvement présentée.

2.1. Nouveaux procédés et méthodes

2.1.1. Prototypage rapide

L'objectif principal du prototypage rapide est la fabrication d'un modèle physique (maquette, prototype, outillage) dans un délai très court, à moindre coût et avec le minimum d'outillage et d'étapes intermédiaires dans le processus de réalisation.

On peut ainsi, au cours du cycle de développement d'un produit :

- détecter au plus tôt d'éventuels problèmes de conception sans conséquences majeures sur le coût final ;
- tester des solutions alternatives (choix technologiques pour la pièce, procédés utilisés pour sa fabrication...)

- valider rapidement la faisabilité industrielle de la pièce et optimiser les formes et le coût des outillages futurs nécessaires à sa fabrication en série, et donc minimiser les risques de modifications lors de l'industrialisation ;
- affiner les caractéristiques opérationnelles du produit (mécanique, aérodynamique, esthétique, ergonomique...) au travers de tests en grandeur réelle sur un prototype physique ;
- disposer d'un objet support, et éviter ainsi l'arbitrage d'éventuels conflits ou le développement en parallèle des éléments de procédés et de processus inhérent à chaque métier (obtention du brut, usinage, métrologie, assemblage, packaging...).

Intégration pédagogique

Le prototypage rapide constitue par ailleurs un moyen idéal pour tester ses idées dans le cadre des processus d'innovation. Le développement des fablab a permis notamment aux établissements d'enseignement supérieur de soutenir cette créativité et favoriser les expérimentations.

Concept né au MIT, les fablab (pour Fabrication Laboratory) sont selon la charte élaborée par ce même MIT, des lieux ouverts, accessibles à tous, où chacun peut s'exprimer et explorer ses idées. Ce sont des lieux qui mettent à disposition différentes technologies telles que des imprimantes 3D, des découpes laser, des fraiseuses, des scanners et également du matériel de bricolage classique. Des dispositifs de prototypage électronique y sont fréquemment présents tels que des cartes Arduino ou Raspberry PI, véritables micro-ordinateurs permettant de faire de l'électronique embarquée.



Figure 7- Fablab CESI Nanterre

Parfaitement adaptés aux pédagogies actives par projet, les fablab permettent de développer chez les apprenants les compétences associées.

2.1.2. Fabrication additive métallique

Apparue il y a une vingtaine d'années, la fabrication additive métallique (FAM) entre dans une phase de maturité industrielle. Elle est un constituant majeur de l'usine du futur. Ainsi, l'enjeu de ses utilisations industrielles, notamment dans la métallurgie, l'aéronautique, les transports, l'énergie et la maintenance, est désormais très fort.

En effet, ces procédés permettent d'envisager une véritable révolution :

- gain de poids des pièces fabriquées jusqu'à 60% ce qui permet de prévoir un allègement global de plus de 20% ;
- réduction du nombre de pièces à assembler par soudure de près de 90% avec pour impact, entre autres, une amélioration de la fatigue au vieillissement des pièces ;
- possibilité d'intégrer dès la fabrication des tubulures internes et de faciliter les échanges thermiques et le passage de fluides divers ;
- possibilité de réaliser des pièces unitaires et spécifiques (tel que de l'outillage) permettant d'accroître l'agilité de l'entreprise ainsi que des gains de production de plus 6 mois, comparativement à des procédés classiques ;
- mais surtout, la conception très particulière en FAM permet d'envisager des pièces qu'il n'était tout simplement pas possible de réaliser par des moyens traditionnels.

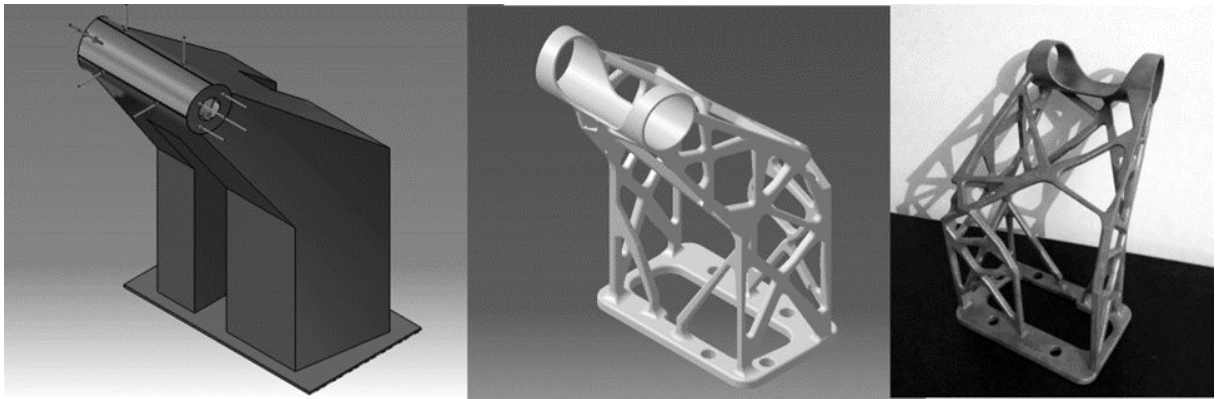


Figure 8- Ex. de support d'antenne pour satellite obtenue par optimisation topologique
[Co-conception Thales Alenia Space et Poly Shape, Fabrication par Poly Shape]



Figure 9- Réalisation de pièces complexes sans soudures ni assemblages

Ainsi, les applications pour les industriels sont multiples et le potentiel industriel de la FAM est immense.

Même si la performance métallurgique de la FAM semble encore inférieure à celle des pièces forgées, l'intérêt de cette technologie lors de la conception et de la maintenance est déjà très élevé. Par exemple, la diminution importante du nombre de soudures et la conception même des pièces peut modifier leur résistance mécanique ou leur comportement à l'effort et au vieillissement.

Enfin, la FAM présente l'intérêt de répondre à des besoins précis parfois uniques des industriels (sur la maintenance : reconception, refabrication rapide de pièces cassées..., la réalisation de prototypes industriels, la micro-production...). Or la technologie demeure coûteuse. Ainsi, la mutualisation des outils et la facilité d'accès à ceux-ci est essentiel.

Sept familles technologiques sont communément admises pour la fabrication additive et représentées sur la figure ci-dessous. A noter, que l'évolution technologique est très rapide, ce schéma n'est représentatif qu'au moment de sa publication.

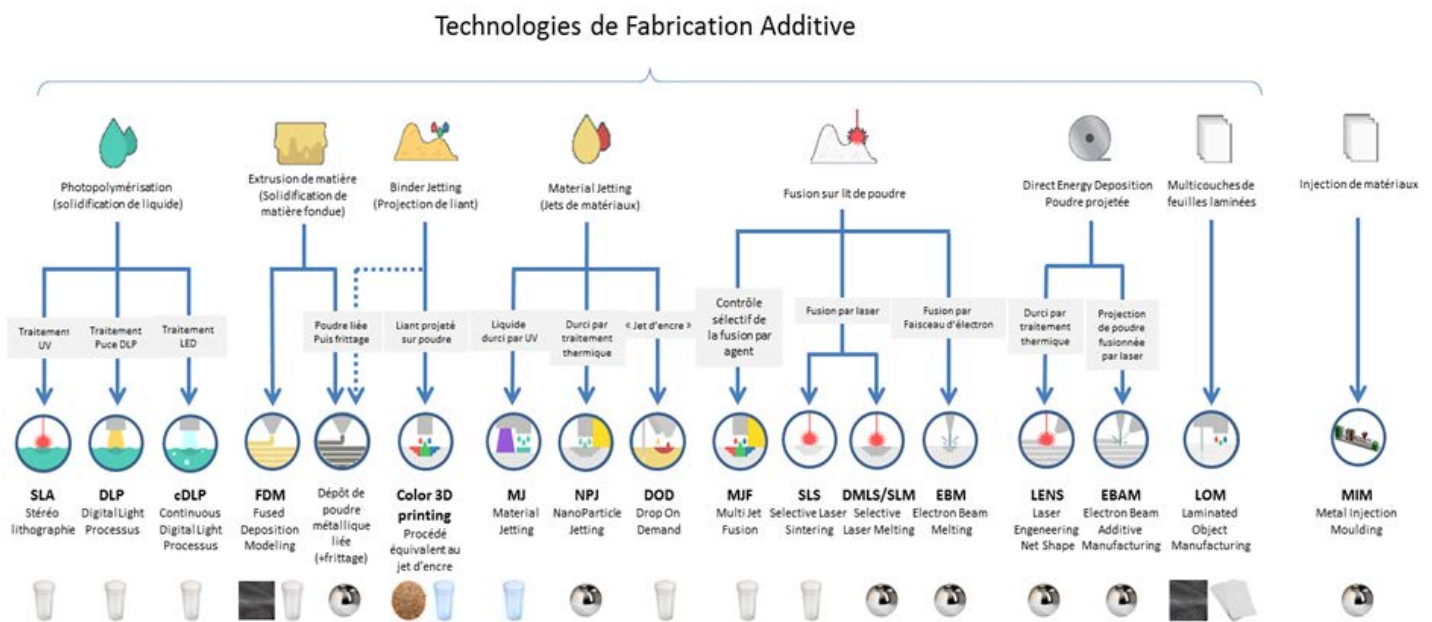


Figure 10- Les 7 familles de procédés de fabrication additive [traduit et inspiré de www.3dhubs.com/what-is-3d-printing]

Trois familles technologiques peuvent être identifiées concernant la FAM :

- 1- **Procédés de dépôt par fil de poudres métalliques liées.** La pièce est réalisée de manière proche du FDM (Fused Deposition Modeling), procédé à dépôt de fil plastique. La pièce nécessite alors un post-traitement en four de frittage pour permettre la fusion de la poudre métallique. L'inconvénient de cette technologie est de réaliser des pièces métalliques poreuses et donc de qualité métallurgique moyenne. Toutefois, cette technologie présente peu de risques industriels et reste intéressante sur le plan du prototypage.

- 2- **Procédés de projection de poudre fusionnée directement sur la pièce.** Intéressant pour la modification de fonction ou la maintenance, ce procédé reste le plus coûteux et le plus complexe à mettre en œuvre. A ce jour, ce procédé reste marginal et le moins développé.
- 3- **Procédés de frittage par laser sur lit de poudre.** L'un d'eux est connu sous le nom de SLM (Selective Laser Melting). Il s'agit de la méthode la plus courante et surtout la plus prometteuse pour la fabrication additive des métaux. Toutefois, il est nécessaire de maîtriser pleinement le risque associé au procédé. En particulier, l'usage de poudres métalliques introduit des risques de déflagration, d'inflammation et CMR (Cancérogènes Mutagènes et Reprotoxiques). Ainsi, il est nécessaire de mettre en œuvre un environnement ATEX complet, en dépression, et les procédures associées.

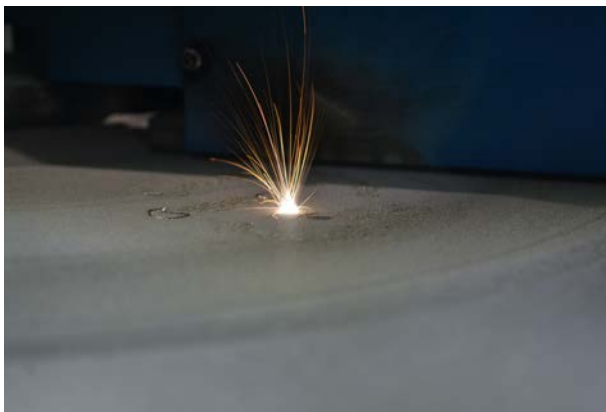


Figure 11- Fusion de la poudre métallique en lit par laser (SLM)



Figure 12- Fusion de poudre projetée (BEAM)

Cas d'usages industriels :

- accroissement de performance (poids, assemblage, canaux) ;
- accroissement de complexité ;
- réalisation d'outillage ;
- personnalisation de pièces / pièces uniques ;
- gestion de l'obsolescence ;
- ajout de fonction aux pièces ;
- maintenance industrielle (réparation).

Intégration pédagogique

La fabrication additive notamment métallique nécessite donc de mobiliser un nombre très important de compétences et de connaissances :

- connaissance des différentes technologies à disposition ;
- connaissance approfondie des sciences des matériaux ;
- conception innovante pour la fabrication additive ;
- maîtrise des processus de sécurité et de protection des biens, des personnes et de l'environnement ;
- maîtrise des machines.

Ainsi, au-delà de compétences associées à l'utilisation de petites imprimantes 3D à dépôt de fils plastiques dans le cadre des fablab, les établissements d'enseignement supérieur vont être amenés à proposer des parcours complets de spécialité proposant l'acquisition de ce métier.

Par ailleurs, la généralisation de ces technologies en tant que nouveaux procédés de fabrication implique que les ingénieurs et techniciens en production, en maintenance, en conception ou encore en qualité soient *a minima* initiés à ces technologies de manière à les appréhender au mieux dans leur métier.

2.1.3. Contrôles non destructifs

Le contrôle non destructif (CND) est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader. Il est utilisé soit au cours de la production, soit en cours d'utilisation, soit dans le cadre de maintenances. On parle aussi d'essais non destructifs (END) ou d'examens non destructifs.

La thermographie

Selon la définition de l'AFNOR, la thermographie est la technique permettant d'obtenir, au moyen d'un appareillage approprié, l'image thermique d'une scène observée dans un domaine spectral de l'infrarouge.

La tomographie

Il s'agit d'un système d'imagerie qui permet de reconstituer le volume d'un objet à partir d'un grand nombre de mesures réalisées par tranche. Cette famille de techniques permet de réaliser des contrôles métrologiques particulièrement précis et surtout d'inspecter l'intérieur d'une pièce et notamment sa structure métallurgique. C'est donc une technique très utilisée dans le milieu médical ou pour les sciences des matériaux. On distingue différentes techniques : l'IRM, la tomographie par rayon X, par émission de positrons ou de muons...

Le ressuage (en anglais penetrating testing)

Il s'agit d'une méthode très utilisée en métallurgie notamment dans l'aérospatiale, qui permet de mettre en évidence la présence de fissures sur tous types de métaux, céramiques, ou matériaux composites.

Le CND par ultrasons

Cette technique permet de mettre en évidence des défauts internes à une pièce par l'émission d'ultrasons et l'analyse de leur réflexion, les ondes interagissant avec les défauts rencontrés.

L'analyse vibratoire

Il s'agit d'une technique permettant de réaliser des prédictions de maintenance sur des machines tournantes. Le principe consiste à réaliser une mesure initiale d'une machine qui en constituera sa signature. De nouveaux relevés sont réalisés à intervalles réguliers et comparés à l'analyse initiale. Toute variation sera le signe d'un problème potentiel tel qu'un desserrement de vis par exemple.

La métrologie optique

Ces méthodes reposant sur les propriétés de la lumière présentent l'avantage d'être rapides à réaliser et souvent faciles à mettre en œuvre. Les mesures par laser permettent, par la précision de ce dernier, de réaliser des contrôles d'alignement, de rectitude, de niveau, d'angles (collimateur, auto collimateur), d'épaisseur, d'apparence, de déplacement, de vibrations.

La magnétoscopie

Cette technologie est majoritairement utilisée dans les sciences des matériaux qui doivent toutefois posséder des propriétés ferromagnétiques (donc alliages à base de fer, nickel ou cobalt). La technique permet de mettre en évidence des fissures, le flux magnétique étant dévié en présence de défauts qui sont alors révélés.

L'émission acoustique

Cette technique repose sur l'émission d'ondes élastiques transitoires dans un matériau. Elle permet de suivre l'évolution dynamique d'un défaut d'une structure et donc de suivre la détérioration de celle-ci. Cette technique est particulièrement avantageuse car elle peut s'effectuer sans arrêt de fonctionnement (et donc de production) tout en apportant un diagnostic global.

Interférométrie holographique

Cette technique est issue des recherches sur la production d'hologrammes pour laquelle, lorsque l'objet bouge ou se déforme, apparaissent des raies d'interférence. Ce phénomène est ainsi exploité en CND pour mesurer les déformations d'un objet.

Notons également le contrôle visuel (qui peut toutefois être assisté par monitoring) qui est le CND le plus simple.

On pourra également s'intéresser à l'analyse d'huiles, aux techniques par courants de Foucault, aux contrôles d'étanchéité...

Les usages industriels sont bien sûr très nombreux mais sont finalement rassemblés dans deux grandes catégories :

- 1- **En contrôle qualité de la production** : les CND peuvent être utilisés pour contrôler en continu les pièces produites et écarter les non-conformités. L'intérêt est évident sur les productions unitaires ou les produits coûteux.
- 2- **En maintenance industrielle (et domaine BTP)** : les CND permettent de mesurer l'état de fonctionnement de systèmes industriels, les niveaux d'usure. Ils facilitent ainsi la prédiction de maintenance qui devient alors conditionnelle (réalisée sous condition de l'état réel du système). En tant que générateur de données, ils sont associés à d'autres types de capteurs. L'ensemble des mesures doivent alors être compilées et analysées par IA (Intelligence Artificielle) pour réaliser des prédictions de maintenance à réaliser.

Intégration pédagogique

Tel que nous le verrons dans le chapitre 3, les CND deviennent indispensables à la prédiction du besoin de maintenance ainsi qu'au contrôle de la qualité. Ainsi, et de fait, ces éléments doivent faire partie du socle de connaissance maîtrisé par les ingénieurs et techniciens de ces domaines.

2.2. Modélisation et simulation

2.2.1. Modélisation multi-physique

Le fonctionnement de la plupart des produits industriels met en jeu des interactions entre plusieurs phénomènes physiques de natures différentes (mécaniques, thermiques, chimiques, électromagnétiques...). Il est donc nécessaire de pouvoir modéliser leur comportement, en intégrant les interactions entre les différents phénomènes physiques existants : c'est le rôle de la modélisation multi-physique.

La modélisation et la simulation multi-physique sont très étroitement liées aux approches systémiques. Ainsi, elles permettent de consolider des études complexes et donc de résoudre des problématiques scientifiques et techniques et d'aider à la prise de décision. Elles sont, en effet, une brique essentielle du prototypage virtuel. C'est pourquoi elles sont associées aux concepts de jumeaux numériques, de BIM (Building Information Modelling) et de PLM (voir les métiers de la conception de systèmes complexes).

D'usages très intéressants pour les métiers industriels, la modélisation pose la question des approches pédagogiques d'enseignement des sciences. Notamment, la modélisation multi-physique est par essence transdisciplinaire, y compris sur les approches méthodologiques. Ainsi, les approches pédagogiques par projets sont tout à fait pertinentes et adaptées.

En particulier, la démocratisation des logiciels de calcul formel implique un changement de paradigme. Il n'est alors plus forcément nécessaire (sauf sur des domaines de forte spécialité) de savoir résoudre des équations complexes ou autres pour résoudre une problématique scientifique, ni consacrer un temps trop long et important aux apprentissages techniques des mathématiques.

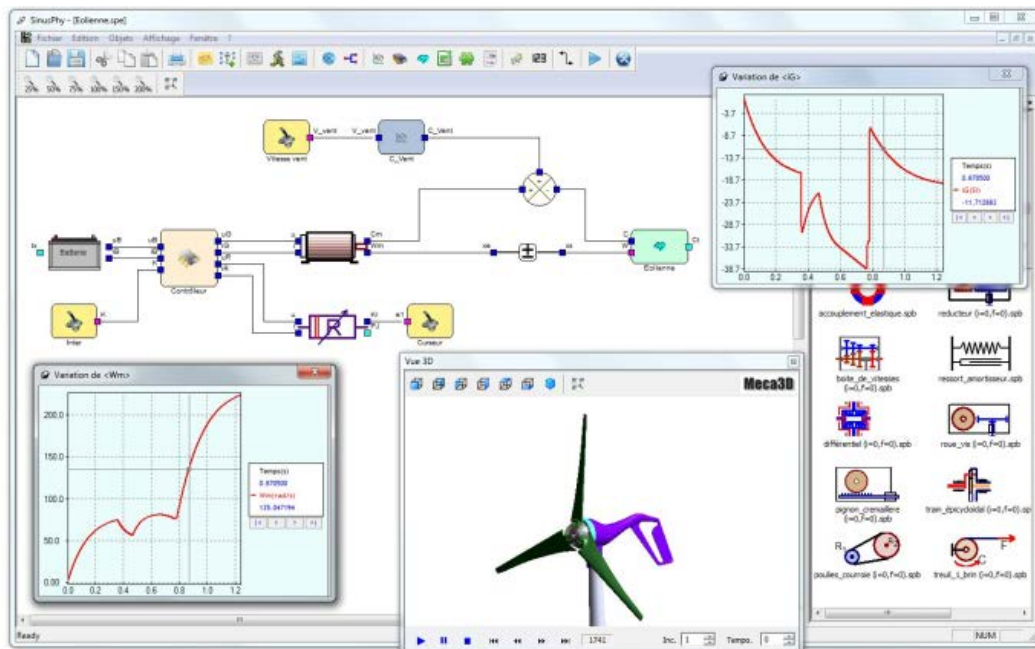


Figure 13- Scilab, logiciel de simulation multi-physique

Le principal logiciel permettant de réaliser les modélisations multi-physiques est MatLab avec Simulink développé par MathWorks.

Toutefois, plusieurs éditeurs proposent des outils gratuits très complets.

Quelques exemples :

- Scilab et XCos (<https://www.scilab.org/fr>)
- OpenModelica (<https://openmodelica.org/>)

Intégration pédagogique

En réalité, la modélisation multi-physique modifie profondément l'approche de l'enseignement des sciences par un décloisonnement complet de ces dernières. Il ne s'agit pas pour autant d'une mauvaise stratégie didactique. En effet, les systèmes physiques sont par nature à la fois chimique, mécanique, électrique, thermodynamique... avec de très fortes interactions de chaque domaine entre eux.

L'enseignement des sciences par cette approche de la modélisation multi-physique nécessite donc d'aborder la question par des pédagogies décloisonnant les domaines et conduisant à des propositions de résolution de problèmes scientifiques complexes.

En ce sens, la pédagogie par projet associant à la fois modélisation, simulation et expérimentation est particulièrement adaptée à cet enseignement.

2.2.2. Réalité virtuelle

La réalité virtuelle consiste à reproduire artificiellement une expérience sensorielle, qui peut inclure la vue, le toucher, l'ouïe et même l'odorat. Elle permet à l'utilisateur d'être pleinement immergé et de réaliser diverses simulations de la réalité.

Les moyens peuvent être des CAVE (projection stéréoscopiques 3D sur 3 à 5 faces d'un cube), des murs d'immersion, des casques, ou encore des systèmes haptiques pour le retour d'effort (voir paragraphe suivant).

Différents moyens informatiques existent pour le développement des contenus tel que Unity, par exemple, qui est aujourd'hui le logiciel le plus utilisé et par ailleurs gratuit (<https://unity3d.com/fr>).

Cependant, l'usage de ce dernier nécessite des compétences en développement informatique. Son utilisation est donc limitée pour des ingénieurs lors de cas d'usages industriels (ou pour les métiers du BTP dans le cadre de l'exploitation de la maquette BIM).

Ainsi, des solutions logicielles existent et permettent la visualisation directe de maquettes 3D réalisées sous Autocad, REVIt ou Catia. Ces solutions peuvent également autoriser la superposition de simulations techniques et scientifiques réalisées par des logiciels spécifiques tels que Fluent.

Quelques exemples de solutions logicielles :

- MiddleVR (<http://www.middlevr.com/middlevr-for-unity/>)
- Improov for Unity (<http://www.improovr.com/home/>)
- TechViz (<https://www.techviz.net/>)
- PLM Vis de Siemens (<https://www.plm.automation.siemens.com/en/products/open/vis/>)

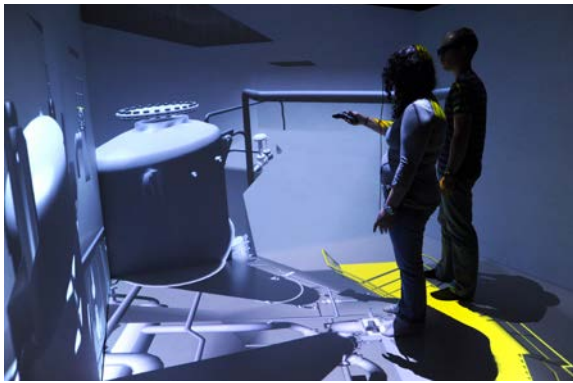


Figure 14- Cube de réalité virtuelle (CAVE) sur 5 faces



Figure 15- Casque immersif



Figure 16- CardBoard + smartphone



Figure 17- Système de réalité augmentée dans une application de maintenance industrielle

Cas d'usages industriels :

- visualisation et exploitation de la maquette numérique ;
- conception collaborative, prenant en compte tous les aspects fonctionnels du produit tout ;
- simulation, aide à la décision ;
- suivi des modifications ;
- innovation ;
- formation ;
- assistance aux techniciens ;
- exploitation, maintenance et entretien ;
- marketing et exploitation commerciale.

Quelques exemples :

- Usage pour la conception de nacelles d'avion chez SAFRAN (<http://usinedufutur.safran-group.com/realite-virtuelle/>)
- Utilisation chez Alstom Transport (<https://www.youtube.com/watch?v=h-JNNDwvP-Q>)
- Dassault System / Haption (<https://www.youtube.com/watch?v=400PKgdliHI>)
- Bras haptique Haption (<https://www.youtube.com/watch?v=4MfrgzFFVis>)

Intégration pédagogique

Comme nous le verrons au chapitre suivant, l'exploitation pédagogique de la réalité virtuelle peut être vue tout autant sous l'angle du développement de technologies, du développement de solutions logicielles que de l'utilisation industrielle.

Ainsi, l'intégration pédagogique de cette technologie va dépendre directement du métier préparé et du diplôme associé, mais il semble évident que la plupart des formations aux métiers techniques devront aborder cette technologie.

Concernant l'usage industriel, un parallèle peut être fait avec l'apparition de l'informatique grand public dans les années 80, où une sensibilisation était faite aux futurs ingénieurs. Selon la même philosophie, il s'agit d'exposer et de familiariser les ingénieurs en devenir à l'utilisation opérationnelle de la réalité virtuelle, notamment par la manipulation de jumeaux numériques de systèmes complexes.

Concernant la question du développement informatique pour ces technologies, de nouveaux métiers sont en train d'apparaître. Le métier d'animateur-concepteur en réalité virtuelle mobilise ainsi des compétences approfondies en programmation ainsi qu'en infographie et modélisation 3D, le tout dans une approche orientée usages et conception innovante. Des formations complètes de la mineure jusqu'au master et mastère spécialisé devront être proposées par les écoles et universités pour répondre aux besoins à venir.

Pour finir, l'intérêt tout particulier de la réalité virtuelle en formation implique une maîtrise partielle ou complète de celle-ci par les enseignants et les formateurs.

2.2.3. Systèmes haptiques

La réalité virtuelle reconstitue la réalité par une simulation. L'expérience peut être plus ou moins immersive selon les media de diffusion. Toutefois, les CAVE ou les casques ne permettent pas de simuler une perception essentielle qu'est le sens du toucher.

C'est le rôle des systèmes à retour d'effort dits haptiques dont le fonctionnement est présenté par le schéma ci-après.

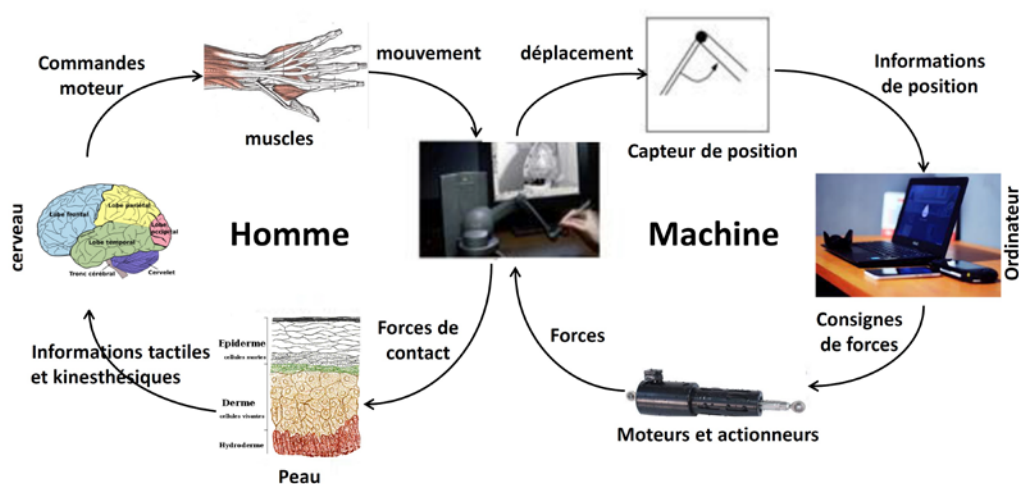
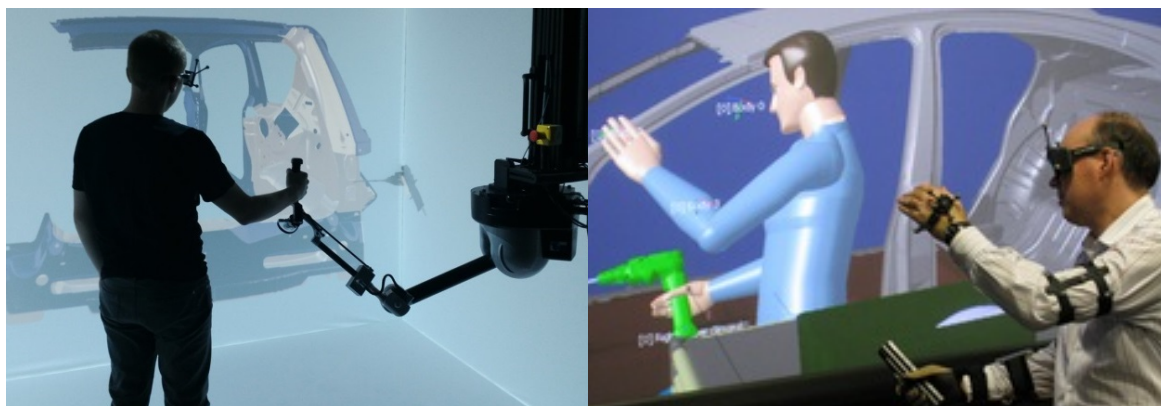


Figure 18- Interaction haptique entre l'homme et la machine [Casiez, 2004]

Les systèmes haptiques permettent ainsi de simuler le contact physique avec un objet virtuel, le poids d'un objet et le sens du toucher d'une manière générale.



*Figure 19- Bras haptique
intégré à une CAVE*

*Figure 20- Gant haptique
pour la simulation du toucher*

Ces systèmes peuvent être intégrés à des cubes d'immersion. Ils peuvent également être couplés à des systèmes de captation de mouvement (par exemple Xsens - <https://www.xsens.com/>) ainsi qu'à des capteurs biométriques (intégrés à des vêtements intelligents ou à des objets connectés).

Cas d'usages industriels :

- études ergonomiques ;
- étude de pénibilité ;
- formation aux gestes techniques ;
- conception d'un poste de travail.

Quelques exemples :

- Démonstration du Scale 1 d'Haption (<https://www.youtube.com/watch?v=4MfrgzFFVis>)
- Etude du poste de travail – Dassault (<https://www.youtube.com/watch?v=wyvYp58RKnA>)
- Etude ergonomique avec Xsens + Haption (<https://www.youtube.com/watch?v=TI2p2kKd9IY>)

Intégration pédagogique

Les systèmes haptiques permettent l'immersion la plus élevée possible pour la réalité virtuelle. Ils trouvent un usage très intéressant pour les métiers de l'ergonomie, du HSE ou pour la formation en elle-même. En effet, ils permettent de reproduire le geste et de parfaire son apprentissage pour les métiers manuels notamment.

Concernant les formations d'ingénieurs, l'appropriation technologique des systèmes haptiques pourra être intéressante sur le plan pédagogique pour les métiers du développement informatique pour la 3D ou encore pour les formations de à la qualité ou les formations intégrant des modules d'ergonomie.

2.2.4. Réalité augmentée

Contrairement à la réalité virtuelle (VR – Virtual Reality), la réalité augmentée permet d'ajouter des informations dans notre champ visuel. En superposition au monde réel, des visuels se juxtaposent à l'environnement visible. Par exemple, pour des opérations de maintenance : en pointant un équipement avec un outil de réalité augmentée, les procédures adéquates vont apparaître dans le champ de vision de l'opérateur. Ainsi, il pourra intervenir rapidement en suivant les informations affichées.

On note que la rupture entre les réalités virtuelle et augmentée n'est en réalité pas si nette. On peut en effet définir un continuum progressif entre les deux, défini par Milgram.

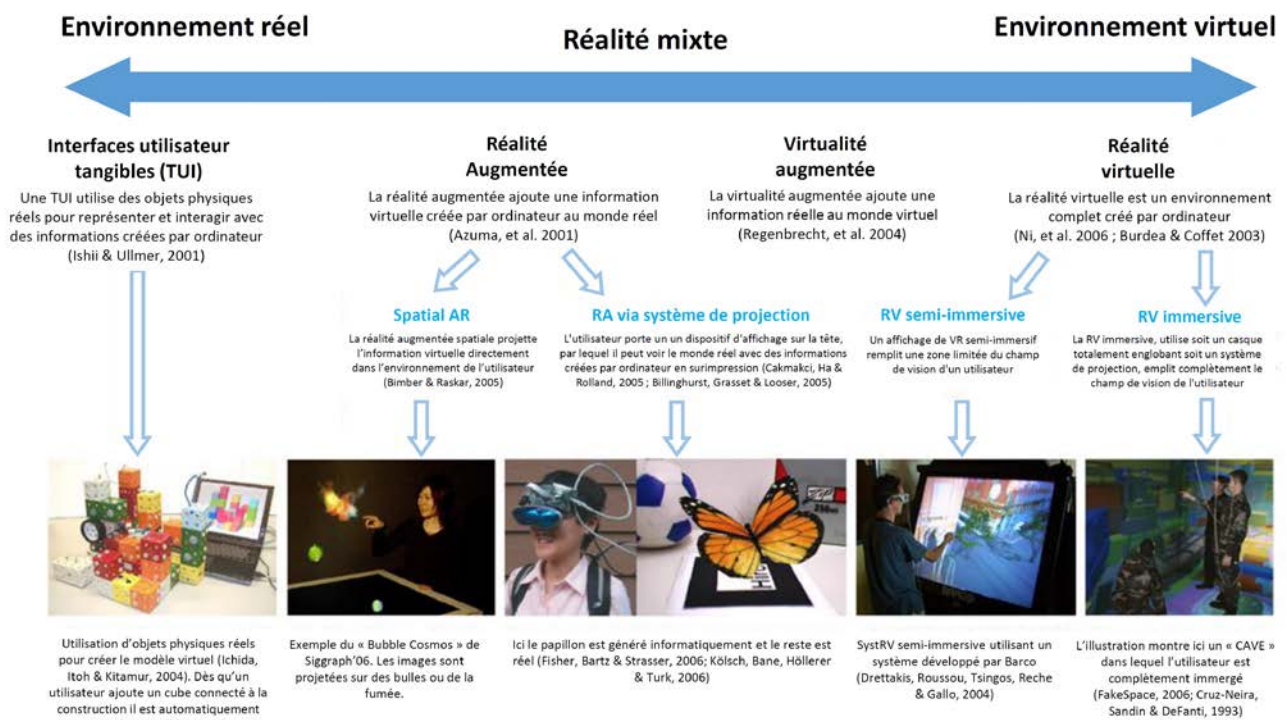


Figure 21- Continuum de Milgram
 [https://realiste.wordpress.com/le-continuum-de-milgram/]

Cas d'usages industriels :

- visualisation et exploitation de la maquette numérique ;
- conception collaborative ;
- simulation, aide à la décision ;
- suivi des modifications ;
- innovation ;
- formation ;
- assistance aux techniciens ;
- exploitation, maintenance et entretien.

Quelques exemples :

- SAFRAN : utilisation de la réalité augmentée comme assistance aux opérateurs en maintenance ou comme appui au contrôles non destructifs (<http://usinedufutur.safran-group.com/realite-augmentee/>),
- Microsoft – cas d’usages (<https://www.youtube.com/watch?v=JsSfluByteo>)
- ThyssenKrupp, utilisation en maintenance (<https://www.youtube.com/watch?v=8OWhGiyR4Ns>)
- Renault (<https://www.youtube.com/watch?v=N6iAk3I3DVU>)

Intégration pédagogique

De la même manière que pour la réalité virtuelle, l’enseignement et/ou l’usage des dispositifs de réalité augmentée va dépendre directement des métiers visés, allant de la sensibilisation à l’expertise. Les futurs ingénieurs et techniciens devront dans tous les cas se familiariser avec ces technologies car elles deviendront pour le métier un moyen aussi répandu que les calculatrices ou les ordinateurs.

Quelques cas où un enseignement approfondi sera nécessaire :

- **Les métiers de la maintenance industrielle ou du bâtiment** pour lesquels une généralisation de la technologie est plus que prévisible. Une compréhension, une appropriation élevée ainsi qu’une capacité à maintenir une veille active sur le domaine seront nécessaires pour imaginer les nouveaux cas d’usage et former les futures générations d’opérateurs.
- **Les informaticiens** pour lesquels un nouveau métier est en train d’apparaître, celui de concepteur animateur pour la 3D.
- **Les métiers de la formation** elle-même puisque la réalité virtuelle et augmentée constituent un moyen particulièrement puissant et adapté.

2.2.5. Jumeau numérique

Très intimement lié aux concepts industriels de PLM et de BIM, le concept de jumeau numérique ou « Digital Twin » a été formalisé par le Dr. Michael Grieves en 2002.

Grieves le décrit comme une mise en miroir (ou comme un jumeau) de ce qui existe dans le monde réel et de ce qui existe dans le monde virtuel. Il contient toutes les informations de « l’objet » physique c’est-à-dire une représentation de toutes les disciplines et pas seulement mécanique ou géométrique, mais aussi une représentation électronique, du câblage, du logiciel, du micro logiciel, etc. Le jumeau numérique est donc bien plus qu’une simple copie en CAO.

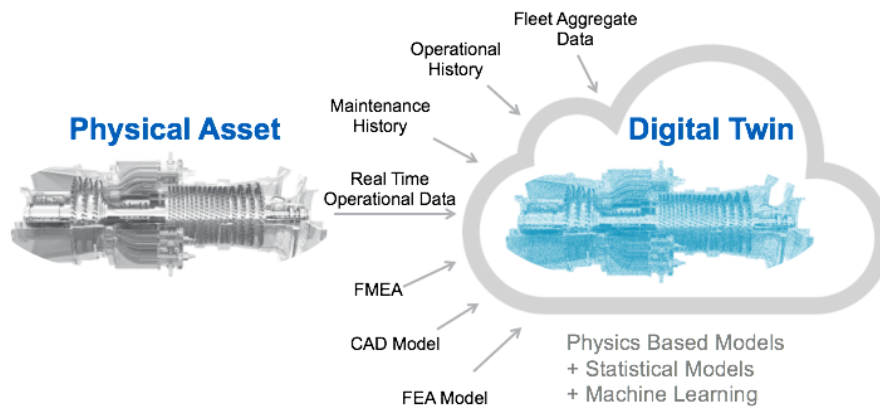


Figure 22- Principe d'un jumeau numérique ou Digital Twin d'un système industriel complexe [https://www.geoilandgas.com/]

Cas d'usages industriels :

- modélisation et simulation de systèmes complexes (intégration de la modélisation multi-physique) ;
- amélioration de la performance globale des systèmes complexes ;
- accroissement de la fiabilité ;
- meilleure appréhension de la complexité des systèmes (aide à la décision) ;
- gain de temps de conception par prototypage virtuel ;
- amélioration de la coopération des équipes projet multidisciplinaires ;
- surveillance et analyse de systèmes complexes.

Quelques exemples :

- Siemens, le DT au cœur de la chaîne numérique (<https://www.youtube.com/watch?v=oWeAYJ8CN70>)
- Conférence Digital Twin (<https://www.youtube.com/watch?v=RaOejcczPas>)
- DNV GL, définition (<https://www.youtube.com/watch?v=8ger1wrAonM>)

Intégration pédagogique

Pour ce qui est de la pédagogie, l'enjeu est double pour les ingénieurs : savoir développer et savoir exploiter les jumeaux numériques, c'est-à-dire modéliser et simuler des systèmes complexes.

Sur ce point, le parallèle sera fait avec l'apparition des logiciels de CAO qui ont progressivement remplacé les planches à dessin industriel. Ainsi, les établissements d'enseignement supérieur devront mettre en œuvre les modules et formations adaptés à l'acquisition des compétences de développement des jumeaux numériques. Tout comme cela l'a été de l'enseignement des logiciels de CAO. Evidemment, cela est particulièrement le cas pour les diplômés en conception de produits industriels.

De plus, l'utilisation des jumeaux numériques va permettre de dupliquer des équipements de formation. Ainsi, un simulateur de ligne de production installé physiquement à un endroit pourra voir son jumeau numérique exploité sur un autre centre.

2.3. Cyber systèmes

2.3.1. Robotique

Systèmes complexes associant des éléments mécaniques, électroniques, électriques, informatiques..., les robots peuvent remplacer l'humain sur des tâches simples et répétitives. Branche de l'automatique qui en permet le contrôle et la programmation, la robotique permet donc d'accroître très fortement le rendement des lignes de production tout en augmentant les temps de production. Par ailleurs, ils permettent de diminuer les erreurs (et donc les non-conformités) et présentent un fort intérêt pour la réduction de la pénibilité en réalisant les tâches les plus difficiles ou à faible valeur ajoutée.

Déjà présents dans l'industrie depuis plus de 20 ans, l'enjeu est de généraliser leur usage voire d'adapter des lignes existantes « classiques ».

Selon les définitions, les robots mobiles peuvent être parfois considérés comme des drones. De même, les robots lorsqu'ils sont sécurisés et qu'ils intègrent de l'intelligence artificielle peuvent assister les personnes et collaborer. Ils prennent alors le nom de cobots.

Cas d'usages industriels :

- automatisation des lignes de production ;
- réalisation des tâches pénibles et répétitives ;
- accroissement de la performance ;
- usine en fonctionnement continu.

Exemple :

- Robot de soudage (www.youtube.com/watch?v=sTlhzwXAOzA)

2.3.2. Cobotique

La cobotique est une branche de la robotique qui consiste à mettre en œuvre des robots collaboratifs et sûrs pour l'humain qu'ils assistent. Ce que l'on désigne par cobot.

Le cobot vient ainsi accroître la performance de l'humain tout en le dégageant de ses tâches les plus pénibles, notamment celles nécessitant des efforts physiques importants et/ou fortement répétitifs. Le cobot doit œuvrer en interprétant les gestes et les besoins de la personne pour lui apporter la meilleure réponse.

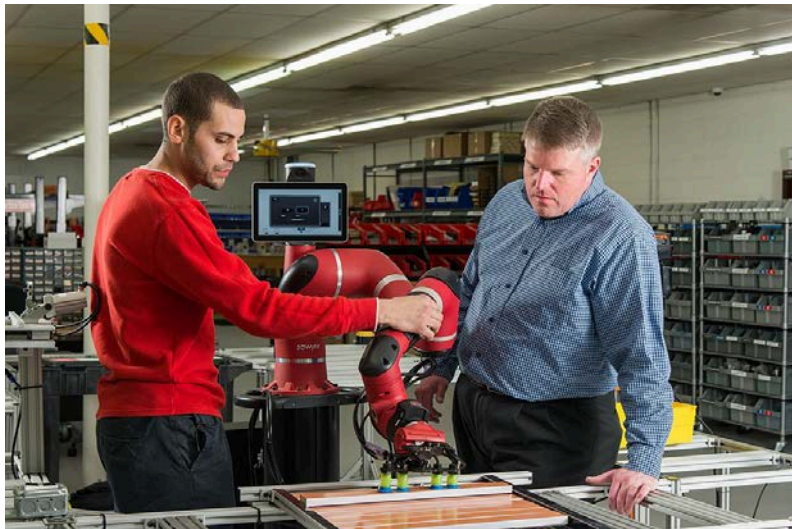


Figure 23- Cobot (collaborative robot) en assistance d'un opérateur

Cas d'usages industriels :

- accroissement de performance ;
- diminution de la pénibilité ;
- opérations médicales ;
- actions à distance.

Quelques exemples :

- Les cobots au secours des ouvriers (<https://www.youtube.com/watch?v=JUMpalxSLRM>)
- Témoignage d'une opératrice (<https://www.youtube.com/watch?v=lj-7iGI9Uqc>)
- Suppression des tâches pénibles (<https://www.youtube.com/watch?v=0zxmF8FpQYA>)
- Assistance au meulage (<https://www.youtube.com/watch?v=ITjVeym63WM>)

2.3.3. Exosquelettes

Un exosquelette ou squelette externe est une structure solide qui protège le corps d'un animal et ses organes. Les insectes, les crustacés ou encore les arachnides possèdent un exosquelette ou carapace externe, en opposition à l'endosquelette tel que celui des vertébrés.

Les exosquelettes biomécaniques sont développés depuis de nombreuses années pour améliorer la performance de l'être humain en particulier à des fins militaires.

Nous les voyons désormais apparaître dans l'industrie ou la compensation du handicap humain. En remplaçant complètement la fonction lésée dans le dernier cas, en améliorant la performance physique dans le premier. Ainsi, les tâches de manutention, de levage sont des applications industrielles intéressantes.



Figure 24- Exosquelette utilisé en maintenance ou pour la performance physique

Cas d'usages industriels :

- accroissement de performance ;
- suppression de la pénibilité ;
- adaptation du poste de travail ;
- compensation du handicap ;
- usages augmentés.

Quelques exemples :

- Dans une usine Renault (<https://www.youtube.com/watch?v=ztOt242mCpY>)
- Pour Fukushima (<https://www.youtube.com/watch?v=BUL53BK0m8Y>)
- Sur des chantiers (<https://www.youtube.com/watch?v=nfwrfuFNbro>)

2.3.4. Drones

La définition des drones diffère entre la France et les pays anglo-saxons. Traduction de « faux-bourdon » le drone est un aéronef sans passager qui peut être soit contrôlé à distance, soit fonctionner en autonomie. En France, on parle de drone également pour les objets terrestres ou sous-marins.

Développés initialement pour des applications militaires, ils trouvent désormais de nombreuses applications industrielles, par exemple dans le BTP ou l'agriculture. On les utilise pour des besoins de surveillance ou de transport. L'acception française inclut également la réalisation d'actions à distance.

Cas d'usages industriels :

- surveillance d'un chantier BTP ;
- surveillance des ouvrages pour évaluer les pathologies ;
- surveillance des lignes ferroviaires ;
- surveillance des cultures agricoles ;
- transport de colis ou de pièces ;
- livraison à domicile ;

- transport autonome de personnes ;
- microdrone : pollinisation de culture ;
- actions distantes en milieu sensible ou dangereux (ex : nucléaire) ;
- usages militaires.



Figure 25- Drone

Exemple :

- Les drones au service du BTP (<https://www.youtube.com/watch?v=WqXe-lzxEqU>)

2.3.5. Intégration pédagogique des cybersystèmes

A ce jour, toutes les formations d'ingénieurs intègrent des modules plus ou moins approfondis en automatisme et régulation. La massification de l'utilisation industrielle des robots ainsi que leurs interactions de plus en plus fortes avec les humains impliquent une évolution de ce champ d'enseignement avec des options ou des mineures entièrement consacrées à l'apprentissage des cybersystèmes.

2.4. Informatique

Les concepts de l'usine du futur et de la ville intelligente et durable sont directement portés par les évolutions actuelles de l'informatique qui porte la « digitalisation », terme impropre, de ces secteurs.

Nous faisons le choix de faire un focus sur un panel très restreint de briques technologiques mais qui nous semblent symboliques de la révolution numérique en cours. Nous aurions pu évoquer toutes les briques liées à la gestion du Web et des réseaux, à des technologies telles que le LoRA, le LiFi, les plateformes de services, le Cloud Computing...

2.4.1. IoT, capteurs intelligents

Terme inventé en 1999 par Kevin Ashton, l'Internet Of Things désigne les systèmes en capacité de réaliser des mesures de tout type de manière automatisée et sur des portées importantes. A titre d'exemple, un Airbus A380 contient près de 200 000 capteurs connectés, 10% seulement étant exploités pleinement. Ainsi, en moyenne, chaque vol génère près de 1,6 Go de données.

Pour les informaticiens, les enjeux sur les IoT consistent à maîtriser et harmoniser les protocoles de communication ainsi que d'amener tous les services associés qui répondent aux besoins des utilisateurs tels que l'assistance vocale. En effet, les IoT, au-delà de représenter des sources de données intéressantes, sont le cœur de la valeur ajoutée pour le client final. C'est pourquoi la question de la sécurité des IoT sera la principale préoccupation dans les années à venir.

2.4.2. Big Data

Comme pour les autres domaines, nous ne donnerons pas ici de description exhaustive de la notion de Big Data. Ce qu'il faut retenir, c'est que l'inflation exponentielle de capteurs et d'objets connectés a entraîné la création d'une quantité tellement massive de données que les bases de données classiques ne peuvent les gérer. Les enjeux du Big Data consistent à être en capacité de gérer, de qualifier et d'utiliser en un temps très court l'ensemble des données disponibles.

Ce concept très vaste est lui-même relié à de nombreux autres concepts tels que le cloud computing, les données non structurées, la réduction des temps d'accès aux bases de données, les bases de données géantes.

Evidemment, tous les domaines industriels sont intéressés par le Big Data, source d'informations inépuisable ; tant pour déduire des comportements machines ou humains, prédire des défaillances, que permettre la traçabilité unitaire des produits. L'objectif est de créer un écosystème informationnel en capacité de permettre à l'industriel d'améliorer ses processus et d'accroître sa performance.



Figure 26- Data base

2.4.3. Intelligence artificielle

Tout comme pour la fabrication additive, il n'y a pas une mais plusieurs technologies d'intelligence artificielle. On y trouve notamment les concepts de « Machine Learning », de « Deep Learning » ou encore de « Deep Reinforcement Learning ».

La finalité de l'IA consiste à permettre à des machines de réaliser des tâches habituellement dévolues à l'être humain : apprendre, dialoguer, raisonner, modifier son comportement en fonction de situations extérieures complexes, penser. L'enjeu, de taille, consiste donc à produire des algorithmes capables de reproduire des fonctions cognitives complexes. Le Deep Learning repose sur la capacité de la machine à reconnaître des situations, des formes de manière automatique à partir d'informations qui lui auront été communiquées et d'adapter sa réponse puis son comportement sur la base de règles claires. Par exemple, nous reconnaissons un chat à chaque fois que nous en voyons un, et cela très rapidement. Et pourtant il existe énormément d'espèces différentes. Cette capacité est directement liée au stockage dans notre mémoire d'un nombre extrêmement important de représentations de chats. C'est la même chose pour l'IA qui pour être en capacité de reconnaître ces animaux sans les confondre avec des chiens par exemple, accumule une quantité de données très importante puis agit par comparaison. On imagine la quantité de stockage nécessaire pour cela.

Le Deep Reinforcement Learning va plus loin quant à lui en procédant par essais-erreurs. Nous sommes donc là plus proches de ce que peut être une capacité d'apprentissage.

Ainsi, pour le moment, l'IA repose sur la capacité à gérer des bases de données et d'informations très importantes et à développer des algorithmes complexes. Ainsi, elle sera assez rapidement limitée aux capacités du Big Data, du Cloud Computing et des capacités de calculs des machines actuelles. Toutefois, l'avènement prochain de l'informatique quantique ouvrira des champs quasi illimités à l'intelligence artificielle grâce à des capacités de calcul proches de celles d'un cerveau humain voire davantage.

L'enseignement de l'informatique quantique est évidemment encore prématuré et constitue une activité de recherche très forte qui va s'intensifier à l'avenir. Au regard des progrès rapides d'entreprises telles que IBM qui prévoit la commercialisation d'un ordinateur quantique à 20 q-bits dans les prochaines années, il est naturel d'imaginer les nouveaux métiers sur ce secteur à un horizon très proche. Toutefois, cela fera appel à des compétences notamment en mathématique de très haut niveau.

Les enjeux de l'IA sont donc extrêmement forts et les cas d'usage très nombreux :

- robots et véhicules autonomes ;
- l'IA comme support de la cobotique et des assistants personnels ;
- analyse de données comportementales à des fins marketing ;
- prise de décisions complexes à partir de situations complexes et nouvelles ;
- optimisation de la gestion technique de bâtiments en vue de l'amélioration globale de leurs performances notamment énergétiques ;
- analyse massive de données et production de prévisions. Les cas d'usages sont multiples : prévisions comportementales, physiques pour l'amélioration des flux de production, de la maintenance, de la chaîne logistique...

2.4.4. Cybersécurité, blockchain, cryptologie

Les possibilités inouïes des technologies que nous venons de développer sont à la hauteur des enjeux de sécurité associés. En effet, la prise de contrôle malveillante de systèmes d'intelligence artificielle et des données qu'ils utilisent peut avoir des conséquences particulièrement dramatiques. Il est important de noter que la notion de cybersécurité est très large et concerne tout autant les questions de technique et de technologie que les questions juridiques.

Un des concepts les plus prometteurs au sujet de la sécurité des échanges et des transactions informatiques est la blockchain. Selon la définition donnée sur le site BlockChain France : *« La blockchain est une technologie de stockage et de transmission d'informations, transparente, sécurisée, et fonctionnant sans organe central de contrôle. Par extension, une blockchain constitue une base de données qui contient l'historique de tous les échanges effectués entre ses utilisateurs depuis sa création. Cette base de données est sécurisée et distribuée : elle est partagée par ses différents utilisateurs, sans intermédiaire, ce qui permet à chacun de vérifier la validité de la chaîne. »*

La cryptologie, ou science des codes secrets, quant à elle, est l'ensemble des techniques de chiffrement qui permettent de sécuriser la transmission de données et d'informations et de vérifier leur intégrité. Il s'agit ici de garantir qu'une information ne soit pas modifiée ni consultée tout en s'assurant d'en être informé le cas échéant.

Les enjeux industriels et sociaux :

- sécuriser les données collectées puis transmises ;
- protéger les utilisateurs dans leur vie privée et sociale ;
- garantir la protection physique des biens, personnes et entreprises ;
- garantir l'intégrité des intelligences artificielles.

2.4.5. Intégration pédagogique

L'enseignement de ces briques technologiques, y compris celles que nous n'avons pas volontairement développées, dépend encore une fois des métiers préparés. Ainsi pour l'ingénieur généraliste en industrie, une sensibilisation est suffisante de manière à en comprendre les tenants et aboutissants en termes d'usages.

Les métiers de l'informatique seront eux plus largement impactés et verront la mise en œuvre de modules, de majeures ou de diplômes de spécialités totalement consacrés à ces différents domaines.

2.5. Méthodes et management

2.5.1. Innovation

Un des piliers de l'industrie du futur consiste à libérer les individus des tâches pénibles et répétitives afin qu'ils se consacrent à l'innovation ou à la qualité.

La révolution numérique, ainsi que la disponibilité, la diversité et les potentialités des technologies participent également à la transformation des raisonnements de conception et d'innovation. De nombreuses fonctionnalités et de nombreux services qui semblaient impossibles hier sont devenus en quelques années des réalités quotidiennes, même si le fonctionnement de nombreuses briques technologiques sous-jacentes échappe à la plupart des consommateurs, ainsi qu'à la plupart des concepteurs. Ces derniers doivent renoncer à une vision du monde et de la technique dans laquelle tout est maîtrisé, stable et intelligible. A l'inverse, les progrès technologiques et la vitesse à laquelle ils apparaissent leur laissent le droit de rêver et de s'affranchir de nombreuses contraintes mécaniques, physiques, et mentales. Aujourd'hui, tout est virtuellement possible.

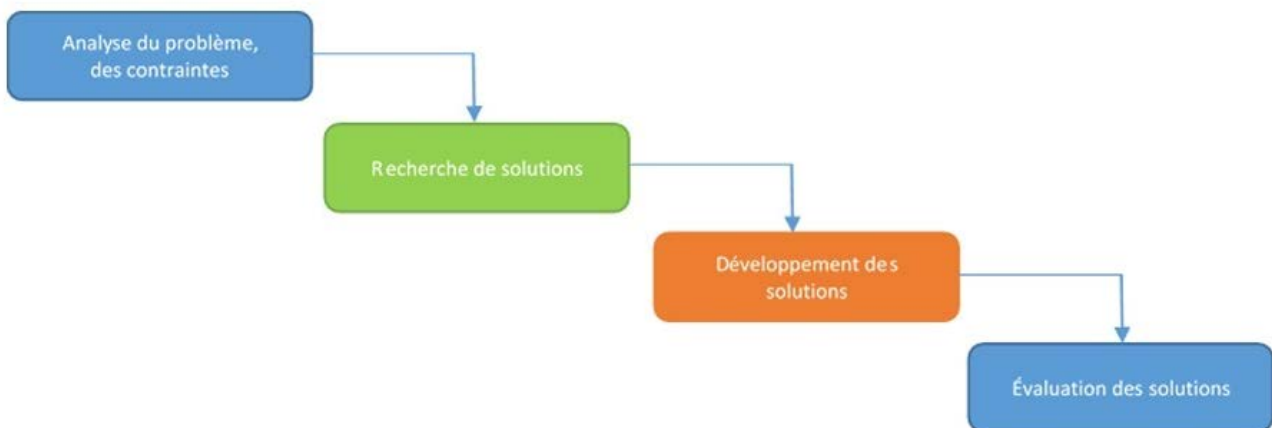


Figure 27- Processus positiviste en cascade

Avant la révolution numérique, l'innovation était vue comme un processus positiviste, dans lequel l'approche analytique et le raisonnement scientifique étaient prédominants. Ce processus issu de la révolution industrielle et du monde mécanique reposait sur l'identification des causes responsables d'un problème, la recherche de nouvelles solutions et le déploiement de celles-ci dans de nouveaux produits. L'investissement était porté sur les phases amont du processus d'innovation, avec l'analyse du problème et la recherche créative. Puis, le reste du processus se déroulait de façon linéaire, séquentielle (processus en cascade, en V, processus Stage/Gate). La bonne analyse du problème était considérée comme garante de la performance des solutions.

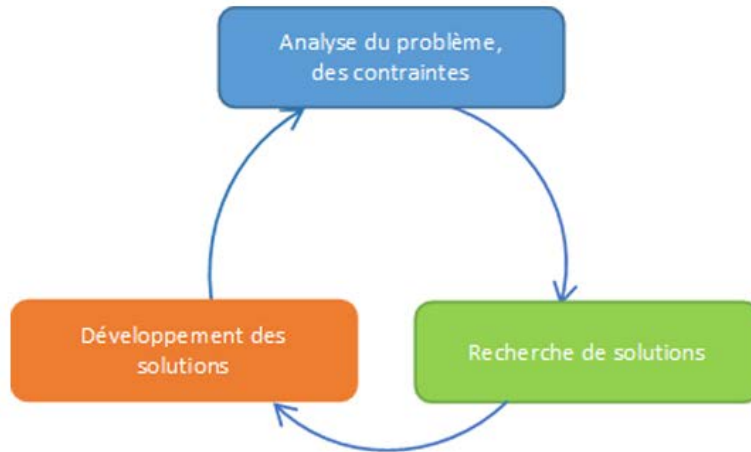


Figure 28- Processus constructiviste circulaire

La révolution numérique a donné lieu à de nouveaux raisonnements d'innovation et de nouveaux processus de conception, tels que les processus circulaires, en spirale et agiles. Ces processus relèvent d'une approche constructiviste dans laquelle le problème est co-construit itérativement en même temps que la solution. Les relations de causalité stricte sont remises en question et ces processus permettent aux membres de l'équipe d'innovation de remettre en question en temps réel leur compréhension du problème, du besoin du client, et leurs choix de solutions créatives. Le raisonnement créatif est mené tout au long du projet et n'est plus circonscrit aux phases amont.

L'analyse de projets d'innovation réalisés par des étudiants et apprentis dans le cadre de leur formation nous apporte des éléments supplémentaires quant à l'efficacité des différents processus d'innovation, et leur pertinence pour former les ingénieurs de demain.

Lorsque les apprenants peuvent choisir librement leur processus d'innovation, on observe que ceux qui obtiennent les meilleurs résultats (propositions les plus créatives, les plus en rupture avec l'existant) sont ceux qui :

- 1- **s'affranchissent des contraintes techniques** et notamment de la définition d'un cahier des charges fonctionnel strict ;
- 2- **utilisent des méthodes de créativité** jusqu'à la fin du projet et n'hésitent pas à pivoter tardivement dans leur projet ;
- 3- **focalisent sur les besoins des usagers** plutôt que sur les briques technologiques.

Ce dernier point est cohérent avec les résultats des observatoires mondiaux de l'innovation (Global Innovation 1000) qui montrent que la stratégie d'innovation la plus porteuse actuellement serait la stratégie Need-Seeker (stratégie centrée sur l'anticipation des besoins futurs des consommateurs), qui dépasse en performance les stratégies Technologie-Driver (développement de produits de valeur technologique supérieure) et Market-Reader (innovation incrémentale et personnalisation des produits basées sur l'écoute des demandes du marché). Dans la formation à l'innovation, il semble donc important d'entraîner les ingénieurs à se concentrer davantage sur les futurs utilisateurs plutôt que sur les contraintes techniques.

2.5.2. Management

La révolution numérique a entraîné une mutation progressive des processus d'innovation, mais pas seulement : elle a aussi amorcé un changement culturel au niveau mondial. L'utilisation d'outils numériques au quotidien, à la fois dans la sphère professionnelle et privée, a permis de développer un mode de communication plus horizontal et moins hiérarchique, avec les citoyens, les responsables politiques, l'ensemble des collaborateurs en entreprise, des clients et des partenaires professionnels. La circulation des informations en réseau se fait de façon immédiate et de plus en plus transparente à la fois en interne et en externe à l'entreprise.

Cette tendance a plusieurs conséquences : elle entraîne une perméabilité des frontières de l'entreprise, et rend possible une plus grande agilité de collaboration avec partenaires, fournisseurs et clients afin de s'adapter en temps réel aux besoins de l'utilisateur final. Mais l'agilité en interne à l'entreprise est aussi un puissant levier de révolution managériale. Elle rend possible des boucles de projet itératives et des circuits de décision drastiquement raccourcis.

Cependant, de nombreux décideurs tendent à se focaliser sur les investissements technologiques au détriment parfois de l'accompagnement de leurs équipes. Ainsi, alors que la transformation digitale devrait renforcer la confiance mutuelle, à l'intérieur et à l'extérieur de l'entreprise, elle suscite encore beaucoup de peurs de la part des salariés et des managers. La révolution numérique exige de se réinventer, et cela n'est possible que par et avec le capital humain de l'entreprise. Or, 80% de l'échec des projets techniques et technologiques viendrait du sous-dimensionnement de la prise en compte du facteur humain, et de la conduite du changement.

Le rôle du leader est ici prépondérant, en particulier dans un pays comme la France, dont le profil culturel implique une « distance hiérarchique élevée ». Cela signifie que le poids du leader est décisif : celui-ci peut être un formidable levier de transformation de l'entreprise, ou un frein total à celle-ci.

L'industrie du futur sera également mise en œuvre par les collaborateurs du futur. A ce titre, il est important de s'intéresser aussi aux évolutions sociodémographiques qui contribuent à transformer les modes de management des entreprises. L'arrivée sur le marché de l'emploi et aux postes de dirigeants, des « digital natives » renforce le besoin général d'horizontalité et de démarche participative en entreprise. Les collaborateurs de la génération Y ont également plus tendance à opérer leurs choix de carrière en fonction de leur adhésion au projet stratégique de l'entreprise, sa « raison d'être », plutôt qu'en fonction de renforçateurs extrinsèques comme le salaire et le positionnement hiérarchique. Enfin, ils seraient moins sensibles au management transactionnel reposant sur l'autorité et l'attribution de récompenses en réponse à une performance professionnelle.

En conséquence, on assiste au développement d'un style de leadership appelé « transformationnel », qui se définit selon 4 caractéristiques :

- 1- Le leader transformationnel **incarne l'idéalisme**, il suscite l'admiration de ses collaborateurs et la fierté de travailler avec lui. Il transmet également l'idéalisme à travers les valeurs de l'entreprise et la manière dont il définit sa raison d'être.
- 2- Le leader transformationnel est **porteur d'inspiration et de motivation** pour ses collaborateurs, il insuffle une vision positive de l'avenir qui aide ses collaborateurs à dépasser les difficultés et les aléas du quotidien. Il donne et fait confiance.

- 3- Il est aussi **stimulant intellectuellement** de travailler avec un leader transformationnel, car il est capable de remettre en question la manière de travailler et il apporte des perspectives nouvelles sur l'activité et la résolution de problèmes.
- 4- Enfin, le leader transformationnel est à **l'écoute de ses collaborateurs**, de leurs besoins, il reconnaît leurs compétences et a le souci de les faire grandir et progresser.

Le leader doit avoir le courage de se remettre en question, de faire autrement, de perdre (dans un premier temps) le pouvoir, de se sentir parfois dépassé ou illégitime – à la manière d'un petit entrepreneur, qui lève des fonds le matin devant un aéropage de financiers, et s'attèle à la production le soir, qui n'hésite pas à raconter comment il s'est trompé une fois, dix fois, et se réinvente à chaque fois, malgré les épreuves. L'entrepreneur qui décide vite n'a pas d'autre choix que de faire confiance.

Le leadership transformationnel est appelé à continuer à se développer dans le futur car il est en phase avec les besoins des nouvelles générations en matière de style de management. Des études à grande échelle tendent également à montrer que le leadership transformationnel est actuellement le plus efficace pour atteindre le meilleur compromis entre performance financière de l'entreprise et bien-être des collaborateurs.

Enfin, une autre évolution sociodémographique laisse à penser que ce style de leadership va continuer à se développer et à se diffuser : la féminisation du management. Des travaux de recherche ayant montré que les femmes dirigeantes montraient significativement plus de caractéristiques transformationnelles que les hommes dirigeants, l'accession des femmes à des postes de plus en plus élevés en entreprise devrait également contribuer au développement du leadership transformationnel.

2.5.3. Entrepreneuriat

Tout comme pour l'innovation et le management, la révolution numérique permet à l'humain de se libérer de tâches désormais automatisées et de se concentrer sur des actions plus créatrices de valeur telles que l'entrepreneuriat.

Quel est le contexte pour les économies occidentales et notamment la France ?

D'une part, le chômage de masse est une tendance massive en France depuis près de 40 ans. L'ensemble des politiques publiques visent à réduire ce phénomène. Ainsi, un des axes prioritaires pour y répondre consiste à amener les demandeurs d'emploi à créer leur propre activité par la création ou la reprise d'entreprise. De très nombreux dispositifs favorisant cette dynamique ont été mis en place tant au niveau de l'état, des régions, des départements que des municipalités. Ces dispositifs agissent au niveau du soutien financier des créateurs d'entreprise, de la mise en œuvre des fonds d'amorçage ou d'accélération de l'activité ou encore sur l'accompagnement méthodologique et stratégique des porteurs de projet.

D'autre part, les économies de marché conduisent à une concurrence forte ce qui pousse les politiques économiques à soutenir l'innovation et la création de valeur. A cet effet, de nombreuses actions de soutien au développement d'activité sont déployées qu'il s'agisse d'aides publiques ou de stratégies d'entreprises dans le cadre de démarches intrapreneuriales.

Par ailleurs, initié en 2000, le processus de Bologne vise à créer une société du savoir, de la connaissance et de l'innovation. Elle incite les pouvoirs publics des pays membres de la zone euro à intégrer l'esprit d'entreprise dans les connaissances de base à acquérir par tous citoyens pour

vivre dans une société fondée sur le savoir. Celles-ci sont précisées par cette définition de l'éducation à l'entrepreneuriat : « *Un concept élargi de l'enseignement des attitudes et compétences entrepreneuriales, qui englobe le développement de certaines qualités personnelles sans être strictement focalisé sur la création de nouvelles entreprises ; et un concept plus spécifique de formation à la création et à la gestion d'une entreprise* ».

Ainsi le monde académique doit donc être « *en capacité de répondre à la demande sociétale de diffuser un esprit d'entreprendre auprès des jeunes en favorisant le passage à l'acte* ».

Au niveau des écoles d'ingénieurs, le document R&O – Repères et Orientations – de la CTI, Commission des Titres d'Ingénieurs, encourage fortement le développement de capacités en entrepreneuriat voire des parcours complet d'enseignement.

L'ouverture sur l'innovation et la création d'activité ou d'entreprise est assurée par des activités et des réalisations spécifiques concrètes. L'ouverture du futur ingénieur sur l'innovation et la création d'activité ou d'entreprise s'appuie sur le développement d'un état d'esprit, la réalisation d'activités et un processus de formation. Ces démarches doivent encourager la pensée divergente, le droit à l'erreur, la prise de risque, l'exercice de la créativité et de l'esprit critique, la prise en compte du besoin de l'utilisateur et l'apprentissage de l'orientation client, la capitalisation pédagogique des expériences, l'ouverture transdisciplinaire, l'engagement vers l'entrepreneuriat, la curiosité et l'ouverture sur le monde.

Un processus de formation est à mettre en œuvre à deux niveaux :

- 1- d'une part, **une formation générale**, au plus tôt dans le cursus, à tous les élèves ;
- 2- d'autre part, **une possibilité d'approfondissement**.

L'ouverture se concrétise par des activités transverses et des événements spécifiques permettant à tout élève de réaliser un projet personnel ou collectif de création (d'innovation ou d'activité) alliant notamment écoute des besoins, créativité, expérimentations, réalisation d'un business plan.

Un temps disponible suffisant doit être laissé aux élèves pour des travaux collaboratifs ou personnels ; des actions avec des étudiants d'autres filières seront recherchées ; les retours d'expériences des élèves doivent être organisés.

Pour la création d'entreprise, il est possible pour les écoles d'ingénieurs de favoriser l'accès au statut d'étudiant entrepreneur et éventuellement au diplôme national « étudiant entrepreneur » (D2E).

2.5.4. Travail distant

Les outils numériques rendent possible un mode de collaboration global, distant, permettant aux entreprises étendues de décloisonner les projets parfois entre plusieurs continents. La demande est forte de pouvoir travailler en équipe quelle que soit la localisation géographique de ses membres.

Au-delà de la distance, cela pose également la question de la temporalité de la collaboration. Le stockage des informations et des données en ligne ainsi que l'ubiquité des moyens informatiques ouvrent la possibilité de travailler virtuellement de partout. Cependant, la plupart des équipes ressentent toujours le besoin d'aménager des réunions de travail synchrones (en présentiel ou à distance) pour favoriser les échanges et la prise de décision, mais aussi créer ou renforcer le sentiment d'appartenance à l'équipe.

Ce contexte a poussé les chercheurs à étudier l'influence du mode de collaboration présentiel / distant et synchrone / asynchrone sur la dynamique de l'identité sociale des membres du groupe, et sur leur performance dans le travail de groupe. Il s'avère que lors du travail en ligne, les individus ne peuvent faire passer qu'une partie limitée de leur identité personnelle (a fortiori lorsqu'ils interagissent de façon anonyme). Le fait que l'identité personnelle soit moins saillante qu'en face-à-face peut être favorable à l'émergence ou à la saillance de l'identité sociale (se définir en tant que membre d'un groupe plutôt qu'en tant qu'individu). En effet, dans ce cas les collaborateurs accordent moins d'attention aux différences interindividuelles ou aux caractéristiques personnelles et se voient plus facilement comme membres du groupe. Lors du travail à distance, il est donc possible de renforcer le sentiment d'appartenance en mettant en avant les indices d'identité sociale (ex : logo de l'entreprise, nom de l'équipe, nom du projet) et en diminuant les indices d'identité personnelle (ex : nom, photos des membres du groupe).

Les études sur la collaboration en ligne en mode synchrone et asynchrone ont également produit des résultats intéressants, montrant que le niveau d'identification au groupe est similaire en collaboration synchrone et asynchrone. Contrairement à ce que l'on aurait pu imaginer, le fait de travailler de façon asynchrone ne nuit pas au sentiment d'appartenance au groupe. Par ailleurs, l'appréhension de l'évaluation (phénomène néfaste à la performance) semble être inférieure en collaboration asynchrone.

L'ensemble de ces résultats de recherche laisse présager de perspectives encourageantes pour le travail à distance. Non seulement celui-ci ne nuirait pas à l'identification sociale des membres du groupe, mais des outils de collaboration bien conçus pourraient même favoriser cette identification, au bénéfice de la performance du groupe.

Enfin, la collaboration asynchrone, qui est parfois indispensable lorsque les collaborateurs sont répartis sur l'ensemble du globe, ne détériore pas non plus le sentiment d'appartenance et serait même susceptible de diminuer le stress lié à l'appréhension de l'évaluation.

