



Briques Technologies

S. GAMOURA & J.P. BOOTZ



Sommaire

- 1. Définitions**
- 2. Lien avec le sujet / questions clés pour ses
avenirs**
- 3. Rétrospective**
- 4. Dynamiques en cours**
- 5. Exploration prospective**
- 6. Références**





1. Définitions

La macro-variable « Technologies » se centre essentiellement sur les technologies liées à l'industrie 4.0: IA, Data Analytics & Big Data, Blockchain, IoT. Elle prend aussi en compte à la marge des technologies liées à l'énergie et aux matériaux (notamment à l'émergence du bioplastique).

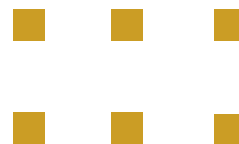
Intelligence Artificielle (IA) : procédé logique et automatisé reposant généralement sur un algorithme et en mesure de réaliser des tâches bien définies (CNIL 2022). Elle représente tout outil utilisé par une machine afin de reproduire des comportements liés aux humains, tels que le raisonnement, la planification et la créativité (Parlement Européen 2023).

Data Analytics & Big Data : est un terme large qui englobe de nombreuses techniques permettant d'obtenir des découvertes à partir de données historiques. Aujourd'hui, le terme est le plus souvent utilisé pour décrire l'analyse de grands volumes de données et/ou de données à haute vitesse, ce qui présente des défis computationnels et de gestion des données. Il existe quatre types d'approches analytiques de données : descriptives, diagnostiques, prédictives et prescriptives (IFAC 2018). Les big data sont des actifs d'information à grand volume (1er V), grande vitesse (2ème V) et/ou grande variété (3ème V), qui exigent des formes innovantes et économiques de traitement de l'information permettant une meilleure compréhension, une prise de décision améliorée et une automatisation des processus (Gartner 2023). A ces trois « V », deux autres V ont été ajoutés par la suite Véracité et Valeur (Teboul et Thierry 2015).

Blockchain : Registre ou une grande base de données qui a la particularité d'être partagée simultanément avec tous ses utilisateurs, tous également détenteurs de ce registre, et qui ont également tous la capacité d'y inscrire des données, selon des règles spécifiques fixées par un protocole informatique bien sécurisé grâce à la cryptographie (Assemblée nationale 2018). Apparues il y a dix ans comme combinaisons de technologies plus anciennes formant le protocole sous-jacent au bitcoin, les blockchains permettent des échanges décentralisés et sécurisés, sans qu'il soit besoin d'un tiers de confiance (Villani et Longuet 2018).

Internet of Things : instruments (objets, gadgets, machines, living éléments, etc.) qui ont la capacité d'étendre le périmètre de connectivité par Internet et permettre ainsi de transmettre les informations de l'environnement. Ces instruments peuvent éventuellement être activés à distance (Sedkaoui 2018).

Mix énergétique : désigne la répartition des différentes sources d'énergie utilisées pour répondre aux besoins en énergie d'une région ou d'un pays. Il englobe l'ensemble des ressources énergétiques telles que les combustibles fossiles, les énergies renouvelables (solaire, éolien, hydraulique, biomasse) et l'énergie nucléaire, ainsi que leur part respective dans la production totale d'énergie. Le mix énergétique est un indicateur clé pour évaluer la diversification, la durabilité et la sécurité de l'approvisionnement énergétique d'un territoire.



Bioplastiques : Désigne les plastiques biodégradables, les plastiques issus de sources renouvelables, ou les deux. On retrouve ainsi des plastiques biosourcés issus majoritairement de sources renouvelables tels que le maïs, la canne à sucre, le soja, mais peuvent être composé pour parti de plastique pétrolier et ne pas être biodégradables. Les plastiques biodégradables, c'est-à-dire assimilables par les micro-organismes peuvent parfois être issus de la pétrochimie. Enfin, une troisième catégorie de plastiques qui sont à la fois biosourcés et biodégradables (par exemple le PLA : acide polylactique) ou les PHA (polyhydroxy-alcanoates). La définition française (Journal officiel du 22 décembre 2016), réserve le terme de « bioplastique » à ces matériaux à la fois biosourcés et biodégradables.

2. Lien avec le sujet / questions clés pour ses avènements

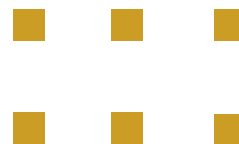
Des technologies au service de la circularité

La transition technologique et la transition vers l'économie circulaire sont deux phénomènes majeurs qui transforment profondément notre société d'une manière jumelée et avec la même intensité et pression sociale (Geoffron 2017). D'un côté, les technologies véhiculées par la transition numérique offrent de nouvelles opportunités pour la transition vers l'économie circulaire et peuvent donc avoir un impact positif dans son développement dans les sociétés (Benkarouba 2022). Elles permettent d'améliorer l'efficacité des processus de production et de consommation, de développer de nouveaux modèles et de diffuser des informations et des initiatives en faveur de l'économie circulaire (Geoffron 2017).

Les IoT peuvent jouer un rôle important dans l'usage des capteurs connectés pour la surveillance et l'optimisation des processus industriels en réduisant le gaspillage dans les chaînes de production, optimisant la qualité des matériaux et surveillant les niveaux d'inventaire (Delpa 2021). La blockchain peut aussi jouer sur la transparence des chaînes logistiques qui permettent d'assurer le cycle des produits en améliorant la traçabilité et la vérifiabilité des matériaux recyclés (Philipposian 2021).

Des technologies qui dans le même temps peuvent constituer un frein à la circularité

De l'autre côté, on ne peut faire abstraction de l'impact négatif de ces technologies sur la dynamique de l'économie circulaire dû principalement à l'augmentation exponentielle des capacités de calcul et de stockage des données. Cette « Pollution numérique » nécessite ainsi des mesures dites de « sobriété numérique » (Nicolai et Peragin 2022). Selon le modèle de la loi de Moore, le nombre de transistors sur une puce intégrée double tous les 18-24 mois induisant ainsi une extension fulgurante des



usages des algorithmes et des calculs très énergivores. Le web et les applications accessibles en continu contribue à l'émission de gaz à effet de serre.

Les technologies sont donc en train de jouer un rôle pivot dans le présent et l'avenir proche et lointain de la transition vers l'économie circulaire.

Liens entre innovations technologiques dans le domaine de l'énergie et l'EC :

L'innovation technologique dans le domaine de l'énergie joue un rôle crucial dans la transition vers une économie circulaire. Tout d'abord, les avancées dans les énergies renouvelables, telles que l'énergie solaire et éolienne, permettent de réduire la dépendance aux ressources non renouvelables, favorisant ainsi une économie circulaire basée sur des sources d'énergie durables. Les évolutions technologiques du nucléaire qui favorise la production peu carbonée est également à prendre en compte. Plus globalement les émissions de CO2 du mix électrique constituent un élément clé du passage vers l'économie circulaire notamment dans une perspective d'électrification des process industriels.

Lien bioplastiques et EC :

Lorsqu'ils sont à la fois « biosourcés » et « biodégradables » les bioplastiques permettent de limiter considérablement l'impact environnemental de ce matériau (préservation des écosystèmes naturels et des ressources fossiles) et sont ainsi en adéquation avec les contraintes de l'économie circulaire

3. Rétrospective

L'explosion de l'usage de l'IA :

En 2000, le premier robot humanoïde basé sur l'IA ASIMO, est présenté par Honda. En 2005, DARPA une course de véhicules autonomes, stimule la recherche en robotique et en vision artificielle (Grand Challenge). En 2011, le chatbot IBM Watson remporte le jeu télévisé Jeopardy. En 2012, AlexNet, un réseau de neurones convolutifs (CNN) révolutionne la reconnaissance d'images. En 2016, le programme AlphaGo de DeepMind bat le champion du monde de Go Lee Sedol, démontrant ainsi la capacité de l'IA à aux tâches stratégiques et tactiques complexes. En 2017, l'IA conversationnelle est propulsée avec Alexa d'Amazon et Google Assistant. En 2020, l'IA générative textuelle via GPT-3 commence à révolutionner le monde en générant du texte réaliste et créatif. En 2022, l'IA générative visuelle (Dall-E 2, MidJourney, etc.) pousse la créativité de l'image et les vidéos.

Aujourd'hui, en France l'IA se démocratise et touche tous les secteurs même l'artisanat. L'écosystème est en forte croissance : en 2022, les startups de l'IA ont doublé le montant des fonds levés par rapport à 2021 pour atteindre un montant total de 3,2 milliards d'euros (BDM 2023).



Big Data, une histoire du pouvoir des données :

Inventé en 1990, c'est en 2000 que le terme Big Data a commencé à prendre son envol dans l'industrie. En 2004, Google a été le premier à lancer sa plateforme d'exploitation des Big Data (Google Maps). En 2005, le Framework open source Hadoop pour l'analyse des données massives, est lancé. En 2008, Amazon Web Services (AWS) rentre dans la course Big Data avec son service S3. En 2010, Facebook avait atteint 500 millions d'utilisateurs actifs migrés sur des plateformes Big Data. En 2020/2021, la pandémie de COVID-19 a accéléré l'adoption des infrastructures Big Data dans divers secteurs. De 2011 à 2017, le marché des Big Data est passé de 7,3 à 50,1 milliards de dollars (CoMarketing 2014). Le stockage d'1 Go de données coûtait aux entreprises plus de 500 USD en 2000 cela coute moins de 0,02 USD en 2022 (McKinsey 2022).

Blockchain ou la démocratie numérique :

En 2008, la blockchain est inventée par Satoshi Nakamoto pour la première crypto-monnaie Bitcoin. En 2011, la première blockchain publique Bitcoin est lancée suivie 3 ans plus tard par Ethereum, une plateforme blockchain programmable. En 2015, un groupe de grandes banques (le consortium R3) se réunit afin d'explorer les applications de la blockchain dans le secteur financier. En 2016, le premier smart contract est exécuté sur la blockchain Ethereum. En 2017, le prix du Bitcoin explose et attire le grand public sur la Blockchain. En 2018, des entreprises de gestion des chaînes logistiques s'intéressent à la BC pour la traçabilité des produits. En 2019, Facebook annonce sa crypto-monnaie basée sur la blockchain (Libra). En chiffres, la valeur totale du marché des crypto-monnaies basées sur la Blockchain atteint 3 000 milliards de dollars en 2022.

IoT une montée en puissance :

Limité à des applications spécifiques en 2000, l'usage de l'IoT s'est largement généralisé pour atteindre en 2015 25 milliards d'objets connectés pour 7,2 milliards d'habitants, soit une moyenne de plus de 3 objets par habitant. Le prix unitaire moyen par capteur IoT était supérieur à 1,30 USD en 2000, 22 ans plus tard (2022), ce prix est descendu à 0,50 USD (McKinsey 2022). Selon cette même étude, en 2000, les réseaux 2G fonctionnaient à environ 50 kbps/s ; ce n'était que le début du Wi-Fi et de la connectivité à courte portée (Bluetooth). Alors qu'en 2022, la puissance du réseau mobile 5G est en train d'arriver et peut aller jusqu'à 20Go/s (soit une multiplication par 400 000 par rapport à l'année 2000) avec intensification des réseaux Wi-Fi et courte portée (Bluetooth) qui sont devenus des technologies standard.



Liens technologies et EC de l'espoir à la réalité :

La pression réglementaire de plus en plus forte vers la transition écologique étant concomitant à l'essor massif des technologies ont poussé les entreprises à établir un lien possible entre les deux phénomènes en situant les outils technologiques au cœur du développement durable et la circularité. En 2010, l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) avait conforté cette « croyance » en évoquant une révolution technologique à faible teneur en carbone. Dans son rapport « Energy Technology Perspectives (2010) », l'AIE précisait que les technologies vont aider à atteindre 50 % de réduction de CO2 émis en 2050.

Après 2020, il y a une prise de conscience que les économies tant attendues des technologies en matière d'EC ont souvent été annihilées par les effets rebonds de ces mêmes technologies, comme par exemples plus de Data énergivores pour l'IA

4. Dynamiques en cours

Avènement de l'Informatique diffuse :

L'« informatique ubiquitaire » ou « diffuse » est décrite comme un système permettant l'accès aux informations pertinentes et la possibilité d'agir sur ces informations à tout moment et de n'importe où (Banâtre 2007). Elle repose sur l'interaction entre l'utilisateur et des objets physiques en combinant des interfaces intelligentes via des technologies nomades (IoT, IIoT, smartphones, appareils M2M, réseaux sans fil 3G, 4G (LTE), et 5G, Navigateurs GPS, etc.).

L'Informatique diffuse est étroitement liée à la démocratisation de l'IA. Elle fournit à l'IA de grandes quantités de données contextuelles et spatiales en temps réels, nécessaires pour développer des algorithmes plus forts, plus précis et plus efficaces. Tandis que l'IA permet à l'informatique diffuse d'être plus intelligente, plus adaptée, et plus proches des besoins des consommateurs là où ils se trouvent (Sajous 2023). La croissance de l'informatique diffuse peut s'interpréter par la croissance de la mobilité. La catégorie d'appareils mobiles qui connaît la croissance la plus rapide est celle des appareils M2M largement utilisés en entreprises. Cette catégorie de mobilité (M2M) a connu un taux de croissance annuel moyen de 30 % de 2018 à 2023. Par ailleurs, les applications liées à l'ID sont en plein croissance notamment dans des entreprises comme JCDecaux, Bouygues, Futuroscope ou Air-France.

Explosion de l'IA générative, un coût environnemental :

Ces deux dernières années, nous vivons un saut important vers l'IA Générative mais qui nécessite l'apprentissage de modèles de plus en plus larges sur des ensembles de données gigantesques. Cette approche est très coûteuse en termes de calcul et très énergivore. Les modèles basés sur traitement du langage naturel (NLP) qui ont connu récemment un réel boom planétaire en matière d'applications de SAV, de



robotisation, marketing, etc. tels que ChatGPT, Bard, etc. sont d'ailleurs les modèles les plus performants mais aussi les plus coûteux en termes d'énergie associée aux puissances et temps de calculs.

Selon le rapport annuel 2023 de l'indice IA de Stanford (Stanford's Artificial Intelligence Index) (Stanford university 2023), il a fallu l'équivalent de 502 tonnes d'émissions de CO² pour entraîner GPT-3 (le langage qui alimente ChatGPT3) l'année 2022 par Open AI et près de 1 300 mégawattheures d'énergie. De plus, lors de son utilisation, ChatGPT générerait 0.14 g de Co2 par requête. Or aujourd'hui on estime près de 10 millions de requêtes par jour.

Explosion de la virtualisation post-COVID :

La virtualisation qui permet de diviser les ressources matérielles d'un seul ordinateur (physique) en plusieurs ordinateurs virtuels représentent avec la mobilité les deux industries technologiques les plus omniprésentes ces 10 dernières années (IDC 2018). Depuis plusieurs années, le monde des Data Centers est gagné par la folie de la virtualisation, mais la crise COVID19 a été un tournant dans le déclenchement d'une explosion du travail virtualisé.

Ces dernières années, les SI décentralisés dans le cloud deviennent la norme, car ces solutions permettent de gérer facilement des réseaux dispersés et de répondre aux exigences en temps réel. Lorsqu'il s'agit d'économie d'énergie et d'empreinte environnementale, la virtualisation permet de gagner beaucoup en efficacité via la mutualisation des ressources (augmente la charge d'utilisation d'un serveur physique de 20% à 80%).

Arrivée de la 5G, plus de consommation à court terme mais une meilleure efficacité énergétique à long terme :

Le déploiement de la technologie 5G est en cours dans de nombreuses régions en France, soutenant une connectivité ultra rapide et plus fiable soutenant ainsi l'arrivée de nouvelles technologies comme le métavers, les hologrammes ou les Digital Twins. La 5G offre aux industriels une solution de connectivité qui permet une maîtrise des processus en temps réel et le live-tracking dans les activités comme la logistique, la surveillance, le monitoring ou la maintenance.

Une étude récente (Arcep 2022) suggère que l'introduction de la 5G entrainerait un impact environnemental positif en matière de consommation énergétique des réseaux. Une densification via la 5G, bien qu'elle engendre une augmentation de la consommation énergétique sur le court terme, permettrait ainsi d'économiser en cumul à horizon 2028 de 3 à 10 fois la consommation énergétique réalisée en 2020 par rapport à une densification via la 4G seule et entre 2 et 8 le volume d'émissions GES.



Vers plus d'interopérabilité via la norme OPC (Open Platform Communications) :

L'interopérabilité constitue un élément clé de l'industrie du futur. L'arrivée de nouvelles normes de connectivité comme l'OPC a amplement facilité la communication entre les systèmes de contrôle industriels des usines. Ce type de normes augmentent l'interopérabilité, réduisent les coûts, améliorent la flexibilité et l'évolutivité des systèmes d'automatisation industrielle. La norme OPC a permis l'expansion du réseautage des sources Data et l'opérabilité des données ainsi que la multiplication des dispositifs interconnectés IIoT pour devenir la norme de l'automatisation intégrale industrielle des usines 4.0 (Farnell 2023).

Selon Omron Industrial Automation (Omron 2023), la prévalence croissante de l'OPC apparaît dans l'augmentation constante du nombre de membres de la Fondation OPC, qui développe et promeut l'utilisation de la norme dans l'industrie. Ce nombre a augmenté de 440 en 2016 à 800 entreprises membres en 2020. En matière d'impact environnemental, la majorité des rapports de durabilité, recommandent aux entreprises d'améliorer leurs dispositifs d'interopérabilité pour réduire l'impact environnemental dû aux répliques notamment entre les données.

Élargissement de la connectivité :

Plus de réseaux, plus d'Internet et plus de IIoT : L'industrie 4.0 s'accompagne d'un accroissement fulgurant de la connectivité, cad de la capacité d'établir des liaisons de communication entre deux ou plusieurs systèmes distants (dispositifs, appareils ou réseaux). Bien qu'il existe plusieurs types de réseaux de communication comme la voix ou les signaux satellitaires, Internet demeure le réseau le plus largement utilisé. En parallèle, nous assistons aujourd'hui à une explosion de réseaux privés notamment pour des raisons de sécurité et de confidentialité des données comme le LAN (local area network), le MAN (Metropolitan Area Network) par exemple. L'ampleur et l'extension de ces réseaux est alimentée en partie par la baisse des coûts des appareils et des services connectés, notamment les objets connectés (IoT).

Selon le baromètre du numérique 2022, les IoT les enceintes connectées poursuivent leur diffusion : la proportion de possesseurs de ces équipements augmente de 7 points par rapport à 2020 et le taux d'utilisation d'IPv6 (indicateur du nombre d'appareils connectés à internet progresse de 15 points). La France passe de la 8ème à la 2ème place derrière l'Inde en taux d'utilisation d'IPv6.

Le marché de l'IIoT devrait quant à lui atteindre une valeur de 500 Milliard de dollars en 2025 du fait d'une demande soutenue de l'industrie 4.0 (McKinsey 2022). Les ventes des IoT 5G dans les industries devraient passer de 0,2 millions d'unités en 2022 à 7 millions en 2024 pour atteindre plus de 22 millions en 2030.

Vers plus de politique techno-verte : appels au jumelage des transitions techno-éco :

En parallèle des dispositifs de financement de l'innovation technologique et presque avec la même intensité, les efforts des programmes et actions pour l'économie circulaire et la durabilité se multiplient en France comme dans l'UE. Le « Green Deal », l'une des priorités phares de la Commission européenne, met l'accent sur le



nécessaire jumelage des transitions numérique et environnementale à l'horizon 2050. Par ailleurs, l'Organe des régulateurs européens des communications électroniques (ORECE) a intégré les enjeux liés à l'empreinte environnementale du numérique dans sa stratégie 2021-2025. Plusieurs propositions de textes réglementaires ont été publiées au niveau européen pour avancer sur le chantier de la réduction de l'empreinte environnementale des technologies, en particulier les nouvelles règles d'éco-conception et d'étiquetage énergétique pour les smartphones et tablettes, ainsi que la proposition de révision de la directive relative aux droits des consommateurs pour mieux lutter contre les pratiques d'obsolescence programmée et de Green Washing. La Commission européenne a également mis sur la table la proposition d'un nouveau règlement sur éco-conception qui prévoit des standards d'Economie Circulaire pour les produits en circulation dans l'UE, y compris les produits technologiques.

L'impact environnemental des technologies est également devenu un sujet d'attention croissant au niveau national. De nombreux rapports ont été publiés ces dernières années alertant sur l'empreinte carbone du secteur et son évolution (ADEME et Arcep 2022) (Sénat France 2020). Dans un rapport récent, l'ARCEP a soulevé 5 leviers pour promouvoir la sobriété numérique et qui au final convergent vers les piliers de l'Economie circulaire : (1) une interrogation sur l'ampleur du développement de nouveaux produits ou services numériques, (2) une réduction ou stabilisation du nombre d'équipements, (3) l'allongement de la durée de vie des terminaux, (4) développant davantage de reconditionnement et de réparation des équipements, (5) sensibilisation des consommateurs aux enjeux de la réutilisation des équipements (Arcep 2023).

Régulations européennes en matières de données et d'IA :

Après le renforcement des restrictions de l'Union européenne (UE) concernant le stockage et le traitement des données et la vie privée (RGPD en 2016), cette dernière a publié une série de rapports dès 2018 visant à encadrer l'utilisation des programmes autonomes (par l'IA). Ces rapports mettent en avant la nécessité d'une explication claire dans le domaine professionnel lorsqu'il s'agit d'implémenter des programmes autonomes. De plus, l'UE cherche à restreindre l'usage des programmes intelligents autonomes ou semi-autonomes, en particulier lorsqu'ils suscitent des interrogations éthiques.

Ces initiatives représentent les premières mesures concrètes visant à encadrer le développement et l'application de l'intelligence artificielle (IA). Elles ont également des répercussions sur les objets connectés (IoT) qui collectent ou traitent des données soumises à des réglementations éthiques. De même, les domaines des Big Data Analytics sont touchés, puisqu'ils doivent maintenant s'adapter à des restrictions sur le traitement de l'ensemble des données disponibles. Ces évolutions marquent un tournant dans le paysage réglementaire, influençant de manière significative le futur développement et l'utilisation de ces technologies émergentes.



Mix électrique français centré sur le nucléaire et progression des ENR :

Le mix électrique français est actuellement peu carboné notamment du fait de l'importance du parc nucléaire. La France, possède en effet le plus grand parc d'Europe et la plus grande part d'énergie nucléaire (70%) dans un mix électrique au monde (rapport Fondapol) . Entre 2010 et 2020, bien que la production brute d'électricité soit stable autour de 540 TWh/an, le parc de production installé a connu une hausse des capacités installées pour le photovoltaïque (+ 9 GW) et l'éolien terrestre (+ 11 GW) et une érosion t de la production électrique d'origine nucléaire avec notamment la fermeture de la centrale de Fessenheim en 2020 qui a diminué la capacité du parc nucléaire de près de 2 GW (rapport ADEME).

Depuis le début des années 2000, la France a mis en place une ambitieuse politique de soutien aux EnR électriques. Le montant total des engagements pris par l'État entre 2000 et 2020 est d'environ 60 MdEUR pour le photovoltaïque et 60 MdEUR pour l'éolien terrestre et maritime. Ces investissements ont permis de structurer les filières, et de faire baisser les coûts de production, éléments clés pour réussir la transformation du système électrique. Depuis quelques années c'est la Chine qui joue le rôle de leader sur les EnR en disposant de la plus grande capacité installée en matière d'énergie éolienne, solaire et hydroélectrique. Elle a augmenté fortement sa production industrielle dans ces domaines et a rendu ces technologies économiquement viables.

Le plastique un matériau incontournable mais aux externalités négatives qui poussent à la recherche d'alternative (bioplastique) :

Aujourd'hui, les plastiques constituent un élément clé pour des secteurs comme les emballages, la construction, le transport, la santé ou l'électronique. La production mondiale de plastiques est passée de 15 millions de tonnes en 1964 à 348 millions de tonnes en 2017. Les plastiques remplacent de plus en plus les autres matériaux d'emballage. Entre 2000 et 2015, ils sont ainsi passés de 17 % à 25 % du volume total des emballages.

Depuis ces débuts, seuls 9% des plastiques produits ont pu être recyclés et 12% ont été incinérés. Ce qui signifie qu'une large majorité se retrouve dans notre environnement ou dans des décharges, où ils mettent des siècles à se décomposer en relâchant des gaz à effet de serre qui contribuent aux changements climatiques. La consommation de pétrole pour la production plastique représente l'équivalent de la consommation mondiale du secteur aéronautique et pourrait plus que tripler d'ici à 2050 si les évolutions actuelles se poursuivent.

Face à ce constat, La volonté de trouver une alternative au plastique conventionnel s'accélère de manière significative et la demande de bioplastiques et de plastiques recyclés augmente considérablement. La capacité mondiale de production de polymères biosourcés et / ou biodégradables est estimée à 2,11 millions de tonnes en 2018 (moins de 1 % de l'ensemble des plastiques produits annuellement). Sur ce total, 43 % sont biodégradables dont 30 % sont à la fois biosourcés et biodégradables. Le marché reste porté par le PET biosourcé (non biodégradable), qui représente 27 % du marché, et les mélanges à base d'amidon biodégradables (18 %). Au niveau européen, la croissance est de l'ordre de +6,4%. Le PLA et les PHA (biodégradables) seront dans les prochaines années les principaux moteurs du marché (association European



Bioplastics). Des entreprises comme Coca-Cola, Danone, Ikea, Samsung, Procter & Gamble, Heinz proposent certains de leurs produits et / ou leurs emballages en bioplastique. Et LEGO prévoit de tout produire à partir de bioplastiques d'ici 2030

5. Exploration prospective

Tendances lourdes

Tension technologie – circularité :

Aujourd'hui, l'économie circulaire occupe une place capitale dans les enjeux de l'industrie en France sous l'impulsion notamment de changements législatifs (loi AGEC (2020), la loi RE2020, ...). Parallèlement à ces évolutions, l'industrie fait également l'objet de transformations digitales profondes résultant de l'intégration croissante de technologies de plus en plus répandues telles que l'IA, les Big Data ou la Blockchain. L'Industrie 4.0 doit prendre en compte les fonctionnalités d'automatisation, d'optimisation et d'intelligence, tout en se confrontant aux nouveaux défis de l'économie circulaire. L'un des piliers majeurs de cette transformation réside dans les technologies elles-mêmes, qui exercent une influence significative sur le modèle circulaire, que ce soit dans la phase de fabrication, d'utilisation et exploitation. L'émergence du problème du rebond de la pollution numérique souligne la nécessité d'intégrer la sobriété numérique dans l'approche de l'économie circulaire. La prochaine décennie de l'industrie française continuera à être marquée par des tensions importantes dans des démarches simultanées visant à harmoniser la technologie et l'écologie. Elle continuera à être confrontée au défi de concilier l'économie circulaire avec les évolutions technologiques.

Vers plus de décentralisation et d'interconnectivité :

Selon Forbes 2022 (Forbes 2022), à l'avenir, tout ce qui pourra être connecté le sera dans les entreprises et organisations de tous types. Pas seulement en termes d'appareils et de produits, mais également en termes d'espaces de vie et de travail. Qu'il s'agisse d'usines et de bureaux intelligents, les espaces du quotidien seront de plus en plus dotés de la capacité de surveiller ce qui se passe et d'agir en conséquence.

Selon le rapport McKinsey 2022 (McKinsey 2022), l'ensemble du marché des IIoT devrait augmenter d'ici 2025 et au-delà à raison de +12 % par an, sous l'effet d'une forte demande sous-jacente des infrastructures industrielles, mais aussi d'une plus grande disponibilité de cas d'usage qui se multiplient dans les secteurs de la construction, de la fabrication, de la production de matières non transformées et du transport.



La Datafication : vers du « Very » Big Data :

L'association de l'IA gourmande en Data, des Big Data Analytics et des IoT sources de Data, le monde sera de plus en plus datafié ! Les données générées par les machines et les humains en masses par les industries ne montre aucun signe de ralentissement actuellement malgré la montée des alertes sur les espaces de stockage et les risques croissants de cybersécurité. Réel levier pour concevoir des systèmes qui permettent de concevoir de meilleurs produits et services, améliorer les processus commerciaux, renforcer la prise de décision et même créer de nouvelles sources de revenus, les entreprises ne sont pas prêtes à freiner la datafication.

Développement intense de l'IA dans les entreprises :

L'intégration de l'IA évolue rapidement et intensément dans les entreprises car tirée par les enjeux de création valeur (Gartner 2023).

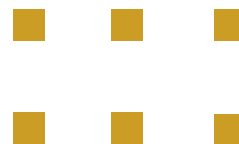
Outil infaillible pour le décisionnel, l'automatisation et l'optimisation des processus industries, l'IA prendra une place pilote dans les des objectifs commerciaux de la majorité des entreprises les années à venir. Selon le rapport McKinsey 2022, dans la période 2025 à 2028, les pionniers de l'intégration IA, peuvent s'attendre à voir leurs flux de trésorerie cumulés augmenter de 122 %, contre seulement 10 % pour les suiveurs. En sus, les entreprises qui n'auront pas adopté l'IA verront leurs flux de trésorerie diminuer de 23 %. Dès 2028, 75 % des ingénieurs logiciels d'entreprise utiliseront des assistants de codage IA, par rapport à moins de 10 % au début de 2023.

La Loi Moore et évolution exponentielle, une augmentation de l'emprunte carbone :

L'augmentation rapide des capacités de calcul, selon le modèle de la loi de Moore (doublement de la capacité des composants électroniques tous les 18 mois), a permis l'arrivée à maturité de nombreuses technologies mais entraînera une augmentation considérable de la demande en ressources informatiques et en énergie mais aussi de matière abiotique. Selon l'Agence internationale de l'énergie, le numérique représente aujourd'hui 3,7 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre, et devrait augmenter à 14 % d'ici 2040.

Un rapport de l'Arcep (ADEME et Arcep 2023) souligne que l'empreinte carbone générée en France augmenterait d'environ +45 % en 2030 par rapport à celle de 2020 (passage de 17,2 à 25 millions tonnes CO²). Avec +35% de ressources utilisées (passage de 63,7 à 88 millions de tonnes), +14% de consommation de matériaux et minéraux (passage de 952 à 1081 tonnes), +4 de consommation des énergies (passage de 52 à 54 TWh).

Selon un rapport du Sénat, en 2020, l'empreinte carbone du numérique est majoritairement liée aux terminaux (qui pèsent pour 79 % de l'empreinte, suivis par les Data Centers (plus de 16 %) puis les réseaux (autour de 5 %)). La phase de fabrication des équipements technologiques (terminaux, serveurs, machines, ...) représenterait 78 % du total alors que la phase d'utilisation représente 21 %.



Augmentation de la consommation électrique via l'électrification des usages :

L'électrification des usages de l'énergie est un des principaux leviers pour atteindre la neutralité carbone et apparaît comme un objectif majeur de l'Union Européen à travers des dispositifs comme le « Fit For 55 ». Même en appliquant des mesures fortes de sobriété énergétique, la production d'électricité devra ainsi s'accroître fortement, via des moyens de production décarbonés (nucléaire et renouvelables). Le constat est unanimement partagé, aussi bien par le GIEC, l'Agence internationale de l'Energie (AIE) et l'Union européenne, que par RTE qui tablent sur une croissance entre 30% et 50% de la consommation d'électricité française d'ici 2050. L'électrification des usages » concernera avant tout les trois principaux secteurs émetteurs de gaz à effet de serre, à savoir le transport (environ 30% des émissions), le bâtiment (23%) et l'industrie (25%).

Des recherches en progression sur les bioplastiques :

La recherche sur les matériaux biosourcés et biodégradables est aujourd'hui particulièrement dynamique (+ de 1 400 publications scientifiques par an au cours des dix dernières années). La recherche progresse et l'innovation se développe, partout dans le monde en particulier en Europe.

Incertitudes

Crise de confiance envers l'IA :

L'année dernière, l'Italie a été l'un des premiers pays au monde qui a décidé d'interdire l'usage des plateformes ChatGPT (IA générative conversationnelle) dans les espaces numériques publics suite au non-respect des restrictions européennes en matière de RGPD et à l'usage abusif de cet outil dans les écoles et les lieux académiques.

Face à de tels inquiétudes, le phénomène « IA Trust » est en train de naître. Selon le dernier rapport Gartner 2023 (Gartner 2023), les sujets de gestion de la confiance et du risque et de la sécurité de l'IA (IA Trust) fera l'une des 10 tendances technologiques stratégiques à partir de l'année 2024. Selon ce même rapport, en 2026, les entreprises devraient augmenter les contrôles type « IA Trust » et de sécurité en essayant d'éliminer 80 % des informations erronées et non légitimes.

Evolution de la Cybersécurité :

La question de la cybersécurité ne cessera de se poser notamment avec la croissance des systèmes ouverts à connectivité de courte ou longue portée comme l'Informatique Diffuse (Banâtre 2007) ou encore l'informatique pervasive (ZDNet 2022). Selon un rapport Gartner publié en 2020 (Gartner 2020), 75 % des entreprises devraient restructurer la gouvernance des risques et de la sécurité numérique pour



répondre aux nouveaux besoins de sécurité informatique, technologies opérationnelles, et IoT en 2023 contre moins de 15 % en 2020. Même si la cybersécurité est cruciale pour protéger les activités des entreprises, celles-ci peinent à trouver un équilibre entre cybersécurité et impératifs opérationnels. Depuis 2015, de plus en plus de cyberattaques ont eu lieu comme par exemple en octobre 2016, de nombreux grands sites de fournisseurs de services (Paypal, Reddit, Airbnb, etc.) étaient inopérants car ils ont été hackés à cause d'un malware passé par des IoT (Le journal du Geek 2016). Les experts pensent que l'informatique diffuse souffre de sa jeunesse, mais on peut s'attendre à voir la situation s'améliorer dans un horizon de 10 à 15 ans (d'ici 2034-2039) et la situation devrait s'inverser dans les années à venir. Toutefois, il reste des techniques de cyberattaques pour lesquelles il n'existe pas de réponse aujourd'hui. C'est le cas, par exemple, des attaques par relais (Interstices 2015).

IA Explicable : Emergence de nouveaux freins envers l'IA :

En 2018, le rapport UE sur le droit à l'interprétation des programmes autonomes et le rapport parlementaire Villani mettent au front de la scène l'exigence d'une IA explicable. Ce nouveau règlement devrait imposer plus de contrôle des programmes IA et impacterait leurs usages et limitations de leurs applications. L'explicabilité des modèles d'IA doit être constamment testée par la surveillance des modèles. Cela permet de s'assurer que les explications et interprétations des modèles d'IA restent actives pendant les opérations du modèle. Malgré la croissance de l'intérêt envers ces modèles explicables de l'IA, leur conception et mise en oeuvre demeurent techniquement complexes.

La limitation de l'impact environnemental des Data Centers :

Les Data Centers nécessaires dans les Big Data Analytics représentent un vecteur important de consommation d'énergie et génèrent le plus d'impact sur l'épuisement des ressources abiotiques naturelles (métaux et minéraux) et l'empreinte carbone et les radiations ionisantes. Les serveurs et les Data Centers consomment une grande quantité d'énergie et ont un impact environnemental significatif en termes d'émissions de gaz à effet de serre et d'empreinte carbone que ce soit en fabrication ou durant la durée de vie ou encore en coût de destruction. Selon le rapport Gartner 2023 (Gartner 2023), d'ici à 2027, plus de 50 % des entreprises utiliseront des plateformes de cloud industriel pour stimuler leurs projets commerciaux, contre moins de 15 % en 2023.

Le rapport d'activité de l'Arcep 2023 (Arcep 2023) sur l'impact environnemental du numérique en France dès 2030, préconise de systématiser l'éco-conception pour l'ensemble des équipements et infrastructures numériques mais surtout sur les Data centers. Selon le rapport ceci devrait permettre de réduire l'empreinte environnementale du numérique d'ici à 2030 : jusqu'à -16 % pour l'empreinte carbone par rapport à 2020.

Dès 2021, le projet « Fit-for-55 » (Ministère TECT 2021) proposé par la Commission Européenne incluant la mise en place d'un certain nombre d'actions à entreprendre liés à la consommation énergétique et à l'empreinte environnementale des Data Centers de 55% au moins en 2030 par rapport à 1990.



Rythme de croissance des ENR :

Un certain nombre d'études prospective mettent en avant une projection massive des ENR dans le futur. Le rapport IRENA souligne par exemple que d'ici 2030, les ENR devraient atteindre 10 770 GW dans le monde, soit quasiment quatre fois la capacité actuelle. Sur le plan national, dans les scénarios construits par l'ADEME, les ENR représentent plus de 70% de la production d'électricité d'ici 2050 (et atteint même 97% dans un scénario).

Mais dans le même temps les technologies ENR souffrent de contraintes d'usage (obligation d'éloignement des habitations, des radars militaires et civils, capacités des toits des bâtiments tertiaires à supporter des charges, orientations des toits, sites inscrits et classés, etc.) et environnementales (tels que Zones de Protection Spéciales, Natura 2000, milieux humides, etc.) et d'acceptation sociale (rejet croissant de la population vis-à-vis des gênes liées au saccage du patrimoine paysager, au nuisances sonores ou à la perte de valeur des logements des riverains). Ces contraintes sont potentiellement de nature à limiter le développement des ENR. Le rythme de croissance des ENR va également être contingent aux innovations technologiques. On voit notamment apparaître ces dernières années en Chine des centrales solaires flottantes de plus 150 MW (comme à Huainan), de nouveaux modules photovoltaïques sur l'eau ou à ultra-haute performance. Dans le domaine de l'éolien les innovations se concentrent sur des pales à très large envergure et faible vitesse (près de 60 m produit par le groupe Sino Wind Energy) et sur les matériaux des pales (fibre de verre silicium-aluminium-magnésium à haute résistance)

Développement du nucléaire incertain et dépendant des innovations technologiques (EMR, Fusion, generation IV) :

La France prévoit de réduire la part de sa production nucléaire, qui représente aujourd'hui plus de 70 %, à 50 % d'ici à 2035, en fermant quatorze des plus anciennes unités. Un réacteur est actuellement en construction et le gouvernement envisage de lancer un programme de six nouveaux EPR afin d'entamer un renouvellement partiel du parc nucléaire au début des années 2030.

Mais l'évolution future du nucléaire reste incertaine. L'ensemble des scénarios de l'ADEME suppose un démantèlement de la majorité des réacteurs nucléaires existants en France d'ici 2050. Mais dans le même temps les scénarios présentés par la Commission européenne sur le même horizon prévoient une capacité de production nucléaire se situant entre 100 et 120 GW en Europe. L'évaluation par le rapport FONDAPOL estime ainsi que 75 GW de capacité nucléaire devraient être construites en Europe d'ici à 2050 à moitié par la France. Selon cette analyse, 16 GW de nouvelles capacités seraient mises en service d'ici à 2035 et 59 GW seraient construites d'ici à 2050. Pour la France, cela équivaut à mettre en service un à deux réacteurs EPR d'ici à 2035, et 22 à 23 réacteurs supplémentaires d'ici à 2050.

Le développement futur du nucléaire est limité par un certain nombre de contraintes : coûts d'investissement initiaux importants, modes de financement coûteux, allongement des délais de construction (FOAK : first of a kind en France et en Finlande ont connu d'importants retards de construction et une très forte inflation de leurs coûts) et forte opposition de certaines parties de la population qui a déjà conduit certains pays européens, à interrompre ou abandonner progressivement leurs programmes nucléaires.



Cette évolution va également dépendre des avancées technologiques permettant la conception de futurs réacteurs plus sûrs, plus opérables et plus performants en matière de gestion de déchets. La R&D actuelle porte notamment sur les SMR (petits réacteurs modulaires avec une puissance de moins de 300 MW qui permet une production décentralisée et dont le déploiement prévu à partir de 2025 dépendra de leur capacité à réaliser les réductions de coûts attendues), les réacteurs de Génération IV (regroupe six filières¹ à des stades de recherche variés, la plupart avec les réacteurs à neutrons rapides refroidis au gaz (Gas-cooled Fast Reactors, GFR) ; les réacteurs à neutrons rapides refroidis au plomb (Lead-cooled Fast Reactors, LFR), les réacteurs à sels fondus (Molten Salt Reactors, MSR) ; les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (Sodium-cooled Fast Reactors, SFR) ; les réacteurs à eau supercritique (Supercritical water-cooled un cycle de combustible fermé pour pouvoir réduire au minimum les déchets). et la fusion nucléaire (Avec des déchets nucléaires très limités et aucun risque de fusion du cœur du réacteur cette technologie est très prometteuse mais ne sera pas commercialisable avant plusieurs décennies). L'innovation au sein des centrales passent également par la numérisation, l'utilisation de digital twins ou la robotisation favorisant leur flexibilité, leur maintenance la réduction des coûts.

Electrification des process thermiques pour décarboner l'industrie :

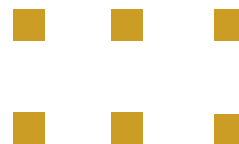
Les usages thermiques représentent le principal gisement de décarbonation industrielle. L'électrification apporte déjà un certain nombre de solutions connues, dont il faut accélérer le déploiement (génération de vapeur par des chaudières électriques, électrification des fours, déploiement de solutions thermiques via résistances, induction, micro-ondes, ou infra-rouge. Mais suppose aussi l'arrivée à maturité de technologie de rupture (récupération de chaleur fatale par des pompes à chaleur haute température, électrolyse du fer pour remplacer les hauts fourneaux). Certains procédés seront toutefois difficiles à électrifier (procédés chimiques, très hautes températures...) et nécessitent des stratégies de décarbonation liées à la capture et au stockage du CO₂.

Développement de filières de recyclage dédié au bioplastique :

La plupart des plastiques biodégradables se dégradent dans un environnement contrôlé que seuls possèdent les composteurs industriels. A l'heure actuelle il n'existe pas de poubelle de tri adapté aux bioplastiques ni de filière de recyclage dédié. S'ils sont donc déposés par erreur dans les bacs jaunes de tris des emballages, ils seront incinérés avec les déchets des Ordures Ménagères Résiduelles (OMR).

Baisse des coûts de production des bioplastiques et croissance du marché :

Aujourd'hui, les bioplastiques biosourcés et biodégradables sont au moins deux fois plus chers que les plastiques classiques issus de la pétrochimie. « Cette différence est liée au coût des matières premières, de leur transformation mais aussi à l'amortissement des coûts de recherche (ADEME). Mais, les économies d'échelle liées à la hausse des volumes, l'amélioration des procédés de fabrication et la hausse des prix du pétrole, tendent à rendre les bioplastiques biosourcés et biodégradables de



plus en plus compétitifs par rapport aux plastiques issus de la pétrochimie. La réduction des coûts de production des bioplastiques et le développement de modèles économiques viables constituent donc un enjeu central de la recherche dans le domaine.

La taille du marché mondial des bioplastiques devrait passer de 1,78 million de tonnes en 2023 à 3,95 millions de tonnes d'ici 2028. L'Europe représente la part de marché la plus élevée et devrait dominer le marché. Mais, la disponibilité d'alternatives moins chères est susceptible d'entraver la croissance du marché.

Signaux faibles

Vers l'Industrie 5.0 : plus de techno mais plus d'humain embarqués :

L'« Industrie 5.0 » se met en place depuis 2020 remet l'humain au cœur de la transformation technologique (uTrakk 2023). On parle de l'humain « augmenté ». Il s'agit d'un pas supplémentaire vers l'automatisation inclusive de l'humain, avec plus d'IA, plus de robotique et plus de collaboration homme-machine. Les technologies Homme-Machine seront donc en ligne de mire de la R&D et de l'innovation (comme l'IA conversationnelle, les IoT à reconnaissance visuelle et vocale, les dispositifs à synthèse vocale, les blockchains, les interfaces gestuelles intelligentes, l'impression 3D, les VR/VA, digital twins, etc.). Selon le rapport du World Robotics 2021 (marketsandmarkets 2023), la croissance en installation des robots collaboratifs homme-machines en industrie 5.0 devrait dépasser les +6% en 2024 par rapport aux 3 millions installés en 2021 (en seulement 3 ans).

Avec l'industrie 5.0, une augmentation exponentielle de la connectivité entre les personnes, les machines et les données est attendue. Les Big Data et la datafication devrait donc augmenter considérablement. La transition vers l'industrie 5.0 commence progressivement et n'en est qu'à ses débuts avec des groupes de réflexion qui voient le jour au niveau de l'Europe à partir de 2020.

Informatique quantique : Emergence d'une révolution probable :

Selon un article dans Forbes 2022 (Forbes 2022), le prochain grand bond en avant viendra probablement des ordinateurs quantiques. Ces ordinateurs sont si rapides et si puissants qu'ils pourraient être utilisés pour accomplir de nouvelles tâches, auparavant impossibles et irréalisables pour les technologies actuelles. Un ordinateur quantique devrait permettre de réaliser des calculs parallèles, en simultané, et plus de manière séquentielle comme avec nos machines actuelles.

En améliorant considérablement l'utilisation du Big Data, les qubits permettront finalement aux recherches en IA de faire un bond de géant. Les ordinateurs quantiques ne sont pas encore sortis des labos, mais les entreprises de la tech et les chercheurs investissent dans ce domaine. C'est le cas de Google, qui mène plusieurs



projets de front, avec l'université de Santa Barbara et la NASA, d'Intel qui a dévoilé lors du dernier CES un processeur à 49 qubits conçu avec l'université hollandaise de Delft, ou encore d'IBM et Microsoft qui conçoivent eux aussi leurs propres ordinateurs fonctionnant avec des bits quantiques.

Traçabilité par Blockchain :

Le terme « confiance numérique » désigne la confiance que les consommateurs placent dans les organisations pour construire un monde digital sécurisé, où les transactions et les interactions peuvent avoir lieu en toute sécurité. La blockchain est considérée une technologie clé pour construire cette confiance numérique et la sécurisation des interactions. Mais cette technologie a encore du chemin à parcourir avant d'être véritablement accessible à tous les types d'organisations en raison de la complexité technique de sa mise en oeuvre.

Déverrouillage du contrôle des Data en Europe :

En raison des freins de la loi RGPD 2016 dans le développement des programmes d'IA, l'UE a compris qu'il est indispensable de « libérer » la Data et de faciliter son partage. Elle a lancé depuis trois ans de nouvelles initiatives législatives concernant plusieurs règlements pour déverrouiller et Ouvrir les écosystèmes numériques. En parallèles, l'UE oeuvre pour promouvoir plus de partageabilité de la Data dans ces écosystèmes (Open-Data). Elle a donc déjà proposé l'adoption du Data Governance Act (DGA) en 2022, puis le « Digital Market Act » (DMA) pour garantir des marchés de données équitables et ouverts rentré en vigueur en 2023, puis le « Data Act » en créant la catégorie des « services d'intermédiation de données » le 11 janvier 2024. Ceci devrait permettre de promouvoir d'avantage la R&D qui développement les technologies de Big Data Analytics et de l'IA.

Emergence de l'informatique pervasive (Ubicamp) :

Appelée également « Informatique ambiante » ou encore « ubicomp » de son terme anglosaxon « Pervasive Computing ». L'informatique ambiante serait la phase à venir suite à l'informatique diffuse qui elle aussi met l'utilisateur au centre de son modèle socio-économique (Waldner 2007). Pour Weiser, le père de l'informatique pervasive, non seulement ces systèmes vont se répandre mais ils doivent aussi devenir invisibles pour les utilisateurs pour qu'on parle d'Informatique pervasive. Cela nécessite de faire évoluer toutes les configurations des interactions homme-machine, ce que le Pervasive Computing ne fait pas encore.

Lors de la conférence Google I/O de 2022, une session spéciale a été consacrée à l'informatique pervasive qui a été annoncée comme un domaine en évolution rapide. Selon un article de ZDNet (ZDNet 2022), Amazon et Google souhaitent tous deux prendre la tête de ce secteur en augmentant le nombre d'appareils qui se connectent à leurs assistants vocaux.

L'informatique pervasive assurerait l'accès à l'information pour tout le monde via des dispositifs dispersés en lieu et place des appareils et des bases de données centralisés. Des exemples commencent à voir le jour comme les capteurs IoT qui



gèrent les flottes et les composants de pipeline ou encore les systèmes d'éclairage à partir de simples applications mobiles.

Dans l'environnement Ubicamp, les outils technologiques sont connectés en réseau et disponibles en permanence. Ces technologies doivent intégrer des IoT mobiles connectés sans fil, des étiquettes d'identification par radiofréquence (RFID), des logiciels intermédiaires et des agents logiciels autonomes munis de capacités IA mais surtout des dispositifs d'informatique embarquée qui permettent d'assurer les interactions entre appareils et humains en toute invisibilité.

Utilisation de bactéries à base d'algues rouges pour dégrader le plastique :

Des recherches récentes en laboratoire montrent que certaines bactéries (platisphères) très abondantes étaient capables de faire des « trous » dans le plastique, et de participer ainsi à sa bio-détérioration. Les travaux en cours cherchent à démontrer que ces résultats obtenus en conditions de laboratoire est possible en milieu naturel. Par ailleurs, la société de capital risque de BASF et un fond d'investissement néerlandais ont investi depuis 2022 dans Sea6 Energy, pour développer du bioplastique à partir d'algues rouges tropicales

Controverses

Techno green : mythes vs réalité !

Intelligence artificielle entre optimisation et consommation d'énergie

L'utilisation de l'IA permet d'optimiser les flux logistiques, de réduire les pertes dans les flux physiques (Willemot et CHaussat 2020), d'optimiser les flux et réduire les déchets. Les Data Analytics et les Big Data permettent d'aider à la collecte, le suivi et l'analyse avancée des données afin d'avoir une meilleure gestion des ressources et ainsi aider les entreprises à développer et respecter un modèle circulaire et optimiser ainsi l'utilisation des matières premières, de l'énergie et des ressources (Demer 2022). Mais l'entraînement des modèles IA de plus en plus large (largem models comme les LLM) nécessite des puissances de calcul une consommation d'énergie conséquents. Selon l'article (Excluvité 2024), la charge des workloads d'IA aura représenté environ 4,3 GW en 2023, soit 8% de la consommation globale des datacenters (57 GW).

Blockchain

La blockchain permet de tracer toutes les transactions relatives à un produit et assurer une traçabilité accrue (ex. IBM Food Trust), ce qui peut offrir des solutions de lutte contre le greenwashing, réduire les gaspillages et améliorer le recyclage (ex. CircularChain). Toutefois, la consommation de la blockchain est importante compte tenu de son mécanisme de preuve de travail en réseau et des transactions



automatisées en continu. Selon une étude menée par Selectra (Selectra 2023), en 2021, la consommation électrique du Bitcoin a été multipliée par 16 par rapport à 2017 (c'est 75% de la consommation globale de tous les français réunis !).

Internet of Things

Les IoT peuvent servir comme dispositifs de surveillance et d'amélioration des cycles de vie des produits (ex. Clothes ID), pour capter et mieux gérer les points de recyclage, etc. Cependant, la fabrication, l'utilisation et la mise au rebut des IoT consomment de l'énergie et des ressources naturelles (matériaux). Les phases de recyclage ou de destruction dégradables des dispositifs IoT posent également un grand questionnement pour les constructeurs.

L'effet Big Brother, demandeurs de technologies mais résistants :

Big Brother fait référence au concept d'une surveillance étendue ou d'un contrôle excessif des autorités (gouvernement, organisation, entreprises, etc.) sur la vie privée des citoyens à travers les technologies de surveillance, les caméras de sécurité, la collecte de données en ligne, etc.

Selon Weiser l'informatisation de l'ensemble des espaces dans le cadre de la montée de l'Informatique Pervasive susciterait de nombreuses craintes associées au phénomène « big Brother » dans l'avenir (Méadel et Musiani 2016). Les consommateurs aujourd'hui sont demandeurs des outils et dispositifs technologiques et intelligents, mais lorsque ces outils sont associés aux espaces de travail ou gérés par autrui, l'effet de réticence est ressenti dans les espaces de travail, cela peut avoir un impact sur l'adoption et le développement de ces technologies.

Tensions que pourraient entraîner le développement massif du bioplastique sur les terres agricoles :

La plupart des plastiques biosourcés utilisent des matières premières végétales cultivées sur des terres agricoles. Pour certains il existe ainsi un risque que s'installe dans l'avenir une compétition sur l'utilisation des ressources alimentaires. Par ailleurs, le fait d'utiliser l'agriculture conventionnelle entraîne également l'usage d'intrants chimiques, exerce une pression sur les ressources en eau et sur les sols et crée une dette carbone.

Ces préoccupations légitimes en matière de sécurité alimentaire et de pression sur les terres agricoles ne doivent cependant pas être exagérées. Car la production de polymères biosourcés, encore faible en volume, mobilise aujourd'hui très peu de ressources agricoles. Cependant en 2018 la production de bioplastiques était de 2,11 million de tonnes (1% des plastiques), soit une utilisation de 0,02 % de la superficie agricole mondiale.

Mais pour éviter qu'à terme cette question puisse réellement se poser, la recherche



s'oriente aujourd'hui sur la production de biopolymères à partir de ressources diversifiées n'entrant pas en concurrence avec les cultures vivrières en particulier les déchets organiques (résidus de récolte, sous-produits agroalimentaires) dont l'usage est à l'heure actuelle encore très marginale. Cette question de la tension sur les marchés agricoles peut tout de même potentiellement être sources à controverses.

Ruptures

Crash des câbles : Vulnérabilité sous-marine en cause :

Aujourd'hui, Internet, passe sous les mers. Des milliers de kilomètres de câbles sous-marins assurent environ 99% de connexions mondiales (Internet et téléphonie). On estime que plus de 10.000 milliards de dollars de transactions financières quotidiennes, soit quatre fois le PIB annuel de la France, transitent aujourd'hui sous la mer. Dans un scénario où les câbles sous-marins d'Internet seraient coupés simultanément, cela aurait des conséquences majeures sur la connectivité mondiale, car la plupart des réseaux de communications internationales dépendent de ces infrastructures. Par conséquent, les technologies des Big Data, de l'IA, des usines connectées, des IoT, les services en ligne, des smartphones, du commerce électronique, etc. seraient toutes affectés.

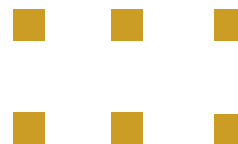
D'ailleurs, dans plusieurs articles, on rappelle que la vulnérabilité des câbles sous-marins serait une réelle menace pour l'Europe (20Minutes 2021). Suite à la récente crise en Mer Rouge ces menaces deviennent plus probables qu'avant.

Impact du Wi-Fi sur la santé :

Les technologies sans fil, y compris le Wi-Fi, ont fait l'objet de nombreuses études sur leur impact sur la santé jusqu'aujourd'hui. Le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) et l'Organisation mondiale de la santé (l'OMS) ont classé les champs électromagnétiques radiofréquences émis par les relais Wifi « cancérogènes possibles » (Choisir 2023). D'ailleurs la loi Abeille de 2015 en France a établi plusieurs règles de cadrage et limitations concernant l'usage du WiFi. Dans l'hypothèse d'une découverte soudaine de maladies potentiellement liées au Wi-Fi, un grand changement impacterait l'industrie des technologies. Les fabricants de dispositifs Wi-Fi pourraient être tenus de revoir ou de trouver d'autres alternatives ou bien de revenir sur les réseaux filaires pour la connectivité.

Arrêt de l'IA, Guerres et bavures en cause :

Mardi 28 juillet 2023, le secrétaire général des Nations Unis a réaffirmé sa volonté de réguler l'usage de l'IA, et en particulier son usage lors de conflits armés². Dans l'hypothèse où les guerres utilisent de plus en plus l'IA, qui montrent au grand public



avec de plus en plus de bavures (drones tueurs par erreur !), son interdiction générale pourrait être probable dans le milieu militaire comme dans le milieu civil et économique.

6. Références

20Minutes. 2021.

<https://www.20minutes.fr/societe/3156875-20211028-internet-pourquoi-vulnerabilite-cables-sous-marins-menace-europe>

ADEME. BASE IMPACTS®: Calculer l'impact environnemental des produits. Communiqué de presse, Paris: ADEME, 2014.

ADEME et Arcep. Evaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective.

Note de synthèse, Paris: Arcep, 2022.

ADEME et Arcep. Evaluation prospective de l'ADEME et l'ARCEP sur l'impact environnemental du numérique en 2030 et 2050.

Communiqué de presse, Paris: ADEME, 2023.

ADEME, Transition(s) 2050 choisir maintenant agir sur le climat.

Mix énergétique, quelles alternatives et quels points communs, 2022.

Al Gore S., Énergie éolienne : pierre angulaire de la transition énergétique, <https://www.acteurdurable.org/energie-eolienne/>, 2023

Antunes, M., G., Économie verte et bleue : les tendances du bioplastique, Magazine Blue Innovation, 2020

Arcep. Equipements et usages du numérique : Baromètre du numérique. Rapport de communiqué de presse, Paris: Arcep, 2023.

Arcep. Etude comparée : consommation énergétique d'un déploiement 4G vs 5G. Etude, Paris: Arcep, 2022.

Arcep. L'état d'Internet en France. Rapport d'activité, Paris: Arcep, 2023.

Assemblée nationale. Rapport de la mission d'information commune sur la blockchain (chaîne de blocs) et ses usages: un enjeu de souveraineté. Paris: Assemblée nationale, 2018.

Banâtre, M., et al. Informatique diffuse: des concepts à la réalité. Hermès, 2007.

BDM. 2023.

<https://www.blogdumoderateur.com/mapping-startups-ia-france-2023/>.



Baroni M., Energie nucléaire : la nouvelle donne internationale, fondapol, 2021.

Benkarouba, F. Z., Benbouzian, M. «Le rôle des technologies numériques issues de l'Industrie 4.0 dans la mise en oeuvre de l'économie circulaire et la réalisation de la durabilité The role of digital technologies from Industry 4.0 in implementing the circular economy and achieving sustain.» Industrial Economics Review, 2022: 12(02): 88-110.

Boton, C., et G. Lefebvre. Du BIM au Digital Twin. Sommes-nous prêts pour la 4^e révolution industrielle? Congrès industriel, Corporation des entrepreneurs généraux du Québec, 2020.

Bruxelles environnement, Rapport technique déchet, « BIOPLASTIQUES » Plastiques biosourcés, biodégradables ou compostables Une alternative (in)soutenable ? Septembre 2020.

Choisir. 2023.

<https://www.choisir.com/box-internet/articles/198189/les-ondes-wifi-ont-elles-un-impact-sur-la-sante>.

Cisco. Cisco Annual Internet Report (2018–2023). Rapport annuel, USA: Cisco, 2020.CNIL. CNIL, Glossaire. 25 03 2022.

<https://www.cnil.fr/fr/intelligence-artificielle/intelligence-artificielle-de-quoi-parle-t-on#:~:text=intelligence%20artificielle-,L'intelligence%20artificielle%20est%20un%20proc%C3%A9d%C3%A9%20logique%20et%20automatis%C3%A9%20reposant,En%20savoir%20plus> (accès le 12 22, 2023).

CoMarketing. 2014.

<https://comarketing-news.fr/infographie-le-big-data-business/> .

<https://www.usine-digitale.fr/article/l-onu-veut-bannir-l-usage-de-l-ia-dans-les-armes-de-guerre-d-ici-2026.N2154642>

Coron, C. La Boîte à outils de l'analyse de données en entreprise. Dunod, 2020.

Costa, S. Transformer l'intégrité: IA, blockchain et lutte contre la corruption. 2023.

Delmaire, H. «BILAN D'UNE CRISE: Comment doper le développement numérique du Québec?» Gestion, 2020: 16-21.

Delpla, V. Optimisation des chaînes d'approvisionnement en boucle fermée dans un contexte d'économie circulaire à l'ère de l'Industrie 4.0. Thèse de doctorat, École de technologie supérieure, 2021.

Demer, A., Dierickx, F. «Symbioses industrielles et Economie circulaire au service de la cause climatique, le basculement vers Industrie 6.0.»

Revue Francophone du développement durable, 2022: 83 - 104.

Devaux, O. Petit M., Crocombette, C., Bena, M. Kariniotakis, G., Robin, S., Mallet, P., UNE NOUVELLE RÉVOLUTION ÉLECTRIQUE AU SERVICE DE LA DÉCARBONATION, association Think Smartgrids, 2023



Evans Data Corporation. Worldwide Developer Population and Demographic Study: 34th Edition.

Rapport annuel, USA: Evans Data Corporation, 2022.
Excluvité. 2024.

[https://dcmag.fr/la-consommation-energetique-de-lia/#:~:text=Le%20besoin%20croissant%20de%20workloads,des%20datacenters%20\(57%20GW\).](https://dcmag.fr/la-consommation-energetique-de-lia/#:~:text=Le%20besoin%20croissant%20de%20workloads,des%20datacenters%20(57%20GW).)

Farnell. 2023.

<https://fr.farnell.com/introduction-to-open-platform-communication-opc>.

Forbes. Ces dix avancées technologiques qui vont façonner le monde de demain. 06 01 2022.

<https://www.forbes.fr/technologie/ces-dix-avancees-technologiques-qui-vont-faconner-le-monde-de-demain/> (accès le 01 30, 2024).

Fourdaous, N. L'industrie 4.0 :présentation d'une révolution mérique modifiant significativement le paysage de la production pharmaceutique. Thèse de doctorat, Bordeaux: Université de Bordeaux, 2022.

Fuchs, P. Le traité de la réalité virtuelle. Vol. 2. . Presses des Mines, 2006.

Gartner. Feuille de route des services informatiques en matière de cybersécurité. Rapport Extrait des activités, San Francisco, Californie, USA: Gartner, 2020.

Information Technology. 02 01 2023.

<https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/big-data> (accès le 12 22, 2023).

Gartner. Principales tendances technologiques stratégiques pour l'année 2024. Rapport annuel, San Francisco, Californie, USA: Gartner , 2023.

Geoffron, P. «Comment transition numérique et transition écologique s'interconnectent-elles?» Annales des Mines-Responsabilité et environnement, 2017: Vol. 87. No. 3. FFE.

Hove,A., Énergies renouvelables : le système d'innovation chinois peut-il favoriser la transition bas-carbone ?, Groupe d'études géopolitiques, Sep 2021, 76-85.

gouvernement français. 2023.

<https://www.gouvernement.fr/lancement-du-programme-d-acceleration-french-tech-2030>.

Greenspector. Quelle est l'empreinte carbone d'une requête sur Chat GPT ? 25 04 2023.

<https://blog.ekip.app/quelle-est-lempreinte-carbone-de-chatgpt/#:~:text=En%20synth%C3%A8se%2C%20une%20requ%C3%AAt%20sur,d%20e%201.54%20g%20de%20Co2> (accès le 01 30, 2024).



The environmental impact of search engines apps. 22 07 2020.
<https://greenspector.com/en/search-engines/> (accès le 01 30, 2024).
HTC. 2023.

<https://www.htc.com/uk/esg/sustainability-agenda/sustainable-products/>.

IBM. Informatique diffuse. 13 04 2021.
<https://www.ibm.com/docs/fr/i/7.4?topic=serving-pervasive-computing> (accès le 01 30, 2024).

Qu'est-ce qu'un jumeau numérique ? 22 12 2023.
<https://www.ibm.com/fr-fr/topics/what-is-a-digital-twin> (accès le 12 22, 2023).

IDC. 5 Things You Didn't Know About Tech Spending. Rapport annuel, USA: IDC, 2018.

IFAC. Data Analytics : An Information Resource for IFAC members. international report, ifac.org , 2018.

Interstices. La sécurité des systèmes informatiques ubiquitaires. 14 01 2015.
<https://interstices.info/la-securite-des-systemes-informatiques-ubiquitaires/> (accès le 01 30, 2024).

IRENA (2021), Perspectives pour les transitions énergétiques mondiales : Trajectoire vers l'objectif de 1.5°C, Agence internationale pour les énergies renouvelables, Abou Dhabi.

Journal Officiel. Réalité de synthèse–virtual reality. Marche Public, 2007.
Julien, N., et M. Éric. Le jumeau numérique: De l'intelligence artificielle à l'industrie agile. Dunod, 2020.

Le journal du Geek. [Hack Dyn] L'Internet des objets au coeur de la cyberattaque. 24 10 2016.
<https://www.journaldugeek.com/2016/10/24/hack-dyn-objets-connectes-paralysent-internet/> (accès le 01 30, 2024).

Mallem, M., et D. Roussel. «Réalité augmentée-Principes, technologies et applications.» Technologies de l'Information, Le traitement du signal et ses applications.» Dans Techniques de l'Ingénieur,, TE5920. 2019.
marketsandmarkets. 2023.
<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/industry-5-market-35376359.html>.

Marty, N., et C. Druelle-Korn. «Histoire des entreprises et économie circulaire: pour une nécessaire clarification.» Entreprises et histoire 1, 2023: 6-17.

McKinsey. Internet industriel des objets et technologies avancées : les leviers d'une transformation digitale réussie. Rapport Annuel, Paris: McKinsey France, 2022.

Méadel, C., et F. Musiani. Abécédaire des architectures distribuées. Paris: Presses des Mines via OpenEdition, 2016.



Ministere TECT. « Fit for 55 » : un nouveau cycle de politiques européennes pour le climat. 15 07 2021.
<https://www.ecologie.gouv.fr/fit-55-nouveau-cycle-politiques-europeennes-climat> (accès le 01 30, 2024).

MIT TR. «Training a single AI model can emit as much carbon as five cars in their lifetimes.» MIT technology Review, 2019: 103.
mordorintelligence. 2023.
<https://www.mordorintelligence.com/fr/industry-reports/digital-twin-market>.

Nations Unis. L'Accord de Paris. 4 11 2016.
<https://unfccc.int/fr/a-propos-des-ndcs/l-accord-de-paris#:~:text=L'Accord%20de%20Paris%20est,vigueur%20le%204%20novembre%202016.> (accès le 01 30, 2024).

Nehme, Z. «L'informatique pervasive. Ed. Techniques Ingénieur, 2003.» Techniques de l'ingénieur, 2003.
Nicolai, J. P., et L. Peragin. «Les certificats de sobriété numérique comme instrument de régulation de la pollution numérique 1.» Revue de l'OFCE, 2022: (1), 229-249.

OFTA. Informatique diffuse. Paris: Observatoire Français des Techniques Avancées, 2007.

Omron. 2023.
<https://www.ia.omron.com/product/special/sysmac/nx1/opcua-evolving.html>.

Parlement Européen. Intelligence artificielle : définition et utilisation. 20 06 2023.
<https://www.europarl.europa.eu/news/fr/headlines/society/20200827STO85804/intelligence-artificielle-definition-et-utilisation> (accès le 12 22, 2023).

Philipposian, P. Leasing, servicisation et économie circulaire: Théorie, pratique, perspectives. Arnaud Franel. 2021.
Picard, F., et C. Tanguy. Innovation et transition techno-écologique. Vol. 7. . ISTE Group, 2017.

Rapport d'information, LES BIOPLASTIQUES BIODÉGRADABLES ET COMPOSTABLES, ÉTAT DES LIEUX, SPHERE & KANEKA, JUILLET 2019.
Sajous, P. «En route avec l'IA! Incidence de l'IA et de l'informatique ubiquitaire dans l'établissement de la mobilité quotidienne: le cas des applications GPS.» Flux, 2023: 1-15.

Sedkaoui, S. Data analytics and big data. John Wiley & Sons, 2018.
Selectra. 2023.
https://selectra.info/energie/actualites/insolite/bitcoin-consommation-electricite#google_vignette.

Sénat France. mission d'information sur l'empreinte environnementale du numérique. Rapport d'information, Paris: Sénat, 2020.

Shohin, A., et et al. «Mass personalisation as a service in industry 4.0: A resilient response case study.» Advanced Engineering Informatics, 2021: 50: 101438.



Stanford university. Artificial Intelligence Index Report 2023. Rapport annuel, USA: Stanford university, 2023. Statista. 2023.
<https://www.statista.com/chart/28467/virtual-and-augmented-reality-adoption-forecast/>.

Strubell, E., A. Ganesh, et A. McCallum. «Energy and policy considerations for deep learning in NLP.» arXiv preprint arXiv:1906.02243, 2019.

Svétošlavova Anastassova, M., J.-M. Burkhardt, C. Mégard, et P. Ehanno. «L'ergonomie de la réalité augmentée pour l'apprentissage: une revue.» Le travail humain, 2007: 70.2: 97-125.

Teboul, B., et B. Thierry. «Valeur et Véracité de la donnée: enjeux pour l'entreprise et défis pour le Data Scientist.» Dans Actes du colloque «La donnée n'est pas donnée». 2015.

Tisseron, S., et F. Tordo. Comprendre et soigner l'homme connecté: manuel de cyberpsychologie. Dunod, 2021.

UE. 2023.

https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/industrial-research-and-innovation/industry-50_en.

uTrakk. «Industrie 5.0.» Livre blanc, 2023.

Villani, M. C., et M. Gérard Longuet. Les enjeux technologiques des blockchains (chaînes de blocs). tech. rep.,. Sénat, 2018.

Waldner, J.-B. Nano-informatique et intelligence ambiante : Inventer l'ordinateur du xxie siècle. Londres, GB: Hermes Science, 2007.

Willemot, A., et J.-C., et Stokkink, D. CHaussat. VERS UNE ECONOMIE CIRCULAIRE 2.0. INR (Institut du Numérique Responsable), 2020.

ZDNet. Informatique ambiante. 20 09 2022.

<https://www.zdnet.fr/actualites/informatique-ambiante-intelligence-ambiante-tout-ce-que-vous-devez-savoir-sur-l-essor-de-la-technologie-invisible-39947430.htm>
(accès le 02 30, 2024).