

# Introduction

« Il n'existe rien de constant si ce n'est le changement. »

Bouddha

« Dans la Nature, tout a toujours une raison. Si tu comprends cette raison, tu n'as plus besoin de l'expérience. »

Léonard de Vinci

« Il est hélas devenu évident aujourd'hui que notre technologie a dépassé notre humanité. »

Albert Einstein

« L'information est la résolution de l'incertitude. »

Claude Shannon

## I.1. Avant-propos

Dans les années 1950, IBM a cherché à introduire le mot *computer* en France, le philosophe Jacques Perret, mandaté par le géant américain, a eu l'idée de reprendre un ancien mot latin du Moyen Âge : *ordinateur*. Ce terme avait pour signification une qualité que les Pères de l'Église attribuent à Dieu – *Deus Ordinator* – signifiant « Dieu ordonnateur » (Alizart, 2017).

Plus un demi-siècle après et l'émergence des systèmes algorithmiques, on peut se demander si l'emploi de cette désignation ne fut pas prémonitoire ? En effet, les textes bibliques disent bien que « Dieu est partout, dans chacun de nous [...] et guide nos choix ». Deux mille ans après, cette citation est toujours d'actualité avec

un Dieu vieillissant qui a pris une forme numérique : « L’algorithme est partout, dans chacun de nous [...] et guide nos choix » !

Pour l’historien israélien Yuval Noah Harari (2017), le *xxi*<sup>e</sup> siècle verra émerger une nouvelle religion centrée sur les données, le « dataïsme », afin de combler un vide spirituel et dont le postulat affirme que l’univers consiste en un flux de données et que la valeur de chaque phénomène ou entité est déterminée par sa contribution au traitement des données.

En inventant le code binaire il y a quelques années, l’être humain n’avait certainement pas envisagé qu’il deviendrait lui-même une suite de 0 et de 1. En effet, aujourd’hui, les algorithmes sont omniprésents en nous et dans notre environnement de manière naturelle et artificielle, tout en nous gouvernant directement ou indirectement. L’information est partout et l’algorithme permet à l’homme d’interagir avec cet environnement informationnel. En 2014, la GSMA Intelligence a annoncé que la planète comptait davantage de dispositifs connectés que d’êtres humains. D’ailleurs, nous ne connaissons pas tous les tenants et aboutissants de leurs usages.

La « datafication », l’« algorithmisation » voire la « gamification »<sup>1</sup> de notre société entraînent inéluctablement une dématérialisation des relations, une désintermédiation et un transfert de la valeur de propriété vers une valeur d’usage. Cette *data society* est construite non plus sur des connaissances significatives mais sur des agrégats de données qui contribuent au caractère disruptif de nos sociétés (Stiegler, 2015).

Les algorithmes font partie prenante du quotidien du citoyen avec : la hiérarchisation des informations sur la consommation de milliards de personnes sur Google (*PageRank*), la sélection de l’information présente sur l’affichage du fil d’actualité de Facebook (*Edgerank*), les recommandations de produits (Amazon), l’optimisation et géolocalisation des déplacements, la détection des maladies, etc. Ils constituent l’outil de base du fonctionnement de la majorité des sites Internet et logiciels actuels, et la source de fonctionnement : des objets connectés<sup>2</sup>, des systèmes d’information (SI), des écosystèmes et technologies numériques à venir (*Big*

---

1. Néologisme qui désigne l’application des principes et mécanismes du jeu dans des situations non ludiques. L’idée est donc de capter l’attention et l’intérêt de l’utilisateur afin d’essayer de le retenir le plus longtemps possible. On peut donner l’exemple du développement des *Serious Games* pour former les professionnels notamment dans le domaine de la santé.

2. Les objets connectés (appelés l’« informatique 3.0 ») fonctionnent *via* des algorithmes afin d’étudier les données de trafic et permettre à la voiture d’être autonome, afin d’analyser les données de santé et bien-être, ou bien encore afin d’analyser les consommations alimentaires d’un individu ou permettre au réfrigérateur connecté de s’approvisionner de manière automatique.

*Data*, intelligence artificielle (IA), plateforme, IoT (*Internet of Things*), *Blockchain*, système biométrique, réalité virtuelle voire augmentée, nanotechnologies, biotechnologies, informatique et sciences cognitives (NBIC), informatique quantique, bio-impression tridimensionnelle<sup>3</sup>, etc.).

Ces algorithmes font sans doute partie des créations immatérielles les plus valorisées de notre économie contemporaine. La quasi-totalité des acteurs du marché fondent leur modèle sur la performance de leurs algorithmes. Toutes ces actions algorithmiques contiennent en leur sein un processus moral où chacune renferme son propre système de valeurs, son prisme de lecture et de compréhension du réel et de ses interrelations, et sa propre subjectivité. Les algorithmes n'ont pas de scrupules à entrer dans l'intimité des personnes et à en étudier leurs comportements. Dans ces conditions, la conception, la mise en place et l'usage de ces algorithmes ne peut rester neutre du fait de ses impacts sociétaux et économiques. Dès lors, cette transformation digitale introduit un changement de repères contextuels et des perspectives axées sur l'information et sur son potentiel de valorisation financière. Désormais, la valeur de la *data* est conditionnée par un ensemble de paramètres et de critères transversaux tels que son accessibilité, son intégrité, sa fiabilité, sa légitimité, sa finalité, sa confidentialité, etc.

Dans ce monde numérique qui est le nôtre aujourd'hui, le respect du droit et des réglementations ne suffit plus. Nous devons examiner la dimension éthique du traitement algorithmique<sup>4</sup> des données. La gouvernance et l'encadrement des Nouvelles technologies de l'information et la communication (NTIC) doivent largement dépasser la dimension rigide purement technologique et normative pour embrasser la dimension transversale, flexible et mouvante de l'éthique algorithmique. C'est pourquoi, il est essentiel d'aborder une analyse approfondie, vaste et multidisciplinaire en vue d'apporter des préconisations et d'éclairer le débat social sur la façon dont la société contemporaine doit relever ce défi technologique.

Dès lors, face à ce changement de paradigme de notre société, comment l'homme peut-il être amené à évoluer ? Bien sûr qu'il est compliqué d'établir des projections dans un avenir qui est par définition incertain et qui l'est d'autant plus que nous sommes dans une période de transition marquant le début de la quatrième révolution industrielle de

---

3. La bio-impression tridimensionnelle d'éléments organiques, qui emploie des copies de cellules de patients et des « biobandes » de collagène afin de fixer des rangées successives de cellules vivantes, devrait être bientôt disponible. Elle faciliterait la fourniture d'éléments anatomiques humains sur mesure.

4. Notons que nous entendons par « traitement algorithmique » toute opération ou ensemble d'opérations – incluant au moins un algorithme – effectué ou non à l'aide de procédés automatisés et appliqués à des données numériques.

l'histoire de l'humanité. Tout l'intérêt, l'essence et l'objet de ce livre réside finalement dans cette question. Nous sommes persuadés qu'à partir de notre approche éthique, nous pouvons apporter quelques éléments de réponses sur les grandes directions qui s'offrent à nous, dans la voie de notre évolution néodarwinienne.

Cet ouvrage fait suite à deux précédents livres intitulés respectivement *Les systèmes d'information en santé et l'éthique* et *Les Big Data et l'éthique* aux éditions ISTE. Il constitue le dernier volet de notre trilogie sur l'éthique dans l'écosystème digital. Durant ces années de réalisations et de réflexions, le cheminement de notre pensée a évolué passant d'une « éthique numérique », puis d'une « éthique algorithmique » pour finir par une « éthique quantique ». Peu importe la dénomination, la forme et l'application que porte notre vision éthique sur le sujet, ce qui prédomine avant tout est l'essence et le contenu intrinsèque qui s'en dégage. Notre quête littéraire a pour vocation de poursuivre notre vigilance et approche à la fois épistémique, citoyenne et morale sur les sujets sociétaux qui s'imposent à nous car ils engagent notre avenir et dont les risques, les enjeux et les limites, au-delà d'une apparente modernité sémantique, apparaissent, *a priori*, peu intelligibles et dépourvus de sens.

Nous avons la chance d'être au début d'une ère nouvelle basée sur la numérisation de la société. Il devient alors essentiel de pouvoir saisir cette opportunité afin de définir un cadre humain de confiance et esquisser un nouvel espace moral, orienté autour des principes éthiques et de la responsabilisation de tous les acteurs concernés par l'élaboration, la mise en place et l'usage des NTIC. C'est ce que nous appelons *l'Ethics by Design* !

L'objectif majeur de ce livre est donc d'apporter aux lecteurs les premières pierres au « visage humain » qui accompagne cette révolution numérique afin de tendre vers plus de sens et d'harmonie entre les intentions, les mises en œuvre, et la finalité des outils technologiques. L'équilibre entre la promesse de l'innovation utile et le risque de préjudice algorithmique est à ce prix... Dès lors, en mettant en évidence une trame de fond centrée sur une approche nouvelle éthicotechnique, notre ouvrage a pour ambition, d'une part, d'apporter l'ossature d'un changement sensible des mentalités qui entoure l'environnement numérique de la société et d'autre part, de contribuer à l'intelligibilité de cette révolution numérique et de s'interroger sur les répercussions de nos représentations digitales en termes de pratiques sociales, économiques, industrielles, de construction de normes et de rapport à l'action citoyenne.

Enfin, notre raisonnement sur la constitution et l'intégration d'un « code éthique algorithmique » s'effluera selon deux étapes essentielles à la fois distinctes et complémentaires. Une première phase affirmant que « le Code est l'Éthique » (en anglais « Code is Ethics »), à l'instar de la citation du célèbre juriste Lawrence

Lessig (1999) avec son « Code is Law ». L'auteur souligne que le code s'est progressivement installé comme régulateur actif des comportements et transactions dématérialisés en ligne de l'économie collaborative, se substituant de fait à la loi. Le codeur est généralement seul face à ses choix et le seul capable d'apprécier si ce choix est éthique ou non. C'est le cas, par exemple, pour la quantité de données qu'il va employer pour effectuer un traitement algorithmique et pour lequel il doit bien réfléchir aux *data* réellement utiles, et coder l'algorithme en conséquence. La technologie risque d'établir la norme sans le moindre débat démocratique. Sa valeur s'inscrit également dans le fait que le code constitue un espace de travail pour les développeurs, et à ce titre il reflète la culture de leur équipe et de leur entreprise. On assiste à une influence du code informatique dans notre quotidien et à une substitution de l'algorithme à la loi. Le numérique génère bien des questions éthiques qui lui sont propres puisqu'il produit à lui seul un appareil normatif équivalant à celui de la loi.

Puis, une deuxième phase démontrant que « l'Éthique est le Code » (en anglais « Ethics is Code ») adaptant la formule de Primavera De Filippi et Samer Hassan (2016) : « Law is Code » suggérant que la *Blockchain* (le registre public distribué) pourrait être à la source technique donnant la possibilité au code de devenir un moyen de faire appliquer la loi. Cet angle normatif du digital doit faire l'objet d'une éthique de l'attention qui pourrait mettre en lumière des dilemmes entre normes produites par le numérique et nos propres normes ou systèmes de valeurs. Cependant, cette éthique risque de ne pas être suffisante car si, comme le dit Lawrence Lessig (1999), le code régule, et s'il régule mal, si les intentions des programmeurs ne sont pas en phase avec une certaine éthique, il sera difficile, *a posteriori*, de réguler ou de rééquilibrer cette vision normative. Dans ces conditions, une plateforme ou système expert autonome pourrait être initiatrice de solutions technologiques permettant au code de devenir un moyen d'expression de l'éthique. Dans le cadre d'une approche néodarwinienne, cette plateforme voire IA<sup>5</sup> serait la concrétisation de notre concept d'un « code éthique algorithmique » à la fois évolutif et universel. On parlera alors de *l'Ethics by Evolution* !

Enfin, la particularité de cet ouvrage est de s'intéresser à la fois aux NTIC animées par des algorithmes eux-mêmes, et aux meilleures exigences et recommandations éthiques concernant leur conception, leur développement, leur usage et leur maîtrise, tout en encourageant ces dernières.

---

5. L'IA peut se décrire comme étant la capacité qui permet aux machines d'imiter les modes de pensée des êtres humains et d'acquérir progressivement des connaissances, au lieu d'exécuter uniquement des commandes spécifiques.

## 1.2. Les révolutions techniques à travers le temps

Traduisant initialement le mouvement circulaire d'un astre qui revient à son point d'origine, le terme « révolution » a évolué avec le temps pour désigner désormais une rupture ou changement radical de nos schémas structurels et de notre cadre de réflexion. Cet éclairage sémantique traduit le fait qu'une révolution comporte à travers le temps une nature cyclique qui se traduit sous différentes formes. Si l'on y associe au secteur industriel, cette révolution se définit par un assemblage de modifications importantes ayant successivement transformé les dispositifs de production industrielle et le travail, impactant de manière notable l'emploi, l'économie, la consommation et l'environnement. Cette définition explique bien que le changement de notre vision du monde est né de chaque révolution industrielle et se joue de nouveau en ce moment.

À travers les siècles, la science a rendu possible la découverte de nouvelles sources d'énergie et de matières premières permettant l'apparition de machines et d'innovations technologiques plus performantes et des méthodes de production inédites. Dès lors, l'évolution technologique de l'humanité s'alimente par les nouveaux savoirs et les innovations que l'homme crée, acquière et utilise. Cela entraîne forcément un phénomène d'obsolescence<sup>6</sup> des connaissances des acteurs qui sont inéluctablement dépassés et supplantés par les NTIC. En conséquence, dans un monde en perpétuelle mouvance et évolution, il devient essentiel que chacun ne reste pas sur ses bases mais les enrichissent afin de faire évoluer son savoir-faire auprès de la société. Les différents royaumes, pays d'Europe occidentale, puis « Nouveau Monde » ont majoritairement recherché, à chaque grande phase de leur histoire et par le biais des influences réciproques multiples (économiques, politiques, spirituelles, culturelles, sociales, etc.) un grand but collectif commun, dont la structuration, assez homogène d'un point de vue spatio-temporel, a apporté à chaque fois l'élaboration d'un modèle de société (Dos, 2015).

Pour mémoire, il est bon de se rappeler que l'Europe fut le lieu de naissance de ce que l'on appelle le « modèle occidental » jusqu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle (notamment à travers sa politique de développement coloniale). Puis les États-Unis émergèrent sur la scène internationale (*via* sa politique de mondialisation) durant le XX<sup>e</sup> siècle. Enfin, les dernières projections et tendances prédisent que les États-Unis et les pays asiatiques, notamment la Chine, devraient étendre leur influence au niveau mondial.

---

6. L'obsolescence est le fait pour un produit d'être dépassé, et donc de perdre une partie de sa valeur en raison de la seule évolution technologique ou de la mode, même s'il est en parfait état de fonctionnement.

Le progrès technique a amené l'individu à améliorer son industrie au cours de son histoire, à se baser toujours plus sur lui, mais également à le réinventer dès lors que de nouvelles ressources élaboraient de nouveaux moyens techniques. L'industrie a donc fait l'objet d'avancées qualitatives, significatives et représentatives de leur époque que l'on peut associer à des « révolutions ». Ainsi, on constate que l'histoire cyclique de l'humanité – qui constitue un éternel recommencement – retient actuellement quatre grandes révolutions industrielles et techniques majeures, totalement interdépendantes.

– La première révolution industrielle apparaît à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle au Royaume-Uni puis en France : elle émerge avec l'arrivée de la mécanisation qui a pour conséquence de faire de l'industrie la pierre angulaire de l'économie, relayant au second plan l'agriculture. L'invention de la machine à vapeur associée avec l'extraction massive du charbon contribuent à apporter une nouvelle énergie essentielle (brevetée par James Watt en 1760) pour le développement des échanges matériels, économiques et humains *via* la croissance des chemins de fer. La première locomotive à vapeur sur chemin de fer fut construite puis brevetée en 1815 au Royaume-Uni par George Stephenson. D'autres inventions notables, notamment dans le textile (les machines à coudre mécanisées, le métier Jacquard créé par Joseph Jacquard en 1801) ou dans la métallurgie (travail de la fonte et des métaux, utilisation du *Coke* et invention du *Puddlage*) et la sidérurgie (en France, le pont d'Austerlitz fut le premier pont métallique construit en 1807), vont amplifier ce phénomène d'industrialisation de la société.

On assiste alors à un développement rapide de la croissance économique nourrie par des gains de production sans précédent provenant des découvertes majeures dans le secteur de la connaissance. Progressivement, les centres urbains vont se construire et se développer. L'installation des différentes entreprises en un même endroit permet d'améliorer la rentabilité des productions. Les innovations techniques sont toujours renouvelées, augmentant sans cesse le rendement industriel. Ainsi, cela entraîne de grands bouleversements économiques et sociaux. Enfin, cette première révolution industrielle émerge dans un contexte particulier, propice au progrès et où se développe de plus en plus l'esprit capitaliste. C'est ainsi que jusqu'en 1830, de grandes mutations économiques, techniques et sociales remodeleront la Grande-Bretagne, avant de s'étendre en Europe et aux États-Unis.

– La deuxième révolution industrielle émerge à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle en Allemagne et aux États-Unis : après une dépression économique (Krach de Vienne) de plusieurs années (1873-1896), une seconde révolution industrielle voit le jour. Elle débute à la toute fin du XIX<sup>e</sup> siècle et ne s'achève qu'en 1914 avec le début de la Première Guerre mondiale.

Cette révolution industrielle apparaît, une nouvelle fois, avec l'apparition de nouvelles sources d'énergie (le gaz, l'électricité et le pétrole) qui vont rendre possible la création de nouvelles innovations et inventions technologiques telles que le moteur à explosion, les textiles artificiels, l'ampoule à incandescence, le téléphone (de Bell), le télégraphe (de Morse), l'automobile, l'avion, etc. Ces moyens de communication et de transports permettent la création d'échanges internationaux.

C'est le début d'une période où l'économie et l'industrie se basent sur de nouvelles méthodes de production et de gestion pensées par le Taylorisme et le Fordisme et dont la sidérurgie développe l'acier et l'aluminium. De même, l'économie adopte un nouveau modèle avec la naissance des *Trusts*, des cartels ou avec la multiplication des actionnaires. Dès lors, cette période est marquée par des grandes innovations qui vont permettre la croissance économique des pays et des gains de productivité majeurs.

Par conséquent, cette seconde révolution industrielle a contribué à l'arrivée de grands progrès techniques, la création des grandes entreprises notamment aux États-Unis, le début de la mondialisation et le développement commercial (principalement international), financier et humain (migrations humaines). Elle s'accompagne d'un rétrécissement des inégalités dans les pays industrialisés et d'un accroissement progressif du niveau de vie des ouvriers.

– La troisième révolution industrielle voit le jour à la moitié du XX<sup>e</sup> siècle aux États-Unis : comme précédemment, c'est l'émergence d'une nouvelle énergie, l'électricité d'origine nucléaire (Uranium), qui marque le démarrage de cette nouvelle révolution industrielle. Cette source d'énergie fait se développer des matériaux révolutionnaires (silicones, céramiques, résines) et contribue planétairement à la structuration de nouveaux moyens de transmission de nature électronique (micro-processeur et transistor : voir « Informatique 1.0 »<sup>7</sup>) et les technologies de l'information pour automatiser la production. Cela ouvre la voie à la miniaturisation des composants, ce qui fera par la suite de l'électronique l'un des principaux domaines de l'économie. Cette période peut se caractériser par une production de matériels et outils toujours plus petits qui a une répercussion et fait entrevoir des perspectives nouvelles, notamment dans le secteur de l'aérospatial, l'aéronautique et la biotechnologie. Notons, que certains experts considèrent que l'histoire de l'électronique démarre avec l'invention du tube diode par Fleming en 1904, suivie par celle du tube triode par Lee de Forest en 1907.

C'est aux États-Unis, plus précisément en Californie à Palo Alto, que débute véritablement cette révolution au début des années 1940 avec la création par

---

7. L'« informatique 1.0 » représente un dispositif informatique qui permet le transfert de la voix, de la donnée, et de l'image sur un même réseau.

William Hewlett et David Packard de la première entreprise basée sur le numérique qui entraînera la naissance en 1971 de la Silicon Valley, première technopole mondiale. À la fin de la Deuxième Guerre mondiale, l'ingénieur Vannevar Bush inventa une machine à mémoriser stockant des microfilms. Au milieu de la décennie apparaît aux États-Unis l'activité *Citizen-Band* (ou « CB », de l'anglais « bande des citoyens »), première implication d'amateurs dans le domaine des télécommunications. En 1957, l'URSS met sur orbite le premier satellite artificiel, Spoutnik 1. Cette étape sera déterminante dans l'ère des télécommunications, notamment pour la mise en place quelques décennies plus tard d'Internet. Le processus de miniaturisation des composants – comme l'image du circuit intégré (ou « puce électronique ») inventé par Jack Kilby (de Texas Instrument), ou du modem (de Bell) permettant de diffuser des données binaires en signal analogique – se poursuit inlassablement. Ce phénomène favorise la diminution des coûts de production alors que les langages de programmation sont de plus en plus élaborés *via* des algorithmes toujours plus performants. La commercialisation des ordinateurs débute tout juste et ne concerne alors que le domaine de l'entreprise.

Enfin, en 1969, grâce aux recherches de Léonard Kleinrock (au MIT) sur l'utilisation de la commutation de paquets pour le transfert des données, le projet ARPANET (*Advanced Research Projects Agency Network*) voit le jour. La mise en place de ce dispositif au sein du département américain de la Défense s'inscrit dans le contexte de la Guerre froide avec l'URSS. L'enjeu de ce système est d'élaborer un réseau de télécommunications militaire structurellement décentralisé capable de fonctionner malgré la destruction de certains dispositifs ou des coupures de lignes. Son développement et son usage au niveau de l'ensemble de la société, nullement envisagés à cette époque, marquèrent l'arrivée de l'Internet et avec lui le début de la quatrième révolution industrielle ou « Révolution numérique », au début des années 1990.

– La quatrième révolution industrielle arrive à la fin du  $xx^e$  siècle aux États-Unis et en Chine : cette révolution est directement associée à la naissance du développement massif de l'informatique, de la télématique et du numérique, c'est-à-dire au fait que toute l'information peut s'exprimer par une combinaison de nombres (en l'occurrence des 0 et des 1). Nous considérons que cette quatrième révolution industrielle apparaît, au début des années 1990, avec l'apparition de la forme la plus connue d'Internet aujourd'hui, à savoir le Web<sup>8</sup>.

---

8. Le Web se traduit également par « World Wide Web » (WWW), littéralement la « toile (d'araignée) mondiale ». Il représente un système hypertexte public fonctionnant sur Internet. On peut le décrire comme un ensemble de pages en HTML mélangeant du texte, des liens, des images, adressables *via* une URL et accessible par le protocole HTTP.

Notons que le philosophe Luciano Floridi (2014) parle également de quatrième révolution, dans son livre éponyme intitulé *The Fourth Revolution*, afin de caractériser ce nouvel écosystème centré sur une information numérique conciliant la nature (*physis*) et la technologie (*technè*). L'auteur apporte le postulat que les êtres humains représentent des organismes informatifs (*inforgs*) (Floridi, 2007) parmi d'autres, pas très différents des entités de matières, des agents naturels ou artificiels, des systèmes intelligents, ou des objets connectés modifiés.

On peut observer qu'en 1991, la Chine fut un des précurseurs de cette révolution numérique avec la conception d'un premier réseau TCP/IP<sup>9</sup>, appelé le TUNET, à l'université de Tsinghua. Trois années plus tard, une première connexion à Internet fut conçue en reliant l'électrospectromètre de Pékin et l'accélérateur linéaire de l'université de Stanford.

Aujourd'hui, nous sommes en plein dans cette période caractérisée par une fusion des NTIC qui obscurcit les lignes entre les espaces physiques, numériques et biologiques au niveau mondial. La numérisation permet l'édification d'un nouveau monde, virtuel, à partir duquel il est possible de piloter la sphère physique notamment grâce à l'analyse des bases de données et aux *Big Data*. Dès lors, la *data* représente la matière première de cette révolution numérique. D'ailleurs, elle est souvent comparée au pétrole qui lui-même constitue l'élément majeur de la seconde révolution industrielle.

Ainsi, ces révolutions industrielles ont permis de développer de nouveaux produits et de nouvelles technologies. Cela peut s'illustrer par la création des ordinateurs personnels (voir Informatique 1.0) (années 1980), le développement exponentiel des usages d'Internet comme les sites Internet, les *forums* et les réseaux sociaux (voir Informatique 2.0<sup>10</sup>) (années 1990), et l'apparition des objets connectés, smartphones, tablettes, l'Internet industriel des objets (IIoT), (voir Informatique 3.0<sup>11</sup>) (années 2000). À titre d'exemple, on peut dire que les NTIC comme les objets connectés jouent pour les *Big Data* la même mission de catalyseur que la chimie ou l'automobile pour le pétrole.

Cette quatrième révolution est la première qui impacte et modifie directement les repères spatio-temporels du quotidien des personnes. En effet, on assiste à

---

9. La suite TCP/IP représente l'ensemble des protocoles employés pour le transfert des données sur Internet.

10. L'« informatique 2.0 » rend possible l'échange et le partage d'informations entre les personnes à travers des réseaux digitaux.

11. L'« informatique 3.0 » correspond à de l'« informatique 2.0 » enrichi d'une capacité de localisation de la donnée numérique.

une véritable numérisation et « plateformisation » de la société (IA, automates programmable industriel (API), systèmes experts auto-apprenant, biotechnologies, 3 dimensions (3D), et les robots, Uber, Airbnb, BlaBlaCar, *smart cities* (villes intelligentes), etc.) (voir Informatique 4.0<sup>12</sup>) (années 2010). En effet, toutes les grandes villes du monde commencent à intégrer pleinement la dimension digitale. Ces *smart cities* sont rendues possible en se criblant (et ses habitants avec) de capteurs, ainsi que de mettre ces capteurs en réseau *via* des opérateurs de télécommunications. L'objectif est de fournir de nouveaux services, d'améliorer la qualité de vie et la sécurité et d'avoir une ville plus durable (planification urbaine, à la gestion des transports, à l'insertion des citoyens, etc.). L'installation de capteurs sur les bâtiments permet par exemple d'obtenir des données intéressantes relatives au taux de pollution dans l'air, à la consommation d'énergie, etc. À Singapour, la municipalité a positionné des capteurs intégrés aux immeubles publics qui génèrent des données utiles, fiables et instantanées pour la prévention et la gestion des catastrophes naturelles (données climatiques, spatiales, photographies de zones urbaines, etc.).

Les derniers progrès technologiques ont contribué à développer la génération, la collecte, le stockage, le traitement et la diffusion des données numériques très diverses à un rythme conséquent sans précédent (Hamid, 2007). Par ailleurs, on peut remarquer que le coltan est une des sources majeures de la production du tantale (notamment du niobium) utilisé pour sa forte résistance à la corrosion. Cette matière première est fondamentale pour la réalisation de composants électroniques, en particulier les condensateurs et les filtres à onde de surface, employés dans la fabrication des téléphones mobiles et des ordinateurs portables.

Désormais, on parle de l'« industrie 4.0 »<sup>13</sup> qui tend à connecter entre eux l'ensemble des moyens de production et de permettre leur interaction en temps réel et dans un espace ouvert et sans frontière définie. Cela est rendu possible grâce aux NTIC telles que le *cloud computing*, la *Blockchain*, la réalité augmentée, les *Big Data analytics* ou l'Internet des objets. Cette période voit apparaître l'émergence de nouveaux acteurs comme les géants américains GAFAM (Google, Apple, Facebook, Amazon et Microsoft) voire les GAFAMITIS (Google, Apple, Facebook, Amazon,

---

12. L'« informatique 4.0 » se définit comme étant de l'« informatique 3.0 » dans laquelle nous pouvons désormais intégrer l'information qui émane du contexte spatial et de l'environnement, c'est-à-dire l'« infosphère ».

13. Le concept d'« industrie 4.0 » a été énoncé pour la première fois lors du salon de la technologie industrielle à Hanovre, en 2011. Il correspond à une nouvelle manière d'organiser les moyens de production à partir de bases technologiques telles que l'Internet des objets, les technologies relatives aux *Big Data* et les systèmes cyberphysiques. L'objectif est de mettre en place des entreprises dites « intelligentes » (*smart factories*) capables d'une plus grande adaptabilité dans la production et d'un usage plus efficace des ressources dont elles disposent.

Microsoft, IBM, Twitter, Intel et Salesforce), ou encore chinois NATU (Netflix, Airbnb, Tesla et Uber) et BATX (Baidu, Alibaba, Tencent et Xiaomi) qui représentent les entreprises emblématiques de la « disruption<sup>14</sup> » numérique. D'après une étude de Gartner, d'ici 2021, 20 % de toutes les activités individuelles humaines seront en relation directe avec au moins un des membres des GAFAs et des BAT. On peut prendre l'exemple d'Apple avec le lancement en 2007 de l'iPhone qui entraîna la création du marché autour des smartphones. D'autre part, la Chine développe les *Big Data* dans le domaine maritime avec la création d'un « océan intelligent ». Dès lors, l'université de Tsinghua édifie un centre de télédétection *Big Data* marine, prenant en compte les ondes de tempêtes océaniques, la surveillance d'inondations intérieures et un système d'alerte précoce. Ainsi, Wu Lixin, le directeur du laboratoire national de Qindao pour les sciences et la technologie marines, a proposé le projet intitulé « océan transparent » qui est alimenté par la détection satellite, les bouées intelligentes, les planeurs et les robots sous-marins, les stations spatiales de haute-mer, et divers autres NTIC. L'enjeu majeur est de pouvoir, d'une part, obtenir des informations globales sur l'écosystème marin à différentes profondeurs dans certains lieux en temps réel ou normal, et d'autre part, garantir de la sécurité en bras de mer, au niveau de l'écologie environnementale et des ressources marines, de la prévention des catastrophes maritimes et des prévisions météorologiques. Enfin, le gouvernement chinois a fait de la technologie de la *Blockchain* une de ses priorités. On peut donner l'exemple de l'application de cette NTIC pour la collecte des taxes sociales et l'émission de factures électroniques chinoises.

Contrairement aux précédentes, cette révolution industrielle s'alimente, d'une part, d'une matière première numérique qui ne s'épuise pas – au contraire, elle est exponentielle – et d'autre part, ne comporte pas l'inconvénient d'être énergivore – en termes d'énergies non renouvelables – puisqu'elle est de plus en plus associée à des modèles alimentés par des ressources alternatives. Avec la convergence des nanotechnologies, des biotechnologies, de l'informatique et des sciences cognitives, nous sommes passés à l'ère des technosciences et du data-centrisme. Le vivant et le non-vivant, interconnectés par un Internet de toutes choses, sont des sources inépuisables de données et de génération de flux informationnels. Le corps, le cerveau humain, les mouvements, les comportements, les sentiments ou les

---

14. Étymologiquement parlant, ce terme vient du latin *disruptus*, participe passé du verbe *disrumpere* ou *dirumpere*, qui signifie « faire éclater, briser en morceaux, détruire, rompre ». En économie, on emploie ce terme pour décrire une soudaine rupture, notamment lorsqu'une entreprise introduit un nouveau produit ou service, totalement innovant, qui perturbe la stratégie de l'entreprise et brise les codes du marché en provoquant une rupture, un nouveau modèle économique, un nouveau marché, et donc des nouveaux comportements de consommation.

---

émotions sont un minerai informationnel capté et traité en permanence par des opérations arithmétiques et logiques (Ghernaoui, 2018).

Au fil des années, les bases de données ne cessent de s'accroître, les statistiques vont devenir de plus en plus précises, les traitements algorithmiques s'affineront et les décisions prises seront plus justes. D'ailleurs, nous sommes en droit de nous dire que si ces NTIC prédictives gagnent de plus en plus la confiance humaine *via* leurs performances et leur efficacité, l'homme ne serait-il pas en train de déléguer progressivement son rôle de décisionnaire et donc un peu de son libre arbitre ? Une conception du monde fondée sur l'exploitation des données générées par l'utilisateur mais également collectées et produites à partir de systèmes algorithmiques et de processeurs interconnectés en partie à son insu. En effet, sans s'en rendre compte, le citoyen favorise et alimente l'apprentissage des systèmes algorithmiques auto-apprenants, le développement de l'IA, voire les applications autour du transhumanisme. Un tel modèle empêche de penser et d'effectuer des schémas alternatifs puisque notre autonomie est progressivement colonisée par les NTIC.

L'histoire étant un éternel recommencement, comme durant les siècles qui nous ont précédés, ce processus de colonisation – qui consistait en partie à déposséder les colonisés de leurs ressources naturelles, tout en les maintenant dans un état d'infériorité et de dépendance – se perpétue encore aujourd'hui sous la forme d'une « colonisation digitale » dans laquelle la matière première représente la donnée numérique.

De plus, lorsque nous étudions la succession de ces révolutions industrielles, nous nous apercevons que la durée de l'enchaînement de ces dernières est de plus en plus courte, passant de plusieurs siècles à moins d'un demi-siècle. Le rythme cyclique de ces révolutions industrielles se trouve donc accéléré avec le temps qui passe. Parallèlement à cela, on observe que plus les révolutions industrielles s'enchaînent et plus leurs sources d'énergie et leurs innovations majeures se miniaturisent. Nous tendons inéluctablement vers l'infiniment petit, voire la dématérialisation des structures physiques. On assiste au passage et à l'exploitation matérielle du macrocosme vers du microcosme environnemental, et d'une autre manière du visible vers le non visible.

Parallèlement à cela, plus on avance dans les révolutions industrielles, plus le progrès technologique a un impact, voire une emprise, sur l'individu. Ainsi, pour la première fois dans l'histoire de l'humanité, la quatrième révolution industrielle – dans laquelle nous nous trouvons – touche directement à l'essence, la nature et au statut de l'être humain. En effet, avec le développement de l'IA, on s'aperçoit que la machine concurrence directement les neurones et le cerveau humain. Cela peut être

illustré par le courant transhumaniste qui ne cesse de s'amplifier inexorablement (voir le tableau I.1).

	1 <sup>re</sup> révolution industrielle	2 <sup>e</sup> révolution industrielle	3 <sup>e</sup> révolution industrielle	4 <sup>e</sup> révolution industrielle	5 <sup>e</sup> révolution industrielle ?
Date d'apparition	Fin XVIII <sup>e</sup> siècle	Fin XIX <sup>e</sup> siècle	Moitié XX <sup>e</sup> siècle	Fin XX <sup>e</sup> siècle	Moitié XXI <sup>e</sup> siècle ?
Pays d'origine	Royaume-Uni et France	Allemagne et États-Unis	États-Unis	États-Unis et Chine	Chine et États-Unis ?
Population mondiale*	0,8 à 1,1 milliard	1,5 à 1,8 milliard	2,5 à 3,3 milliards	4,4 à 5,7 milliards	8,5 à 11,1 milliards ?
Sources d'énergie et matières premières	Charbon	Gaz, électricité et pétrole	Nucléaire (uranium) et électronique (silicones, céramiques, résines)	Coltan, numérique ( <i>Big Data</i> et base de données)	Quantique ( <i>quantum</i> ) ?
Inventions majeures	Machine à vapeur	Moteur à explosion, ampoule à incandescence, téléphone	Centrale nucléaire, micro-processeur, transistor	Ordinateur, robot, Internet, objet connecté (IoT), NTIC, <i>Blockchain</i>	Ordinateur, téléportation, avatar et cryptologie quantique ?
Nature de l'information	Analogique	Analogique	Numérique (informatique 1.0)	Numérique (informatique 1.0, 2.0, 3.0, et 4.0)	Numérique (informatique 4.0), Quantique ? (informatique 5.0) ?
Nature du droit	Code civil	Code du travail	Charte des droits fondamentaux, loi bioéthique, TNT	Code des robots et de l'écosystème digital ? Traité international du cyberspace ?	Code de l'environnement et de la transformation quantique ?
Nature de l'éthique	Éthique utilitariste	Éthique positiviste	Bioéthique	Éthique algorithmique ?	Éthique quantique ?

**Tableau I.1.** Révolutions industrielles à travers le temps (\*sources : ONU (*World Population Prospects : The 2015 et 2017 Revision*))

Par ailleurs, lorsque l'on regarde la population mondiale pour chaque naissance de cet événement, on constate, d'une part, que le nombre de personnes double quasiment à chaque fois avec celle qui la précède, et d'autre part, que la succession de ces révolutions techniques sont de plus en plus proches dans le temps avec un coefficient d'accélération compris entre 1,3 et 1,5 (voir la figure I.1).

On remarque que cette règle fonctionne en partie avec la révolution machinique, avec l'invention de la presse à imprimer typographique par Johannes Gutenberg vers 1450, période pendant laquelle la population mondiale est estimée entre 0,42 et 0,54 milliard de personnes. Même si l'apparition de l'imprimerie n'est pas considérée d'après les historiens comme une véritable révolution industrielle, celle-ci dispose également une nature disruptive pour la société durant la Renaissance. Selon l'historienne Elizabeth Eisenstein (1991), en cinquante ans, entre 1457 et 1500, près de huit millions de livres furent imprimés, soit l'équivalent de tout ce qui avait été produit par les scribes d'Europe depuis la fondation de Constantinople. Ainsi, l'imprimerie permet de fixer les textes et contribue à répandre les idées, en particulier celles des humanistes, puis celles de la Réforme. La Bible peut être lue et comprise grâce à sa traduction complète en allemand, en français et en anglais.

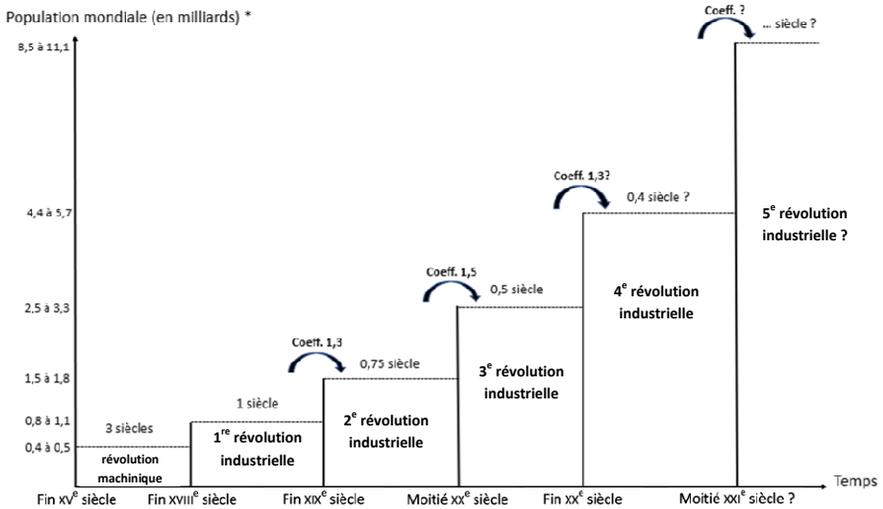
D'autre part, selon l'archéologue Jean-Paul Demoule (2017), la révolution néolithique avec l'invention de l'agriculture et de l'élevage a permis la sédentarité et entraîné un boom démographique sans précédent. Ainsi, en moyenne, les chasseurs-cueilleuses ont un enfant tous les trois ou quatre ans contre un toutes les années pour les agricultrices (même si une partie de ces enfants meurent en tant que nourrissons). On peut alors envisager et émettre l'hypothèse que notre règle démographique du doublement de la population mondiale s'applique également entre l'apparition de la révolution néolithique et le commencement de la révolution des produits secondaires<sup>15</sup>.

Une étude approfondie de cette observation pourrait peut-être tendre vers une loi relative à l'apparition d'une nouvelle révolution industrielle en vertu, d'une part, d'un doublement constaté de la population mondiale, et d'autre part, d'un coefficient d'accélération de 1,3 – 1,5 par rapport à l'apparition de la précédente révolution industrielle. Toutefois, on peut noter qu'il est fortement probable que cette « loi » atteindra ses limites après la cinquième révolution industrielle. En effet, de nombreuses études estiment que la Terre ne peut accueillir et faire cohabiter plus de 10 milliards êtres humains, du fait de ses ressources limitées. L'avenir du nombre de personnes sur la planète pourrait donc dépendre fortement des innovations futures en

---

15. D'après l'anthropologue anglais Andrew Sherratt, la révolution des produits secondaires, succédant à la révolution néolithique, survient lorsque que les néolithiques prennent conscience que les animaux peuvent apporter plusieurs autres produits utiles à l'homme.

termes de ressources naturelles ainsi que des habitudes alimentaires et écologiques des individus.



**Figure I.1.** Grandes révolutions techniques de l'humanité à travers le temps (sources : ONU (World Population Prospects : The 2015 et 2017 Revision))

Ainsi, si nous établissons une projection à partir des estimations de la population mondiale (d'après l'étude *The 2017 Revision* et les scénarios moyens de l'ONU), et un coefficient d'accélération avoisinant les 1,3 – 1,5 entre la période de deux révolutions techniques, la prochaine révolution industrielle (la 5<sup>e</sup>) devrait apparaître vers la première moitié du XXI<sup>e</sup> siècle (autour de 2040). En effet, selon les estimations démographiques de l'ONU, il y a de fortes chances que l'on atteigne les 10 milliards de personnes d'ici une vingtaine d'années. On pressent que la source d'énergie notable qui devrait être exploitée sera le *Quantum* (voir Physique quantique) avec la création et la mise en application d'innovations technologiques telles que l'ordinateur quantique, la téléportation quantique, l'imagerie quantique, l'avatar quantique<sup>16</sup> et la cryptologie quantique. On constate que cette informatique

16. Les avatars quantiques correspondent à un système entremêlant les identités numériques, relations connectées, avatars et principes de la mécanique quantique. Ils sont une concrétisation d'un dispositif interactif et d'un système numérique en réseau issus d'une transposition métaphorique des principes de la physique quantique. Cela permettrait d'étudier les dynamiques relationnelles des êtres vivants à travers le temps et l'espace.

quantique et cognitive représente une nouvelle étape dans le développement des machines et de l'informatisation. Ces NTIC quantiques sont développées pour atteindre, voire contourner, les limites standards en métrologie de l'espace et du temps, des champs magnétiques, de la gravitation, etc. Cette énumération des domaines d'applications et du champ des possibles ne sera limitée que par l'imagination des mathématiciens, physiciens, informaticiens et ingénieurs.

D'autre part, cette cinquième révolution industrielle marquera l'avènement de l'« industrie 4.0 » et de la cybernétique<sup>17</sup> et donc de la « société 5.0 »<sup>18</sup> du fait que l'informatique quantique nous permettra d'exploiter tous les usages possibles de l'« informatique 4.0 » – centrés autour des *Big Data* – en intégrant pleinement tout le contexte spatial et l'écosystème digital. On peut imaginer qu'avec les nouvelles applications quantiques, notamment dues aux ordinateurs quantiques et à la téléportation quantique, nous verrons apparaître une « informatique 5.0 » pour laquelle les développeurs ont pu apporter la capacité d'intégration du contexte temporel au sein de l'« informatique 4.0 ». L'information générée sera de nature quantique. Cette prochaine révolution industrielle pourrait devenir le théâtre de l'obsolescence programmée de l'être humain...

Enfin, les pays où cette nouvelle révolution risque d'apparaître pourraient bien être les États-Unis et la Chine, qui sont déjà bien en avance dans les travaux de R & D, centrés sur les applications quantiques. On peut prendre l'exemple de la Chine qui, un an après avoir lancé Mozi – le premier satellite à communication quantique – a réussi, en 2017, la première téléportation quantique sur de grandes distances et depuis l'espace.

De plus, lorsque nous analysons de près toutes ces révolutions techniques à travers le temps, on remarque qu'elles sont toutes de nature informationnelle :

- **révolution machinique** : développe le support informationnel (avec l'imprimerie) : information analogique ;
- **1<sup>re</sup> révolution industrielle** : accélère le transport informationnel (avec la machine à vapeur pour les personnes et le courrier postal) : information analogique ;
- **2<sup>e</sup> révolution industrielle** : créé des moyens informationnels (avec le téléphone et le télégraphe) : information analogique ;

---

17. La cybernétique se décrit comme étant la science du gouvernement ou encore la gestion de l'information visant au pilotage des systèmes. Cette discipline a pris son envol en partie grâce aux travaux du mathématicien Norbert Wiener.

18. Elle se définit en tant que « société de l'intelligence » où l'espace physique et le cyberespace sont fortement impliqués et intégrés. Cette société constitue la volonté des recherches d'optimisation des quatre sociétés précédentes (1.0, 2.0, 3.0, et 4.0).

– 3<sup>e</sup> révolution industrielle : invente des outils informationnels (avec le microprocesseur et le transistor) : information numérique ;

– 4<sup>e</sup> révolution industrielle : déploie les objets, les réseaux et l'écosystème informationnel, (avec l'ordinateur, le robot, l'IoT, l'Internet, la *Blockchain*) : information numérique ;

– 5<sup>e</sup> révolution industrielle : entraîne la transformation informationnelle (avec l'ordinateur quantique, la téléportation quantique, et l'avatar quantique) : information numérique et quantique.

Selon l'économiste Jérémy Rifkin (2012), un changement de civilisation s'enclenche à partir du moment où une révolution apparaît dans trois secteurs : la communication, l'énergie et le transport. Ces trois piliers ont tous un point qui les relie, à savoir l'information. Finalement, tout est une histoire d'information. À la lecture de l'enchaînement de ces révolutions techniques informationnelles, nous nous rendons compte que chaque invention ou création est de nature informationnelle et est elle-même régie et dédiée au développement et à l'expression de l'information en tant que tel. Une certaine logique semble se dessiner à travers la succession de ces révolutions où chacune correspond à une étape dont l'aboutissement tend vers une miniaturisation et transformation informationnelle totale de la matière.

Nous passons d'un état macroscopique (régé par les lois physiques classiques) illustré respectivement par le support, le transport, les moyens, les outils, les objets, les réseaux et l'écosystème informationnel vers un état microscopique (dirigé par les lois de la physique quantique) concrétisé par la transformation informationnelle. De là à dire que l'étape finale n'est juste que la révélation de ce que nous sommes vraiment – c'est-à-dire de l'information – il n'y a qu'un pas à franchir ! Car finalement, nous voyons bien que tout est information et au service de celle-ci, que ce soient les êtres vivants, l'environnement, la Nature et les lois physiques qui la structure.

L'ensemble de l'univers est régi par les lois de l'information, et tout ce qui existe dans l'univers est dirigé par l'information. Cette dernière détermine le comportement des atomes, les électrons, la vie et l'univers lui-même. Chaque particule subatomique, chaque atome, chaque molécule, chaque cellule, chaque espèce vivante, chaque planète, chaque étoile et chaque galaxie abonde d'informations. L'information s'inscrit dans chaque interaction qui se produit dans l'univers et la Nature se structure et se révèle à travers le langage de l'information et des systèmes algorithmiques.

L'histoire de l'humanité étant cyclique, nous sommes en droit de nous demander si notre loi concernant le doublement de la population mondiale et le coefficient d'accélération de 1,3 – 1,5 entre deux révolutions techniques, ne seraient pas les conséquences d'un algorithme<sup>19</sup> à échelle planétaire voire universelle. Il en va de même pour la théorie quantique pour laquelle nous savons aujourd'hui qu'elle n'est autre qu'une théorie de l'information pour laquelle l'information n'est pas une abstraction mais bien une chose physique dont sa propriété s'exprime concrètement dans la matière et l'énergie. Dans ces conditions, nous pouvons soumettre l'hypothèse que toute l'histoire de l'humanité peut être considérée comme un seul système algorithmique de traitement de données dont l'homme ferait partie intégrante comme émetteur et récepteur d'informations, voire comme un processeur. Chaque espace du macrocosme du monde est connecté avec le microcosme de la vie où l'information doit circuler librement. Cette approche data-centrique du monde peut sembler à première vue extravagante, voire un peu provocatrice. Mais elle a au moins le mérite de poser de vraies questions sur l'évolution de l'humanité.

En outre, toutes ces (r)évolutions s'accompagnent d'un progrès social et humain, avec un temps de transition et d'adaptation. Au final, elles ont toujours conduit à des progrès de productivité et à la création, de plus d'emplois qu'il n'en a été détruit. Bien sûr, qui dit révolution industrielle dit destruction créatrice. Cette mutation bouleverse l'ensemble des règles géopolitiques mondiales, certains concepts établis, l'économie planétaire, plus directement, la manière dont les citoyens perçoivent le monde (voir Culture), se comportent avec autrui (voir Mœurs et attitudes), et se considèrent eux-mêmes (voir Représentation). Chaque révolution industrielle favorise donc l'éclosion d'une nouvelle forme de Droit. Ainsi, on constate que la première révolution industrielle s'est accompagnée par la création en France du Code civil (ou Code Napoléon) – promulgué le 21 mars 1804 – regroupant les lois relatives au droit civil français, c'est-à-dire l'ensemble des règles qui déterminent le statut des personnes (livre I), celui des biens (livre II) et celui des relations entre les personnes privées (livres III et IV). En ce qui concerne la deuxième révolution industrielle, cette dernière a vu l'apparition des droits sociaux avec le Code du travail. On peut prendre l'exemple du Code du travail français intitulé *Code du travail et de la prévoyance sociale* dont le premier livre a été adopté le 28 décembre 1910. Ce Code constitue un recueil organisé de la plupart des textes législatifs et réglementaires applicables en matière de droit du travail, et qui concerne essentiellement les salariés sous contrat de travail de droit privé, les salariés du secteur public étant généralement soumis à des statuts particuliers.

---

19. Cette idée d'une Nature intégrant des codes, des programmes et des algorithmes, sera développée plus en profondeur dans le chapitre 2 de cet ouvrage.

À la suite de ces deux premières révolutions industrielles, le Mouvement des droits de l'homme a préservé et assuré le bien social général en diminuant les barrières au respect de la personne physique. Avec la Charte des droits fondamentaux du 7 décembre 2000, et à la suite de la Déclaration universelle des droits de l'homme et de la Convention européenne de sauvegarde des droits de l'homme, l'Union européenne a mis l'accent sur l'inviolabilité de la dignité humaine. En plus que d'être un droit fondamental en soi, cette dignité humaine représente un pilier sur lequel s'appuient les autres droits et libertés, y compris les droits à la protection des données personnelles et au respect de la vie privée<sup>20</sup>. Parallèlement à cela, la troisième révolution industrielle est marquée, selon nous, par la création de deux autres textes majeurs :

– d'une part, par la première loi relative à la bioéthique où a été voté en 1984, dans l'État de Victoria en Australie, l'*Infertility Treatment Act* (loi sur le traitement de la stérilité), dans l'objectif de réguler les pratiques de fécondation *in vitro*. Ce texte, de nature législative et réglementaire, fixe un cadre juridique officiel qui évolue en fonction des découvertes scientifiques et des réflexions éthiques ;

– d'autre part, le traité sur la non-prolifération des armes nucléaires (TNP) qui correspond à un traité international acté et signé le 1<sup>er</sup> juillet 1968 par un grand nombre de pays. Il vise à réduire le risque que l'arme nucléaire se répande à travers le monde, et son application est garantie par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA). Ce texte est le premier à encadrer en partie les usages de cette source d'énergie qui est le nucléaire.

La quatrième révolution industrielle étant encore en cours, nous ne pouvons qu'émettre des suppositions. Mais quelques signaux tendent à penser que l'on se dirige vers la mise en place de « code des robots »<sup>21</sup>, d'une *Lex robotica* permettant aux textes de loi de mieux appréhender et anticiper le changement de paradigme du monde moderne qui se met en place. En effet, un courant de pensées des

---

20. Voir article 1<sup>er</sup> de la Charte des droits fondamentaux qui est une déclaration des droits fondamentaux adoptée le 7 décembre 2000 par l'Union européenne et mise en œuvre par le traité de Nice.

21. Dans sa nouvelle de 1942 intitulée *Cercle vicieux*, l'auteur de science-fiction Isaac Asimov a énoncé trois lois de la robotique qui constituent des règles d'éthiques. Ces dernières sont devenues la pierre angulaire dans des dizaines d'autres romans et histoires du même auteur (Asimov, 1950 ; 1985). Elles consistent plus aux règles d'un jeu qu'aux fondements d'un système juridique. Ces trois lois éponymes de la robotique sont qu'« un robot ne peut porter atteinte à un être humain, ni, en restant passif, permettre qu'un être humain soit exposé au danger », « un robot doit obéir aux ordres qui lui sont donnés par un être humain, sauf si de tels ordres entrent en conflit avec la première loi », « un robot doit protéger son existence tant que cette protection n'entre pas en conflit avec la première ou la deuxième loi ».

« robotariens » (Bensoussan, 2015) de plus en plus fort souhaite que les robots disposent d'un statut juridique à part entière, à l'instar de l'être humain et du courant des « humanitariens » (Loiseau, 2015 ; Mendoza-Caminade, 2016).

D'ailleurs, la Commission des affaires juridiques (JURI) du Parlement européen a adopté, le 16 février 2017, un projet de résolution réclamant de la Commission des règles européennes en matière de droit des robots et de son environnement numérique. Ce texte est directement influencé par l'évolution des robots et de l'IA qui ne cessent de croître tout en s'accompagnant d'un certain nombre de problématiques à la fois juridiques et éthiques. Enfin, on pourrait imaginer la réalisation d'un Traité international du cyberspace avec une Déclaration de Genève du cyberspace qui pourrait, par exemple, énoncer dans son préambule que « les hommes et les femmes de toutes les nations reconnaissent que l'humanité doit donner au cyberspace ce qu'elle a de meilleur, affirmant leurs devoirs, en dehors de toute considération de race, de nationalité, de croyance » (Ghernaouti, 2018).

Concernant la cinquième révolution industrielle, on peut émettre l'hypothèse qu'il faudra peut-être instaurer un Code de l'environnement (physique et temporel) et de la transformation quantique afin de contrôler et maîtriser l'usage des applications quantiques en tout genre (ordinateurs, télétransportations, transactions, télécommunications, avatars, etc.) qui vont bouleverser au niveau mondial les rapports spatio-temporels des hommes.

Par ailleurs, on constate que du fait que chaque apparition d'une nouvelle révolution industrielle arrive de plus en plus tôt, cela a pour répercussion de rendre plus complexe et difficile l'adaptation des individus de notre société en raison d'un temps de transition de plus en plus court.

Enfin, depuis toujours, les périodes de changement nourrissent à la fois de l'enthousiasme mais également de l'inquiétude. La modification des repères, les incertitudes et la méconnaissance d'un avenir proche de la société alimentent les interrogations des personnes. Dans ces conditions, ces ruptures industrielles et sociales s'accompagnent toujours d'un cadre éthique applicable en fonction de l'environnement et des domaines d'application. Ainsi, on remarque que la première révolution industrielle était plus encadrée par l'utilitarisme provenant de l'héritage des Lumières et d'une profonde influence de l'empirisme anglais *via* Jeremy Bentham. Elle se caractérise par un schéma de pensée qui, faute de pouvoir définir objectivement ce que sont le Bien et le Mal, se propose d'en faire abstraction en employant l'« utile » comme principe premier d'une action dite rationnelle. En ce qui concerne la deuxième révolution industrielle, on voit se développer une doctrine philosophique fondée par Auguste Comte, le « positivisme ». Cette éthique traduit la méfiance à

l'égard des grandes hypothèses, ou même simple pensée à ne s'attacher qu'aux certitudes les plus immédiates et aux biens les plus concrets. La troisième révolution industrielle voit émerger, dans le courant des années 1960, la bioéthique, née des interrogations éthiques posées notamment par l'utilisation des nouvelles technologies médicales (biomédecine et des technosciences) et aux enjeux de pouvoir qu'elles mettent en avant. Ce champ de l'éthique se situe au carrefour de trois disciplines anciennes et ancrées dans la société que sont la morale (religieuse ou philosophique), le politique et la science. Aujourd'hui, la quatrième révolution industrielle impose aux acteurs de repenser et réinventer l'éthique existante afin de la faire évoluer vers une éthique algorithmique appliquée essentiellement au numérique. Cette éthique devient essentielle afin que toutes les personnes concernées trouvent un juste équilibre entre un traitement rationnel et mesuré des données numériques, dans le respect de la vie privée, et un surtraitement qui serait contre-productif pour la société. L'éthique algorithmique permettrait de donner du sens à la numérisation du monde en s'appuyant sur le concept de la *Responsability by Design* ou *Ethics by Design* que nous décrirons ultérieurement dans ce livre. Elle est une nécessité afin de mieux appréhender, accompagner et encadrer cette révolution industrielle. Car comme l'expliquait Max Weber, « la révolution n'est pas un carrosse dont on peut descendre à volonté ». On ne peut y échapper !

À l'instar de sa prédécesseuse, on peut imaginer que la cinquième révolution industrielle à venir devra se nourrir d'une éthique quantique, c'est-à-dire une éthique dont le périmètre d'action sera tourné vers les innovations relatives au secteur de la quantique. Tout comme la précédente, cette éthique est à construire et à mettre en place. Elle s'appuiera vraisemblablement sur les mêmes fondements et paramètres que la mécanique quantique, à savoir l'espace, le temps et l'infiniment petit.

En définitive, nous voyons bien que ces révolutions techniques ont des conséquences directes sur l'organisation du travail, sur l'économie et les rapports sociaux en général, mais également contribuent (ou doivent contribuer) à ce que l'humanité se pose des questions sur son avenir et sur le sens du monde qui est en train de se construire.

### **1.3. L'émergence et l'omniprésence multiforme des NTIC dans la société**

Le monde digital se caractérise par son instantanéité, sa densité d'informations, son omniprésence, en contraste avec le monde concret des choses. Désormais, avec la multiplication des moyens de connexion, la baisse des coûts des technologies, les nouvelles capacités de collecte et de traitement des données, on s'aperçoit que nous pouvons faire communiquer des éléments de notre environnement jusqu'à présent

muets. On assiste au développement multiforme des nouvelles technologies de l'information et la communication (NTIC) illustré par l'émergence des technologies associées aux *Big Data*, aux objets connectés, aux algorithmes, aux nanotechnologies, biotechnologies, informatique et sciences cognitives (NBIC), à la *Blockchain*, à l'intelligence artificielle (IA), à la réalité virtuelle et augmentée, voire à l'informatique quantique dans tous les domaines d'activités de notre société contemporaine. Le numérique pénètre même le monde de l'art, souvent dépeint comme étant la sphère réservée à l'homme. Ainsi, des ordinateurs autonomes ont permis à des artistes sollicités de concevoir des mélodies, des harmonies ou des voix, à partir de morceaux ou d'extraits musicaux qu'ils soumettaient à des logiciels. On peut donner l'exemple de l'album de musique *Hello World* pour lequel l'artiste belge Stromae a utilisé de l'IA pour composer deux morceaux de musique. L'univers de la peinture n'est pas en reste avec une machine autonome de *deep learning* capable d'étudier les tableaux d'artistes prestigieux afin d'apprendre leurs styles et de les reproduire à partir d'une photo. Ce système algorithmique peut donc générer des œuvres de grands maîtres tels que Picasso, Van Gogh ou Léonard de Vinci.

Ce phénomène numérique multifacette est en train de réunir les différents univers en ajoutant aux objets associés à ces NTIC la vitesse, l'intelligence et l'ubiquité propres au numérique. Ce contexte technoscientifique est propice au développement d'un mouvement culturel et intellectuel international de plus en plus important, à savoir le transhumanisme dont l'objectif est d'améliorer les caractéristiques physiques et mentales de l'être humain en s'appuyant sur les biotechnologies et les autres technologies émergentes. Ce courant de pensée considère que certains états de la condition humaine comme la maladie, le handicap, la douleur, le vieillissement ou la mort ne sont pas une fatalité en soi et peuvent être corrigés voire supprimés.

Ainsi, les révolutions technologiques ont permis un changement d'échelle (Cambon-Thomsen, 2004) dans l'exploitation des données numériques, notamment dans le domaine de la génétique. Elles peuvent être produites en grande quantité, de façon de plus en plus précise et conservées sur un temps indéfini. Le traitement des données numériques a pour vocation de révéler l'information cachée au sein des grands volumes de données. On observe que les progrès en matière informatique ont rendu possible, grâce à la création de programmes spécifiques, l'interopérabilité des bases de données permettant par là-même la fusion de données provenant de sources diverses et multiples. À cela, on peut ajouter le développement des nouveaux modes d'accès aux *data*, en particulier à travers la multiplication des sources de données en tout genre. Si l'on prend le secteur biomédical et médical, le *crowdsourcing*<sup>22</sup>

---

22. En France, on parle de production participative définie selon la Commission générale de terminologie et de néologie comme le « mode de réalisation d'un projet ou d'un produit

devient l'un des nouveaux dispositifs permettant un accès facilité, en temps réel, aux données de santé afin de développer des recherches (Khare *et al.*, 2015).

Enfin, avec la digitalisation du monde qui se traduit par une hyperconnectivité à outrance, une automatisation permanente et une multiplication des échanges, des réseaux et des flux d'information, l'homme ne vit plus avec les machines mais il apprend à vivre dans un cyberspace techno-humaniste.

### 1.3.1. Les Big Data

L'humanité génère et exploite des données à des échelles plus ou moins grandes, avec la connaissance et les technologies du moment. L'histoire nous indique que des tablettes d'argile de Mésopotamie représentent sans doute une des premières bases de données et d'informations dans des secteurs aussi divers que la littérature (*l'Épopée de Gilgamesh*), les mathématiques (géométrie et algèbre babyloniennes) et le commerce (comptabilité).

D'après l'Union européenne, les *Big Data* (traduits par « données massives ») peuvent se définir comme « de gros volumes de différents types de données produites à haute vitesse à partir d'un grand nombre de différents types de sources. Ces ensembles de données à forte variabilité et en temps réel nécessitent aujourd'hui pour leur gestion de nouveaux outils et procédés, tels que des processeurs, des logiciels et des algorithmes puissants »<sup>23</sup>.

Généralement, les informaticiens utilisent plus souvent le terme de « données » (*data* en anglais) que d'« informations ». Ceci provient du fait qu'une donnée se caractérise principalement par son type qui peut être numérique, alphabétique, temporelle, binaire, alphanumérique, etc. Aujourd'hui, plus de 90 % des données sont semi-structurées ou non structurées. Par nature, les données ne sont que les résidus individualisés et neutres provenant d'un effort de décontextualisation (Rouvroy, 2014).

Chaque jour, des quantités importantes de données sont collectées grâce à notre historique de navigation, notre activité sur les réseaux sociaux ou encore par le biais de capteurs associés à des objets connectés. On estime que le volume de données

---

faisant appel aux contributions d'un grand nombre de personnes, généralement des internautes », *JORF*, n° 0179 du 5 août 2014, p. 12995, texte n° 91.

23. Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions, Vers une économie de la donnée prospère, /\* COM/2014/0442 final \*/, Introduction point2. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=CELEX:52014DC0442>.

stockées dans le monde double tous les quatre ans (Blondel, 2013). En 2013, l'humanité a stocké plus de 2 000 milliards de gigaoctets de données numériques nouvelles.

La *data* n'a qu'un contenu et un type. Elle n'est pas significative en soi car elle est objective et réelle. Elle se construit à partir de faits, d'observations, et d'éléments bruts. Sans traitement, sa signification est faible. Ces mégadonnées en disent beaucoup sur l'individu comme son âge, son état de santé, sa capacité financière et assurantielle, sa localisation, allant même jusqu'à ses centres d'intérêts et comportements. Une fois collectées et analysées, les *Big Data* s'avèrent très précieuses dans des secteurs tels que la publicité, le marketing, l'urbanisme, la finance ou encore la santé. Ainsi, grâce aux informations recueillies, certaines entreprises sont en mesure de proposer des produits personnalisés et plus en phase avec les habitudes et les goûts de leurs clients. D'un point de vue marchand, les *Big Data* consistent à transformer les traces d'activités des consommateurs en informations dans l'objectif de documenter les acteurs du marché. Ils représentent donc un processus de documentation.

Notons que ces « données massives » peuvent être considérées et appréhendées comme des données secondaires dans le sens où la majorité n'a pas été collectée dans le but de répondre à des questions de recherche identifiées à l'avance (Kitchin, 2014). Ces *Big Data* impliquent ce qui recouvre l'acquisition de données analytiques et hétérogènes dont l'exploitation nécessite l'usage des dernières évolutions technologiques et algorithmiques (*machine* et *deep learning*). Dans ces conditions, de nombreuses informations peuvent être enregistrées de manière numérique et renseigner, voire orienter, nos comportements *via* des NTIC et algorithmes dynamiques auto-apprenants. À rebours d'une réflexion déductive, dans une approche *bottom up* probabiliste directement en rupture avec les visions scientifiques classiques de nature majoritairement hypothético-déductives, les *Big Data* peuvent être représentées non seulement par la production d'une quantité importante de données mais également par les bénéfices éventuels (pour la santé, l'économie, l'éducation, l'écologie, etc.) que recèlerait l'usage de ces technologies. En effet, on estime que la valeur produite par les données livrées par les citoyens européens pourrait représenter 1 000 milliards d'euros en 2020, soit 8 % du PIB européen<sup>24</sup>.

Désormais, toutes les données ont pris un caractère personnel. Même la plus insignifiante des données peut révéler l'identité d'une personne si elle est croisée avec une multitude d'autres données comme le permet l'accès à Internet. Le risque majeur des *Big Data* ne se situe pas uniquement sur la vie privée et la confidentialité

---

24. Disponible à l'adresse : [http://europa.eu/rapid/press-release\\_SPEECH-13-788\\_en.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_SPEECH-13-788_en.htm).

de l'individu mais également sur le risque que la société est amenée à juger des personnes non pas sur leur comportement réel, mais sur leur propension à avoir le comportement que les *data* leur prêtent.

Depuis le développement des NTIC et des technologies algorithmiques, on observe l'apparition de plus en plus fréquente des données dites « non structurées » ou « semi-structurées »<sup>25</sup> qui viennent compléter et enrichir les données structurées provenant des applications informatiques traditionnelles (ERP, CRM, SCM, etc.). Ces données seront identifiées et nommées comme non structurées dès l'instant qu'elles vont subir une transformation plus complexe avant de révéler leur signification et leur valeur expressive. L'exploitation souvent en temps réel de ces *data* passe irrémédiablement par des algorithmes puissants et peut, dans certaines situations, constituer le cœur de l'information à analyser (Bensabat *et al.*, 2014). Après traitement, les données se transforment en information qui se caractérise plus par son sens dont sa compréhension et son acquis aboutissent naturellement à la connaissance. Cette connaissance représente ce qui permet de localiser l'information, de la contextualiser et de la globaliser, c'est-à-dire de la situer dans un ensemble. D'un point de vue étymologique, l'information apporte un savoir que le destinataire ne dispose pas ou ne peut pas prévoir. Elle permet de réduire les incertitudes et de clarifier les choses.

Dès lors, la diversité dans la nature protéiforme de la donnée est un des atouts majeurs d'un projet *Big Data*. Tout l'intérêt se situe dans la confrontation et le croisement d'une multitude de jeux de données<sup>26</sup> très différentes, non ou semi-structurées d'origines très variées, telles que :

- les messages électroniques (e-mails et messages instantanés), les *forums*, réseaux sociaux et les sites Internet, les saisies et les traces déposées sur le Web, la numérisation des documents contractuels, et les conversations avec les centres d'appels ;

- les données associées à la mobilité : les identifiants (carte SIM, numéro d'identification IMEI, UID, etc.), les historiques de navigation, et les géolocalisations ;

- les données qui émanent des objets connectés : machines, capteurs, domotique, voitures et compteurs « intelligents », des systèmes biométriques personnels, *Set Top Box* (passerelles Internet des opérateurs, box des câblo-opérateurs, etc.) ;

---

25. Les données « non structurées » peuvent avoir comme source des photos, des vidéos ou des sons, alors que les données « semi-structurées » proviennent plus des messages e-mail, log, etc.

26. Selon Gabriel Siméon, dans le journal *Libération* en 2012, « l'humanité produit autant d'informations en deux jours qu'elle ne l'a fait en deux millions d'années. L'avenir appartient à ceux qui sauront utiliser cette profusion ».

– les données produites et partagées hors des circuits traditionnels de communication d’une structure et organisation *via* l’Internet social (Béranger, 2016).

Ces données sont issues de sources multiples différentes comme les compteurs d’énergie, le RFID, les transactions financières, les opérations commerciales en volumes, les réseaux sociaux, les blogs, les réseaux de capteurs industriels, l’indexation sur Internet, la téléphonie, les détails d’appels en *call center*, le parcours de navigation GPS, les dossiers médicaux, l’e-commerce, l’Internet des objets (ou IoT : *Internet of Things*), l’informatique embarquée, les données de jeux massivement en ligne, les données biologiques, les sondages, logs, les mails, etc.

Cette variabilité dans la nature intrinsèque des données traduit à la fois la plus-value mais également la complexité de réalisation d’un traitement algorithmique des données numériques en nécessitant des acteurs pluridisciplinaires au sein de l’entreprise.

Aujourd’hui, la croissance exponentielle des *data* ne peut être dissociée de son contexte et environnement. Ce phénomène est associé directement et/ou indirectement à :

- la génération de données par des capteurs et des machines ;
- l’évolution du nombre d’utilisateurs finaux<sup>27</sup> des solutions IT ;
- la finesse de l’information tracée ;
- l’évolution des périmètres couverts et des usages (mobiles, satellites, 4 voire 5G, etc.) ;
- l’évolution de l’historique des données disponible ;
- la croissance des volumes opérationnels.

À côté de l’information brute ou quantitative qu’elle dispose, elle renseigne sur la qualité de celui qui la diffuse. Désormais, on s’interroge sur ce que la donnée numérique dit de l’éthique de la structure qui la délivre. En effet, les *Big Data* comportent une valeur intrinsèque paradoxale : d’un côté, ils renforcent l’idée de voir des informations sortir de la structure et de l’autre, ils possèdent le risque d’un effet *Big Brother*.

---

27. Les utilisateurs finaux peuvent être caractérisés soient de directs (particuliers et professionnels), soient d’indirects (employés ou étudiants dont l’évolution, respectivement de carrière (voir logiciel de RH) et d’orientation (voir admission post-bac (APB)) serait pilotée par un système algorithmique).

Dans les deux cas, nous touchons au domaine de la visibilité qui nécessite un complément de contrôle de la validité des NTIC annoncées. Les applications plurisectorielles autour des *Big Data* sont multiples : maintenance prédictive, aide des prises de décision en temps réel, coordination optimale entre les métiers, analyse des comportements d'achat d'une personne sur un site d'e-commerce et suggestion en temps réel de produits, surveillance en direct de pièces mécaniques afin de prédire le meilleur moment pour les remplacer, prédiction d'actes criminels (à cent mètres près) à Los Angeles, destruction sélective de documents archivés, diagnostic automatique en temps réel de pathologies (Servy, 2016), anticipation de la gestion des stocks en fonction de l'avancement de la production, etc.

On peut donner l'exemple des essais cliniques *in silico*<sup>28</sup> où l'on teste et évalue des choix thérapeutiques sur un double numérique (une sorte d'avatar), créé à partir de modèles mathématiques très poussés établis sur la base des *Big Data*. Ce double numérique pourrait notamment permettre des essais cliniques « virtuels » ou encore éviter des interventions inutiles.

Couplée au séquençage génomique, une telle approche permettrait alors d'effectuer une médecine prédictive et personnalisée. C'est le cas de l'institut Insigneo – installé à Stefffield en Grande-Bretagne – qui travaille sur le *Virtual Physiological Human* (VPH), c'est-à-dire un double physiologique virtuel de l'humain.

D'autre part, on voit se développer progressivement des projets autour de la ville « intelligente » comme SystemX à Lyon (France) qui cible les territoires intelligents, en relation avec les actions conduites par le Grand Lyon sur la métropole intelligente.

L'objectif est de développer des outils d'aide à la décision capable de valoriser les données urbaines. Ce projet utilisera les technologies *Big Data* pour se consacrer à tout ce qui relève de la mobilité urbaine connectée et intelligente : des capteurs de gestion du trafic au *tracking* des marchandises en ville, de l'éclairage urbain à la gestion dynamique de parking, à la sécurité, à l'Internet des objets (ou IoT).

Autant d'innovations qui améliorent chaque jour un peu plus les outils de productions et laissent entrevoir des possibilités sans limite pour le futur de l'« industrie 4.0 », carrefour d'un processus global interconnecté.

---

28. Le terme *in silico* correspond à un néologisme d'origine latine désignant une recherche ou un essai effectué au moyen de calculs complexes informatisés ou de modèles informatiques.

### 1.3.2. L'Internet des objets

L'Internet des objets (ou IoT : *Internet of Things*) correspond aux objets connectés à Internet qui diffusent des données numériques par le biais de puces radiofréquences (RFID). Ces objets peuvent communiquer entre eux. On peut les retrouver dans les objets du quotidien (domotique, podomètres connectés, compteurs électriques intelligents, etc.), dans les voitures et les avions, dans la ville, dans le secteur médical du sport, la construction, le commerce de grande consommation, assurantiel et financier, etc. En résumé, ces objets connectés envahissent tous les domaines de la société. La valeur de l'Internet des objets s'imbrique autour de trois grands niveaux : objets, connectivité (réseaux) et traitements (intelligence) des données.

D'après une étude EMC-IDC en 2015, l'IoT aura pour conséquence de « doubler la taille de l'univers numérique tous les deux ans, lequel devrait peser 44 000 milliards de gigaoctets en 2020, soit 10 fois plus qu'en 2013 ». Selon le cabinet McKinsey, l'Internet des objets comporte un marché qui devrait atteindre les 6,2 trillions de dollars en 2025. La connectivité devrait devenir une caractéristique standard, avec plus de 50 milliards le nombre d'objets connectés présents dans le monde en 2020<sup>29</sup> dans des secteurs allant des automobiles, drones ou aéronefs semi-autonomes, de la télé-médecine, en passant par des compteurs intelligents permettant la construction de villes intelligentes (Buttarelli, 2015). Leur usage risque de conduire à de graves ingérences dans la vie privée et d'apporter un effet dissuasif sur la liberté d'expression des personnes.

Il est important de souligner que le vrai intérêt de l'IoT n'est pas simplement dans l'objet et la technologie associée mais dans les services qu'il va apporter. Ce phénomène est en train de créer de nouveaux usages et de remodeler nos modes de vies. On ne peut pas dire que l'Internet des objets est une révolution en soi d'un point de vue strictement technologique. Ainsi, les véhicules autonomes<sup>30</sup> vont vraisemblablement perturber la façon dont les déplacements individuels sont réalisés et organisés, et pourraient rendre peu lisible la distinction entre les transports privés et publics.

La véritable révolution se situe surtout dans les usages et les modèles économiques que permet cette technologie de l'Internet. Désormais, l'IoT apparaît comme une des pierres angulaires de la transformation de l'économie vers une

---

29. Source : *World Economic Forum*.

30. D'après le cabinet Boston Consulting Group, on estime que d'ici 2035, l'Europe comptera 12 millions de véhicules pleinement autonomes et 18 millions de véhicules partiellement autonomes.

économie de services et de la fonctionnalité dans laquelle les acteurs ne vendent plus des objets destinés à un usage donné, mais bien à un accompagnement, des compétences, et la garantie d'une utilisation. Les *Big Data* qui émanent des capteurs ont alors pour vocation de produire en continu et de façon personnalisée des services. Désormais, l'utilisateur – personne ou structure – dispose *via* l'Internet des objets la possibilité d'agir en temps réel sur son environnement – de manière manuelle ou automatisée – afin d'optimiser des processus comme des flux routiers ou des chaînes logistiques en temps réels. L'enjeu majeur ne se situe pas vraiment dans l'acquisition des données mais plus dans sa *data visualisation* et les applications associées : rappels, tableaux de bord, notifications, *feedback*, etc. qui permet à ses utilisateurs de prendre la meilleure décision pour eux, de manière simple et rapide. On peut donner l'exemple d'un constructeur d'automobiles qui intègre toute une série de capteurs qui permet d'élargir les services de la voiture, à savoir alerte radars, maintenance prédictive, relai avec des dépanneurs et/ou des garagistes, etc. On voit bien dans ce cas-là que le rôle du constructeur de voitures ne se réduit plus à vendre un véhicule – comme simple moyen de transport – mais qu'il devient alors un partenaire qui accompagne l'automobiliste dans la durée de ses déplacements. Les IoT peuvent également se composer d'objets « portables » comme les montres et les vêtements qui pourront entre autres détecter la présence de caillots sanguins et surveiller l'état de santé et l'évolution de la cicatrisation de plaies (Buttarelli, 2015). Les textiles connectés pourront bientôt apporter une protection vis-à-vis de l'environnement comme les forts indices d'UV émanant du soleil ou les flammes d'un incendie.

Dans le secteur de la santé, les objets connectés, notamment les montres connectées, s'installent de plus en plus sur le marché en proposant des applications qui permettent de mesurer des critères physiologiques (pulsations cardiaques, nombre de pas par jour, tension artérielle, glycémie, calories dépensées, etc.). Ces applications dépassent le stade du gadget du fait qu'elles contiennent désormais un intérêt pour la surveillance des maladies chroniques comme l'hypertension artérielle, le diabète, les troubles du rythme cardiaque (tachycardie, troubles de conduction) et des maladies cardiovasculaires (infarctus) (Atoui, 2006).

De plus, l'Internet des objets va contribuer à modifier radicalement le comportement du consommateur du fait que des machines vont se charger de faire des achats de consommation réguliers. On peut prendre l'exemple du réfrigérateur intelligent qui commande des provisions, de la cave à vin connectée qui va commander une autre bouteille de vin lorsque la réserve s'épuise, ou de la salle de bain intelligente qui commande en ligne des articles de toilettes lorsque ces derniers sont en rupture de stock. Désormais, les utilisateurs auront leurs produits livrés automatiquement *via* un dispositif de paiement automatisé – quasi-invisible – sous

forme d'un paiement mensuel, à l'instar d'une facture d'électricité ou d'eau. On assiste au commencement d'une nouvelle dynamique des achats où les transactions s'effectueront en partie par les IoT sur des bases régulières ou semi-régulières.

Les technologues se reposent sur l'approche des smartphones afin de l'appliquer aux *smart wearables* et *smart home*. On peut donner l'exemple du *smart fridge* de Samsung qui intègre une interface permettant aux utilisateurs d'acheter des produits depuis plusieurs magasins, directement à partir de la porte du réfrigérateur. L'objet se connecte également au smartphone du consommateur afin de lui transmettre en direct des images de l'intérieur du réfrigérateur et permettre un accès à distance à l'emploi du temps de la maison. Dans un proche avenir, il est fort probable que certains foyers deviendront de véritables maisons « intelligentes » dans lesquelles des systèmes d'exploitation intégrés piloteront tous les appareils ménagers *via* une plateforme unique de gestion. En effet, les progrès dans le secteur de la domotique sont tels que bientôt le chauffage central d'une maison sera géré en fonction des mouvements du propriétaire, les salles de bain, la buanderie, la trousse à pharmacie connectée etc. feront des commandes pour se réapprovisionner en produits spécifiques à leur fonction.

Au-delà du secteur de la domotique, nous pouvons faire le même constat pour tous les autres domaines de la société, comme l'automobile, la grande distribution, la ville, etc. En effet, Cisco prévoit dans un futur proche des rues où les lampadaires munis de capteur de mouvement pourront diminuer leur intensité en fonction des périodes pleines et creuses, économisant ainsi de l'énergie inutile. C'est également grâce aux solutions de l'Internet des objets que certaines personnes pourront contrôler leurs données de santé ou que les industriels optimiseront leurs dispositifs opérationnels.

Enfin, l'Internet des objets dispose d'une relation étroite avec diverses plateformes de traitement de données, en lien avec les vagues du *cloud computing* et des *Big Data*. En effet, ces dernières ont la capacité d'élaborer des automatismes, de concevoir des recommandations et faire interagir des acteurs divers. À l'ère des GAFAM, NATU, BATX et autres plateformes, on assiste donc à une triangulation relationnelle entre l'objet, l'utilisateur et la plateforme dans une économie collaborative centrée sur le service à faire concorder l'offre et la demande, et non basée sur la propriété, et dont l'écosystème est fluide et transversal. On parle de plateformes d'intelligence collaborative disruptes qui s'adaptent au bénéfice des acteurs et des partenaires de cet écosystème numérique. Cela a pour conséquence d'avoir un impact multisectoriel suivant les différents liens :

- lien plateforme : objet est centré sur des problématiques technologiques et structurelles ;

- lien utilisateur : objet se repose sur des questions de sensibilisation, de formation et d'appropriation ;
- lien utilisateur : plateforme s'axe sur des interrogations autour de l'éthique, la transparence, la sécurité et la confiance.

### 1.3.3. Les algorithmes

Le terme « algorithme » provient du mot latin médiéval *algorithmus*, latinisation du nom d'un mathématicien de langue arabe appelé Al-Khwârizmî<sup>31</sup>, avec l'influence du grec *arithmos* : le nombre. Son origine est estimée au III<sup>e</sup> millénaire en Mésopotamie babylonienne. En effet, durant l'Antiquité, l'algorithme d'Euclide permettait de calculer le plus grand commun diviseur de deux nombres.

On peut définir l'algorithme comme étant un ensemble de règles opératoires dont l'application permet de résoudre un problème énoncé au moyen d'un nombre fini d'opérations. Il prend des décisions de façon déterministe et qui font partie d'un gigantesque réseau digital global. C'est une méthode pour effectuer un calcul. Il constitue donc une suite finie et non ambiguë d'instructions ou d'opérations dont la mission est soit de générer un résultat, soit de résoudre un problème donné. Sa vocation première est de permettre la réalisation optimisée de processus répétitifs, principalement *via* la formalisation et à la description des successions logiques à un niveau plus abstrait, indépendamment du système de codage particulier permettant sa mise en place effective au sein d'un ordinateur, d'un robot, d'une machine, ou d'un système d'information autonome.

Un algorithme peut être traduit, grâce à un langage de programmation, en un programme exécutable par un ordinateur. Il est capable de développer des techniques de calculs et de modélisation à partir d'un objectif donné. Les grandes étapes de la réalisation d'un algorithme peuvent se résumer à sélectionner tout d'abord la solution que l'on estime adéquate à un problème donné puis la coder, c'est-à-dire la retranscrire dans un langage interprétable par la machine.

Les algorithmes disposent d'un caractère mécanique, chacune des étapes devant être la plus précise et transparente possible, tout en ne requérant aucune intuition humaine ou tâtonnement. Une précision qui donne la possibilité à ces étapes d'être transposées au sein d'un ordinateur. Autre caractéristique fondamentale, un algorithme doit fonctionner dans tous les cas de figure, quelles que soient les *data*

---

31. Au IX<sup>e</sup> siècle, le mathématicien arabe Person Al-Khwârizmî fit le lien avec le savoir mathématique provenant de l'Inde (dont le dispositif de numération décimale).

qui l'alimentent. Peu importe les chiffres que nous essayons d'additionner, l'algorithme d'« addition » nous donnera toujours une réponse correcte.

Évidemment, il existe toutes sortes d'algorithmes, plus ou moins complexes et longs à définir, à structurer puis à coder. Mais les développements constants de la personnalisation du Web ou encore de l'intelligence artificielle (IA) notamment du *machine learning* voudraient que ceux-ci deviennent de plus en plus élaborés avec le temps. Ainsi, le *machine learning* permet d'apporter de la valeur ajoutée et d'y voir plus clair dans la masse informationnelle grandissante, en identifiant des modèles inconnus ou des modèles de comportement, *via* sa puissance de calcul et d'algorithmie.

Les algorithmes sont plurifactoriels et sont capables de s'adapter en temps réel à toutes les requêtes et actions que leurs intègrent les utilisateurs. On peut citer les algorithmes de recommandation des réseaux sociaux, des plateformes de *Streaming* ou encore des applications de transport qui en sont le parfait exemple à l'heure actuelle. Cette complexité leur conférant une valeur économique telle qu'elle suffit à expliquer qu'ils représentent des secrets aussi bien gardés que la recette de notre dessert favori. En effet, les *Big Data* seules ont une valeur intrinsèque limitée. Elles ne peuvent pas être transformatrices. L'apport de l'algorithme permet d'exploiter et de laisser pleinement exprimer la véritable valeur des *Big Data*. Les algorithmes comportent explicitement ou implicitement des jugements de valeur. On peut observer quatre types de variables dans les algorithmes : variables de décision, d'objectif, de contexte, et auxiliaires.

Dès lors, nous employant quotidiennement, consciemment ou pas, des dizaines voire des centaines de programmes algorithmiques ou de « calculateurs numériques » (Cardon, 2015) :

- sélection de l'information qui est visible sur un mur du réseau social Facebook (*edgerank*) ;
- popularité, mesures d'audience : dénombrement des clics des internautes et ordonner la popularité des sites, représentation traditionnelle du public, des médias ou des électeurs ;
- hiérarchisation des résultats d'une recherche d'information sur le moteur de recherche Google (*pagerank*), et relatif à l'autorité (les mesures fondées sur la méritocratie) ;
- *matching* : par exemple répartir des malades afin qu'ils puissent participer à un essai clinique *via* une cohorte donnée ;

- gestion de la connaissance afin de tirer bénéfice des grandes quantités d’informations (publications scientifiques, bases de données et cohortes *via* de l’*Open Data*) ;
- mesures d’e-réputation (sites de notations et réseaux sociaux) : valorisation de la réputation de personnes, de produits et/ou services afin de le recommander, à l’intérieur du Web (statistiques typiques du *benchmark*) ;
- recommandation de produits tels que des ouvrages (Amazon) ou des films (Netflix) ;
- aide à la décision (notamment pour les professionnels de la santé, de l’assurance et de la finance) ;
- optimisation des déplacements pour un transport donné ;
- prédiction<sup>32</sup> (détection des maladies ou des épidémies, personnalisation des contenus permis par les traces de navigation des internautes, affectation des forces de police, etc.).

Cette « algorithmisation » de notre société s’appliquant à tous les champs et domaines d’activité, on observe que les modèles prédictifs se multiplient de manière exponentielle. Cela a pour conséquence de formater nos représentations. Étant donné que tout devient données, des objets, de nos vies jusqu’à l’être humain lui-même, ce phénomène n’est qu’au début de son développement.

Les programmeurs implantent dans les systèmes d’information (SI) des méthodes systématiques, les algorithmes, qui consistent en la description précise d’actions élémentaires et leur enchaînement. Dès lors, les algorithmes sont donc devenus omniprésents et essentiels dans notre société contemporaine. Ils sont conçus par l’homme et au cœur même de tous nos SI. Pour cela, ils utilisent les données produites massivement dans tous les secteurs tels que la finance, l’écologie, les sciences, l’assurance, la santé, etc. À base de traitements statistiques, ces algorithmes créent des corrélations à caractère prédictif voire autoréalisateur mais pas forcément explicatif. Ils orientent les choix et les comportements de nature aussi bien individuels que collectifs : déplacements intelligents<sup>33</sup>, publicités ciblées en identifiant les acheteurs potentiels d’un produit ou d’un service, recommandations médicales (pacemakers qui assurent le maintien des rythmes cardiaques naturels), détection d’une fraude

---

32. Ces algorithmes de prédiction correspondent généralement à des « boîtes noires » posant tant des problèmes techniques et mathématiques pour leur compréhension, que sociétaux de transparence pour leur acceptabilité morale.

33. Certains algorithmes génétiques optimisent les temps de réaction en croisant données d’emplacement des ambulances et données démographiques (Gerber, 2014).

bancaire ou encore cerner les mauvais payeurs, politiques privées ou publiques, détermination tarifaire, dispositifs d'alerte rapide suivant au plus près l'approche des tempêtes ou détectent l'activité sismique, établissement du prix d'un billet d'avion (*Yield Management*), élaboration d'une liste de suspects terroristes (loi française sur le renseignement), répartition des élèves ou des étudiants français en lycée ou en université (*Affelnet*, admission postbac (APB)), etc. Ainsi, la présence et l'application des algorithmes dans chacune des tranches de la société nous confirment qu'ils définissent la manière dont le monde fonctionne.

Toutefois, certaines personnes mettent en cause notre attitude par rapport aux algorithmes et notre tendance à considérer comme juste les résultats de ces calculs complexes. Or, un algorithme contient également un ensemble d'hypothèses mathématiques qui peuvent très vite être la cible de préjugés dans la vie réelle.

Qu'ils servent à classer, lier, sélectionner ou encore prédire, les algorithmes constituent des instructions prenant la forme de lignes de code informatique. Même si ces algorithmes ont des visées et des vocations différentes, ils présentent tous un trait commun, à savoir qu'ils sont tous fondés sur la performance. Derrière ces lignes de code se cachent de nombreux mathématiciens, informaticiens, et ingénieurs, en charge de les programmer et par là-même de leur donner vie. Mais au préalable, encore faut-il que les structures ou les entrepreneurs identifient et déterminent précisément le problème auquel ils souhaitent répondre. Ainsi, dans le cas d'un moteur de recherche, les concepteurs doivent se demander : comment organiser l'information en ligne et sa recherche – et la solution à y apporter – classer l'information en mettant la priorité sur tel ou tel critère ?

Cette partie théorique initiale est primordiale et vient souligner le caractère profondément humain du fonctionnement des NTIC. Du coup, cela revient à penser que finalement, les systèmes algorithmiques disposent tous d'une part de subjectivité illustrée par les choix d'indicateurs et de paramètres effectués par les concepteurs. Par conséquent, même si les algorithmes ne sont pas construits avec une intention de discrimination et même s'ils reproduisent les préférences sociales de façon tout à fait rationnelle, ils tendent également à reproduire une certaine forme de discrimination non objective.

### 1.3.4. La Blockchain

Aujourd'hui, la société moderne est devenue presque inconcevable sans l'utilisation des données numérisées. La révolution de ces immenses volumes de données brutes et hétérogènes va de pair avec le développement d'une nouvelle science des données. La valorisation des *Big Data* passe par la mise en place d'analyses sophistiquées, véritables « passage à l'échelle » dans la conception et

l'usage des modèles d'analyse et la mise en œuvre des algorithmes. Désormais, les logiciels doivent avoir la capacité de détecter l'information intéressante pour obtenir un traitement optimum des données : c'est le *data mining*. Parallèlement à cela, on voit apparaître et s'installer progressivement dans cet écosystème digital le concept de la *Blockchain*, technologie sur laquelle s'est fondée les Bitcoin<sup>34</sup> (la monnaie cryptographique et système de paiement *peer-to-peer*). On peut distinguer deux types de *Blockchain*, d'un côté les « *Blockchain* publiques », ouvertes à tout le monde (Bitcoin, Ethereum, Tezos, etc.), et de l'autre côté, les « *Blockchain* entreprises » (Hyperledger, Ripple, MultiChain, etc.).

Désormais, on assiste à l'émergence de processus de « datafication » qui consiste à tout numériser et à mesurer afin d'en ressortir des données que ce soit pour des écrits, des localisations, des actes individuels, voire des empreintes. L'exploitation des données à caractère personnel est un sujet sensible, du fait que ces dernières touchent directement à l'intimité de chaque individu. Les situations dans lesquelles se posent de difficiles problèmes de choix stratégiques en matière de gestion de la donnée personnelle sont chaque jour plus nombreuses.

Dans ce contexte, l'interaction de la société avec les NTIC représente un système instable voire précaire. Ainsi, les enjeux associés aux *Big Data* sont importants, tant sur le plan économique que pour garantir un espace numérique protecteur de la vie privée et des libertés fondamentales. Dès lors, une telle transformation numérique comporte également des risques éthiques autour des données à caractère personnel comme l'intégrité, la fiabilité, la sécurité, le respect de la vie privée et des libertés individuelles, la réputation, la régulation, etc. C'est pourquoi il nous paraît essentiel d'apporter un éclairage éthique autour de la révolution *Blockchain*<sup>35</sup>.

Avant d'entrer dans le vif du sujet, il nous faut expliquer clairement les aspects technologiques de la *Blockchain* avant d'envisager une analyse éthique sur ce phénomène. Cette NTIC fonctionne comme une base de données publique ou un grand livre de compte ouvert répondant à des règles de fonctionnement cryptographiques. Elle enregistre les détails de chaque échange effectué entre les utilisateurs de cette *Blockchain* depuis sa création. Ce qui la rend particulièrement ingénieuse, c'est qu'elle est conçue pour empêcher que le même échange soit comptabilisé en double, et ce sans qu'aucun intermédiaire n'intervienne (comme une banque ou une assurance). Dès lors,

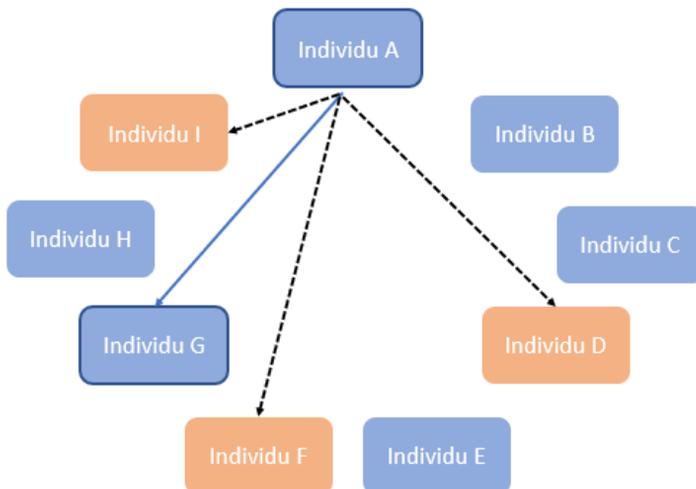
---

34. De l'anglais *bit*, unité d'information binaire et *coin*, pièce de monnaie. Le Bitcoin représente une monnaie virtuelle et alternative qui est utilisée *via* des serveurs, des *datacenters*, réseaux, etc. sous forme cryptée. On peut constater que c'est la première fois dans l'histoire de l'humanité qu'une NTIC génère sa propre monnaie.

35. En français, « chaîne de blocs » informatique, protégée contre toute modification, dont chacun contient l'identificateur de son prédécesseur.

la *Blockchain* enregistre un ensemble de données comme une date, une signature cryptographique associée à l'expéditeur et tout un ensemble d'autres éléments spécifiques. Tous ces échanges sont traçables, consultables et téléchargeables gratuitement sur Internet, par toute personne qui souhaite vérifier la validité et la non-falsification de la base de données en temps réel. L'intérêt majeur de ce dispositif est de pouvoir stocker avec chaque transaction une preuve d'information afin de pouvoir prouver ultérieurement et à chaque instant l'existence et le contenu de cette information originale à un moment donné. Sa mission est donc de créer de la confiance en protocolisant un actif numérique ou une *database* en le rendant auditable. On en parle parfois comme l'accélérateur et l'écosystème bénéfique de la révolution numérique. À partir de cette idée, nous pouvons donner l'image de la *Blockchain* qui peut être comprise comme une sorte de colonie symbiotique.

La sécurité du dispositif s'appuie sur le principe suivant : chaque nœud du réseau part du principe que les autres nœuds sont frauduleux. C'est une forme de « présomption de culpabilité ». Si un nœud reçoit un bloc, il le soumet d'abord à un protocole pour vérifier sa conformité avant de l'utiliser. Elle se repose donc sur une architecture *peer-to-peer* où chaque nœud est à la fois client et serveur, sans aucun point de contrôle ou de vulnérabilité, puisque chacun conserve une copie de toute transaction. Chaque transaction repose sur un verrou cryptographique qui la sécurise, dont de petites quantités sont prélevées pour payer le calcul et le stockage que la plateforme réalise. La confiance se base sur la multitude des individus qui participent et la multitude des possibilités de vérifications des échanges.



**Figure I.2.** Architecture distribuée et décentralisée

Sur l'exemple de la figure I.2, l'individu A souhaite effectuer une transaction dématérialisée avec l'individu G. Le paiement circule directement d'un acteur à l'autre, mais l'ordre de transaction est vérifié par des « mineurs » (individu D, F et I). Une fois la transaction vérifiée puis validée, cette dernière est inscrite dans un grand registre visible par tous (voir la figure I.2).

Par conséquent, la sécurité de la *Blockchain* croît au fur et à mesure qu'on y ajoute des blocs. Cette technologie se fonde sur un historique de tous les échanges réalisés entre ses utilisateurs. Cela constitue un réseau décentralisé de milliers de systèmes d'information et d'objets connectés autonomes, « les mineurs », partout sur la planète qui réalisent des transactions ou des projets et enregistrent des actifs numériques entre eux. Le « minage » est la procédure permettant la validation des blocs de transactions à ajouter dans la chaîne de blocs de Bitcoin. Ce réseau de « mineurs » travaille de manière simultanée afin de valider chaque nouvelle information ajoutée à la *Blockchain*. Cette validation est consensuelle *via* un protocole au sein du réseau et ne dépend d'aucune autorité centrale. C'est le principe d'une approche collaborative. Lorsqu'une transaction est validée, une *Proof of Work* est envoyée par le « mineur ». Chaque « mineur » possède une copie intégrale de la transaction (sous la forme de ligne de code chiffrée) sur son ordinateur et peut confronter cette dernière à celle du réseau afin de vérifier sa conformité à l'ensemble de la chaîne. Ainsi, chaque bloc est validé et chaque transaction dépend de toutes les précédentes. Si l'intermédiaire avait pour rôle de créer de la confiance, la *Blockchain* permet de déplacer cette fonction afin de la recentrer sur la technologie elle-même. Elle donne aux objets et aux systèmes d'information une identité, une pleine autonomie et l'appartenance à eux-mêmes. On peut noter que pour encourager les « mineurs » – essentiels au bon fonctionnement et à la viabilité du réseau – une rémunération leur est attribuée en récompense de leur travail. La complexité du problème de validation est liée à une difficulté associée au bloc. Afin de maintenir constant le temps de production d'un bloc, le niveau de difficulté est automatiquement ajusté par le réseau.

Par ailleurs, en faisant office de tiers de confiance automatisé, cette technologie ouvre la voie à une diminution des coûts de structure tout en fiabilisant et en accélérant les processus de décision. La *Blockchain* trouve une application majeure notamment dans le secteur du droit, *via* son registre infailible, utile pour apporter la preuve que tel document était bien possédé par tel individu à une date donnée ou que telle somme d'argent a bien été transférée à tel moment à une personne donnée. Dans le domaine de la santé, ces applications sont potentiellement très nombreuses. En effet, la *Blockchain* pourrait par exemple permettre de gérer les données des patients de manière transparente, sûre et infalsifiable, et restreindre leur partage aux principaux tiers de confiance : médecins, hôpitaux, laboratoires pharmaceutiques,

etc. Elle pourrait également améliorer l'accès aux données de santé afin de renforcer le suivi des malades et soutenir la recherche, tout en garantissant le respect de la vie privée des usagers de santé : la technologie permet en effet de partager les données au profit des patients *via* deux procédés sécurisants, la cryptographie asymétrique et le consensus distribué. Il sera dès lors possible de limiter les failles de sécurité car plusieurs codes peuvent être requis pour déverrouiller un seul dossier médical. On peut, par ailleurs, imaginer la mise en œuvre d'un système BitHealth sur le modèle des Bitcoin, à travers lequel les données de santé sont stockées et sécurisées de manière distribuée en mode *peer-to-peer*. Des applications sont en outre possibles dans le cadre du dossier médical partagé (DMP) grâce à la transparence de la *Blockchain* et à l'interopérabilité inhérente à la technologie. Sa robustesse et son caractère infalsifiable permettraient enfin de certifier des essais cliniques et de lutter contre les faux médicaments, par exemple en créant une base de données ouverte et universelle, accessible aux entreprises pharmaceutiques, aux régulateurs et aux usagers. Ainsi, la technologie *Blockchain* promet de très belles applications dans le domaine de la médecine. Elle pourra débiter une révolution du service médical, tournée vers le patient et la manière dont il peut prendre soin de lui et des autres. Même dans les situations les plus critiques, il restera possible, d'une part, de maîtriser la permission d'accès aux informations importantes relevant de notre identité, et d'autre part, de garantir un paiement futur en échange d'un traitement que nous souhaitons afin qu'il soit développé et mis sur le marché. En conséquence, au lieu de se reposer sur des grilles opaques d'évaluation stigmatisant les santés des plus faibles, les acteurs de l'assurance pourront se fier ou non à notre comportement médical pour passer un contrat d'avenir avec nous, et récompenser les comportements vertueux. Pour l'instant, la *Blockchain* n'a pas vraiment pour mission de stocker les données mais plutôt d'en garder une trace sécurisée en un espace de stockage limité par transaction. La donnée est donc toujours stockée dans une base de données « classique ». De même, la *Blockchain* n'est pas facilement maniable en temps réel. Son intérêt se situe plus dans l'audit rétrospectif. Cette technologie ne permet pas encore une grande fluidification des échanges de données ou la maniabilité d'un DMP. Mais cela pourrait changer dans les années à venir, en fonction de l'évolution des NTIC.

De plus, la *Blockchain* peut toucher n'importe quels autres domaines d'activité. C'est le cas des *smart contracts*<sup>36</sup>, des paiements automatisés et des registres publics de transactions qui promettent de disrupter la gestion des sinistres et la traçabilité des biens. Ces *smart contracts* combinés à l'Internet des objets (IoT) constituent

---

36. En français, « contrats intelligents », sont des programmes autonomes qui exécutent automatiquement les conditions et termes d'un contrat, sans nécessiter d'intervention humaine une fois démarrés.

des programmes qui vérifient si le produit a bien été envoyé par le fournisseur. Cela a pour conséquence une sensible diminution des coûts de structure, une expérience client réinventée, voire de tout nouveaux *business models* à mettre en application. Ainsi, la technologie *Blockchain* va permettre de répondre aux enjeux majeurs de l'IoT, à savoir les coûts de transactions et de connexion (comme les paiements, les messages, les échanges de données, etc.).

En effet, d'après IBM, dans un souci d'efficacité et de déploiement au niveau mondial, le réseau de l'IoT doit être réfléchi dès le commencement comme un espace décentralisé et de façon à ce que les transactions et les échanges soient effectués de manière sécurisés, anonymes et sans tiers de confiance. Enfin, la *Blockchain* trouve également de nombreuses autres applications telles que (Vauplane *et al.*, 2015) :

- le stockage décentralisé (par exemple BitHealth et Storj) ;
- la preuve de l'existence (avec les start-up comme MyPowers, Assembly ou BlockCDN) ;
- le vote électronique.

Dans ces conditions, la chaîne économique de valeur est bousculée et les acteurs redistribués. Cela se traduit par l'émergence des DAO (*Decentralized Autonomous Organizations*) que l'on peut définir comme étant des organisations fonctionnant grâce à un programme informatique qui apporte des règles de gouvernance transparentes, immuables à une communauté, et sans autorité centrale. Les décisions sont collectives et les bénéfices sont redistribués entre les acteurs (Zouarhi, 2018).

Cependant, la *Blockchain*, considérée comme un protocole décentralisé, transparent, désintermédié, sécurisé, infalsifiable, fiable, et autonome, est-elle une nouvelle technologie crédible ou une simple illusion à la mode ? Et dans quelle proportion touchera-t-elle le domaine des mutuelles, de l'assurance et des institutions de prévoyance ? Quel pourrait être le modèle de gouvernance associé à ce processus ? La plupart des autorités françaises et européenne sont attentives à ce phénomène afin de penser et de dessiner les prochains contours d'une régulation. Comment motiver ou inciter les transactions et le partage de données afin d'alimenter le processus de recherche scientifique et/ou clinique ?

Quelles « mesures » et quelle « valorisation » ? Par rapport aux aspects sécuritaires, technologiques et éthiques, peut-on mettre des données sensibles dans la *Blockchain* ? Quels seront le cadre juridique et les barrières réglementaires à venir ? Qui décide au sein de la *Blockchain* ? Les développeurs ? Les mineurs ? Comment se prennent les décisions ? Par vote ? Par adoption ? Quels recours en cas de litige ?

Quelle sera la couverture fonctionnelle de cette nouvelle chaîne de valeur (voir Faisabilité) ? Quels pourraient être les modèles et les apports de la *Blockchain* pour la gestion du consentement de la personne et la protection de ses données ? L'usage de la *Blockchain* ne pourrait-elle pas amener à une réflexion plus globale sur la valorisation économique et sociétale de telles transactions, avec une nouvelle monnaie « complémentaire » en fonction du domaine d'application comme la santé, l'assurance ou la finance ?

Autant de questions que nous nous posons aujourd'hui et dont il faudra bien apporter des réponses dans un proche avenir afin de pouvoir exploiter pleinement tout le potentiel qu'une telle technologie renferme.

### 1.3.5. Les NBIC

Les nanotechnologies, biotechnologies, informatique et sciences cognitives (NBIC) sont en train de remettre en cause la médecine traditionnelle d'au moins trois manières différentes (Alexandre, 2016) :

- les diagnostics et les actes robotisés vont transférer la valeur économique et médicale vers les écosystèmes digitaux ;

- la « datafication » favorise l'échange des données à coût nul, à l'instar du passage du DVD vers le MP3. Cette mobilité peut être effectuée par les acteurs transcendant les zones géographiques traditionnelles (tourisme de santé, demain diagnostics réalisés sur un autre continent) ;

- le développement de plateformes de mise en relation des acteurs du marché (offre et demande) apporte le contrôle de la valeur ajoutée à ces nouveaux intermédiaires et non plus uniquement aux producteurs des biens. On peut noter que le quasi-monopole de l'accès aux clients et la sélection des offreurs ont pour conséquence de permettre à des plateformes *pure players* de capter la valeur produite et de décider de la survie des producteurs devenus fournisseurs mis en concurrence mondiale.

Les applications qui émanent des NTIC sont multiples comme les neurosciences computationnelles (susceptibles de construire de nouveaux modèles biologiques dans l'analyse du cerveau), la biologie synthétique (pouvant synthétiser intégralement l'ADN d'une bactérie), la bio-ingénierie (permettant l'élaboration de transistors biologiques), la bionique (capable d'implémenter un système électronique). On peut donner l'exemple de la détection d'altérations chromosomiques récurrentes (telle que la perte ou l'amplification de régions entières) qui peut survenir dans le génome d'un patient. De telles altérations sont connues pour être associées à des pathologies comme le cancer. Leur détection et leur localisation représentent donc un enjeu thérapeutique majeur, qui s'apparente à un problème de détection de ruptures et qui pose des problèmes

mathématiques en termes de modélisation statistique, de complexité algorithmique ou de sélection de modèle. Une fois cette détection réalisée pour chaque malade, on s'intéresse naturellement à la recherche d'altérations particulièrement fréquentes (ou «*recurrentes*») dans des cohortes de patients atteints d'une même pathologie. Sous un modèle simple mais raisonnable, la détection d'une telle région peut se reformuler en termes d'excursion d'un certain processus stochastique. De nouveau, selon la dimension des données, des modèles statistiques divers doivent être considérés, menant chacun à des problèmes de probabilité différents. On constate qu'à court terme, les nanotechnologies pourraient favoriser la fabrication de nanomédicaments optimaux pour soigner de façon ciblée et personnalisée certains types de cancers, en employant par exemple l'échauffement de zones ciblées, ou en s'accrochant chimiquement aux cellules cancéreuses entraînant ainsi leur suicide cellulaire (voir Apoptose ciblée), ou en leur injectant un anticancéreux. On peut imaginer qu'à plus long terme, les nanotechnologies seraient capables de construire des nanorobots qui auront pour vocation de nous autoréparer ou d'introduire des artefacts dans notre cerveau pour nous interconnecter avec des interfaces robotiques et informatiques, à même de remplacer ou d'optimiser nos organes défaillants et non efficaces. Ces nanorobots circuleront dans notre système sanguin afin d'identifier et diagnostiquer des pathologies, des dysfonctionnements, et de réparer les problèmes physiologiques, voire éliminer les cellules cancéreuses et les agents pathogènes.

Dès lors, le séquençage et la lecture de l'ADN représente un des moteurs de l'émergence des NTIC. Cette pratique s'est complètement démocratisée avec les années. On constate que depuis le premier séquençage complet du génome humain en 2003, le prix du séquençage d'un génome humain a été divisé par 3 millions en passant de 3 milliards de dollars en 2003 à un millier de dollars aujourd'hui<sup>37</sup>. On estime que l'étude génomique d'une seule tumeur exige le traitement d'environ 20 000 milliards d'informations. Ces dernières années ont été le théâtre des premières manipulations génétiques d'embryons humains avec les progrès considérables des technologies d'édition du génome. Ainsi, une équipe chinoise a publié des modifications génétiques sur 86 embryons humains. L'objectif de cette étude est de corriger une mutation responsable d'une maladie du sang, la bêta-thalassémie. Parallèlement, de l'autre côté de la planète, une équipe américaine de Harvard publiait la manipulation réussie de 62 gènes sur des cellules de cochons afin de permettre la transplantation de leurs organes chez l'homme. Avec le développement constant de ces technologies autour de la transcription, le codage et la compréhension de l'ADN, il est fort probable que la manipulation du génome humain sera totalement opérationnelle avant 2025.

Par ailleurs, au-delà d'un transfert de pouvoir du médecin vers la technologie (machines, robots, systèmes experts auto-apprenants, etc.), le grand défi des NBIC se

---

37. Disponible à l'adresse : [www.genome.gov/10001772/all-about-the-human-genome-project-hgp/](http://www.genome.gov/10001772/all-about-the-human-genome-project-hgp/).

situé dans l'usage prévisible de toutes les éventualités nouvelles de transformation de l'homme, entraînant inévitablement d'importantes inégalités entre les différentes populations dans le monde. Un tel phénomène sera rendu possible notamment à cause des techniques scientifiques d'eugénisme bientôt opérationnelles (séquençage intégral de l'ADN des fœtus, sélection puis transformation génétique des embryons, augmentation des capacités cognitives *via* injection de cellules souches dans le cerveau, etc.). Ces dernières décennies, des recherches en biotechnologie ont entre autres permis de reconstituer des cellules souches pluripotentes<sup>38</sup> à partir des cellules classiques d'un adulte. Dans ces conditions, il serait envisageable de se dire que nous serions capables, un jour ou l'autre, de pouvoir régénérer tous nos organes.

En ce qui concerne les sciences cognitives, de nombreuses études sur le cerveau comme les causes d'apparition probable de certaines maladies dues à l'accumulation de protéines mal repliées dans les neurones par voie médicamenteuse, ou par des traitements fondés sur des thérapies cellulaires, ou même par des thérapies géniques sur des gènes prédisposant à leur survenue. Ces recherches pourraient permettre, à moyen terme, de vaincre les maladies neurodégénératives. Enfin, à plus long terme, le développement concomitant des recherches de l'informatique et du cerveau pourrait tendre vers la réalisation et la structuration d'un cerveau artificiel avec l'émergence d'une conscience et le « téléchargement » d'une personne au sein de ce dernier. À titre d'exemple, on peut citer le projet européen *Human Brain Project*<sup>39</sup> – coutant environ un milliard d'euros – qui a pour objectif de simuler l'intégralité d'un cerveau de souris puis d'un être humain sur un ordinateur.

À la lumière de ces analyses, on observe que ces NTIC risquent donc de transformer sensiblement le programme même de l'humanité. Il est fort à parier que ces techniques d'eugénisme ne se feront pas de la même manière partout et pour chaque individu. Cela va forcément créer une fracture entre les populations, en raison principalement du coût élevé de ces techniques.

Google est l'une des sociétés la plus en pointe et un des principaux architectes de cette révolution NBIC. Il soutient activement le transhumanisme, notamment en parrainant la Singularity University, qui forme les experts des NBIC (Alexandre, 2016). Dès lors, Google a pour ambition de pouvoir domestiquer les *Big Data* afin de lutter de manière personnalisée contre la maladie. C'est pourquoi ils ont annoncé dès 2013 le lancement de Calico – filiale d'Alphabet – dont la mission est d'allonger significativement voire définitivement la durée de vie humaine (« tuer la mort »). Un tel objectif nécessite de modifier notre nature par des interventions technologiques

---

38. Les cellules souches pluripotentes sont des cellules qui peuvent se différencier en n'importe quel type de cellules de l'organisme, sans restriction.

39. Disponible à l'adresse : [www.humanbrainproject.eu/](http://www.humanbrainproject.eu/).

importantes en employant tout le potentiel des NBIC. On peut remarquer que Google n'est pas à son premier coup d'essai dans le secteur de la biologie. Il possède également une filiale spécialisée dans le séquençage du génome avec 23andMe qui comporte entre autres un brevet « eugéniste » sur la sélection génétique des embryons afin de produire des « bébés à la carte ». Dès lors, les dirigeants de Google militent pour une adoption intégrale des NBIC, disposant d'une place centrale au cœur de l'économie mondiale, pour transformer l'humanité.

### 1.3.6. L'intelligence artificielle (IA)

L'idée d'élaborer des machines autonomes remonte vraisemblablement à l'Antiquité grecque avec les automates construits par Héphaïstos, relatée notamment dans l'Iliade (Marcinkowski et Wilgaux, 2004). Ces automates étaient mécaniques, comme le canard de Vaucanson pensé par Jacques de Vaucanson en 1738 et exposé au palais royal en 1744 qui représenta indéniablement un des premiers robots (Colloc, 2018).

C'est en 1956 que John McCarthy, informaticien et père nominal de l'IA, a employé pour la première fois le terme IA lors d'une conférence à Dartmouth College.

Pour Brian Krzanich, président directeur général d'Intel (premier fabricant mondial de microprocesseurs), l'IA n'est pas seulement le prochain raz-de-marée de l'informatique mais c'est également le prochain virage majeur dans l'histoire de l'humanité. L'IA ne représente pas un programme informatique classique : elle s'éduque plus qu'elle ne se programme. Elle s'inscrit dans un champ très large et varié des technologies qui s'appuient sur des fonctionnalités autonomes et cognitives.

Force est de constater que le procès intenté à l'IA a mêlé fantasmes, science-fiction, et futurologie à long terme, en oubliant même les définitions de base de cette dernière.

Le concept de l'IA<sup>40</sup> est d'élaborer des programmes informatiques capables d'effectuer des tâches accomplies par des humains demandant un apprentissage, une organisation de la mémoire et un raisonnement. L'objectif est de donner des notions de rationalité, des fonctions de raisonnement et de perception (par exemple, visuelle) pour commander un robot dans un milieu qui lui est inconnu. Son engouement est associé à de nouvelles techniques comme le *deep learning* qui donne la possibilité à un programme d'apprendre à représenter le monde grâce à un réseau de neurones virtuels qui réalisent chacun des calculs élémentaires, de manière similaire à notre

---

40. La norme ISO 2382-28 : 1995 définit l'intelligence artificielle comme la « capacité d'une unité fonctionnelle à exécuter des fonctions généralement associées à l'intelligence humaine, telles que le raisonnement et l'apprentissage ».

cerveau. La machine est programmée pour « apprendre à apprendre ». Grâce à des boucles de rétroactions algorithmiques, la machine peut modifier ses paramètres internes employés pour gérer la représentation de chaque strate à partir de la représentation de la strate précédente. Ces strates de fonctionnalités sont apprises par la machine elle-même et non par l'homme. À partir de ce postulat, on peut dire que la machine devient autonome et intelligente, en construisant ses propres structures de « computérisation » et en s'appuyant sur des décisions axiomatiques.

À l'instar du fonctionnement humain qui analyse une situation avant de changer son comportement, l'IA permet à la machine d'apprendre de ses propres résultats pour modifier sa programmation. Cette NTIC existe déjà dans de multiples applications comme sur nos smartphones, elle devrait prochainement s'étendre à tous les secteurs de la vie quotidienne : de la médecine à la voiture autonome, en passant par la création artistique, la grande distribution ou la lutte contre la criminalité et le terrorisme. Le *machine learning* n'offre pas uniquement l'opportunité d'exploiter automatiquement de grandes quantités de données et d'identifier des habitudes dans le comportement des consommateurs. Désormais, nous pouvons également actionner ces données. À notre sens, adopter le *machine learning* n'est plus seulement une utilité mais plutôt une nécessité. Ainsi, à l'aune de la transition numérique et cette « guerre des intelligences » (Alexandre, 2017), les entreprises vont être la cible d'une importante transformation et investir dans des applications de l'IA afin de pouvoir en particulier :

- augmenter l'expertise humaine *via* les programmes d'assistance virtuels ;
- optimiser certains produits et services ;
- apporter de nouvelles perspectives dans la R&D *via* l'évolution des systèmes auto-apprenants.

Par ailleurs, le *deep learning* n'est pas un algorithme nouveau. Cela fait plus de vingt années qu'il est utilisé pour différentes actions sous la forme de réseaux de neurones, en particulier pour faire de l'« apprentissage ». Un neurone représente une fonction simple qui prend différentes entrées et calcule son résultat qu'elle envoie à différentes sorties. Ces neurones sont principalement structurés et organisés en couches. La première couche emploie des données quasi brutes et la dernière va générer un résultat. Plus le nombre de couches est important et plus la capacité d'apprentissage et de performance sera accrue. On peut prendre l'exemple de la reconnaissance de caractères à partir de l'écriture manuscrite. La première couche va prendre en compte la totalité des pixels constituant un caractère écrit, par exemple, une lettre ou un chiffre, et chaque neurone aura quelques pixels à analyser. La dernière couche indiquera « c'est un T avec une probabilité de 0.8 » ou « c'est un I avec une probabilité de 0.3 ». On effectue une opération de rétropropagation à partir du résultat final pour remodifier les paramètres de chaque neurone. On peut illustrer cela par l'exemple d'un enfant qui

apprend l'alphabet : au début, il fait des erreurs de reconnaissance, on lui annonce le résultat, puis il recommence. Les paramètres ajustables correspondent à l'ensemble des poids des moyennes pondérées réalisées par chaque neurone. L'objectif de l'apprentissage est donc d'identifier des valeurs de ces poids qui apporteront de bonnes réponses sur des exemples d'apprentissage – et d'envisager que ces mêmes valeurs seront opérantes en phase test. Cela est rendu possible par de petits ajustements successifs des paramètres ajustables dans un sens qui réduit le taux d'erreur (voir rétropropagation) (Bouzeghoub et Mosseri, 2017).

Une fois entraîné, le réseau de neurones va avoir une action et une influence sur un nouveau jeu de données et générer des résultats qui sont associés à la qualité de son apprentissage. Ce réseau de neurones peut modéliser une correspondance complexe par l'empilement d'opérations à la fois simples, précises, concrètes, et ajustables. À la différence d'un réseau de neurones, l'algorithme apprend, mais on n'a pas une vision précise du comment et de ce qu'il apprend véritablement.

L'IA se fonde sur trois piliers majeurs, à savoir la diversité, la qualité et le volume des bases de données disponibles, la puissance de calcul des machines, et la qualité du savoir et des compétences des acteurs qui l'utilise. On peut observer que cette NTIC porte principalement sur trois objets : l'IA forte (visant à remplacer, à terme, l'intelligence humaine par des objets de sensibilité équivalente), l'IA distribuée (contribuant à développer des systèmes intelligents qui s'adaptent à un écosystème ou environnement concret et dynamique), et l'IA faible (représentant une aide à l'analyse de prévisions, à la décision et à l'action).

En outre, on ne peut pas considérer l'IA comme un produit. Il n'existe pas de logiciel d'IA, mais des « solutions logicielles » d'IA qui se reposent sur diverses et multiples briques, qui vont de la captation des sens à l'interprétation des informations, à l'étude du langage et au traitement de bases de données structurées ou non comme (voir la figure I.3) :

– systèmes symbiotiques (systèmes experts) : diagnostic médical, conduite de processus industriels, prospection pétrolière, etc. ;

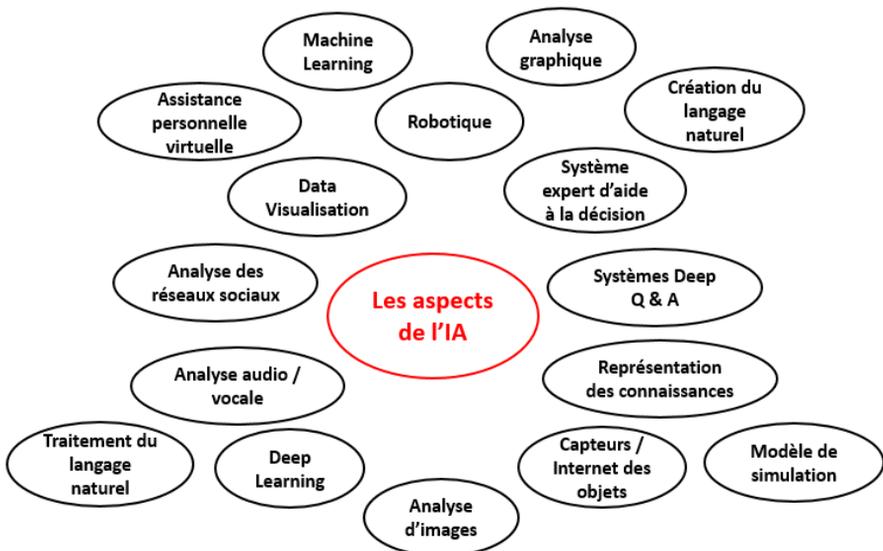
– systèmes apprenants (*machine learning*, apprentissage statistique, *deep learning*) : trading algorithmique, marketing (préconisation, segmentation client, *Pricing*), analytique (aide à la prise de décision), industrie (maintenance prédictive), compréhension du langage personnel (*Chatbots*<sup>41</sup>, assistants personnels, traduction automatique), analyse de l'image, robotique.

---

41. Les *Chatbots* ou agents conversationnels correspondent à des robots logiciels dotés d'IA pouvant dialoguer avec un être humain en langage naturel ou à l'écrit par chat. On peut les

On peut citer l'exemple de l'apprentissage de modèles virtuels de la structure cérébrale humaine à partir de données de neuro-imagerie. Ces outils numériques et statistiques permettent d'apprendre des configurations typiques de l'anatomie cérébrale à partir d'images IRM d'un ensemble d'individus. Ces modèles virtuels sont composés de maillages linéiques ou surfaciques des principales structures cérébrales de l'homme. Les variations typiques de ces configurations à l'intérieur d'un groupe de personnes permettent de mieux comprendre le substrat anatomique de pathologies neurologiques. Par conséquent, cette personnalisation de ces modèles à de nouvelles données apporte au clinicien un dispositif de diagnostic assisté par ordinateur et un outil d'aide au suivi des malades.

En outre, on peut donner l'exemple du secteur de la génétique dont les applications se multiplient comme le plan Médecine France génomique 2025 qui comprend la mise en place d'un réseau de 12 plateformes de séquençage qui permettra le développement de solutions de séquençage à très haut débit pour des projets de recherche. Les données issues des échantillons biologiques prélevés seront transformées en données génomiques et en outils de diagnostic notamment pour les maladies rares.



**Figure I.3.** Aspects multidimensionnels de l'intelligence artificielle (IA)

désigner comme étant des assistants intellectuels proactifs qui répondent à des questions standardisées. Ils constituent des systèmes capables de percevoir, décider, agir et apprendre, et dotés d'une indépendance. On les retrouve en particulier dans le marketing relationnel (centres d'assistance) du fait qu'ils apportent des conseils et des renseignements aux clients (*e-Helpdesk*).

Par ailleurs, le développement de l'intelligence artificielle (IA) peut se décrire selon trois vagues successives :

- **première vague** : systèmes experts perception, apprentissage, abstraction, raisonnement ;
- **deuxième vague** : apprentissage statistique perception, apprentissage, abstraction, raisonnement apprendre sans comprendre ;
- **troisième vague** : adaptation contextuelle, sens commun perception, apprentissage, abstraction, raisonnement Graal produisant des explications.

D'après une étude du cabinet Tractica<sup>42</sup>, le marché des systèmes d'IA va connaître une importante augmentation pour les entreprises, en passant de 202,5 millions de dollars en 2015 à 11,1 milliards de dollars en 2024. D'autres sources comme Markets and Markets 2017 estiment une croissance de près de 63 % par an entre 2016 et 2022 avec un marché avoisinant les 16,06 milliards de dollars en 2022 notamment par l'importance des transactions américaines. Les principaux domaines impliqués par cette croissance sont les médias et la publicité, la production industrielle, la finance, la distribution et l'énergie, puis la santé.

En effet, si nous prenons le cas de la publicité, les technologies programmatiques ont totalement révolutionné ce secteur par la manière dont les publicités sont achetées et ciblées en ligne. L'exploitation des *Big Data* ont permis non seulement d'automatiser une grande partie d'un travail fastidieux mais également prendre des décisions stratégiques plus pertinentes et réalistes en termes d'opportunités pour les marques de produits et/ou de services. Selon une étude de Boston Consulting Group (BCG)<sup>43</sup>, l'usage des techniques *Big Data* ont permis d'optimiser la performance des campagnes de publicité de plus de 30 % à 50 %.

D'après une étude de Gartner, on estime que d'ici 2020, les agents intelligents (*smart agents*) seront impliqués dans 40 % des transactions commerciales. L'IA va donc contribuer au passage vers une ère post-applications dans laquelle des agents intelligents et autonomes – activés par des algorithmes et pilotés par les géants du numérique – vont émerger. Ainsi, demain, les robots, les drones, les objets et les véhicules reposeront sur des traitements algorithmiques. Ces agents vont progressivement devenir de plus en plus intelligents au point d'être capables d'engendrer à leur tour de nouveaux agents. Dans ces conditions, le scientifique et

---

42. Disponible à l'adresse : [www.tractica.com/newsroom/press-releases/artificial-intelligence-technologies-are-quietly-penetrating-a-wide-range-of-enterprise-applications/](http://www.tractica.com/newsroom/press-releases/artificial-intelligence-technologies-are-quietly-penetrating-a-wide-range-of-enterprise-applications/).

43. Disponible à l'adresse : [www.thinkwithgoogle.com/marketing-resources/programmatic/value-of-an-integrated-plat-form-for-programmatic-buying/](http://www.thinkwithgoogle.com/marketing-resources/programmatic/value-of-an-integrated-plat-form-for-programmatic-buying/).

prospectiviste Joel de Rosnay (2017) prédit que dans cinq siècles, les hommes communiqueront avec les animaux, les insectes et les plantes dans leur langage grâce à l'IA. L'être humain pourra comprendre le langage animal et végétal *via* l'IA. Une nouvelle espèce apparaîtra, à savoir les biorobots, qui collaboreront avec les hommes.

Ainsi, il est fort à parier que la transition vers ces nouvelles innovations technologiques sera quelque peu disruptive en raison notamment d'une absence de modèles et cadres sociaux adaptés à un monde qui sera totalement modifié. L'automatisation du travail dispose d'un processus plus rapide que celui de la formation, la réorientation et de la reconversion humaine. Cela contribue forcément à des répercussions et des conséquences négatives sur les emplois les moins bien payés en développant des inégalités économiques majeures. Cette transition devra obligatoirement s'accompagner d'une réforme du système professionnel et de l'éducation afin de garantir une continuité et une articulation entre le niveau de qualification des travailleurs et le champ d'action de l'IA. Une collaboration homme-machine va s'instaurer, au sein de laquelle les forces de l'un contrebalanceront les limites de l'autre pour tendre vers une intelligence augmentée.

### **1.3.7. L'informatique quantique**

Depuis 1965, la loi de Moore est parfaitement suivie par l'industrie informatique et a orienté ses plans de développement. C'est un principe simple qui a été mis en application depuis plus de cinquante ans : tous les deux ans, la puissance de calcul des puces électroniques double. Bien que promise à une fin programmée à court terme, notamment à cause de l'atteinte d'une limite physique en termes de miniaturisation des processeurs (rapport taille de gravure en microns et dissipation thermique), cette loi a illustré le développement des importantes puissances de calcul disponibles aujourd'hui. Est-ce la fin proche de l'accroissement de la puissance ? Au regard des nouvelles avancées, en particulier des systèmes quantiques, il semble que non.

En effet, certains scientifiques se sont naturellement orientés et concentrés sur la mécanique quantique, en considérant que l'ordinateur quantique s'inscrit comme l'évolution future de l'ordinateur classique comme on le connaît actuellement. Un ordinateur quantique ne s'appuie pas sur l'électricité pour diffuser ses informations en interne, mais sur les propriétés quantiques des particules de matière. Il est la combinaison et le point de convergence de deux grands domaines scientifiques, l'informatique et la mécanique quantique. La puissance de calculs d'un tel ordinateur est impressionnante et considérable. Pour la même série de calculs, on estime que le temps nécessaire pour le réaliser passe de 10 000 ans pour un

ordinateur classique à 1 seconde pour un ordinateur quantique. Actuellement, nos ordinateurs utilisent des bits qui comportent deux états qui sont soit 0, soit 1. À moyen terme, l'ordinateur quantique emploiera des bits quantiques, c'est-à-dire des *qubits* (plusieurs centaines de bits quantiques). Ces *qubits* posséderont l'état 0, l'état 1 mais également, et c'est ce qui les rendent très intéressants, les deux états à la fois, soient 0 et 1. En effet, c'est sur ce principe de superposition, qui est qu'un *Qubits* possède les deux états 0 et 1, que repose l'ordinateur quantique. On remarque que la propriété de l'information quantique va à l'encontre de toutes les règles et lois de la physique classique (reposant notamment sur la mécanique newtonienne, la théorie du champ électromagnétique de Maxwell et Lorentz, et la thermodynamique de Clausius, Maxwell et Boltzmann).

En effet, Claude Shannon – le père fondateur de la théorie de l'information au travers son article intitulé *A Mathematical Theory of Communication* publié en 1948 – avait énoncé les principes selon lesquels fonctionne un ordinateur classique. Pour l'auteur, l'information représente une entité qui a une existence physique réelle, au même titre que l'énergie ou la masse. Certaines lois fondamentales de la Nature telles que la deuxième loi de la thermodynamique (ou principe de Carnot), sont en réalité des lois de l'information. Ces lois régissent la matière et l'énergie, elles établissent les règles selon lesquelles les atomes interagissent et les étoiles se comportent, elles s'appliquent même à nous en tant qu'êtres vivants parce que nos gènes comportent des informations que nos corps reproduisent, et en tant qu'êtres humains dans la mesure où notre cerveau contient des informations qui sont produites par notre conscience. Notons que la transformation de Fourier a été l'élément central qui a permis à Claude Shannon d'identifier le passage du monde analogique vers le monde digital. En indiquant précisément l'influence de l'étape de numérisation d'un signal sur son spectre en fréquence, le scientifique a ouvert le chemin vers la réalisation d'un échantillonnage du signal sans perte d'information (Bouzeghoub et Mosseri, 2017).

Cependant, l'information peut se déplacer plus vite que la lumière. Comme nous le verrons lors d'un chapitre ultérieur, la Nature s'exprime à travers le langage de l'information. Or un ordinateur quantique ne procède pas à un calcul entre deux options, il calcule toutes les options en même temps. Pour cela, il faut savoir concilier la physique quantique, le déterminisme et la causalité. En d'autres termes, établir une théorie du tout !

Ainsi, l'univers microscopique de la mécanique quantique, c'est-à-dire celui des atomes, fonctionne de manière très différente que l'univers macroscopique régit par la physique classique. Par exemple, les électrons ont la capacité de passer d'un état à un autre (onde ou particule ou bien les deux à la fois), d'une orbite élevée à une

orbite basse sans que rien ne les y oblige et sans aller par un état ou une orbite intermédiaire. Finalement, les électrons sont partout en même temps et de manière simultanée. De plus, certains physiciens émettent même l'hypothèse qu'un observateur peut influencer aujourd'hui le comportement d'un électron ou d'un photon hier. L'observateur et la réalité dépendent ontologiquement l'un de l'autre. La réalité n'existe donc pas sans l'observation. À cela, il faut rajouter la nature structurellement indéterminée du monde quantique. Une idée qu'Albert Einstein avait du mal à admettre en affirmant que « Dieu ne joue pas aux dés ». Cela signifierait qu'il existe non seulement divers futurs possibles mais également divers passés possibles. De nombreuses recherches ont démontré que le fait de décider consciemment d'observer le microcosme modifie la réalité de ce dernier.

À partir de ces observations et postulats, on peut appliquer ce principe dans le cas de l'informatique quantique. Dans ce cas, l'état d'un registre de  $2$  *qubits* pourra alors être  $0$ ,  $1$ ,  $2$  ou  $3$ , mais aussi une superposition d'une partie quelconque de ces quatre états de base, voire même les quatre à la fois. Dès lors, l'état d'un registre de  $n$  *qubits* pourra être une superposition d'un ensemble quelconque des  $2^n$  valeurs possibles sur  $n$  bits ( $n$  est un entier), y compris une superposition de toutes ces valeurs à la fois (voir Parallélisme, c'est-à-dire effectuer en parallèle un grand nombre d'opérations), alors qu'un registre de  $n$  bits classiques ne peut contenir, à chaque instant, qu'une seule de ces valeurs.

Par conséquent, toute opération réalisée lors d'un calcul quantique pourra agir simultanément sur  $2^n$  valeurs différentes. Ainsi, si une fonction peut être calculée avec  $2^n$  arguments différents, on calculera toutes ses valeurs simultanément. Le fait que ces calculs sont réversibles et déterministes explique pourquoi les développeurs ne peuvent pas affecter la valeur d'une variable quantique à une autre, ni utiliser cette valeur plusieurs fois. Cette situation impose donc d'inventer un nouvel algorithme et des langages de programmation respectant les lois de la physique quantique. Deux algorithmes majeurs sont généralement utilisés dans l'informatique quantique :

- **l'algorithme de Shor** : permet la factorisation des nombres entiers par deux nombres premiers. Grâce à cet algorithme, un ordinateur quantique peut factoriser un nombre de 300 chiffres en 10 secondes contre 30 000 ans pour un ordinateur classique ;

- **l'algorithme de Grover** : traite des problèmes de comparaison. Cet algorithme permet de trouver la bonne réponse en effectuant un nombre de comparaisons égal à la racine carrée de la taille de la base de données, c'est à dire seulement 1 000 comparaisons.

Le principal avantage de cet ordinateur se situe donc au niveau de sa puissance de traitement et donc de son gain de temps. Au niveau sécuritaire, il offre en cryptographie optimale. En effet, les messages codés avec un tel ordinateur sont sûrs à 100 %. Son usage, afin de sécuriser les communications militaires d'une armée en opération, est d'un intérêt évident pour un gouvernement. De plus, pour des applications comme la voiture sans conducteur, le calcul quantique adiabatique deviendra primordial car il sera amené à jouer pleinement son rôle d'« oracle quantique » en anticipant toutes les situations possibles pour le véhicule.

Il faut noter qu'il y a de grandes probabilités que les ordinateurs ne soient pas exclusivement quantiques. En effet, un processeur quantique nécessite d'être contrôlé électroniquement. Or la manière la plus simple d'y arriver est probablement d'employer un processeur classique.

Par ailleurs, le chemin pour concevoir un ordinateur quantique totalement opérationnel est encore long et semé de nombreux obstacles et de difficultés à franchir.

On constate un problème de la lecture de l'information quantique mais également la fabrication physique de l'ordinateur en tant que tel. En effet, nous savons que la mécanique quantique est indéterministe. La problématique que se pose actuellement les chercheurs et les scientifiques est de se dire que si un ordinateur quantique travaille sur toutes les données possibles au même moment, comment récupère-t-on les résultats ? En d'autres termes, nous ne connaissons pas l'état des atomes. Par exemple, si on réalise un calcul, on ne connaît pas le résultat, et la lecture de ce résultat détruit l'information. Plus explicitement, si nous établissons un calcul compliqué, nous ne pourrions connaître que son résultat final. Les résultats intermédiaires seront inaccessibles sous peine de détruire l'information et ainsi d'arrêter les calculs. En effet, lorsque l'on observe un *qubit*, ce dernier prend une valeur fixe parmi toutes celles qui lui sont possibles, dans ces conditions, tous les autres états superposés sont supprimés. L'état qui sera rendu à l'observation provient complètement du hasard. Toute la difficulté est là ! Par conséquent, la seule manière d'écrire un algorithme quantique efficace est de s'arranger pour que le résultat qu'on recherche soit celui qui sera le plus probablement rendu. Une telle condition ne peut se réaliser que si un maximum d'états superposés porte ce résultat. En conclusion, un ordinateur quantique apporte donc moins d'informations qu'un ordinateur classique en autant d'opérations mais peut analyser exponentiellement plus de données à chaque opération.

Un deuxième problème majeur qui revient souvent porte sur l'élaboration physique d'un ordinateur quantique. Différentes pistes sont actuellement à l'étude

pour savoir s'il vaut mieux que les *qubits* soient structurés à partir de photons (la lumière), de molécules ou d'atomes. Il semble que la méthode centrée autour de l'état quantique des molécules et des atomes soit la plus encourageante, même s'il faut régulièrement remplacer l'azote liquide et l'hélium pour garantir la supraconductivité du fait d'une évaporation de ces derniers.

En définitive, il faut bien admettre que l'informatique quantique n'est pas simple à comprendre du fait que la mécanique quantique, qui gouverne le mouvement des corps dans les domaines atomiques, moléculaires et corpusculaires, constitue une théorie dont la logique est totalement contraire à l'intuition. Il faut donc avoir recours aux mathématiques pour bien la saisir. L'ordinateur quantique est-il l'avenir de l'ordinateur ? Sera-t-il ou non une véritable révolution technique aboutissant à la cinquième révolution industrielle ? Quel est l'avenir d'un tel ordinateur ? Sera-t-il la fin de l'architecture actuelle de sécurité de l'Internet ? En effet, il est fort probable que cette machine quantique aille définitivement « casser » les algorithmes de chiffrement asymétrique RSA<sup>44</sup>, omniprésents dans le Web. Quelles en seront les répercussions sociales et économiques pour nos sociétés de demain ? De nombreuses questions que nous sommes en droit de nous poser afin de préparer l'avenir...

---

44. Le chiffrement asymétrique RSA repose sur le fait qu'il est très compliqué de factoriser les grands nombres en nombres premiers. La difficulté de calcul augmente de façon presque exponentielle avec la taille du nombre (« sous-exponentielle » selon les mathématiciens).