

Haute Ecole
« ICHEC – ECAM – ISFSC »



Enseignement supérieur de type long de niveau universitaire

Impact de l'utilisation de l'intelligence artificielle sur l'empreinte carbone des entreprises

Mémoire présenté par :
Adrien WAERSEGgers

Pour l'obtention du diplôme de :
Master en gestion de l'entreprise

Année académique 2020-2021

Promoteur :
Prof. Dr. Jacques FOLON

Boulevard Brand Whitlock 6 - 1150 Bruxelles

Haute Ecole
« ICHEC – ECAM – ISFSC »



Enseignement supérieur de type long de niveau universitaire

Impact de l'utilisation de l'intelligence artificielle sur l'empreinte carbone des entreprises

Mémoire présenté par :
Adrien WAERSEGgers

Pour l'obtention du diplôme de :
Master en gestion de l'entreprise

Année académique 2020-2021

Promoteur :
Prof. Dr. Jacques FOLON

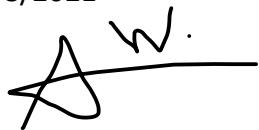
Boulevard Brand Whitlock 6 - 1150 Bruxelles

Dispositif anti-plagiat

« Je soussigné, WAERSEGGERS, Adrien, étudiant en Master 2 à l'ICHEC Brussels Management School, déclare par la présente que le mémoire ci-joint est exempt de tout plagiat et respecte en tous points le règlement des études en matière d'emprunts, de citations et d'exploitation de sources diverses signé lors de mon inscription à l'ICHEC, ainsi que les instructions et consignes concernant le référencement dans le texte respectant la norme APA, la bibliographie respectant la norme APA, etc. mises à ma disposition sur Moodle. Par ma signature, je certifie sur l'honneur avoir pris connaissance des documents précités et que le travail présenté est original et exempt de tout emprunt à un tiers non-cité correctement. »

Date : 15/08/2021

Signature :

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Adrien W." The signature consists of a stylized "A" followed by a "W" with a dot above it.

Remerciements

Ce mémoire est le fruit d'un long travail qui n'aurait pas été possible sans l'aide de nombreuses personnes. Je tiens à remercier tous ceux qui ont été impliqués de près ou de loin dans ce mémoire.

Je voudrais remercier en particulier Monsieur Folon, Ph. D., mon promoteur, pour son aide, sa disponibilité et le temps consacré à la relecture de mon mémoire. Son écoute et ses conseils avisés ont largement contribué au bon déroulement de ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent ensuite à toutes les personnes qui m'ont accordé une interview et qui ont pris le temps de répondre à mes questions : Madame De Ketelaere (IMEC-IDLab), Monsieur Demulder (Orange Belgium), Monsieur De Spiegeleer (Ethernetics), Monsieur Quetel (Centrica Business Solutions), Monsieur Johner (Sami) et Monsieur Laubeuf (IMEC). Leur disponibilité, leur expertise et leur enthousiasme m'ont permis d'envisager toutes les pistes de réflexion et d'acquérir les connaissances nécessaires à la réalisation de ce mémoire.

Je voudrais également exprimer mes sincères remerciements à mon maître de stage chez Micropole, Monsieur Colinet, ainsi qu'à Monsieur Casier (Agoria). Ils m'ont tous deux partagé leur grande expertise et mis en contact avec différents acteurs du monde de l'intelligence artificielle.

Enfin, je voudrais remercier du fond du cœur ma famille et mes amis qui m'ont soutenu dans ce travail de longue haleine ainsi qu'au cours de mes études à l'ICHEC. Ils étaient toujours là pour moi, dans les bons moments comme dans les moments de doutes. Les nombreuses discussions et leurs précieuses relectures m'ont permis de mettre en lumière des pistes non explorées.

Merci !

Table des matières

Introduction générale	1
Méthodologie	3
A. L'analyse de la littérature	3
B. Les entretiens	3
Approche théorique	5
1. La transformation durable des entreprises.....	5
1.1 Introduction.....	5
1.2 La lutte contre le réchauffement climatique : un enjeu international.....	7
1.3 17 Objectifs de Développement Durable (ODD)	8
1.4 Evolution des émissions de gaz à effet de serre dans le monde et en Europe	11
1.5 Impact écologique des matières premières	13
1.6 Impact écologique des technologies de l'information et de la communication (TIC)	14
1.7 Un exemple : les datacenters	15
1.8 La neutralité carbone des entreprises.....	17
1.9 Enjeux du développement durable pour les entreprises	19
2. L'intelligence artificielle.....	22
2.1 Origine de l'intelligence artificielle.....	22
2.2 Qu'est-ce que l'intelligence artificielle ?	26
2.2.1 Machine Learning.....	27
2.2.2 Natural Language Processing	28
2.2.3 Computer Vision.....	30
2.2.4 Predictive Analysis.....	30
2.3 L'importance du big data dans l'intelligence artificielle.....	32
2.4 Enjeux économiques et sociaux de l'intelligence artificielle.....	34
2.5 L'intelligence artificielle au sein des entreprises.....	36
2.6 Impact éthique de l'intelligence artificielle	37
2.7 Critique de l'intelligence artificielle.....	41
2.8 Impact de la crise du Covid-19 sur l'intelligence artificielle	42
Approche pratique	44
3. L'empreinte carbone d'une entreprise	44
3.1 Complexité du calcul du bilan carbone.....	44
3.2 Limites du calcul du bilan carbone	46
3.3 Réduction de l'empreinte carbone des entreprises	46
3.3.1 Révision des activités	46

3.3.2	Compensation carbone	47
3.4	L'intelligence artificielle au service du développement durable des entreprises	48
4.	L'empreinte carbone de l'intelligence artificielle.....	50
4.1	Les algorithmes	50
4.2	Les processeurs et les puces	52
4.3	Les datacenters	54
4.3.1	Consommation énergétique.....	54
4.3.2	Mesure de la consommation énergétique	55
4.3.3	Composants des datacenters	56
4.4	Pistes pour réduire l'empreinte carbone des datacenters	58
4.4.1	Système de refroidissement	58
4.4.2	Composants des datacenters	59
4.4.3	Conclusion	60
5.	Impact de l'intelligence artificielle sur l'empreinte carbone des entreprises.....	61
5.1	Complexité du calcul de l'impact	62
5.2	Exemple concret : Centrica Business Solutions.....	65
6.	Conclusion	69
7.	Limites de notre analyse	71
8.	Pistes pour le futur	72
9.	Bibliographie.....	73

Table des figures et tableaux

Figure 1 : Evolution de la température moyenne annuelle mondiale de 1850 à 2017.....	6
Figure 2 : Les 17 Objectifs de Développement Durable (ODD)	9
Figure 3 : Emissions atmosphériques mondiales par polluant (2017)	11
Figure 4 : Répartition des émissions de Gaz à Effet de Serre dans l'UE à 27 entre 1990 et 2018	12
Figure 5 : Consommation des matières premières en 2017 et projection pour 2060	13
Figure 6 : Contribution du numérique à l'empreinte environnementale mondiale	14
Figure 7 : Pourcentage de la consommation énergétique des datacenters en Europe	16
Figure 8 : Le cercle vicieux de la maximisation du profit à court terme	19
Figure 9 : Mettre le développement durable au cœur de la stratégie d'entreprise	20
Figure 10 : Ligne du temps : les 4 révolutions.....	25
Figure 11 : Les sous-technologies de l'intelligence artificielle	27
Figure 12 : La pyramide des besoins pour la science des données.....	32
Figure 13 : Evolution de la taille annuelle de la datasphère mondiale	33
Figure 14 : Evolution de l'utilisation de l'intelligence artificielle dans les différents secteurs	36
Figure 15 : Domaines d'action prioritaires pour les défis environnementaux.....	38
Figure 16 : Impact de l'IA sur la réalisation des objectifs de développement durable	40
Figure 17 : Représentation des 3 périmètres	45
Figure 18 : Représentation du processus de pruning.....	52
Figure 19 : Répartition de la consommation énergétique des datacenters.....	55
Figure 20 : Fréquence de remplacement des systèmes dans les datacenters.....	57
Figure 21 : Recyclage des déchets des datacenters	58
Figure 22 : Aperçu du site Machine Learning CO2 Impact	63
Figure 23 : Aperçu du résultat du site Machine Learning CO2 Impact	63
Figure 24 : Total net de la production d'électricité en Belgique par technologie en 2019.....	66
Tableau 1 : Profils des différents intervenants	4
Tableau 2 : Les 17 ODD expliqués	10

Introduction générale

« Le gouvernement dévoile ses 15 actions pour un numérique au service de la transition écologique », « HealthTech et GreenTech séduisent les professionnels IT », « Un nouvel outil pour aider les entreprises à abaisser leur empreinte carbone », « Les entreprises écoresponsables déroulent le tapis vert » etc.

Ce genre de titre devient de plus en plus fréquent dans notre actualité depuis quelques années. Ce n'est plus un secret pour personne, le réchauffement climatique est bien réel et devient une préoccupation de plus en plus importante pour la population (Slate.fr, 2020). L'incertitude climatique dans laquelle nous vivons aujourd'hui pousse aussi les entreprises à revoir leur manière de fonctionner et à fournir des efforts en termes de réduction de leurs émissions de gaz à effet de serre.

Parallèlement à cela, l'émergence des nouvelles technologies fascine le monde. La crise du Covid-19 a poussé de nombreuses entreprises à revoir leur mode de fonctionnement. Pour beaucoup d'entre elles, la digitalisation n'était plus une option mais une réelle nécessité afin de pouvoir poursuivre leurs activités en temps de crise sanitaire (Delacharlerie, 2020). Bien sûr, toutes ces technologies ont un coût financier mais également un coût écologique (Segone, 2021).

Il nous semblait donc intéressant d'analyser comment il était possible d'allier utilisation des nouvelles technologies et réduction de l'empreinte carbone. Etant donné que le concept des « nouvelles technologies » est très large, nous avons décidé de nous focaliser sur l'intelligence artificielle. En effet, depuis quelques années, nous entendons de plus en plus souvent parler de l'intelligence artificielle dans des domaines très variés, sans toujours réaliser que cette technologie est en pleine évolution et qu'elle pourrait avoir un impact sur les enjeux de demain.

Du 15 au 19 mars 2021, l'intelligence artificielle a été mise à l'honneur en Belgique grâce à de nombreuses conférences et débats organisés par AI4Belgium. AI4Belgium est un organisme qui permet aux personnes et aux organisations de saisir les opportunités liées à l'intelligence artificielle. Cette semaine était organisée pour permettre notamment aux professionnels de découvrir les utilisations de l'intelligence artificielle. En voyant la volonté des autorités de rendre cette technologie accessible à toutes les entreprises, il nous semblait intéressant de nous poser la question du coût énergétique lié à l'utilisation de cette technologie.

Tout ceci nous amène à nous poser la question suivante, qui sera aussi la question de recherche de notre mémoire : **Quel est l'impact de l'utilisation de l'intelligence artificielle sur l'empreinte carbone des entreprises ?**

Afin de répondre au mieux à cette question, notre mémoire sera divisé en 2 grandes parties.

La première partie sera consacrée à l'analyse de la littérature existante sur les sujets de l'intelligence artificielle et de l'empreinte carbone des entreprises. Il est en effet primordial d'aborder les 2 domaines en profondeur afin que le lecteur puisse avoir les connaissances nécessaires pour comprendre la partie analyse de notre mémoire.

La seconde partie de notre mémoire sera une partie plus pratique. Nous utiliserons des interviews menées avec des acteurs du monde de l'intelligence artificielle, de l'empreinte carbone et des datacenters pour mettre en corrélation l'utilisation de l'intelligence artificielle et l'empreinte carbone des entreprises. Nous terminerons notre analyse en prenant l'exemple d'une entreprise qui a réussi à concilier utilisation de la technologie et réduction de son empreinte carbone.

Enfin, nous clôturerons ce mémoire en abordant les limites de notre analyse ainsi que les pistes futures de réflexion.

Méthodologie

Depuis notre première année à l'ICHEC, nous avons appris à adopter une rigueur scientifique lors de nos travaux. C'est avec cette même rigueur que nous avons rédigé notre mémoire. Nous développerons dans les prochaines lignes la méthodologie utilisée pour l'analyse de la littérature ainsi que pour la récolte de données.

A. L'analyse de la littérature

Afin de mener à bien notre analyse de la littérature, nous avons récolté de la documentation sur des sujets tels que l'intelligence artificielle, le développement durable, l'empreinte carbone, le bilan carbone, etc. La documentation utilisée pour cette partie provient majoritairement de rapports, d'articles et revues scientifiques, d'anciens mémoires etc. Nous avons utilisé les outils mis à disposition par la bibliothèque de l'ICHEC comme Cairn.info, le catalogue des anciens mémoires de l'ICHEC et des sites de recherche tels que Google Scholar.

B. Les entretiens

Afin de mener à bien notre analyse qualitative dite exploratoire, nous avons choisi de récolter des données par le biais d'interviews. Nous avons ainsi mené six interviews avec des experts dans leur domaine.

La première personne que nous avons interviewée était Mieke De Ketelaere, directrice de la section Intelligence Artificielle au sein du laboratoire IMEC-IDLab (Institut de microélectronique et composants – Internet Technology and Data Science Lab). Le laboratoire est un pôle de recherche et développement pour les nanotechnologies et les technologies numériques. Elle dirige notamment les recherches liées à la « Green-AI ».

Nous avons ensuite posé quelques questions à Wim Demulder, Datacenter Manager chez Orange Belgium. Grâce à lui, nous avons pu avoir un aperçu de ce qu'il était possible de faire aujourd'hui afin de réduire l'empreinte carbone des datacenters.

La troisième interview a été celle de Gert De Spiegeleer, CFO et co-fondateur d'Ethernetics, une start-up belge qui a pour objectif de rendre les datacenters rentables, plus écologiques et plus rapides.

Thibaut Quetel, Sourcing & Sales Manager chez Centrica Business Solutions, nous a également accordé un entretien. Centrica Business Solutions offre à ses clients une expertise énergétique afin qu'ils deviennent durables sur le plan écologique et économique. L'entreprise propose de nombreux services dont notamment le Virtual Power Plant, développé par REstore. C'est ce service en particulier qui a fait l'objet de nos discussions.

Nous avons ensuite interviewé Brice Johner, commercial chez Sami. Sami est une entreprise qui calcule le bilan carbone des entreprises et les aide à établir des plans d'actions.

Lors de notre dernière interview, nous avons interrogé Nathan Laubeuf, doctorant pour IMEC-IDLab. Il effectue actuellement des recherches sur le développement de puces moins énergivores pour l'intelligence artificielle.

Intervenant	Fonction	Domaine
Mieke De Ketelaere	Directrice IA @IMEC-IDLab	Intelligence Artificielle
Wim Demulder	Datacenter Manager @Orange Belgium	Datacenter
Gert De Spiegeleer	CFO @Ethernetics	Datacenter
Thibaut Quetel	Sourcing & Sales Manager @Centrica Business Solutions	Empreinte Carbone des Entreprises
Brice Johner	Commercial @Sami	Empreinte Carbone des Entreprises
Nathan Laubeuf	Doctorant @IMEC-IDLab	Intelligence Artificielle

Tableau 1 : Profils des différents intervenants

Nous avons donc interviewé un panel d'experts sur trois sujets principaux : l'intelligence artificielle, l'empreinte carbone des entreprises et les datacenters.

D'un point de vue méthodologique, toutes les interviews ont été réalisées en ligne, par le biais de différentes plateformes, que ce soit par téléphone, via Teams ou encore via Google Meet. Les interviews ont été réalisées via des entretiens semis-directifs. Pour chaque interview, un guide d'entretien fut créé au préalable, disponible dans les annexes.

Toutes les interviews ont été enregistrées et retranscrites à l'exception de celle de Gert De Spiegeleer. Son interview n'a pas pu être enregistrée en raison d'un souci informatique. Une retranscription des éléments importants de l'entretien a cependant été faite.

Les retranscriptions nous ont permis d'analyser chaque entretien de manière rigoureuse, de pouvoir confronter les différents points de vue et de faciliter le traitement des données.

Approche théorique

1. La transformation durable des entreprises

1.1 Introduction

Depuis la dernière période glaciaire il y a plusieurs milliers d'années, la planète a toujours connu des périodes de réchauffement et de refroidissement. Cependant, depuis un siècle le réchauffement de la planète s'accélère. En effet, durant les 5000 dernières années, la température de la terre a augmenté de 4 à 7 degrés Celsius. Mais lors du dernier siècle uniquement, la terre s'est réchauffée de 0,7 degré Celsius, ce qui est déjà 10 fois plus rapide par rapport à la fin de la dernière période glaciaire. Personne ne peut donc ignorer l'existence du réchauffement climatique (Météo-France, s. d.). Le réchauffement climatique est directement lié à l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère (Commission Européenne, 2017). Les gaz à effet de serre ou GES tirent leur nom du fait qu'ils permettent à l'énergie solaire d'entrer dans l'atmosphère mais l'empêchent de s'en échapper. L'atmosphère est ainsi réchauffée, ce qui permet le développement de la vie sur terre (sans ces gaz, la température terrestre moyenne serait de -18°C). De nombreux gaz à effet de serre sont présents naturellement dans l'atmosphère (European Commission, s. d.) :

- La vapeur d'eau (H_2O) qui représente 75 % de l'effet de serre
- Le dioxyde de carbone (CO_2), bien moins présent que la vapeur d'eau mais sa capacité à retenir la chaleur est très élevée
- Le méthane (CH_4)
- Le protoxyde d'azote (N_2O)
- L'ozone (O_3) (Agence Parisienne du Climat, 2019)

Depuis l'ère industrielle, les activités humaines entraînent une grande concentration des gaz à effet de serre, ce qui a pour conséquence de réchauffer davantage l'atmosphère, mettant à mal cet équilibre naturel. Ainsi :

- Le dioxyde de carbone (CO_2) est responsable de 64 % du réchauffement de la planète dû aux activités humaines ; il est principalement lié à la combustion d'énergies fossiles, à l'agriculture et à la déforestation ;
- Le méthane, responsable du réchauffement de la planète à hauteur de 19 %, provient essentiellement du secteur agricole, mais également des décharges, des exploitations charbonnières, pétrolières ou gazières ;
- Le protoxyde d'azote provient du secteur agricole et de certaines industries chimiques ;
- Les gaz fluorés : hydrofluorocarbures (HFC), hydrocarbures perfluorés (PFC) et hexafluorure de soufre (SF_6), sont uniquement dus aux activités humaines et se

retrouvent dans les systèmes de réfrigération et de climatisation, ainsi que dans certains procédés industriels. Les gaz fluorés sont progressivement interdits par la réglementation de l'Union européenne (Agence Parisienne du Climat, 2019) (European Commission, s. d.).

Selon les climatologues, le réchauffement climatique observé depuis la moitié du XXe siècle est préoccupant et le rôle de l'activité humaine en est la cause principale. En effet, l'observation de l'atmosphère montre une augmentation des gaz à effet de serre due aux activités humaines depuis l'ère industrielle (Jouzel et al., 2020). Comme le montre le graphe repris ci-dessous, la température moyenne de la planète a augmenté de 0,85°C depuis la fin du XIXe siècle. Or, une augmentation de 2°C par rapport à la période préindustrielle entraînerait un risque accru de changements climatiques dangereux, et même catastrophiques (European Commission, s. d.).

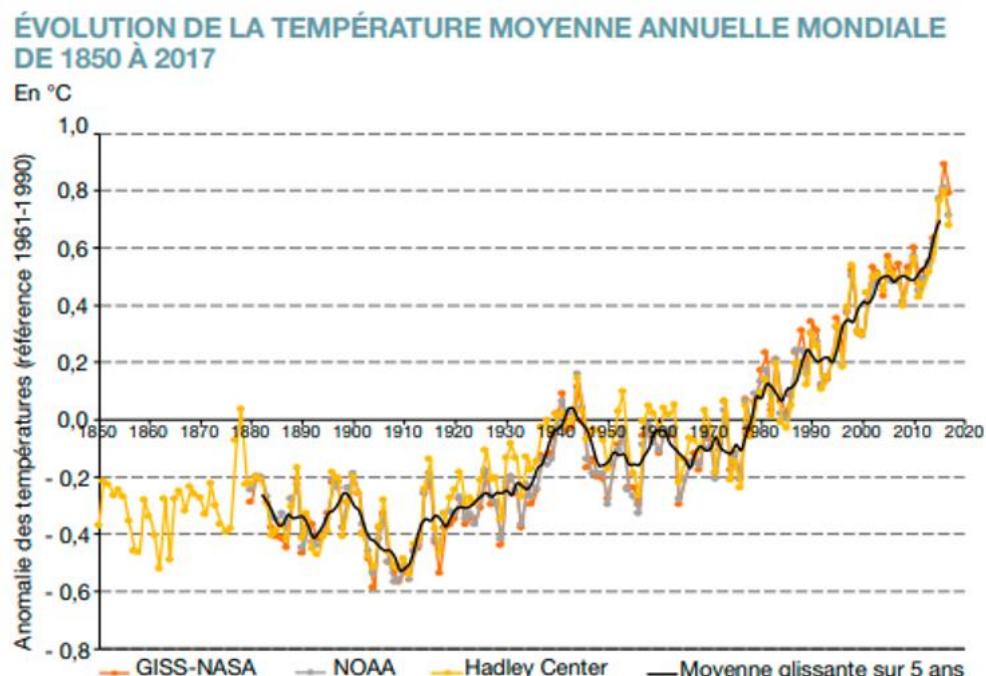


Figure 1 : Evolution de la température moyenne annuelle mondiale de 1850 à 2017

Source : I4CE - Institute for Climate Economics. (2019). *Chiffres clés du climat France, Europe et Monde*. Récupéré de https://www.i4ce.org/wp-content/uploads/2018/11/Chiffres-Clefs-du-Climat_2019.pdf

Face à l'ampleur et à la globalité du problème, la communauté internationale se mobilise pour faire bouger les choses.

1.2 La lutte contre le réchauffement climatique : un enjeu international

Le concept de développement durable fait son apparition en 1992, lors de la Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement (CNUED). Cette conférence, également appelée Sommet de la Terre ou Conférence de Rio, rassemble 182 Etats à Rio de Janeiro dans le but de débattre sur l'avenir de la planète et de proposer des pistes d'action dans tous les domaines où les activités humaines influencent le développement de l'environnement. Le Sommet de la Terre instaure également la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC). Entrée en vigueur en mars 1994, elle a été ratifiée par 197 pays et vise à stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre de manière à empêcher toute interférence dangereuse de l'homme avec le système climatique mondial. Depuis 1995, les représentants de la CCNUCC se rassemblent une fois par an lors des « COP » (Conferences of the Parties) (European Commission, s. d.) (United Nations, 2020).

Lors de la COP3 à Kyoto en décembre 1997, un accord international a été signé par 192 parties : le **Protocole de Kyoto**. Cet accord international montre la voie aux pays industrialisés afin de limiter et réduire les émissions de gaz à effet de serre. Les pays sont tenus d'adopter des politiques et des mesures de réduction de leurs émissions conformément à des objectifs individuels convenus (European Commission, s. d.) (United Nations, 2020).

Le premier accord mondial et juridiquement contraignant sur le changement climatique a été adopté lors de la Conférence de Paris sur le climat (COP21) en décembre 2015. **L'Accord de Paris** vise à :

- maintenir le réchauffement de la planète à un niveau inférieur à 2°C par rapport aux niveaux préindustriels,
- poursuivre les efforts pour limiter l'augmentation de la température moyenne mondiale à 1,5°C, ce qui permettrait de réduire considérablement les risques et les impacts du changement climatique ;
- parvenir le plus rapidement possible au plafonnement mondial des émissions des gaz à effet de serre, sachant que cela prendra davantage de temps pour les pays en développement ;
- réduire ensuite les émissions des gaz à effet de serre mondiales dans un délai rapide, afin de parvenir à un monde climatiquement neutre d'ici le milieu du XXI^e siècle (European Commission, s. d.) (United Nations, 2020).

Chaque pays était invité à soumettre en 2015 un plan d'action climatique au secrétariat de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) : les mesures visant à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre et les mesures destinées à renforcer leur résilience afin de s'adapter aux effets de la hausse des températures (European Commission, s. d.) (United Nations, 2020). Chaque pays est invité à soumettre un nouveau plan d'action climatique tous les 5 ans (United Nations Climate Change, s. d.).

L'Europe s'inscrit naturellement dans ces objectifs ambitieux en matière de lutte contre le réchauffement climatique : réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 55 % d'ici 2030 et atteindre la neutralité carbone en 2050. En décembre 2019, elle a ainsi mis en place une nouvelle stratégie, appelée Green Deal, un pacte vert pour l'Europe visant à rendre l'économie de l'Union européenne durable. Pour y arriver, un plan d'action a été établi afin de promouvoir l'utilisation efficace des ressources en passant à une économie propre et circulaire, de restaurer la biodiversité et de réduire la pollution (European Commission, 2019).

1.3 17 Objectifs de Développement Durable (ODD)

2015 a été une année charnière pour l'élaboration de la politique internationale. Outre l'Accord de Paris, les Etats membres des Nations Unies ont adopté le Programme de développement durable à l'horizon 2030. Avec pour objectif ultime la paix et la prospérité des populations et de la planète, ce programme s'articule autour de 17 Objectifs de Développement Durable (Sustainable Development Goals – SDGs) et s'adresse tant aux pays développés qu'aux pays en développement. En effet, le changement climatique doit aller de pair avec des stratégies visant à éliminer la pauvreté, améliorer l'accès aux soins de santé et à l'éducation, réduire les inégalités, stimuler la croissance économique et préserver les océans et les forêts (Nations Unies, s. d.).

SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS



Figure 2 : Les 17 Objectifs de Développement Durable (ODD)

Source : United Nations. (s. d.). 17 SDG's. Récupéré de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/news/communications-material/>

 SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS	
Objectif 1	« Eliminer la pauvreté sous toutes ses formes et partout dans le monde » (United Nations, s.d.-b)
Objectif 2	« Eliminer la faim, assurer la sécurité alimentaire, améliorer la nutrition et promouvoir l'agriculture durable » (United Nations, s.d.-b)
Objectif 3	« Permettre à tous de vivre en bonne santé et promouvoir le bien-être de tous à tout âge » (United Nations, s.d.-b)
Objectif 4	« Assurer à tous une éducation équitable, inclusive et de qualité et des possibilités d'apprentissage tout au long de la vie » (United Nations, s.d.-b)
Objectif 5	« Parvenir à l'égalité des sexes et autonomiser toutes les femmes et les filles » (United Nations, s.d.-b)
Objectif 6	« Garantir l'accès de tous à des services d'alimentation en eau et d'assainissement gérés de façon durable » (United Nations, s.d.-b)

Objectif 7	« Garantir l'accès de tous à des services énergétiques fiables, durables et modernes, à un coût abordable » (United Nations, s.d.-b)
Objectif 8	« Promouvoir une croissance économique soutenue, partagée et durable, le plein emploi productif et un travail décent pour tous » (United Nations, s.d.-b)
Objectif 9	« Bâtir une infrastructure résiliente, promouvoir une industrialisation durable qui profite à tous et encourager l'innovation » (United Nations, s.d.-b)
Objectif 10	« Réduire les inégalités dans les pays et d'un pays à l'autre » (United Nations, s.d.-b)
Objectif 11	« Faire en sorte que les villes et les établissements humains soient ouverts à tous, sûrs, résilients et durables » (United Nations, s.d.-b)
Objectif 12	« Etablir des modes de consommation et de production durables » (United Nations, s.d.-b)
Objectif 13	« Prendre d'urgence des mesures pour lutter contre les changements climatiques et leurs répercussions » (United Nations, s.d.-b)
Objectif 14	« Conserver et exploiter de manière durable les océans, les mers et les ressources marines aux fins du développement durable » (United Nations, s.d.-b)
Objectif 15	« Préserver et restaurer les écosystèmes terrestres, en veillant à les exploiter de façon durable, gérer durablement les forêts, lutter contre la désertification, enrayer et inverser le processus de dégradation des terres et mettre fin à l'appauvrissement de la biodiversité » (United Nations, s.d.-b)
Objectif 16	« Promouvoir l'avènement de sociétés pacifiques et inclusives aux fins du développement durable, assurer l'accès de tous à la justice et mettre en place, à tous les niveaux, des institutions efficaces, responsables et ouvertes à tous » (United Nations, s.d.-b)
Objectif 17	« Renforcer les moyens de mettre en œuvre le Partenariat mondial pour le développement durable et le revitaliser » (United Nations, s.d.-b)

Tableau 2 : Les 17 ODD expliqués

Source : United Nations. (s. d.-b). *LES 17 OBJECTIFS / Sustainable Development*. Récupéré de <https://sdgs.un.org/fr/goals>

Comme nous venons de le voir, la communauté internationale se mobilise pour lutter contre le réchauffement climatique. Attardons-nous à présent sur l'évolution des émissions de gaz à effet de serre à l'origine de ce réchauffement climatique.

1.4 Evolution des émissions de gaz à effet de serre dans le monde et en Europe

Le dioxyde de carbone (CO₂) est le gaz à effet de serre le plus rejeté dans l'atmosphère comme nous pouvons le voir sur le graphique suivant :

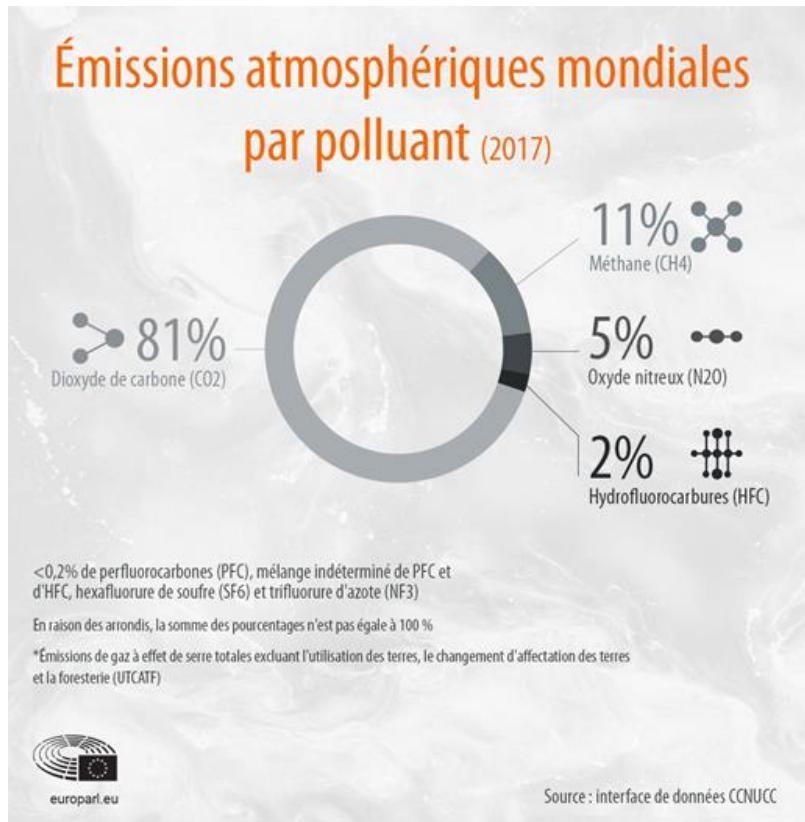


Figure 3 : Emissions atmosphériques mondiales par polluant (2017)

Source : Parlement Européen. (2018b, mars 17). *Émissions atmosphériques dans le monde par polluant*. Récupéré de

<https://www.europarl.europa.eu/news/fr/headlines/society/20180301STO98928/emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-par-pays-et-par-secteur-infographie>

Les activités humaines jouent un rôle important dans le rejet de ces émissions : en 2018, les émissions de gaz à effet de serre liées aux activités humaines représentent au niveau mondial l'équivalent de 55,3 milliards de tonnes de CO₂. Ici aussi, le CO₂ occupe la place la plus importante, puisqu'il représente à lui seul les trois quarts de ces émissions, contre un quart pour les autres gaz à effet de serre. Ces émissions mondiales de CO₂ ont progressé de plus de 65 % entre 1990 et 2018, avec une augmentation de 1,9 % en 2018. C'est la Chine qui occupe la première place mondiale avec 30 % des émissions mondiales, suivie par les États-Unis (14 %) et par l'Union européenne (8 %) (Cohen, 2019).

La situation en Europe suit une trajectoire différente, grâce aux politiques menées pour lutter contre le réchauffement climatique. En 2018, les émissions de gaz à effet de serre sur le territoire de l'Union européenne diminuent de 23 % par rapport à 1990 ; elles s'élèvent à 3,5 Gt CO₂ éq., ce qui représente une diminution de 2,3 % par rapport à 2017 et une diminution de 23 % sur la période 1990-2018 (I4CE - Institute for Climate Economics, 2019).

RÉPARTITION PAR SOURCE DES ÉMISSIONS DE GES DANS L'UE À 27 ENTRE 1990 ET 2018

En Mt CO₂ éq

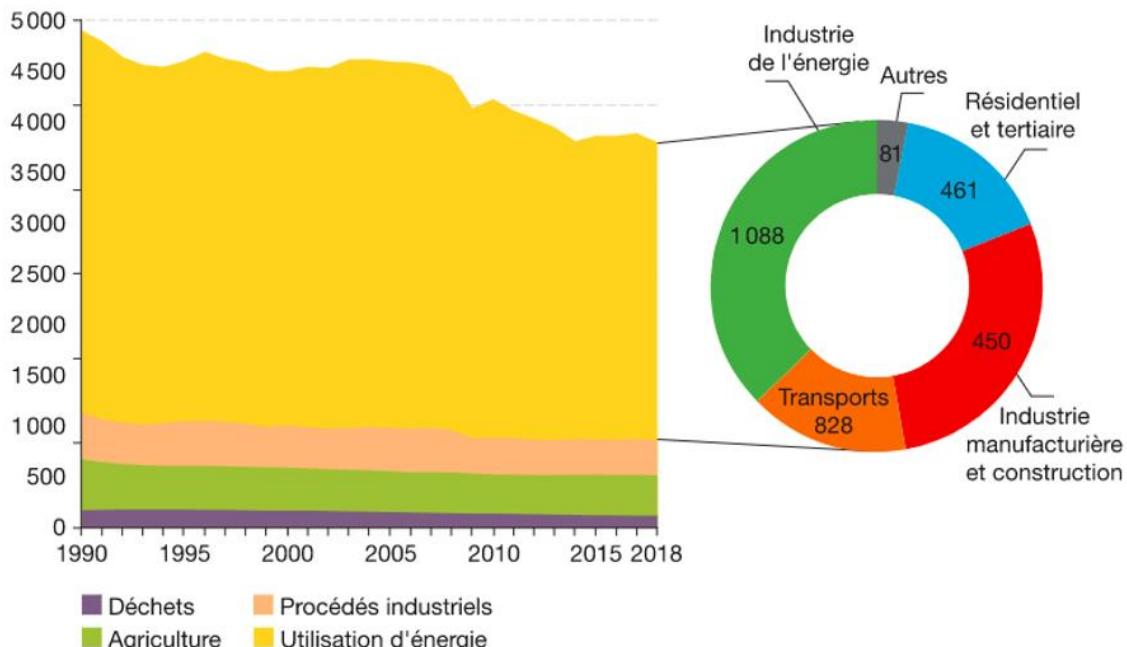


Figure 4 : Répartition, par source, des émissions de Gaz à Effet de Serre dans l'UE à 27 entre 1990 et 2018

Source : DataLab. (2021). *Répartition, par source, des émissions de Gaz à Effet de Serre dans l'UE à 27 entre 1990 et 2018.* Récupéré de <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat/>

En 2018, l'utilisation d'énergie reste la première source d'émissions de gaz à effet de serre (77,2 %), comme nous le montre le graphique ci-dessus, dont 28,9 % pour l'industrie de l'énergie, notamment la production d'électricité, suivie par les transports (22,0 %), l'agriculture (10,5 %) et les procédés industriels (9,1 %) (Ministère de la Transition Ecologique, 2020).

Dans les deux prochaines sections, nous allons détailler l'impact écologique de deux domaines en particulier : les matières premières et les technologies de l'information et de la communication.

1.5 Impact écologique des matières premières

Les matières premières ont un impact sur l'environnement. En effet, plus de la moitié des émissions de gaz à effet de serre sont aujourd'hui imputables aux activités de gestion des matériaux. L'utilisation de combustibles fossiles, l'extraction et la production de métaux (fer, aluminium, cuivre, zinc, plomb, nickel et manganèse) et de matériaux de construction (béton, sable et graviers) sont responsables de pollutions atmosphériques (air, eau, sols) et sont sources d'importantes concentrations de gaz à effet de serre. A titre d'exemple, le béton est aujourd'hui responsable de 9 % des émissions totales de gaz à effet de serre et 7 métaux (fer, aluminium, cuivre, zinc, plomb, nickel et manganèse) représentent 7 % de ces émissions (OECD, 2018).

La situation au niveau mondial est préoccupante. D'après un rapport de l'OCDE paru en 2018, l'utilisation des matières premières dans le monde devrait pratiquement doubler d'ici 2060, à la suite de l'augmentation de la demande mondiale de biens et services (OECD, 2018).



Figure 5 : Consommation des matières premières en 2017 et projection pour 2060

Source : OECD. (2018, octobre). *Global Material Resources Outlook to 2060 Economic drivers and environmental consequences*. Récupéré de <https://www.oecd.org/environment/waste/highlights-global-material-resources-outlook-to-2060.pdf>

Selon la projection de l'OCDE représentée dans le graphique ci-dessus, les émissions liées à la gestion des matériaux passeraient de 28 à 50 gigatonnes d'équivalent CO₂ d'ici 2060, tandis que l'ensemble des émissions atteindrait 75 gigatonnes d'équivalent CO₂ (OECD, 2018).

1.6 Impact écologique des technologies de l'information et de la communication (TIC)

Le développement des technologies en général s'appuie sur des supports numériques tels que les ordinateurs, les centres de données (datacenters) et bientôt le réseau de téléphonie mobile 5G. Or l'impact écologique du numérique contribue à alourdir le bilan environnemental global (GreenIt, 2019).

Les répercussions écologiques de l'extraction des matières premières et de leur transformation sont importantes. Ainsi, certaines ressources minières nécessaires aux technologies du numérique (comme le cobalt) s'épuisent ; leur transformation nécessite le recours à des produits chimiques qui provoquent des pollutions (exemple : les résidus miniers souvent rejetés dans les nappes phréatiques ou dans la mer), mettant à mal les écosystèmes, la qualité des sols et la santé des populations locales (GreenIt, 2019).

En outre, toutes les étapes du cycle de vie d'un équipement numérique nécessitent un recours à l'énergie fossile : l'extraction des minéraux, leur transformation en composantes électroniques, la distribution et la commercialisation de l'équipement, son utilisation et sa fin de vie. La production de l'électricité à chacune de ces étapes contribue largement à l'épuisement des énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz, uranium, etc.) et à l'émission de gaz à effet de serre qui contribuent au réchauffement climatique global (GreenIt, 2019).

Dans son rapport sur l'empreinte environnementale du numérique mondial, le chercheur Frédéric Bordage relève quelques chiffres particulièrement intéressants :

En 2019, l'univers numérique se compose de 34 milliards d'équipements : ordinateurs, écrans, smartphones, millions de kilomètres de câbles en cuivre et de fibres optiques, milliers de centres informatiques, milliards d'objets connectés, etc. Ces équipements sont répartis entre 4,1 milliards d'utilisateurs (Bordage, 2019).

La contribution du numérique à l'empreinte environnementale mondiale est loin d'être négligeable :

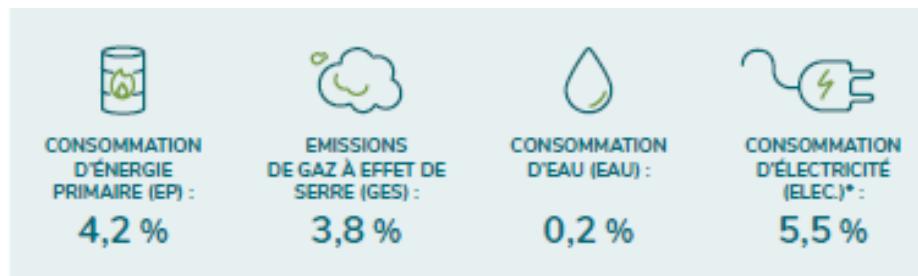


Figure 6 : Contribution du numérique à l'empreinte environnementale mondiale

Source : Frédéric Bordage. (2019, septembre). *Empreinte environnementale du numérique mondial*. Récupéré de https://www.greenit.fr/wp-content/uploads/2019/10/2019-10-GREENIT-etude_EENM-rapport-accessible.VF_.pdf

En raison de leur nombre (34 milliards dont 15 milliards d'objets connectés), ce sont les équipements des utilisateurs qui ont l'impact le plus important. La fabrication de ces équipements concentre 30 % du bilan énergétique global, 39 % des émissions de gaz à effet de serre, 74 % de la consommation d'eau et 76 % de la contribution à l'épuisement des ressources abiotiques. Et si nous tenons compte de la production de l'électricité consommée par ces équipements, ils totalisent de 59 % à 84 % des impacts globaux (GreenIt, 2019).

Les autres sources d'impact du numérique sont (par ordre décroissant d'importance) la consommation électrique du réseau, la consommation électrique des centres informatiques (datacenters qui regroupent 67 millions de serveurs), la fabrication des équipements réseau (1,3 milliard) et enfin la fabrication des équipements hébergés par les centres informatiques (GreenIt, 2019).

1.7 Un exemple : les datacenters

Les datacenters sont indispensables à toutes les activités numériques actuelles. Ce sont des bâtiments abritant les serveurs informatiques qui traitent et stockent toutes les données numériques. Or ces datacenters sont extrêmement énergivores, nécessitent un refroidissement constant et sont nombreux à fonctionner grâce à de l'électricité produite à partir de charbon ou de centrales nucléaires (Phosphoris, 2019).

Dans son rapport intitulé « Energy-efficient Cloud Computing Technologies and Policies for an Eco-friendly Cloud Market », la Commission européenne souligne quelques chiffres intéressants. Ces chiffres sont le résultat d'un condensé d'études sur le sujet.

Au niveau mondial, la Commission relève que les données relatives à l'évolution et au niveau de la demande énergétique des datacenters manquent de fiabilité. Ainsi, selon les études prises en compte, la demande énergétique annuelle se situait entre 200 et 800 TWh/an en 2018, et les datacenters représentaient 2 % à 5 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre (European Commission, 2020).

Les analyses au niveau européen sont davantage concordantes. Ainsi, la consommation énergétique des datacenters dans l'Union européenne est passée de 53,9 TWh/an à 76,8 TWh/an entre 2010 et 2018 (une hausse de 42 %), soit 2,7 % de la demande en électricité de l'Union européenne. Cette augmentation s'explique par la demande grandissante de services numériques, entraînant une augmentation significative de la capacité des datacenters. Cette augmentation est tellement forte qu'elle a plus que neutralisé les gains d'efficacité qui ont été réalisés au niveau du matériel, des logiciels et des infrastructures des datacenters (European Commission, 2020).

Il n'est pas possible de déterminer leur part exacte des émissions de gaz à effet de serre, car il n'existe pas de données fiables relatives aux émissions de CO₂ provenant de la consommation électrique utilisée dans les datacenters. Les experts estiment que les

datacenters représenteraient approximativement entre 0,4 % et 0,6 % des émissions de gaz à effet de serre de l’Union européenne en 2018 (European Commission, 2020).

La majorité des études s'accordent à dire que la consommation énergétique des datacenters au niveau européen poursuivra sa progression dans le futur, malgré les efforts réalisés par différents acteurs en matière d'efficacité énergétique : systèmes de refroidissement plus efficaces, réutilisation de la chaleur (par exemple pour le chauffage urbain), amélioration de l'efficacité des infrastructures et de l'indicateur d'efficacité énergétique. L'IoT, l'intelligence artificielle, les applications big data, le streaming vidéo et l'Edge Computing devraient entraîner une demande toujours plus forte de capacité de calcul et de stockage des datacenters. Selon les prévisions, la consommation énergétique des datacenters devrait continuer à augmenter par rapport à 2018, pour atteindre 92,6 TWh/an en 2025 et 98,5 TWh/a en 2030 (European Commission, 2020).

Le graphique ci-dessous représente l'évolution de la consommation énergétique des datacenters entre 2010 et 2030 (prévision), en pourcentage de la consommation électrique totale de 28 pays de l'Union européenne. Si cette tendance se confirme, la consommation énergétique des datacenters représenterait 3,2 % de la consommation européenne d'électricité. En 2010, elle ne représentait que 1,8 %.

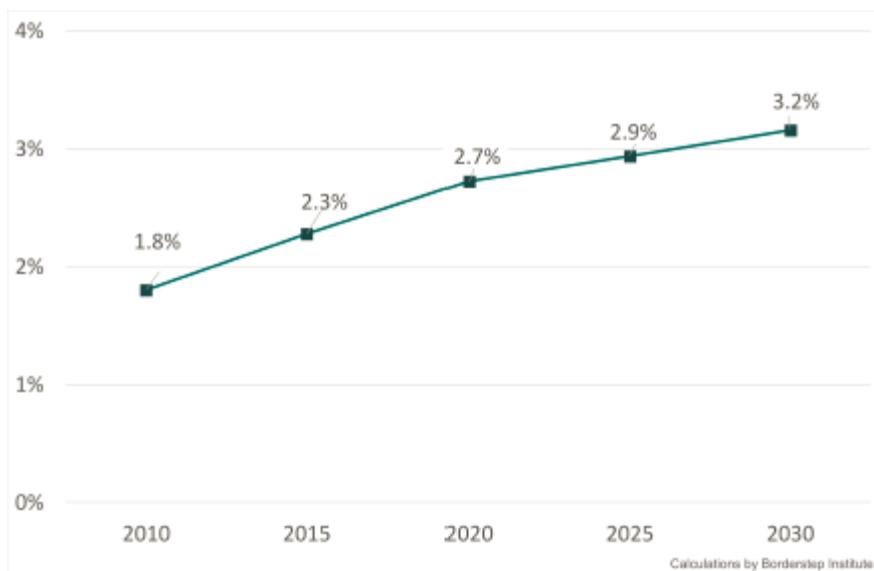


Figure 7 : Pourcentage de la consommation énergétique des datacenters en Europe sur la consommation électrique totale entre 2010 et 2030

Source : European Commission. (2019, 12 octobre). *Un pacte vert pour l'Europe. Commission européenne - European Commission*. Récupéré de https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_fr

Tournons-nous à présent vers le monde des entreprises. En effet, les entreprises sont amenées elles aussi à contribuer à l'effort global de lutte contre le réchauffement climatique en adoptant une stratégie de développement durable.

1.8 La neutralité carbone des entreprises

La seule définition scientifique de la neutralité carbone concerne la neutralité carbone planétaire : il s'agit de l'équilibre entre les émissions de CO₂ anthropiques et les absorptions de CO₂ anthropiques, à atteindre en 2050 (Parlement Européen, 2021). Les émissions anthropiques désignent les émissions de CO₂ causées par l'Homme (Geo.fr, 2018). Depuis la mise en œuvre de l'Accord de Paris, de plus en plus de pays, de régions et de villes participent concrètement à la lutte contre le réchauffement climatique en se fixant des objectifs de neutralité carbone. A ce jour, 190 pays ont ratifié l'Accord de Paris, avec le retour des Etats-Unis dans l'accord depuis l'investiture de Joe Biden en janvier 2021 (Garric, 2021).

Poussées par les Etats, les entreprises se voient elles aussi contraintes de mettre en œuvre des politiques volontaristes de réduction de leurs émissions de gaz à effet de serre, notamment de leurs émissions de CO₂.

Toute entreprise désireuse de mener une stratégie de développement durable doit d'abord établir son **bilan carbone**. En effet, le calcul de l'empreinte carbone permet de comprendre l'impact de l'entreprise sur le climat (Carbone4 & Net Zero Initiative, 2020).

Le bilan carbone permet d'analyser les émissions directes, c'est-à-dire celles qui sont liées à l'activité de l'entreprise, ainsi que les émissions indirectes, c'est-à-dire celles qui sont émises par les fournisseurs et par les clients (Agence de la transition écologique, s. d.) :

- L'utilisation d'énergie fossile dans l'entreprise
- Les procédés industriels hors combustion (par exemple une fuite de gaz réfrigérants)
- L'achat d'électricité ou de vapeur par l'entreprise
- Le transport des matières premières, des produits finis et le fret interne
- Le déplacement des travailleurs, des visiteurs, etc.
- La fabrication des matières premières et des matériaux utilisés pour l'activité (papier, plastique, acier, produit chimique, etc.)
- La fin de vie des déchets directs ou indirects (emballages, eaux usées, etc.)
- L'utilisation des bâtiments, des machines, etc. (immobilisations)
- Les services achetés
- L'utilisation des produits vendus (consommation d'énergie) et leur fin de vie (déchets)

Il revient à l'entreprise de choisir le cadre pertinent pour la collecte des données. Il existe trois périmètres différents (Agence de la transition écologique, s. d.) :

- Le périmètre 1, le plus limité, mesure uniquement les émissions directes de gaz à effet de serre liées à la combustion d'énergie dans le cadre de l'activité de l'entreprise (procédés de production, chauffage des bâtiments, etc.) et à la fuite de gaz réfrigérants (Molloy, 2020).
- Le périmètre 2 regroupe les émissions indirectes liées à la production d'énergie à l'intérieur de l'entreprise, sous forme d'électricité ou de chaleur/vapeur.

- Le périmètre 3 concerne toutes les autres émissions indirectes, telles que les déplacements des travailleurs et des clients, le fret, etc. Mais il comprend aussi toutes les émissions indirectes qui ne sont pas directement associées à la fabrication des produits et services, comme l'utilisation des produits par les clients, la gestion des déchets, le transport des marchandises, l'amortissement du matériel, etc. (Carbon Trust, 2020).

Le bilan carbone permet ainsi de calculer l'empreinte carbone de l'entreprise et d'établir un plan d'action concret permettant de concilier réduction des gaz à effet de serre et rentabilité (Mauguet, 2021).

Toutefois, la définition de la neutralité carbone des entreprises est pour le moins floue. Pour atteindre cet objectif, les entreprises adoptent généralement un processus en trois étapes : mesurer, réduire, compenser (Compte CO2, s. d.). Ainsi, une entreprise va mesurer ses émissions selon un périmètre qu'elle définit de manière unilatérale, par exemple en ne tenant compte que de ses émissions directes. Elle va ensuite essayer de les réduire au maximum, sur base d'actions qu'elle pourrait se fixer en fonction de sa capacité à les mener plutôt qu'en fonction des enjeux de neutralité carbone planétaire. Enfin, elle va compenser les émissions incompressibles, c'est-à-dire les émissions qui sont considérées comme ne pouvant être évitées par l'entreprise, en soutenant des projets en faveur du climat dans des pays en voie de développement (Mauguet, 2021). Ce principe est aujourd'hui largement remis en cause : utiliser les « crédits carbone » pour remplacer un effort qui n'a pas été accompli par l'entreprise et ainsi se donner en quelque sorte bonne conscience ne contribue pas à la neutralité globale (une entreprise dont les émissions augmentent chaque année mais qui compense ces émissions sera considérée comme « neutre en carbone »), et masque la dépendance de notre économie à des ressources parfois épuisables telles que les énergies fossiles (Carbone4 & Net Zero Initiative, 2020).

Afin d'avoir un réel impact sur le climat, chaque entreprise devrait plutôt se poser les questions suivantes : « Comment l'entreprise peut-elle contribuer à la neutralité carbone globale ? » « Dans quelle mesure l'activité-même de l'entreprise est-elle compatible avec un monde neutre en carbone ? » (Carbone4 & Net Zero Initiative, 2020).

1.9 Enjeux du développement durable pour les entreprises

Le développement durable constitue un défi majeur pour les entreprises.

Si les dégradations environnementales et sociales sont visibles et tangibles, il est de plus en plus largement admis que le modèle de développement de notre société en est l'une des causes principales. En effet, le modèle de croissance actuel des entreprises privilégie la recherche de maximisation du profit à court terme, ce qui entraîne des répercussions tant au niveau environnemental que social (Deloitte, 2019) :

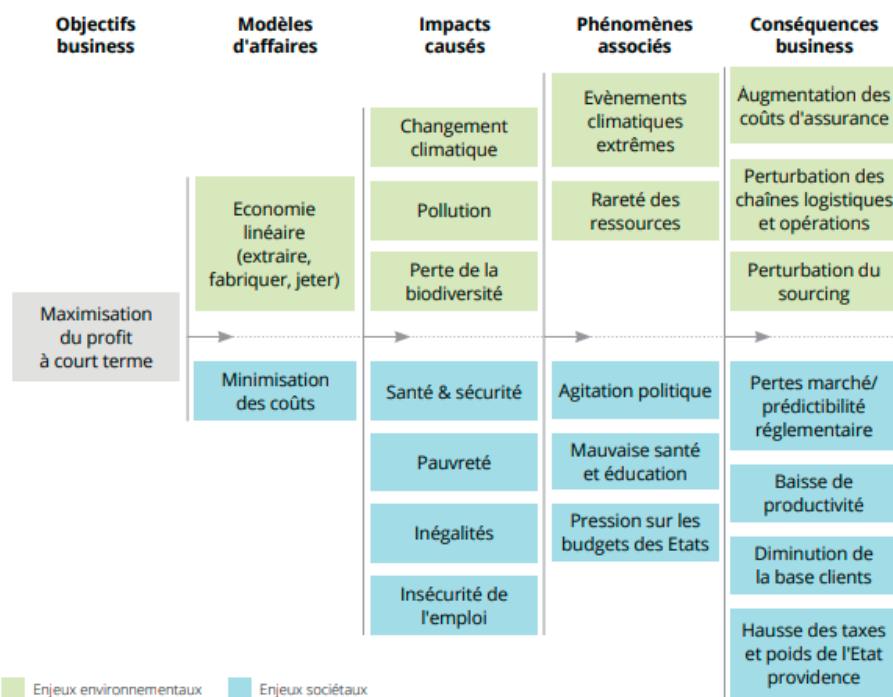


Figure 8 : Le cercle vicieux de la maximisation du profit à court terme

Source : Deloitte. (2019, octobre). *Mettre le développement durable au cœur de la stratégie d'entreprise*. Récupéré de https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/fr/Documents/sustainability-services/deloitte_developpement-durable-au-coeur-strategies-entreprises.pdf

De nombreuses entreprises ont déjà intégré une démarche de développement durable à leur stratégie globale, mais elle est souvent insuffisante pour répondre aux défis climatiques et environnementaux. L'entreprise doit aujourd'hui retrouver une fonction sociétale, elle doit créer de la valeur pour l'ensemble de ses parties prenantes (employés, clients, investisseurs) tout en réduisant les impacts négatifs de ses activités et en contribuant positivement à la société. C'est grâce à sa capacité à innover et à proposer des solutions répondant aux besoins de la société qu'elle a un rôle fondamental à jouer dans la transition environnementale et sociale (Deloitte, 2019).

La mise en œuvre de politiques de développement durable (et donc de réduction des émissions de gaz à effet de serre) constitue une **tâche de grande ampleur** pour les entreprises, car il s'agit de repenser leur raison d'être, leur modèle d'activité et d'intégrer le développement durable au cœur de leurs *business models*, gouvernance, processus d'innovation, culture d'entreprise, équipements et offres (Soistier, 2009).

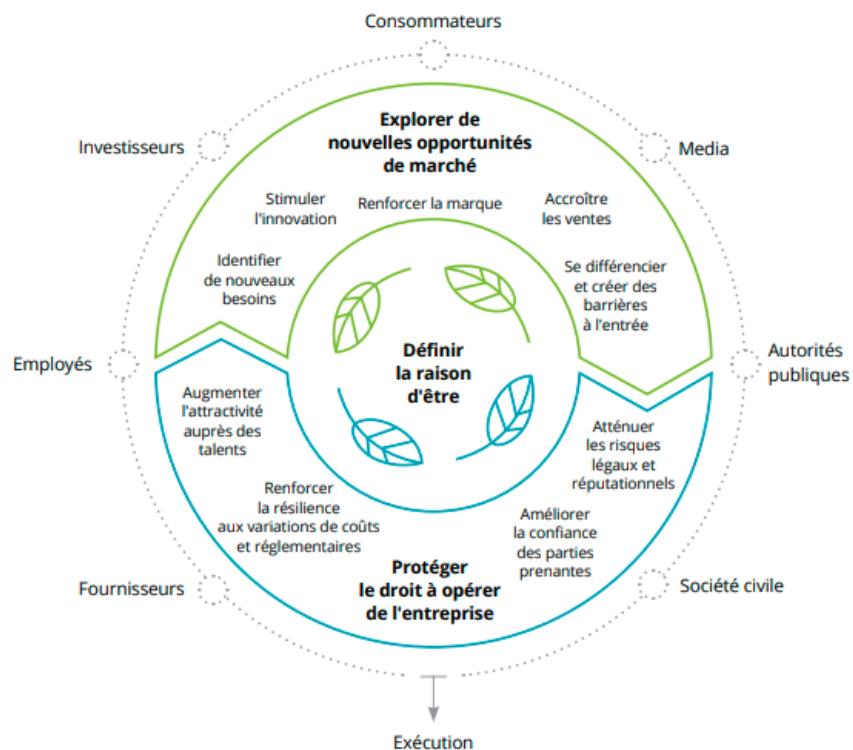


Figure 9 : Mettre le développement durable au cœur de la stratégie d'entreprise

Source : Deloitte. (2019, octobre). *Mettre le développement durable au cœur de la stratégie d'entreprise*. Récupéré de https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/fr/Documents/sustainability-services/deloitte_developpement-durable-au-coeur-strategies-entreprises.pdf

Outre les enjeux environnementaux indéniables, le développement durable constitue une **opportunité** et un **facteur de performance** pour l'entreprise. Intégrer le développement durable au cœur de sa stratégie permet de :

- réduire la consommation de ressources naturelles tout au long du processus d'approvisionnement et de production ;
- maîtriser ses coûts sans forcément nécessiter d'investissements importants (baisse des consommations d'énergie ; optimisation des processus de fabrication, stockage, commercialisation ; réduction des quantités de matières,...)
- se différencier de la concurrence et assurer la pérennité de l'activité en créant davantage de valeur ;

- stimuler la capacité de l'entreprise à innover, à se lancer dans l'écoconception, à optimiser l'offre de produits ;
- améliorer l'image de marque de l'entreprise vis-à-vis de ses clients, partenaires et investisseurs, de plus en plus exigeants sur l'origine des produits, sur l'empreinte carbone des activités, sur le respect des droits de l'homme ou sur la transparence de la chaîne d'approvisionnement ;
- mobiliser ses collaborateurs de plus en plus sensibilisés aux enjeux environnementaux et ainsi retenir ses talents (Soistier, 2009) (Deloitte, 2019).

L'enjeu actuel pour l'entreprise est de faire évoluer son organisation et sa culture pour pouvoir répondre aux défis environnementaux et sociaux. Mais pour cela, elle doit se poser les bonnes questions : Quels investissements dois-je faire pour assurer la pérennité de mon activité ? Quelle activité non durable dois-je abandonner ? Que choisir entre exploiter des business models qui font vivre l'entreprise mais qui sont voués à disparaître ou exploiter de nouveaux business models qui ne sont pas encore toujours rentables ? Mes objectifs de croissance sont-ils compatibles avec les objectifs de développement durable ? (Deloitte, 2019).

2. L'intelligence artificielle

2.1 Origine de l'intelligence artificielle

Bien que l'intelligence artificielle semble être un sujet très moderne et très novateur, la technologie existe déjà depuis longtemps. La présente section aborde les différentes étapes qui ont mené l'intelligence artificielle à ce qu'elle est aujourd'hui. Il est en effet important de savoir quelles ont été les évolutions dans l'utilisation de cette technologie au fur et à mesure des années.

L'histoire de l'intelligence artificielle remonte à l'**Antiquité**. De nombreux mythes mettaient alors en scène des objets de type humain. Les mythes impliquant le forgeron Héphaïstos, par exemple, décrivaient des serviteurs fonctionnant mécaniquement. Bien que le terme « robot » n'ait pas été inventé avant plusieurs siècles, ceci peut être considéré comme l'une des premières conceptualisations de l'idée.

Au **13^{ème siècle}**, le premier robot humanoïde, créé par l'inventeur arabe Al-Jazari en 1206 après J.-C., voit le jour (Elices, 2020).

Au **15^{ème siècle}**, Léonard de Vinci conçoit un « robot » (1495). Le Robot de Léonard de Vinci portait une armure médiévale et pouvait exécuter certains mouvements tels que plier ses bras, ouvrir sa bouche etc. Ce fut le premier « robot » conceptualisé (Salecha, 2020).

Au **17^{ème siècle}**, des machines capables d'effectuer des calculs numériques et arithmétiques sont inventées par Blaise Pascal et Sir Samuel Morland, et perfectionnées par Gottfried Wilhelm Leibniz (Harvard, 2020).

En **1770**, le Turc Mécanique est présenté comme le premier robot capable de jouer aux échecs seul, sans intervention humaine. Il a été construit à Vienne en 1770 par Wolfgang von Kempelen. La machine se composait d'un grand piédestal abritant une machinerie complexe, au sommet duquel se trouvait un échiquier. À cette boîte était attachée la moitié supérieure d'un homme vêtu d'une robe orientale et d'un turban. Chaque représentation commençait par une introduction élaborée visant à convaincre le public que le Turc était en réalité une machine. L'automate devait ensuite affronter un adversaire (Harvard, 2020).

En réalité, la machine n'était absolument pas un robot. C'était une illusion élaborée : la machine contenait un compartiment caché qui pouvait abriter une personne de taille moyenne. C'était donc un maître d'échecs qui se cachait dans le compartiment et qui faisait bouger le Turc afin de faire croire à l'existence d'un robot. La supercherie a fonctionné pendant plus de 50 ans avant de se faire démasquer (Josić, 2011).

Au **19^{ème siècle}**, la première machine programmable est inventée par Joseph-Marie Jacquard : le métier à tisser Jacquard.

En **1950**, le Test de Turing est créé par Alan M. Turing (1912-1954). Mr. Turing est un mathématicien anglais qui a formalisé les bases de ce qui deviendra par la suite l'ordinateur.

C'était aussi un visionnaire qui a imaginé avant tout le monde ce que pourrait être l'intelligence artificielle. Dans son célèbre article « Computing Machinery and Intelligence », il aborde un test (le test de Turing) qui vise à mettre en évidence l'existence d'un raisonnement intelligent. Lors du test, une personne réelle va converser avec un ordinateur et une autre personne réelle, sans savoir avec qui elle discute. L'ordinateur va essayer de se faire passer pour une personne réelle, et si la personne réelle n'arrive pas à différencier la personne réelle et l'ordinateur, alors l'ordinateur aura réussi le test de Turing. Cette approche était révolutionnaire à l'époque. Mr. Turing poursuit son article par la description des neuf objections qui verront le jour quand se posera la question « Est-ce que les machines peuvent penser ? ». Le test de Turing fut la première remise en question philosophique de l'intelligence artificielle (Le Blanc, 2014).

En **1956**, une conférence a lieu à l'Université de Dartmouth aux Etats-Unis. Vingt chercheurs, principalement des Américains, se sont réunis pendant 2 mois, afin de discuter et de structurer des domaines de recherches qui étaient à l'époque en pleine expansion. Il était notamment question de la cybernétique, du traitement complexe de l'information, des réseaux neuronaux formels, de la théorie des automates, des modèles de prise de décision etc. Cette conférence fut véritablement la base d'une nouvelle science, l'intelligence artificielle (Henno, 2017).

C'est sur base des écrits de Mr. Turing de 1950 que Joseph Weizenbaum, un informaticien allemand, développa en **1966** un programme nommé ELIZA, qui visait à tromper ses utilisateurs en leur faisant croire qu'ils avaient une conversation avec un véritable être humain. Il a donc conçu ELIZA afin d'imiter un thérapeute qui allait poser des questions ouvertes et qui répondait ensuite comme un humain.

ELIZA est considéré par beaucoup comme le premier « Chatbot » (agent conversationnel) dans l'histoire de l'informatique, même si le terme chatbot a été utilisé pour la première fois en 1994 par Michael Mauldin. Cependant, ELIZA ne ressemble en rien aux chatbots que nous connaissons tous aujourd'hui. ELIZA était capable de reconnaître des mots ou phrases clés et de reproduire une réponse à partir de réponses préprogrammées liées aux mots clés. Nous pourrions citer l'exemple suivant : si un humain dit : « Mon père aime manger des gâteaux », ELIZA va détecter un mot clé qui est dans son répertoire, c'est-à-dire le mot « père » et répondra par le biais d'une question ouverte préprogrammée du genre « Parlez-moi de votre famille ». Ceci aura pour but de donner l'illusion de dialoguer avec un être humain, alors qu'il s'agit d'un processus mécanisé (Salecha, 2020).

Au **début des années 1970**, James Lighthill, un mathématicien anglais, fut chargé de rédiger un rapport sur les recherches académiques menées à propos de l'intelligence artificielle au nom de la « Science Research Council ». C'est en **1973** que fut publié le rapport intitulé : « Artificial Intelligence : a general survey ». Les critiques émises par James Lighthill sur l'intelligence artificielle au Royaume-Uni ont été l'une des raisons du ralentissement des recherches sur l'intelligence artificielle. En effet, dans son rapport, James Lighthill a conclu que les recherches menées dans le domaine n'ont pas produit les résultats espérés (peut-être en

raison des attentes trop optimistes des chercheurs). Ceci a mené à un arrêt brutal du financement des recherches dans le domaine de l'intelligence artificielle dans la majorité des universités britanniques, à l'exception de deux. Cet arrêt des recherches au Royaume-Uni s'est propagé dans toute l'Europe. L'intelligence artificielle entra ainsi dans son premier « hiver » (Hendler, 2008).

L'intelligence artificielle sortira de son hibernation au **début des années 1980** avec le succès des systèmes experts qui entraînera une relance des investissements liés à cette nouvelle technologie. Les systèmes experts sont des ordinateurs capables de se comporter comme un expert, dans un certain domaine pour lequel ils sont formés. Grâce au succès de ces systèmes experts, la valorisation des investissements dans l'intelligence artificielle atteint 1 milliard de dollars, créant ainsi une spirale positive d'investissements de la part des différents pays (Siècle Digital, 2020).

Cette spirale positive fut à l'origine d'un véritable engouement au sujet de l'intelligence artificielle, de nombreuses entreprises communiquant leurs découvertes au monde entier. Cet engouement qui ne cessait d'augmenter a fait craindre aux chercheurs de revivre la même situation qu'en 1973, à savoir des résultats jugés décevants par rapport au niveau des attentes. La crainte de ne plus avoir le financement nécessaire pour poursuivre les recherches, pour la seule raison que les objectifs fixés étaient irréalisables, finira par devenir réalité. En **1984**, John McCarthy, un informaticien américain, a critiqué les systèmes experts parce qu'ils manquaient de bon sens et de connaissance de leurs propres limites. Ceci a notamment contribué à une nouvelle diminution des investissements dans le domaine et à une baisse de l'intérêt général pour l'intelligence artificielle, les attentes ne pouvant pas être satisfaites. Cette situation entraîna par la suite la faillite de nombreuses entreprises actives dans le secteur (Schuchmann, 2019).

En **1995**, Alta Vista est lancé. Il s'agit du premier moteur de recherche disponible pour tous. Il permettait de rechercher des sites web, des images et des vidéos. Il a définitivement fermé en 2013 avec l'essor de concurrents tels que Google (1ère Position, 2019).

En **1997**, un autre événement va symboliser le progrès réalisé dans le domaine de l'intelligence artificielle. C'est en effet le 11 mai 1997 que Deep Blue, un supercalculator développé par IBM, va battre pour la première fois le champion du monde d'échecs de l'époque, Garry Kasparov. Il était difficile pour Garry Kasparov de rivaliser avec Deep Blue, capable d'évaluer 200 millions de positions par seconde tandis que Kasparov était capable d'en évaluer 3...

Dans les **années 2000**, tout s'accélère pour l'intelligence artificielle : de nombreuses découvertes majeures feront entrer l'intelligence artificielle dans une nouvelle dimension et ouvriront le champ des possibles à l'utilisation de cette technologie. Les découvertes majeures sont reprises ci-dessous, par date :

- 2006 : Apprentissage profond (Deep Learning)
- 2009 : Découverte de la voix (Voice breakthrough)
- 2012 : Découverte de l'image (Image breakthrough)
- 2013 : Découverte du texte (Text breakthrough) (Renard, 2021)

Ces nouvelles découvertes vont rapidement révéler l'importance capitale des données dans le domaine de l'intelligence artificielle. Ceci va notamment constituer un tremplin pour quelques entreprises telles que Google et Facebook.

Au cours de l'histoire de l'humanité, de nombreuses inventions ont révolutionné notre façon de vivre. C'est notamment le cas de la vapeur en 1784, de l'électricité en 1870 et de la technologie de l'information en 1969. Nous pouvons maintenant parler de la **4^{ème} révolution**, l'intelligence artificielle, qui est aujourd'hui en marche (Schuchmann, 2019).

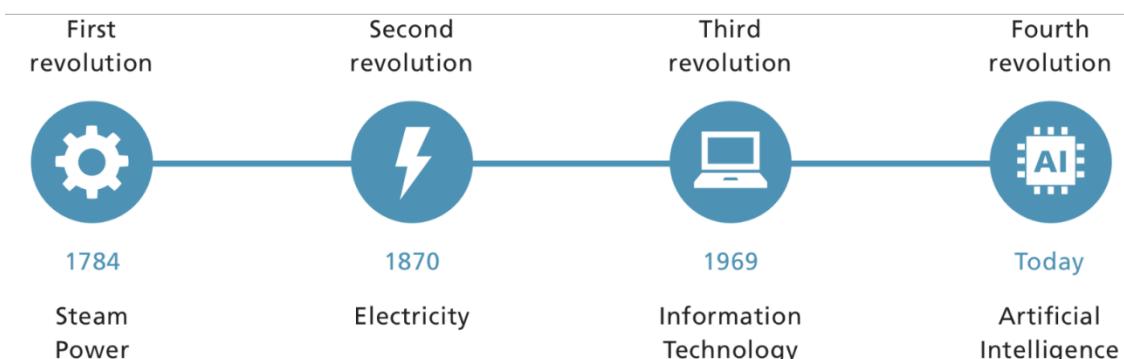


Figure 10 : Ligne du temps : les 4 révolutions

Source : Sarah Hardison. (2017, 13 décembre). *Ligne du temps : les 4 révolutions*. Récupéré de <https://medium.com/@sarah.hardison/creative-collaboration-with-ai-39f147d25934>

2.2 Qu'est-ce que l'intelligence artificielle ?

Après ce bref aperçu historique de l'intelligence artificielle, il est intéressant de s'attarder quelque peu sur ce qu'est véritablement l'intelligence artificielle. Au vu des nombreuses recherches menées sur le sujet et du nombre incalculable de définitions différentes, nous pouvons affirmer qu'**il n'existe pas une définition unique de l'intelligence artificielle**. Etant donné que la technologie évolue tellement rapidement, les définitions évoluent au même rythme que la technologie.

Un rapport d'Harvard a condensé différentes définitions existantes pour en formuler une nouvelle qui se veut, selon les chercheurs d'Harvard, la plus proche de la réalité. Le rapport définit l'intelligence artificielle de la manière suivante : « les systèmes d'intelligence artificielle (IA) sont des systèmes logiciels (et éventuellement matériels) conçus par des humains qui, étant donné un objectif complexe, agissent dans la dimension physique ou numérique physique ou numérique en percevant leur environnement par l'acquisition de données, en interprétant les données collectées, structurées ou non, en raisonnant sur les connaissances, ou en traitant les informations, dérivées de ces données et en décidant de la ou des meilleures actions à entreprendre pour atteindre l'objectif donné. Les systèmes d'IA peuvent soit utiliser des règles symboliques, soit apprendre un modèle numérique. Ils peuvent également adapter leur comportement en analysant comment l'environnement est affecté par leurs actions précédentes. » (Harvard Library, 2020). Cette définition risque bien évidemment de changer dans les prochaines années avec l'apparition de nouveaux modes d'utilisation de cette technologie.

L'intelligence artificielle permet donc aux machines d'apprendre sur base de données fournies, des expériences passées, et d'effectuer des tâches qui peuvent être réalisées par des humains. Lorsqu'un humain doit prendre une décision, un nombre infini de connexions se font dans son cerveau afin de prendre la décision la plus adéquate qui prend en compte une multitude de facteurs différents, que ce soit l'environnement dans lequel il se trouve, ses expériences passées, etc. Le même principe pourrait s'appliquer à l'intelligence artificielle. Grâce à celle-ci, le raisonnement humain peut être répliqué à travers un ordinateur. L'ordinateur va devoir prendre la meilleure décision sur base de données qui sont en quelque sorte la mémoire de l'être humain (European Parliament, 2021).

L'intelligence artificielle est donc basée en partie sur des données disponibles. Mais toutes les données disponibles ne sont pas pertinentes ou ne sont pas exploitables. C'est pourquoi il existe le data mining ou en français, **l'extraction de données**. Mais qu'entendons-nous par extraction de données ? Il s'agit de l'extraction non triviale d'informations implicites, précédemment inconnues et potentiellement utiles, à partir de données (Rampe, 2021). En d'autres termes, c'est l'extraction de données et d'informations, d'une quantité de données, afin d'y trouver de la connaissance et de rendre cette connaissance utile à l'entreprise.

Etant donné le très grand nombre d'applications possibles de l'intelligence artificielle, ce ne sont pas les mêmes technologies qui sont utilisées pour chaque application. Une voiture autonome ne va pas utiliser la même sorte d'intelligence artificielle qu'un ordinateur faisant des prédictions analytiques. Il existe donc **4 grandes sous-technologies**, représentées dans le schéma ci-dessous : l'apprentissage machine (Machine Learning), le traitement du langage naturel (Natural Language Processing), la vision par ordinateur (Computer Vision) et l'analyse prédictive (Predictive Analysis). Dans un souci de compréhension, la terminologie anglaise sera ici systématiquement utilisée (European Parliament, 2021).

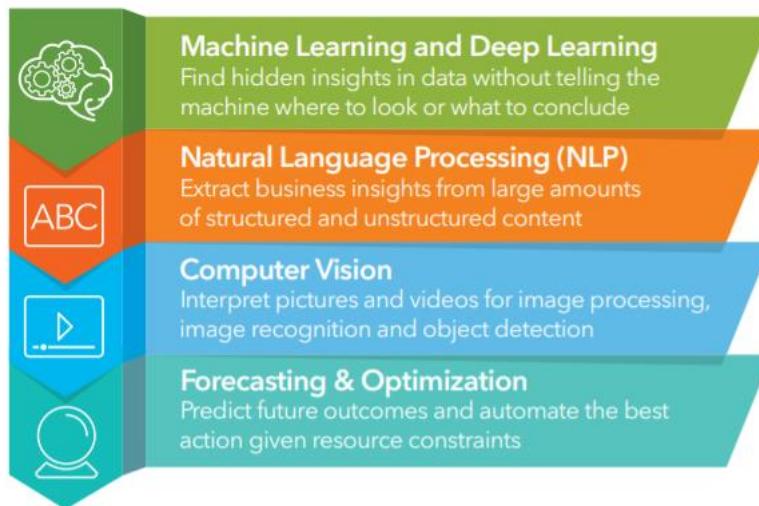


Figure 11 : Les sous-technologies de l'intelligence artificielle

Source: SAS. (2018). *What is powering AI*. Récupéré de https://www.sas.com/content/dam/SAS/en_us/doc/infographic/artificial-intelligence-109282.pdf

Analysons un peu plus en détail chacune des 4 sous-technologies de l'intelligence artificielle.

2.2.1 Machine Learning

Le Machine Learning est une des applications de l'intelligence artificielle qui rend les systèmes capables d'apprendre automatiquement et de s'améliorer et s'adapter à partir de l'expérience sans être explicitement programmés. L'apprentissage automatique est focalisé sur le développement de systèmes informatiques qui ont la capacité à accéder à des données et à les réutiliser afin d'apprendre de manière autonome (SAS, s. d.-a).

Le processus d'apprentissage commence par des observations ou des données, telles que des exemples, une expérience directe ou des instructions, afin de rechercher des modèles dans les données et de prendre de meilleures décisions à l'avenir sur la base des exemples que nous fournissons. L'objectif principal est de permettre aux ordinateurs d'apprendre automatiquement sans intervention ou assistance humaine et d'ajuster leurs actions en conséquence (Education & IBM, 2021).

En utilisant les algorithmes classiques de l'apprentissage automatique, le texte est considéré comme une séquence de mots-clés ; au contraire, une approche basée sur l'analyse sémantique imite la capacité humaine à comprendre le sens d'un texte (MathWorks, 2020).

Le Machine Learning peut à son tour être divisé en 3 catégories : Deep Learning, Unsupervised Machine Learning et Supervised Machine Learning (SAS, s. d.-a).

L'apprentissage profond (Deep Learning) est une sous-catégorie de l'intelligence artificielle et est utilisé afin de pouvoir faire des prédictions à partir de données disponibles (Petersson, 2020).

Les algorithmes **d'apprentissage automatique supervisé** (Supervised Machine Learning) peuvent appliquer ce qui a été appris dans le passé à de nouvelles données en utilisant des exemples étiquetés pour prédire des événements futurs. En partant de l'analyse d'un ensemble de données d'apprentissage connues, l'algorithme d'apprentissage produit une fonction déduite pour faire des prédictions sur les valeurs de sortie (Microsoft, 2021). Le système est capable de fournir des cibles pour toute nouvelle entrée après un entraînement suffisant. L'algorithme d'apprentissage peut également comparer sa sortie avec la sortie correcte et prévue et trouver des erreurs afin de modifier le modèle en conséquence (Education & IBM, 2021).

En revanche, les algorithmes **d'apprentissage automatique non supervisé** (Unsupervised Machine Learning) sont utilisés lorsque les informations utilisées pour l'apprentissage ne sont ni classées ni étiquetées. L'apprentissage non supervisé étudie la manière dont les systèmes peuvent déduire une fonction pour décrire une structure cachée à partir de données non étiquetées (Microsoft, 2021). Le système ne détermine pas la bonne sortie, mais il explore les données et peut déduire des ensembles de données pour décrire des structures cachées à partir de données non étiquetées.

2.2.2 Natural Language Processing

Tout être humain parle et écrit dans une langue spécifique, que ce soit l'anglais, le français ou le japonais. Mais dans le cas des ordinateurs c'est différent. Le langage d'un ordinateur est uniquement composé de 0 et de 1. Ce langage est compris par une minorité de la population, pourtant chaque être humain est aujourd'hui capable de communiquer avec son téléphone ou avec son assistant personnel virtuel tel que Alexa (Amazon) ou Google Home (Google). Nous sommes à présent en mesure de poser une question à une machine et d'avoir une réponse orale de la part de nos assistants virtuels. Cette prouesse est rendue possible grâce au Natural Language Processing notamment, mais aussi au Deep Learning et au Machine Learning (SAS, s. d.-d).

Les ordinateurs ont des programmes pour lire et des microphones pour recueillir l'audio. Et de la même manière que les humains ont un cerveau pour traiter ces données, les ordinateurs

ont un programme pour traiter leurs données respectives. À un moment donné du traitement, l'entrée est convertie en un code que l'ordinateur peut comprendre.

Le traitement du langage naturel comporte deux phases principales : le prétraitement des données et le développement des algorithmes (IBM, 2021).

Le **prétraitement des données** consiste à préparer et à « nettoyer » les données textuelles pour que les machines puissent les analyser. Le prétraitement met les données sous une forme exploitable et met en évidence les caractéristiques du texte avec lesquelles un algorithme peut travailler (Lutkevich & Burns, 2021).

Une fois que les données ont été prétraitées, un algorithme est développé pour les traiter. Il existe de nombreux **algorithmes de traitement du langage naturel** mais deux grands types sont couramment utilisés :

- Le système basé sur des règles. Ce système utilise des règles linguistiques soigneusement conçues. Cette approche a été utilisée dès le début du développement du traitement du langage naturel et est toujours utilisée aujourd'hui (IBM, 2021).
- Le système basé sur l'apprentissage automatique. Les algorithmes d'apprentissage automatique utilisent des méthodes statistiques. Ils apprennent à effectuer des tâches sur la base des données d'entraînement qui leur sont fournies et ajustent leurs méthodes au fur et à mesure que d'autres données sont traitées. Grâce à une combinaison d'apprentissage automatique, d'apprentissage profond et de réseaux neuronaux, les algorithmes de traitement du langage naturel affinent leurs propres règles par le biais de traitements et d'apprentissages répétés (Lutkevich & Burns, 2021).

Les entreprises utilisent des quantités massives de données non structurées et lourdes en texte et ont besoin d'un moyen de les traiter efficacement. Une grande partie des informations créées en ligne et stockées dans des bases de données est constituée de langage humain naturel et jusqu'à récemment, les entreprises ne pouvaient pas analyser efficacement ces données.

Le Natural Language Processing est déjà présent dans de nombreuses applications disponibles au grand public, que ce soit la correction orthographique ou la classification de texte en fonction du degré de confidentialité (SAS, s. d.-d.).

2.2.3 Computer Vision

La vision par ordinateur est un domaine de l'intelligence artificielle qui permet aux ordinateurs et aux systèmes de tirer des informations significatives à partir d'images numériques, de vidéos et d'autres entrées visuelles, et de prendre des mesures ou de faire des recommandations sur la base de ces informations. Si l'intelligence artificielle permet aux ordinateurs de penser, la vision par ordinateur leur permet de voir, d'observer et de comprendre (IBM, s. d.).

La vision par ordinateur fonctionne à peu près comme la vision humaine, si ce n'est que les humains ont une longueur d'avance. La vision humaine a l'avantage de pouvoir s'entraîner grâce à des vies entières de contexte, à distinguer les objets, à déterminer leur distance, à savoir s'ils sont en mouvement et si quelque chose ne va pas dans une image (IBM, s. d.).

La vision par ordinateur forme des machines à exécuter ces fonctions, mais elle doit le faire en beaucoup moins de temps avec des caméras, des données et des algorithmes plutôt qu'avec des rétines, des nerfs optiques et un cortex visuel. Comme un système formé à l'inspection de produits ou à la surveillance d'un actif de production peut analyser des milliers de produits ou de processus par minute, en remarquant des défauts ou des problèmes imperceptibles, il peut rapidement dépasser les capacités humaines (Dickson, 2019).

La vision par ordinateur est utilisée dans des secteurs allant de l'énergie et des services publics à la fabrication et à l'automobile, et le marché continue de croître. Il devrait atteindre 51,3 milliards USD d'ici 2026 (Intrado GlobeNewswire, 2021).

2.2.4 Predictive Analysis

L'analyse prédictive est une branche de l'analyse avancée qui permet de faire des prédictions sur les résultats futurs en utilisant des données historiques combinées à la modélisation statistique, aux techniques d'exploration de données et à l'apprentissage automatique. Les entreprises utilisent l'analyse prédictive pour trouver des modèles dans ces données afin d'identifier les risques et les opportunités (Predictive Analytics Today, 2021).

L'analyse prédictive est souvent associée au big data et à la science des données. Aujourd'hui, les entreprises sont noyées sous les données qui résident dans des bases de données transactionnelles, des fichiers journaux d'équipements, des images, des vidéos, des capteurs ou d'autres sources de données (MathWorks, s. d.). Pour tirer des enseignements de ces données, les « data scientists » (scientifiques des données) utilisent des algorithmes d'apprentissage profond et d'apprentissage automatique pour trouver des modèles et faire des prédictions sur des événements futurs. Ces algorithmes comprennent la régression linéaire et non linéaire, les réseaux neuronaux, les machines à vecteurs de support et les arbres de décision. Les enseignements tirés de l'analyse prédictive peuvent ensuite être exploités dans le cadre de l'analyse prescriptive afin d'orienter les actions en fonction des prévisions (Edwards, 2019).

L'analyse prédictive permet de multiples utilisations, nous en mentionnerons trois parmi les plus importantes à titre d'exemple.

Il y a tout d'abord la **détection de fraudes**. La combinaison de plusieurs méthodes d'analyse va permettre de déceler un « patent » et ainsi de prévenir les potentielles fraudes. La Cybersécurité est de plus en plus souvent évoquée, notamment les fuites de données d'utilisateurs de Facebook par exemple, et l'analyse prédictive peut aider à lutter contre ce type de fraudes.

L'analyse prédictive peut aussi être utilisée lors de **campagnes marketing** afin de pouvoir prédire la réaction des clients face à la promotion de tel produit ou service. Les campagnes sont donc plus ciblées et permettent aux entreprises d'attirer les clients les plus intéressés et de les fidéliser, au bénéfice de la rentabilité de l'entreprise (Predictive Analytics Today, 2021).

L'analyse prédictive est également présente dans le **secteur du tourisme**. En effet, les compagnies aériennes basent les prix des billets en fonction de prédictions du taux de réservations. Les hôtels utilisent aussi l'analyse prédictive pour maximiser le taux d'occupation de leurs chambres - et leurs revenus par la même occasion. L'analyse prédictive permet donc aux entreprises de fonctionner plus efficacement.

2.3 L'importance du big data dans l'intelligence artificielle

La pyramide de Monica Rogati représente la hiérarchie des besoins en science des données en fonction de leur importance. Tout en bas de la pyramide se situe la collecte des données, suivie du stockage des données, de la transformation de ces données en données exploitables, de l'agrégation de ces données et enfin de l'optimisation des données (Rogati, 2017). Toutes ces étapes sont nécessaires afin de pouvoir utiliser les outils d'intelligence artificielle. La qualité de toute application de l'intelligence artificielle et du Deep Learning dépend de la qualité des données.

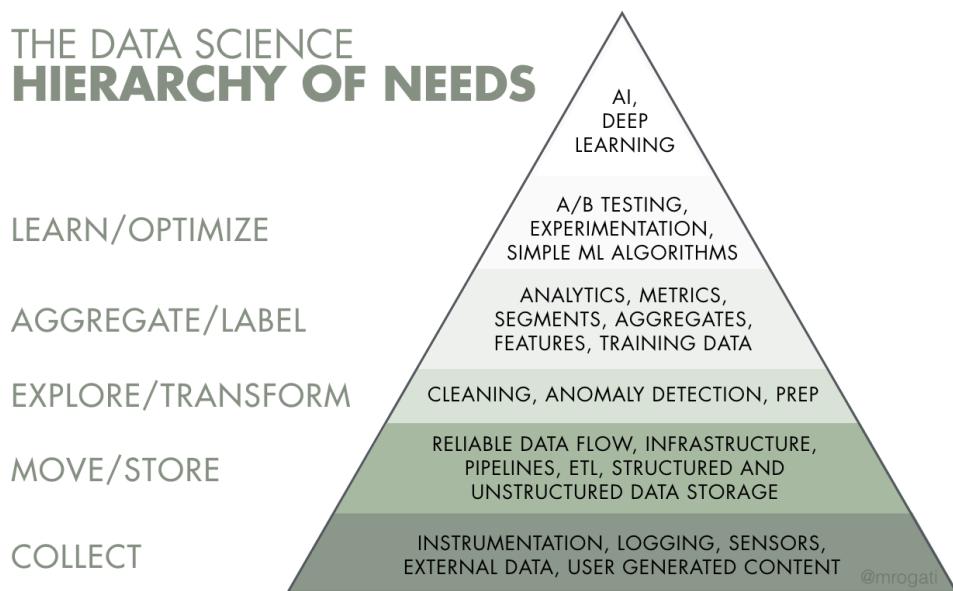


Figure 12 : La pyramide des besoins pour la science des données

Source: Monica Rogati. (2017, 12 juin). *The data science hierarchy of needs*. Récupéré de <https://hackernoon.com/the-ai-hierarchy-of-needs-18f111fcc007>

Cette pyramide montre l'importance des données dans l'intelligence artificielle, des données de qualité et exploitables sans trop de transformation. Heureusement, le nombre de données disponibles ne cesse d'augmenter aujourd'hui. Presque toutes nos activités génèrent des données, qui peuvent par la suite être utilisées dans diverses applications de l'intelligence artificielle (SAS, s. d.-b.).

Cependant, toutes ces données ne sont pas exploitables et un bon nombre d'entre elles doivent être « nettoyées » de toutes les impuretés qui peuvent être présentes (ThinkwithGoogle, 2020).

En effet, il est important de pouvoir faire un tri dans les milliards de téraoctets de données créées chaque année à travers le monde. Selon une étude de Statista datant de 2019, 2 zettaoctets de données furent créés en 2010. En 2015, ce chiffre s'élevait à 12 zettaoctets et la croissance ne cesse de s'accentuer (Statista, 2021).

Figure 1 - Annual Size of the Global Datasphere

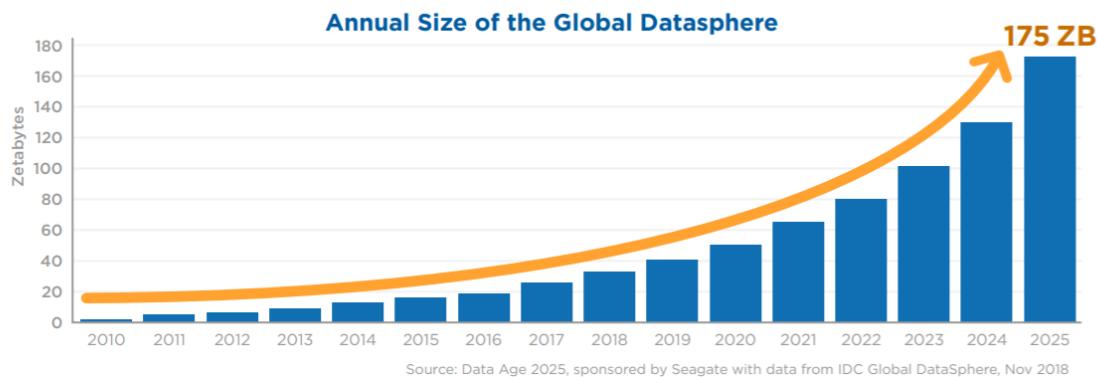


Figure 13 : Evolution de la taille annuelle de la datasphère mondiale

Source : Statista. (2021, 5 février). *Global datasphere real time data total size worldwide from 2010 to 2025*. Récupéré de <https://www.statista.com/statistics/949144/worldwide-global-datasphere-real-time-data-annual-size/#:~:text=Real%2Dtime%20data%20makes%20up,five%20zettabytes%20to%2051%20zettabytes>.

Mais qu'en est-il du futur ? Est-ce que l'augmentation des données atteindra sa limite, comme la loi de Moore ? Pour rappel, la loi de Moore est une loi physique qui prédit le doublement de la puissance de calcul des ordinateurs tous les 18 mois. La loi de Moore a cependant atteint sa limite en termes de capacité physique (JDN, 2019). En effet, il est aujourd'hui difficile de doubler la puissance de calcul des ordinateurs à cause de la miniaturisation des processeurs. La puissance de calcul avait l'habitude de se multiplier par 10 tous les 5 ans et de se multiplier par 100 tous les 10 ans. Mais depuis quelques années, la loi de Moore n'augmente plus que de quelques pourcents par an. Nous avons donc atteint la limite de la loi de Moore (Futura Sciences, s. d.).

En sera-t-il de même pour les données ? Rien n'est moins sûr.

Depuis plus de 10 ans, les données mondiales n'ont cessé de croître de manière exponentielle et elles n'ont montré aucun signe de ralentissement. Elles se développent via l'internet, notamment les réseaux sociaux, les requêtes de recherche sur le web, les messages texte et les fichiers multimédias. Un volume gigantesque de données est également créé par les appareils et capteurs IoT. Ils sont les principaux moteurs de la croissance du marché mondial du big data, qui représente déjà 49 milliards de dollars (Statista, 2021).

La majorité des experts en big data s'accordent à dire que la quantité de données générées va continuer à croître de manière exponentielle à l'avenir. Dans son rapport Data Age 2025 pour Seagate, IDC prévoit que la datasphère mondiale atteindra 175 zettaoctets en 2025. Il est parfois compliqué de se rendre compte de ce que représentent réellement 175 zettaoctets. Une petite comparaison s'impose. Prenons le plus gros disque dur actuellement disponible, qui a une capacité de 17 téraoctets ; 12,5 milliards de disques durs seront nécessaires afin de stocker toutes les données produites en 1 an. Il s'agit donc d'une quantité astronomique de données (i-Scoop, 2021).

2.4 Enjeux économiques et sociaux de l'intelligence artificielle

Bien évidemment, l'intelligence artificielle vise à répondre à des besoins existants et aux enjeux futurs de la société. Le développement de l'intelligence artificielle va transformer le monde du travail (Stahl, 2021). En effet, dans les prochaines années, nous verrons croître le nombre de systèmes utilisant de l'intelligence artificielle dans l'environnement de travail mais pas uniquement. La collaboration humains-machines va aussi s'intensifier et nous aurons de plus en plus recours à l'analyse prédictive dans de nombreux secteurs industriels, notamment dans l'utilisation des machines appelées à réaliser des tâches qui peuvent être considérées comme « répétitives » et ainsi remplacer l'homme dans certaines activités (Zacklad, 2018). Cependant, toutes les activités humaines ne pourront pas être remplacées par les machines et l'intelligence artificielle ; tous les emplois ne seront donc pas impactés de la même façon.

La majorité des études soulignent que l'intelligence artificielle aura un **impact économique important**. Une étude lancée par la société de conseil Accenture portant sur 12 économies développées, qui génèrent ensemble plus de 0,5 % de la production économique mondiale, prévoit que d'ici 2035, l'intelligence artificielle pourrait doubler les taux annuels de croissance économique mondiale. L'intelligence artificielle sera le moteur de cette croissance de plusieurs manières différentes (Accenture, 2016).

Tout d'abord, elle entraînera une forte augmentation de la productivité du travail (jusqu'à 40 %) grâce à des technologies innovantes permettant une gestion plus efficace du temps de travail (Accenture, 2016). En effet, l'intelligence artificielle entraînera des gains de productivité à court terme, sur la base de l'automatisation des tâches de routine, ce qui devrait affecter les secteurs à forte intensité de capital tels que l'industrie manufacturière et les transports. Cela inclura une utilisation étendue de technologies telles que les robots et les véhicules autonomes (PwC, 2017).

La productivité s'améliorera également du fait que les entreprises complèteront et aideront leur main-d'œuvre existante grâce aux technologies de l'intelligence artificielle. Cela nécessitera d'investir dans des logiciels, des systèmes et des machines basés sur l'intelligence assistée, autonome et augmentée ; la main-d'œuvre sera ainsi en mesure d'accomplir ses tâches mieux et plus efficacement, mais aussi de libérer du temps pour se concentrer sur des

activités plus stimulantes et à plus grande valeur ajoutée. L'automatisation supprimerait en partie le besoin de main-d'œuvre, ce qui entraînerait des gains de productivité globaux (PwC, 2017).

L'intelligence artificielle créera ainsi une nouvelle main-d'œuvre virtuelle - décrite comme une « automatisation intelligente » dans le rapport - capable de résoudre des problèmes et d'apprendre par elle-même (Accenture, 2016).

Enfin, l'économie bénéficiera également du déploiement de l'innovation, qui touchera différents secteurs et créera de nouvelles sources de revenus. Une étude de PricewaterhouseCoopers (PwC) estime que le PIB mondial pourrait augmenter de 14 % (soit l'équivalent de 15 700 milliards de dollars) d'ici à 2030 en raison de l'accélération du développement et de l'adoption de l'intelligence artificielle. Le rapport prévoit que la prochaine vague de la révolution numérique sera déclenchée grâce aux données générées par l'Internet des Objets (IoT), qui seront probablement plusieurs fois supérieures à celles générées par l'actuel « internet des personnes ». L'Internet des Objets stimulera la normalisation et, par conséquent, l'automatisation, tout en améliorant la personnalisation des produits et des services (PwC, 2017).

2.5 L'intelligence artificielle au sein des entreprises

L'utilisation de l'intelligence artificielle ne cesse de se développer, tout comme ses applications. Le potentiel pour les prochaines années est loin d'être négligeable. Le graphique de Markets & Markets Analysis (Gaidya, 2018) représente le marché de l'intelligence artificielle dans les différents secteurs en milliards de dollars pour 2018 et de manière prévisionnelle pour 2025. Le graphique montre que l'augmentation attendue est significative, ce qui résulterait donc en une augmentation de l'adoption de l'utilisation de l'intelligence artificielle par les entreprises.

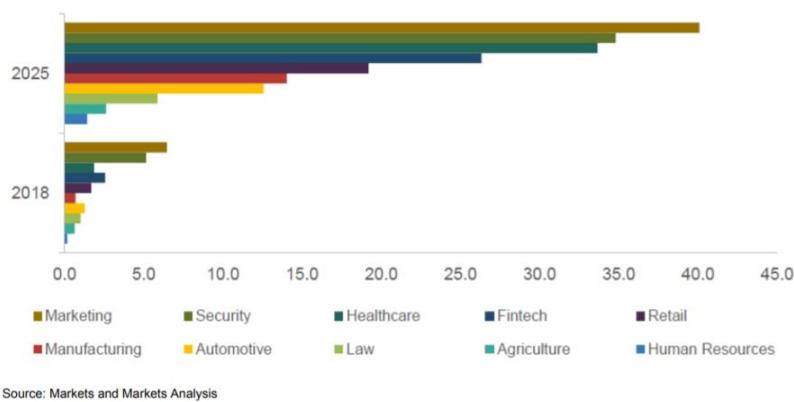


Figure 14 : Evolution de l'utilisation de l'intelligence artificielle dans les différents secteurs

Source: Vikas Gaidya. (2018). *Organizations to Leverage Artificial Intelligence to Transform their Businesses*. Récupéré de <https://doi.org/10.4172/2167-0234.1000327>

Cependant, l'utilisation de l'intelligence artificielle par les entreprises dépendra de certains facteurs tels que les valeurs et visions de l'entreprise, ainsi que de la « maturité » de l'entreprise à implémenter un système d'intelligence artificielle.

Implémenter un nouveau processus ou une nouvelle technologie représente toujours un coût pour les entreprises (Segone, 2021). C'est aussi le cas pour l'intelligence artificielle. Il est donc important pour une entreprise d'être prête à investir pleinement dans la technologie afin de pouvoir en tirer le maximum.

Plusieurs éléments doivent être pris en compte lors de l'implémentation d'un système d'intelligence artificielle. Il y a tout d'abord le coût humain. En effet, même s'il est désormais possible d'externaliser les services, la majorité des entreprises vont devoir recruter et former des équipes de « data scientists » afin d'internaliser les compétences du futur (Coche, 2019).

Un autre élément crucial est la disponibilité des données. Les entreprises qui souhaitent se lancer dans l'utilisation de l'intelligence artificielle doivent pouvoir garantir une disponibilité constante des données, comme nous l'avons vu précédemment.

La mise en place d'un système d'intelligence artificielle est donc un processus long et nécessaire pour pouvoir bénéficier au maximum des compétences de l'intelligence artificielle.

2.6 Impact éthique de l'intelligence artificielle

Pour commencer, il est important de préciser que l'intelligence artificielle n'est qu'un outil qui permet d'avoir un impact sur la société, et que par conséquent, ce sont les objectifs poursuivis lors de l'utilisation de l'intelligence artificielle qui vont déterminer la nature de l'impact sur la société. Cependant, l'évolution semble aller dans le bon sens : grâce à l'importance accrue de l'intelligence artificielle dans le monde, en raison notamment d'investissements massifs dans le secteur, de nombreuses grosses multinationales, qui ont une empreinte carbone élevée, commencent à utiliser l'intelligence artificielle afin de réduire leur empreinte carbone (European Parliament, 2020).

Parmi les multinationales utilisant l'intelligence artificielle pour être plus en phase avec un avenir durable, nous pouvons citer les exemples suivants :

- IBM utilise l'intelligence artificielle pour améliorer les prévisions météorologiques, ce qui rend ses prévisions 30 % plus précises. Cela aide les entreprises du secteur des énergies renouvelables à mieux gérer leurs usines, à maximiser la production d'énergie renouvelable et à réduire les émissions de carbone (Deschamps, 2020).
- Xcel Energy, une entreprise américaine de production d'électricité, utilise l'intelligence artificielle pour mieux prédire les modèles de consommation d'énergie et adapter ses systèmes d'exploitation, ce qui lui permet d'améliorer considérablement son efficacité ($\pm 20\%$) (Power Technology, 2020).
- Carbon Tracker, un groupe de réflexion sur la défense du climat, utilise l'intelligence artificielle pour suivre les émissions des usines de charbon à l'aide d'images satellites. Les données satellitaires permettent d'orienter les investissements vers des projets à faible empreinte écologique (Benjamin, 2019).

L'intelligence artificielle peut avoir un **réel impact sur les défis environnementaux mondiaux**.

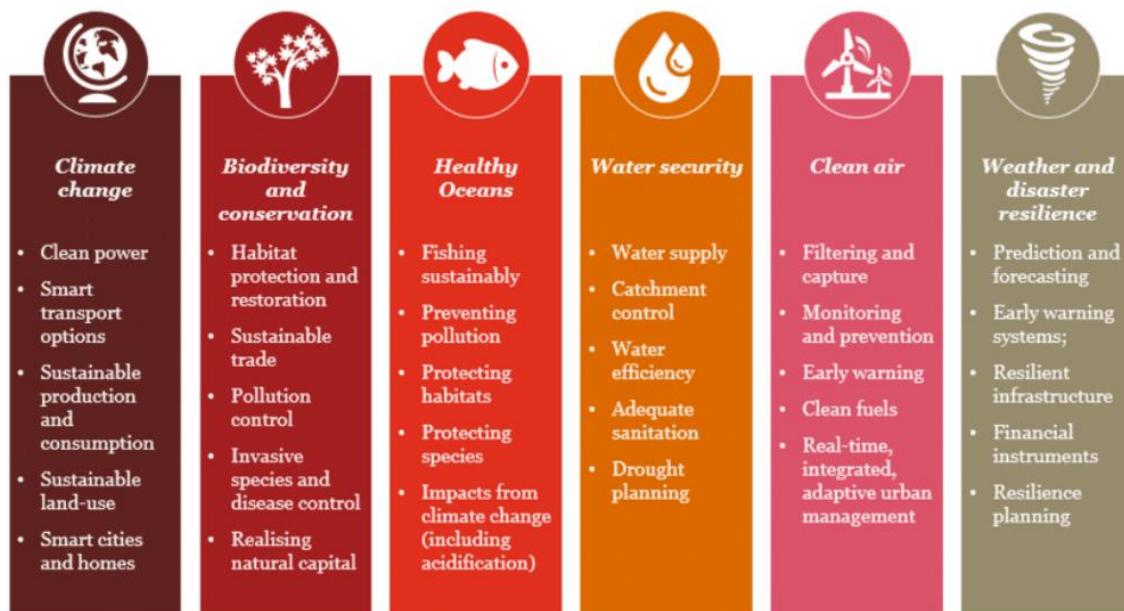


Figure 15 : Domaines d'action prioritaires pour les défis environnementaux

Source : PwC. (s. d.). *Domaines d'action prioritaires pour les défis environnementaux*. Récupéré de https://earth.org/data_visualization/ai-can-it-help-achieve-environmental-sustainable/

Comme le montre le schéma ci-dessus, l'utilisation de l'intelligence artificielle peut avoir un impact positif dans de nombreux domaines.

Changement climatique (Marr, 2021)

- L'intelligence artificielle permet d'optimiser la production et la demande d'énergie en temps réel, d'améliorer la prévisibilité et l'efficacité des systèmes de réseau et d'accroître l'utilisation des énergies renouvelables.
- Des capteurs et des compteurs intelligents peuvent être déployés dans les bâtiments pour collecter des données et surveiller, analyser et optimiser l'utilisation de l'énergie dans les bâtiments.
- L'intelligence artificielle est déjà utilisée dans les transports intelligents, par exemple dans Google Maps et Waze, où des algorithmes d'apprentissage automatique sont utilisés pour optimiser la navigation, accroître la sécurité et fournir des informations sur les flux de trafic et les embouteillages.

Biodiversité et conservation (Comision Européa, 2021)

- Associée aux images satellites, l'intelligence artificielle peut détecter les changements dans l'utilisation des terres, la végétation, la couverture forestière et les conséquences des catastrophes naturelles.

- Les espèces envahissantes peuvent être surveillées, identifiées et suivies à l'aide de cette même technologie. L'identification et le suivi de leur présence, ainsi que leur élimination, se font grâce à l'apprentissage automatique et à la vision par ordinateur.
- Des logiciels prédictifs ont été déployés pour aider les unités anti-braconnage à planifier leurs itinéraires de patrouille.

Santé des océans (Diaz, 2020)

- L'intelligence artificielle peut recueillir des données sur des sites océaniques difficiles ou impossibles à atteindre et ainsi contribuer à la protection des espèces et des habitats. L'intelligence artificielle permet également de repérer la pêche illégale.
- Des robots alimentés par l'intelligence artificielle peuvent être utilisés pour surveiller les conditions océaniques telles que les niveaux de pollution, la température et le pH.

Problèmes liés à l'eau (HYDREOS, 2019)

- L'intelligence artificielle est largement utilisée par les spécialistes de l'eau pour projeter l'utilisation de l'eau dans une zone géographique particulière et faire des prévisions météorologiques afin de prendre des décisions politiques éclairées.
- L'intelligence artificielle, associée à des données satellites, peut aider à prévoir les conditions météorologiques, l'état des sols et des eaux souterraines et à prédire les sécheresses.

Un air sain (Mulhern, 2021)

- Les purificateurs d'air dotés d'intelligence artificielle peuvent enregistrer la qualité de l'air et les données environnementales en temps réel et adapter l'efficacité de la filtration.
- Les simulations faites par l'intelligence artificielle peuvent envoyer des avertissements aux personnes vivant dans des zones urbaines sur les niveaux de pollution des zones en question. Il existe des outils capables de détecter rapidement et précisément les sources de pollution.
- En utilisant les données des véhicules, des capteurs radar et des caméras, l'intelligence artificielle peut contribuer à améliorer la pollution atmosphérique.

Prévisions météorologiques et résilience en cas de catastrophe (Mayer, 2021)

- Les analyses prédictives alimentées par l'intelligence artificielle, ainsi que les drones, les plateformes de capteurs avancés et les outils similaires peuvent surveiller les tremblements de terre, les inondations, les tempêtes de vent, les changements du niveau de la mer et d'autres risques naturels potentiels. Cette technologie peut aider les gouvernements et les organismes concernés à prendre des mesures opportunes, et la disponibilité de ces informations en temps réel avec des déclencheurs automatiques peut permettre des évacuations précoces en cas de besoin.

- Diverses sociétés météorologiques, des entreprises technologiques et des compagnies d'assurance associent l'intelligence artificielle aux méthodes traditionnelles de modélisation basées sur la physique pour modéliser l'impact des phénomènes météorologiques extrêmes sur les infrastructures et sur leurs autres systèmes afin de conseiller les stratégies de gestion des risques de catastrophes.

L'intelligence artificielle joue un rôle important dans la réalisation non seulement des objectifs environnementaux, mais aussi de tous les autres **objectifs de développement durable** - de l'éradication de la faim et de la pauvreté à la protection et à la préservation de la biodiversité en passant par l'énergie durable et l'égalité des sexes. Les chiffres repris ci-dessous illustrent les gains potentiels qui peuvent être réalisés en adoptant l'intelligence artificielle pour atteindre les objectifs de développement durable (Mulhern, 2021).

Il existe au total 17 objectifs de développement durable définis par les Nations Unies, qui peuvent être regroupés en trois piliers : l'environnement, l'économie et la société. Une étude publiée dans Nature Communications a examiné à quel point le développement de l'intelligence artificielle pourrait permettre de nombreuses avancées, tout en freinant d'autres.

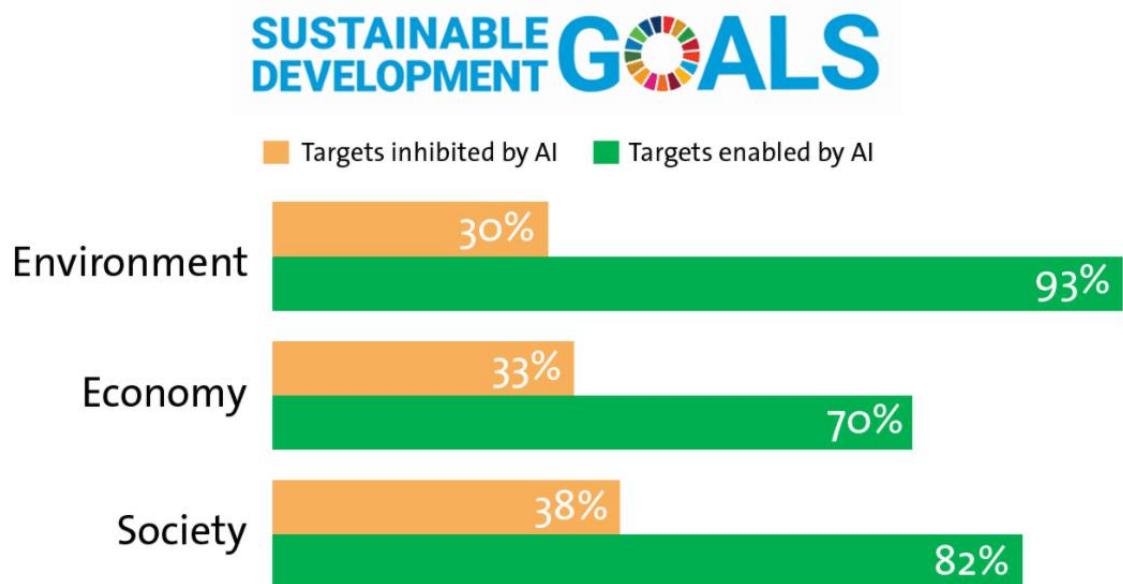


Figure 16 : Impact de l'IA sur la réalisation de chaque cible des objectifs de développement durable

Source : Springer Nature Sustainability Community. (2021). *Impact de l'IA sur la réalisation de chaque cible des objectifs de développement durable*. Récupéré de https://earth.org/data_visualization/ai-can-it-help-achieve-environmental-sustainable/

Comme le montre le graphique ci-dessus, bien que l'utilisation de l'intelligence artificielle puisse avoir un impact positif sur l'environnement, sur l'économie et sur la société en général, la technologie peut également être utilisée à mauvais escient et entraîner des effets négatifs.

Autrement dit, même si l'intelligence artificielle offre des possibilités sans précédent, elle ne donne pas toujours des résultats positifs selon le cadre dans lequel elle est utilisée. Par exemple, dans un pays où le contrôle éthique, la transparence et les mesures démocratiques sont limités, l'intelligence artificielle pourrait favoriser le nationalisme, la discrimination et les résultats électoraux non démocratiques. Dès lors, des organismes de réglementation plus stricts doivent être mis en place pour superviser le développement de l'intelligence artificielle, car celui-ci influencera fortement l'avenir de l'humanité (Mulhern, 2021).

2.7 Critique de l'intelligence artificielle

L'intelligence artificielle est bénéfique à bien des égards et continuera à apporter de nombreux avantages à notre société moderne, mais elle aura aussi inévitablement des conséquences négatives. Plus tôt nous commencerons à envisager ces conséquences, mieux nous serons équipés pour atténuer et gérer les risques potentiels (Fallery, 2020).

Il est donc essentiel de lister les principaux dangers potentiels liés à l'utilisation de l'intelligence artificielle.

- Des algorithmes d'intelligence artificielle biaisés

Comme les algorithmes utilisés sont créés par l'Homme, ils peuvent être biaisés de manière intentionnelle ou fortuite. Si les algorithmes d'intelligence artificielle sont construits avec un certain parti pris ou si les données des ensembles d'apprentissage sont biaisées, ils produiront des résultats biaisés. Cette réalité pourrait avoir des conséquences involontaires, comme celles que nous avons observées avec les algorithmes de recrutement discriminatoires et le chatbot Twitter de Microsoft qui est devenu raciste (Schwartz, 2021). Les entreprises qui créent des algorithmes d'intelligence artificielle doivent les développer et les former de manière responsable.

- La disparition de certains métiers

Alors que de nombreux emplois seront créés grâce à l'intelligence artificielle et que nombreux sont ceux qui prédisent une augmentation nette du nombre d'emplois - ou du moins anticipent la création d'un nombre équivalent d'emplois pour remplacer ceux qui seront perdus - grâce à la technologie de l'intelligence artificielle, certaines tâches effectuées aujourd'hui seront prises en charge demain par les machines. Il faudra donc faire évoluer les programmes de formation et d'éducation afin de préparer la main-

d'œuvre de demain et d'aider les travailleurs à s'adapter à de nouveaux postes qui utiliseront leurs capacités humaines uniques (Numa, 2019).

- Une réglementation internationale

Le monde est plus petit que jamais grâce à la technologie. Cela signifie que de nouvelles lois et règlementations devront être mises en place entre les différents gouvernements afin de permettre des interactions mondiales sûres et efficaces. En raison de la mondialisation, les actions et les décisions relatives à l'intelligence artificielle dans un pays pourraient très facilement avoir des répercussions négatives sur les autres. L'Europe a adopté une approche réglementaire solide pour garantir le consentement et la transparence, tandis que les États-Unis et la Chine notamment autorisent leurs entreprises à utiliser l'intelligence artificielle de manière beaucoup plus libérale.

L'intelligence artificielle a donc de nombreuses opportunités de croissance et de développement pour faire face aux enjeux actuels mais elle est également source de préoccupations légitimes. La poursuite des recherches et des investissements dans l'intelligence artificielle doit donc s'accompagner d'une remise en question et d'une réflexion approfondie sur les conséquences de l'utilisation de cette technologie (Stanford, 2020).

2.8 Impact de la crise du Covid-19 sur l'intelligence artificielle

Face à la pandémie de Covid-19 qui impacte le monde depuis plus d'un an maintenant, toutes les entreprises, dans tous les secteurs, ont dû se réinventer afin de répondre aux enjeux posés par la crise sanitaire. Cette transformation, imposée et brutale, va donc sans aucun doute métamorphoser la société dans les années à venir. La crise du Covid-19 a eu un impact tant au niveau individuel qu'au niveau collectif de la société. Au niveau individuel, elle a bousculé notre rapport à la vie quotidienne tandis qu'au niveau collectif, les modes de fonctionnement sociaux et organisationnels ont muté rapidement en raison de la situation (Anderson et al., 2021).

De nombreuses entreprises se sont donc tournées vers les technologies digitales et les nombreuses possibilités qu'elles offrent. Cette crise a accéléré le processus de digitalisation de la société et de nombreuses entreprises, dans tous les secteurs d'activités. Et cette transformation numérique est la première étape importante vers l'intelligence artificielle. En effet, la digitalisation de la société permet de mettre en place des processus agiles et numérisés, et surtout de sensibiliser les employés à l'utilisation et à l'exploitation des données. Comme dit précédemment, sans les données, il n'est pas possible d'avoir des systèmes d'intelligence artificielle efficaces. Ces évolutions sont indispensables afin de pouvoir intégrer des systèmes d'intelligence artificielle dans une entreprise par la

suite (Forbes France, 2021). La crise du Covid-19 a donc eu un impact positif sur la digitalisation de la société, ce qui va accélérer l'intégration de l'intelligence artificielle.

Il faut cependant souligner que de nombreuses entreprises ont enregistré des pertes de chiffre d'affaires pendant la crise du Covid-19. En effet, le chiffre d'affaires total en Belgique a diminué de 3,8 % au quatrième trimestre de 2020 comparé à 2019 (Economie.fgov, 2021). Cette perte de chiffre d'affaires aura un impact sur les investissements qui risquent de diminuer au cours des prochains trimestres, même si un rebond de l'activité économique est attendu dans les prochaines années.

Approche pratique

3. L'empreinte carbone d'une entreprise

3.1 Complexité du calcul du bilan carbone

Le calcul du bilan carbone est un processus indispensable pour toute entreprise désireuse de réduire son empreinte écologique. En effet, le calcul du bilan carbone permet d'avoir une vue globale de toutes les activités de l'entreprise en fonction de leurs émissions de CO₂. Il permet ainsi de mettre en lumière les activités pour lesquelles des efforts peuvent être faits et où il est possible de réduire les émissions de CO₂ dans l'atmosphère. Le bilan carbone sert donc de fondement aux actions prises par l'entreprise afin de réduire son empreinte carbone.

Comme expliqué dans notre analyse de la littérature, le calcul du bilan carbone est un processus long et onéreux. Cela nous a été confirmé par Monsieur Johner, responsable commercial chez Sami, une entreprise qui accompagne ses clients dans leur stratégie environnementale en calculant notamment le bilan carbone et en mettant en place un plan d'action afin de réduire l'empreinte carbone.

Il y a plusieurs raisons à la complexité du calcul du bilan carbone d'une entreprise.

Selon Monsieur Johner, la première raison est qu'il est nécessaire de suivre une **méthodologie rigoureuse** afin d'établir le bilan carbone d'une entreprise. En effet, le but est d'avoir un cadre commun à toutes les entreprises pour que les résultats soient comparables entre les entreprises et que l'ensemble des postes d'émissions soit pris en compte, car il y a de nombreux types d'émissions différents (le numérique, les déplacements, les repas, les locaux, la production, etc...). Il existe de nombreuses méthodologies : le bilan carbone, le GHG Protocol, la méthodologie ISO, et bien d'autres encore (Johner, 2021).

Cependant, avant de pouvoir calculer un bilan carbone, il faut pouvoir maîtriser la méthodologie. Il existe donc deux alternatives aux entreprises : soit former quelqu'un en interne à l'utilisation de la méthodologie (ce qui prend du temps) soit faire appel à des services externes afin de sous-traiter le calcul.

L'autre raison à la complexité du calcul est de devoir prendre en compte toutes les émissions de l'entreprise. Comme expliqué dans l'analyse de la littérature, il existe **différents périmètres** pouvant être pris en compte dans le bilan carbone d'une entreprise. Le premier périmètre reprend les émissions directes ; le second périmètre regroupe les émissions indirectes liées à la production d'énergie. Le troisième périmètre regroupe toutes les émissions indirectes, en d'autres mots toute la chaîne de valeur de l'entreprise, comme par exemple l'énergie utilisée par un produit tout au long de son cycle de vie. Ce troisième périmètre est donc le plus pertinent, car il regroupe le plus d'émissions.

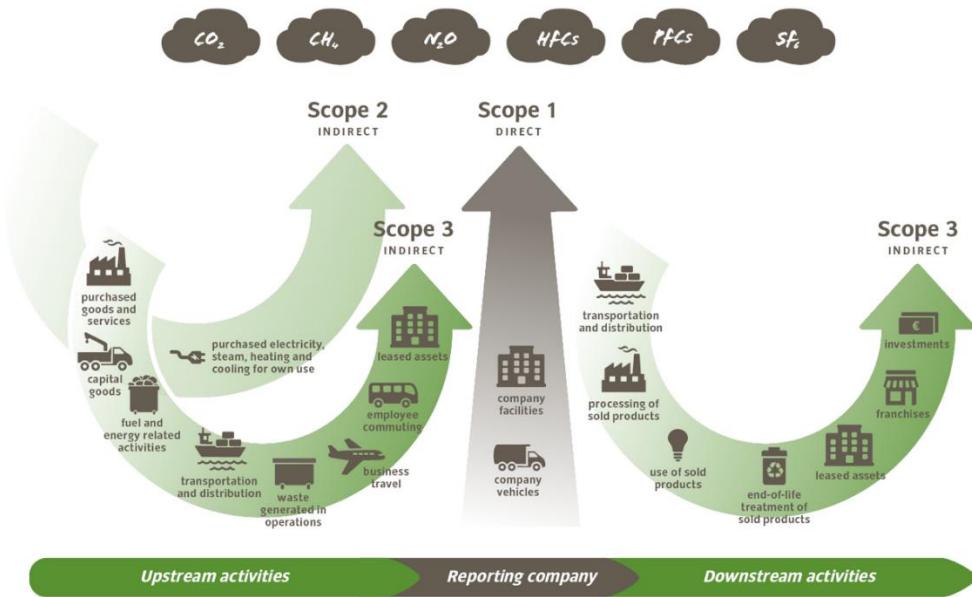


Figure 17 : Représentation des 3 périmètres

Source : AlumniForThePlanet. (s. d.). *Représentation des 3 périmètres*. Récupéré de <https://alumnifortheplanet.org/je-m-informe-sur-les-enjeux>

Mais c'est également le périmètre qui est le plus compliqué à mesurer selon Monsieur Johner. En effet, étant donné que le périmètre regroupe toutes les émissions de la chaîne de valeur de l'entreprise, cela implique aussi les fournisseurs et les fournisseurs des fournisseurs. Or tous les fournisseurs ne partagent pas les informations relatives à leurs émissions (c'est en effet un point stratégique au niveau de la concurrence) ou parfois n'ont simplement pas analysé leur bilan carbone à eux et sont donc incapables de pouvoir donner des chiffres. C'est donc parfois une véritable enquête qui est nécessaire afin d'établir le bilan carbone d'une entreprise.

3.2 Limites du calcul du bilan carbone

Il existe cependant quelques limites au calcul du bilan carbone d'une entreprise. En effet, une entreprise établie en Belgique n'est pas contrainte aujourd'hui de calculer son bilan carbone - même si de nombreuses entreprises commencent à le faire, comme l'atteste l'étude menée par l'agence de communication Finn. Elle a en effet analysé les communications non financières des 55 plus grandes entreprises belges. Parmi ces 55 entreprises, 36 ont publié en 2020 des indicateurs sur leurs émissions de gaz à effet de serre (Lauwers, 2021). Ce chiffre est bien entendu encourageant, mais trop souvent les entreprises qui communiquent leur bilan carbone se contentent de prendre en compte les périmètres 1 (émissions directes) et 2 (émissions indirectes liées à l'énergie) et ne prennent donc pas en compte le périmètre 3 (émissions indirectes) (Johner, 2021). La raison réside souvent dans la difficulté de calculer le périmètre 3 comme expliqué au point 3.1. Or, ce sont les émissions indirectes qui ont le plus d'impact sur l'empreinte carbone d'une entreprise, représentant souvent plus de 80 % des émissions (ADEME, 2016). Les efforts en termes de réduction d'émissions de CO₂ sont dès lors limités à 20 % des émissions totales de l'entreprise, ce qui réduit le nombre d'éléments sur lesquels des efforts peuvent être faits (Johner, 2021). La France confirme cette réalité : le calcul de l'empreinte carbone est devenu une obligation pour les entreprises mais uniquement dans le cadre des périmètres 1 et 2, le périmètre 3 étant seulement recommandé.

3.3 Réduction de l'empreinte carbone des entreprises

Dès lors qu'une entreprise a calculé son bilan carbone, il est possible de mettre en place des solutions afin de réduire l'empreinte carbone. Comme expliqué par Monsieur Johner, il existe deux moyens de réduire l'empreinte carbone d'une entreprise. La première consiste à revoir toutes les activités de l'entreprise, la seconde à faire de la compensation carbone.

3.3.1 Révision des activités

Revoir les activités d'une entreprise consiste à passer en revue toutes les activités, analyser les activités pour lesquelles des solutions existent ou sont envisageables afin de réduire la quantité de CO₂ émis dans l'atmosphère, et mettre ces solutions en application. Les solutions peuvent être très simples et ne pas utiliser de technologie particulière. Par exemple, sensibiliser les employés au covoiturage ne nécessite aucune technologie et permet de réduire la quantité de CO₂ émis lors des déplacements des employés. D'autres solutions peuvent au contraire être complexes et nécessiter le recours aux nouvelles technologies telles que l'intelligence artificielle. Ainsi, analyser la chaîne de production et optimiser les processus de fabrication afin d'être plus économique en électricité, ou générer moins de déchets en optimisant l'utilisation des matières premières, sont autant de solutions qui nécessitent un recours à la technologie. Les possibilités sont donc nombreuses et variées et toutes les entreprises peuvent trouver des solutions, même celles qui n'ont pas un budget énorme à y consacrer.

3.3.2 Compensation carbone

Un autre moyen de réduire l'empreinte carbone consiste à faire ce qui est appelé de la compensation carbone. L'idée est de financer des projets qui permettent soit de séquestrer du carbone (absorber du carbone), soit d'éviter des émissions de carbone. Ces projets se trouvent en dehors de la chaîne de valeur de l'entreprise et peuvent être très variés : cela va de la reforestation à la protection des forêts en passant par des projets liés à une énergie plus verte. Tous ces projets vont permettre de capter des émissions. C'est une donnée importante lorsque nous considérons le problème climatique à un niveau macro, car l'accord de Paris fixe des objectifs ambitieux en matière de réchauffement climatique. Pour pouvoir atteindre ces objectifs, il faut d'un côté réduire nos émissions, ce qui représente la plus grosse partie du travail, mais il faut aussi développer des puits de carbone pour réduire le taux de carbone présent dans l'atmosphère. Les puits de carbone « désignent le processus qui extrait les gaz à effet de serre de l'atmosphère, soit en les détruisant par des procédés chimiques, soit en les stockant sous une autre forme » (Actu-environnement, s. d.). Les forêts et les océans sont des grands puits de carbone. Les préserver contribue donc à la réduction du taux de carbone présent dans l'atmosphère.

Chaque projet est catégorisé en fonction du nombre de tonnes de CO₂ non émis ou captés. Un prix à la tonne de CO₂ non émis ou capté est fixé, et les entreprises peuvent par la suite acheter ces tonnes de CO₂. Les entreprises peuvent ainsi contribuer à l'effort collectif en termes de réduction de quantité de CO₂ présent dans l'atmosphère (Johner, 2021).

Cependant, comme pour toute solution, il y a des **limites à la compensation carbone**.

D'après Monsieur Johner, une première limite réside dans le fait que certaines entreprises se disent neutres en carbone par le simple fait de financer des projets dits de compensation carbone. C'est ce qui est appelé communément du **greenwashing** : l'entreprise se donne une image écologiquement responsable qui est en réalité trompeuse. Dans les prochaines années, cette pratique pourrait être interdite en France si la Loi Climat entre en vigueur. En effet, selon l'amendement n° 4981 de ladite loi, sera « Interdit, dans une publicité, le fait d'affirmer à tort qu'un produit ou un service est neutre en carbone, dépourvu de conséquences négatives sur le climat, ou toute autre formulation ayant une finalité et une signification similaires. » (Jahnich, 2021)

Pour cette raison, Monsieur Johner estime que le terme « compensation » est trompeur car il donne l'impression aux entreprises qu'en compensant la totalité de leurs émissions, elles ne doivent plus faire d'effort pour réduire l'empreinte carbone. Or, si nous voulons réellement être efficaces dans la lutte contre le réchauffement climatique, il faut d'une part chercher à réduire sa propre empreinte carbone en travaillant sur sa chaîne de valeur et d'autre part financer des projets qui aideront à réduire la quantité de CO₂ présent dans l'atmosphère au niveau mondial. Pour cette raison, il préfère utiliser le terme de « **contribution** » : en finançant des projets, les entreprises vont plutôt contribuer à l'effort collectif visant à atteindre la neutralité carbone au niveau mondial.

Une autre limite à la compensation carbone découle d'une **limite d'intention**. En effet, certaines entreprises sont désireuses de réduire leur empreinte carbone dans un souci purement et exclusivement financier. La neutralité carbone constitue pour elles une belle carte de visite vis-à-vis des investisseurs et de leurs fournisseurs et leur permet de se démarquer de la concurrence. Si tout effort de réduction de l'empreinte carbone est évidemment louable, il pose toutefois problème s'il n'est fait que dans un but financier. Car si tel est le cas, les entreprises pourraient ne pas s'impliquer de manière active dans le processus, chercher des solutions innovantes et contribuer significativement à la réduction de leur empreinte carbone.

Comme nous l'a très bien résumé Monsieur Johner, c'est un processus pédagogique qu'il faut mettre en place. Il est important de bien expliquer les étapes et de souligner l'importance de regarder d'abord comment l'entreprise peut réduire ses propres émissions avant de penser à financer des projets.

3.4 L'intelligence artificielle au service du développement durable des entreprises

Face à la difficulté et au coût engendré par l'analyse, la réduction et/ou la compensation de leurs émissions carbone, de nombreuses entreprises ont tendance à reporter cet effort. Mais l'intelligence artificielle peut les aider à accélérer leur transformation durable tout en réduisant les coûts.

La grande force de l'intelligence artificielle réside dans sa capacité à fournir des informations approfondies sur les multiples aspects de l'empreinte carbone d'une entreprise, à établir des connexions que l'homme ne décèle pas et à recommander des actions appropriées sur base de ses conclusions (Johner, 2021).

L'intelligence artificielle peut être utilisée à trois niveaux :

- **Suivi des émissions** : les technologies de pointe alimentées par l'intelligence artificielle permettent désormais aux entreprises de suivre l'ensemble des émissions constituant leur empreinte carbone. L'intelligence artificielle permet de collecter des données provenant des opérations, d'activités telles que les déplacements du personnel et les équipements informatiques, et de chaque partie de la chaîne de valeur, y compris les fournisseurs de matériaux et de composants, les transporteurs, et même les utilisateurs de leurs produits. Et si certaines données sont manquantes, l'intelligence artificielle peut générer des approximations et estimer le niveau de certitude des résultats (Johner, 2021).

- **Prévision des émissions** : l'intelligence artificielle prédictive permet de prévoir les émissions futures de l'empreinte carbone d'une entreprise, en fonction des efforts de réduction actuels, des nouvelles méthodologies de réduction du carbone et de la demande future. Ainsi, les objectifs de réduction des émissions peuvent être ajustés avec plus de précision (Johner, 2021).
- **Réduction des émissions** : grâce à un aperçu détaillé de chaque aspect de la chaîne de valeur de l'entreprise, l'intelligence artificielle prescriptive permet d'optimiser et d'améliorer l'efficacité de la production, du transport et d'autres activités, afin de réduire les émissions de carbone et les coûts (Johner, 2021).

Aujourd'hui, ce sont surtout les grandes entreprises qui peuvent profiter au mieux de tous les bénéfices offerts par l'intelligence artificielle. En effet, leur taille leur donne accès à d'énormes quantités de données - un facteur clé de succès pour le déploiement de l'intelligence artificielle.

4. L'empreinte carbone de l'intelligence artificielle

Dans l'analyse de la littérature relative à l'intelligence artificielle, nous avons mis en lumière les bénéfices ainsi que les limites liées à l'utilisation de cette technologie. Dans cette partie-ci, nous analyserons l'impact environnemental de l'intelligence artificielle ainsi que les solutions qui peuvent être mises en place afin de limiter cet impact.

Comme l'a souligné Monsieur Johner, l'intelligence artificielle offre un potentiel important et prometteur lorsqu'il s'agit de réduire les émissions de gaz à effet de serre et d'aider la société à lutter contre le changement climatique. Mais parallèlement, le déploiement de solutions utilisant l'intelligence artificielle dépend de ressources informatiques extrêmement importantes qui nécessitent une consommation d'énergie tout aussi importante.

Afin de déterminer l'empreinte carbone de l'intelligence artificielle, trois éléments importants sont à prendre en compte.

4.1 Les algorithmes

Le déploiement d'un modèle d'intelligence artificielle requiert habituellement deux phases : une phase d'apprentissage et une phase d'inférence.

Comme expliqué dans la partie théorique, un grand nombre de données sont nécessaires afin d'**entraîner** un modèle d'intelligence artificielle. En effet, l'algorithme va devoir analyser une quantité énorme de données et ainsi acquérir suffisamment de connaissances pour être capable de prendre des décisions seul. C'est grâce à ces données qu'un système de reconnaissance d'images, par exemple, sera capable de différencier un chien d'un chat. En analysant des milliers d'images labellisées chat ou chien, l'intelligence artificielle va être capable, si nous lui montrons une nouvelle image, de déterminer si l'image représente un chien ou un chat. C'est donc une étape nécessaire au fonctionnement de l'intelligence artificielle (De Ketelaere, 2021).

Selon Madame De Ketelaere, si tous les systèmes d'intelligence artificielle consomment beaucoup d'énergie, que ce soit dans le monde de la santé ou des entreprises, c'est parce qu'ils ont été créés avec la volonté de recopier le fonctionnement du cerveau humain, en oubliant que dans un cerveau humain, tout se fait de manière plus intuitive et surtout en consommant moins « d'énergie ».

Le fonctionnement des algorithmes est très différent du fonctionnement du cerveau humain. Lorsqu'un être humain apprend quelque chose, l'apprentissage ne recommence pas au point zéro. L'apprentissage se base sur des acquis. Prenons l'exemple du squash. Quelqu'un qui veut jouer au squash et qui sait déjà jouer au tennis sera plus doué que celui qui n'a jamais joué au tennis de sa vie et qui se met au squash. L'être humain n'apprend donc jamais de zéro. C'est sur ce point que les algorithmes se différencient le plus du cerveau humain. Pour chaque nouvelle tâche attribuée à une intelligence artificielle, un apprentissage qui part de zéro est

nécessaire. Or c'est le processus d'apprentissage qui est la partie la plus énergivore de l'utilisation de l'intelligence artificielle, en raison des quantités de données à analyser et à traiter.

Plus il y a de données disponibles pour l'entraînement d'un modèle, plus la précision de l'intelligence artificielle sera élevée. Bien qu'une meilleure précision permette d'avoir des résultats plus précis, la recherche de la plus haute précision pour les modèles d'intelligence artificielle pose également problème. Plus un modèle d'intelligence artificielle est précis, plus il offrira de bons résultats. Afin d'avoir un modèle plus précis, il faut donc augmenter les capacités de calcul du modèle. Or, nous sommes arrivés aujourd'hui à des précisions avoisinant les 95 % et pour augmenter encore la précision, il faut augmenter de manière significative la puissance de calcul. Prenons l'exemple du modèle ResNeXt développé en 2017. Afin d'augmenter sa précision de 0,5 %, une augmentation de 35 % de la capacité de calcul a été nécessaire (Toews, 2020). Cette augmentation a automatiquement entraîné une augmentation de la consommation énergétique, comme nous l'avons expliqué ci-dessus. Il serait donc intéressant d'analyser le coût/bénéfice de cette amélioration de la précision. Comme nous l'a confié Madame De Ketelaere, il y a quelques années encore, le taux de précision était le seul indicateur clé de performance (KPI) pris en compte pour estimer si un projet d'intelligence artificielle était intéressant pour des investisseurs. Depuis 2 ans, ce n'est plus le cas car la consommation énergétique est aussi devenue un facteur important. Un modèle d'intelligence artificielle avec une précision inférieure mais plus économique en énergie est parfois privilégié au détriment d'un modèle plus précis et donc plus énergivore.

L'apprentissage des modèles se fait donc sur des bases de données qui ne cessent de croître, ce qui augmente inévitablement la consommation énergétique de la phase d'apprentissage.

Une fois le modèle entraîné, il devient opérationnel et entre dans la **phase d'inférence**. Le modèle doit analyser des données afin de trouver des tendances utiles. Pour chaque requête, une nouvelle analyse des données est nécessaire. Cette étape n'est pas une opération ponctuelle comme pour l'apprentissage. Elle est continue, tout comme la consommation énergétique. Bien que la consommation énergétique lors de la phase d'inférence soit inférieure à celle de l'apprentissage, son utilisation de manière continue la rend plus énergivore que la phase d'apprentissage. Après environ 1 million d'inférences, l'impact surpassé celui de la phase d'apprentissage. Ce n'est donc pas un processus durable (Nackaerts & De Ketelaere, 2021).

Il existe cependant des solutions pour chacune de ces deux phases.

Afin de réduire la consommation énergétique durant la phase d'apprentissage, il est possible de transférer un modèle d'intelligence artificielle entraîné dans un domaine spécifique vers un domaine adjacent. Cela s'appelle le « **transfer learning** » (en français, l'apprentissage par transfert). Le transfer learning consiste à prendre les connaissances apprises par un modèle pour une tâche spécifique et à les transférer en partie ou dans leur entièreté vers un modèle qui devra effectuer une tâche similaire. Cette technique permet de réduire la consommation

énergétique car le processus d'apprentissage est réduit. Il faut donc consacrer moins de temps à l'apprentissage et par conséquent consommer moins d'énergie (De Ketelaere, 2021).

Lors de la phase d'inférence, il est possible d'utiliser la technique dite du « **pruning** » (en français, l'élagage) afin de réduire la consommation énergétique au cours de cette phase. Afin de visualiser cette technique, prenons l'exemple de l'arbre : quand nous voyons qu'un arbre a des branches qui ne sont pas en très bon état, nous allons couper les branches qui n'apportent pas grand-chose à l'arbre et ne laisser que les branches en bonne santé. Nous pouvons faire la même chose pour les systèmes neuronaux (les algorithmes). Il y aura toujours des « branches » qui apportent très peu à la décision finale ou au résultat final. Chaque branche représente un calcul que le système va devoir effectuer avant d'obtenir un résultat. Au lieu de laisser les « branches » qui n'apportent pas de valeur pour la décision finale, nous pouvons les couper. Cela réduit donc le nombre de calculs que le système va devoir effectuer. Bien que cela n'ait pas d'incidence sur le fonctionnement du système en lui-même, un calcul restant un calcul pour une machine, en réduisant le nombre de calculs, la quantité d'électricité nécessaire pour arriver au résultat final va être diminuée. Grâce à cette technique, il est possible de réduire de 30 à 50 % le nombre de calculs nécessaires, et donc de diminuer la consommation énergétique (De Ketelaere, 2021).

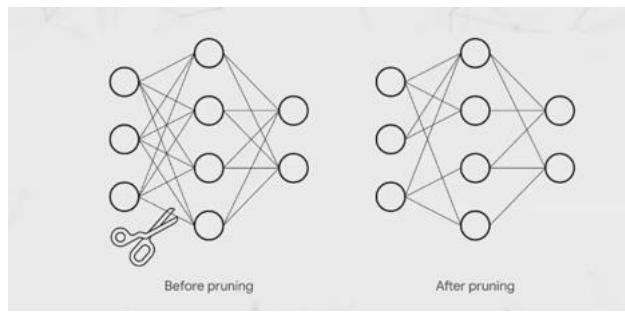


Figure 18 : Représentation du processus de pruning

Source : IMEC. (2021). *Représentation du processus de pruning*. Récupéré lors de la conférence IMEC-Energy Efficiency lors de la semaine d'intelligence artificielle du 15 au 19 mars 2021

Il existe donc bel et bien des techniques permettant de limiter la consommation énergétique des algorithmes utilisés par une intelligence artificielle.

4.2 Les processeurs et les puces

Ce qui consomme également de l'énergie, c'est le processeur sur lequel les algorithmes sont entraînés. C'est en effet la puce qui a besoin d'électricité pour fonctionner.

Les processeurs utilisés par les modèles d'intelligence artificielle ont souvent une **précision trop élevée** par rapport au résultat qui est attendu. De nombreuses recherches sont

actuellement menées pour développer des processeurs plus adaptés aux tâches qui leur sont demandées et qui par conséquent consomment moins d'énergie. Google, par exemple, a développé des processeurs appelés TPU (Tensor Processing Units) qui peuvent opérer avec des précisions plus basses que celles des processeurs graphiques GPU (Graphics Processing Units). Auparavant, seuls les GPU étaient utilisés pour traiter un nombre élevé de calculs de raisonnement en utilisant 32 bits flottants, ce qui produisait d'excellents résultats. Aujourd'hui, les TPU permettent d'effectuer des calculs de raisonnement avec 8 bits entiers, ce qui divise donc le nombre de bits par 4 par rapport aux GPU. Les calculs sont dès lors effectués de façon beaucoup plus efficace et rapide parce qu'il y a 4 fois moins de données qui circulent dans le processeur, ce qui réduit la consommation d'énergie (Laubeuf, 2021).

Les recherches sur les puces se heurtent aujourd'hui à la **limite de la loi de Moore**. Auparavant, nous pouvions diviser par deux la taille des puces nécessaires à l'utilisation d'un modèle d'intelligence artificielle. Energétiquement parlant, c'était très intéressant car plus la puce est petite, moins elle va consommer d'énergie. La puissance augmentait et la consommation énergétique diminuait.

Actuellement, la puissance de calcul que requièrent les nouveaux algorithmes d'intelligence artificielle croît plus vite que la loi de Moore. Cela signifie que les nouveaux algorithmes ont une puissance de calcul supérieure mais que cette puissance entraîne une augmentation de la consommation énergétique alors qu'il y a encore quelques années, cela correspondait à une baisse de la consommation énergétique.

Si la limite de la loi de Moore est aujourd'hui atteinte, c'est en raison de la taille des puces et du coût de la recherche. Les éléments dans les puces sont de l'ordre du nanomètre et si nous voulons réduire la consommation énergétique de ces puces, il est nécessaire d'en réduire encore la taille, ce qui est très compliqué et surtout très coûteux. Très peu d'entreprises sont aujourd'hui capables de financer la recherche pour obtenir des puces plus petites. Les producteurs de processeurs se rendent compte que ce n'est pas rentable de financer la recherche s'il n'y a pas de marché pour acheter les processeurs qui sont produits avec cette technologie (Laubeuf, 2021).

Dans l'état actuel des choses, la complexité croissante des algorithmes d'intelligence artificielle va donc entraîner un accroissement de la consommation énergétique. Les recherches se poursuivent afin de trouver une solution et faire en sorte que la consommation énergétique des processeurs décroît plus vite que la puissance des algorithmes de deep learning.

Il faut également souligner un problème connexe. Si ce type de processeur vient à se démocratiser, il y aura alors un **impact écologique lié à l'e-waste**. En effet, si de nouveaux processeurs plus performants d'un point de vue énergétique sont mis sur le marché à un prix abordable, un changement de processeur sera nécessaire pour profiter des nouvelles performances énergétiques. Cela implique donc des coûts et un impact écologique liés à la production de ces nouveaux processeurs et au traitement de ces déchets (Laubeuf, 2021).

4.3 Les datacenters

A côté des algorithmes et des processeurs et puces, nous devons également nous pencher sur la problématique des datacenters. En effet, l'intelligence artificielle et les datacenters sont étroitement liés : sans datacenters, il ne peut y avoir d'intelligence artificielle.

L'utilisation de l'intelligence artificielle nécessite en effet une capacité de calcul qui doit être hébergée quelque part, un espace de stockage d'une quantité énorme de données, ainsi qu'un environnement sécurisé (Roger, 2018).

Tout ceci se retrouve dans un datacenter. Il est donc important de considérer les datacenters comme partie intégrante de l'intelligence artificielle. C'est la raison pour laquelle nous nous sommes aussi concentrés sur l'empreinte carbone des datacenters.

Comme expliqué dans la partie théorique, les datacenters sont des nids à consommation énergétique. Les interviews que nous avons menées nous ont permis d'analyser les raisons des problèmes liés à la consommation énergétique des datacenters et les solutions qui sont envisagées.

4.3.1 Consommation énergétique

Si les datacenters sont aussi énergivores, c'est d'abord en raison de notre monde de plus en plus digitalisé. Aujourd'hui, tout se passe sur le réseau ou en streaming. Prenons un exemple concret. Avant, nous avions des dvd's pour regarder un film et l'unique source d'énergie nécessaire était le lecteur dvd. De nos jours, regarder un film passe par une plateforme de streaming, laquelle va nécessiter beaucoup de données afin de pouvoir regarder le film quand nous le souhaitons. Ceci est un exemple concret du changement de nos habitudes et de nos modes de consommation. La digitalisation des usages tant professionnels que privés entraîne donc une augmentation du nombre de transactions avec les datacenters, et par conséquent une augmentation de l'énergie utilisée dans les datacenters. En effet, les datacenters sont utilisés à plein régime 24h sur 24 (Demulder, 2021).

L'autre raison de la grande consommation énergétique des datacenters est son fonctionnement. L'électricité est indispensable, non seulement pour faire fonctionner le matériel informatique dans le datacenter, mais aussi pour maintenir le datacenter à une certaine température (entre 15 et 32 degrés Celsius avec une température idéale de 27 degrés Celsius) afin que le matériel à l'intérieur du bâtiment puisse fonctionner de manière optimale (Bordage, 2012).

Le schéma ci-dessous représente la répartition de la consommation énergétique d'un datacenter.

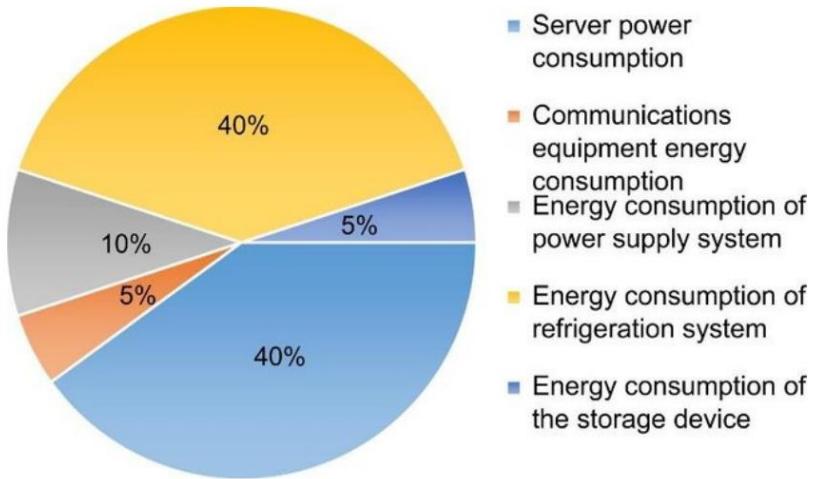


Figure 19 : Répartition de la consommation énergétique des datacenters

Source : Ramdas, S., Rajmane, P., Chauhan, T., Misrak, A., & Agonafer, D. (2019, octobre). Impact of Immersion Cooling on Thermo-Mechanical Properties of PCB's and Reliability of Electronic Packages. Récupéré de <https://doi.org/10.1115/IPACK2019-6568>

Nous pouvons constater que 40 % de la consommation énergétique provient du fonctionnement des serveurs mais que 40 % est consommé par le système de refroidissement, afin de maintenir le datacenter à une température constante de 27 degrés Celsius.

4.3.2 Mesure de la consommation énergétique

A côté de la répartition de la consommation énergétique des datacenters, il est important de comprendre comment est mesurée l'efficacité énergétique de ces derniers. La mesure d'efficacité utilisée par les opérateurs de datacenters est le « **Power usage effectiveness** » (PUE), en français : l'efficacité de l'utilisation de l'énergie, qui est définie comme suit :

PUE = Consommation électrique totale du datacenter / Consommation électrique totale de l'IT (serveurs, stockage, réseau)

Le PUE est en quelque sorte l'indicateur de rendement énergétique du datacenter. Pour le déterminer, nous calculons le ratio de l'énergie utilisée dans son ensemble pour le datacenter sur l'énergie utilisée par les systèmes informatiques. Les systèmes de refroidissement ne sont donc pas pris en compte, alors qu'ils représentent la plus grande partie de la consommation énergétique.

Afin de clarifier le PUE, prenons un exemple. En France, le PUE moyen des datacenters était de 1,84 en 2018 (Campana et al., 2019). Cela signifie que pour 1 watt d'énergie consommé par l'IT (serveurs, stockage, réseau), 1,84 watt est nécessaire au datacenter. En d'autres termes, 0,84 watt est nécessaire au refroidissement du datacenter. Avec un PUE de 1,84, les datacenters en France ne sont pas optimisés. Pour que les datacenters fonctionnent de manière optimale sur le plan énergétique, le score de PUE devrait se rapprocher au plus près de 1. En effet, quand le PUE est à 1, il n'y a pas d'utilisation d'énergie autre que pour faire fonctionner les composantes de l'IT. Lors de la rénovation de datacenters ou lors de la création de nouveaux datacenters, l'objectif est d'avoir un PUE qui oscille entre 1,2 et 1,4 (42U – Data Center Solutions, 2021).

4.3.3 Composants des datacenters

Comme expliqué ci-dessus, le système de refroidissement nécessaire au bon fonctionnement des datacenters représente une grande partie de la consommation énergétique des bâtiments.

Il existe cependant une autre composante du datacenter qui a en réalité un impact beaucoup plus grand en termes d'émissions de CO₂. Il s'agit de **l'extraction des matières premières** et de **la fabrication des composants** des datacenters.

Comme nous l'a confié Monsieur De Spiegeleer, nous associons trop souvent l'empreinte carbone des datacenters à leur consommation énergétique tout au long de leur durée de vie. Or l'extraction des matières premières et la fabrication des composants représentent 80 % de la consommation énergétique des datacenters. Les 20 % restants sont imputés au fonctionnement des datacenters durant toute leur durée de vie. Trouver des solutions pour diminuer la consommation énergétique de l'utilisation des datacenters n'aurait donc qu'un impact limité sur l'empreinte carbone globale de ces derniers.

Il est bien évidemment important de réduire la consommation énergétique de l'utilisation, mais l'empreinte carbone des datacenters ne pourra être réduite de manière significative que si des efforts sont également faits en matière d'extraction des matières premières et de fabrication des composants.

Il est donc important de garder en tête qu'avoir un datacenter fonctionnant grâce à de l'énergie verte ne résout finalement pas le problème des émissions de CO₂. En effet, fournir les datacenters en énergie verte fait certes ralentir les courbes d'émissions de CO₂ mais ne change rien au fait que la courbe continue d'augmenter au fur et à mesure que l'utilisation de l'internet augmente (Le Parisien, 2015). C'est donc une remise en question de tout le processus de production des datacenters qui est nécessaire.

Un autre point important à soulever est le **remplacement des systèmes**. Selon Monsieur De Spiegeleer, les datacenters sont toujours à la recherche des systèmes les plus puissants, permettant d'augmenter la capacité de calcul et de stockage. Ceci va de pair avec l'évolution

technologique et l'augmentation de la puissance de calcul chaque année. Les datacenters doivent être à la pointe de la technologie pour pouvoir rester au même niveau que les autres datacenters. Les composants des datacenters sont donc remplacés à un rythme effréné, comme l'atteste l'étude menée par SuperMicro en 2018 et 2019 sur les datacenters et l'environnement. Selon cette étude, plus de 75 % des datacenters rafraîchissent leurs systèmes au moins tous les 5 ans et 37 % d'entre eux tous les 3 ans ou moins.

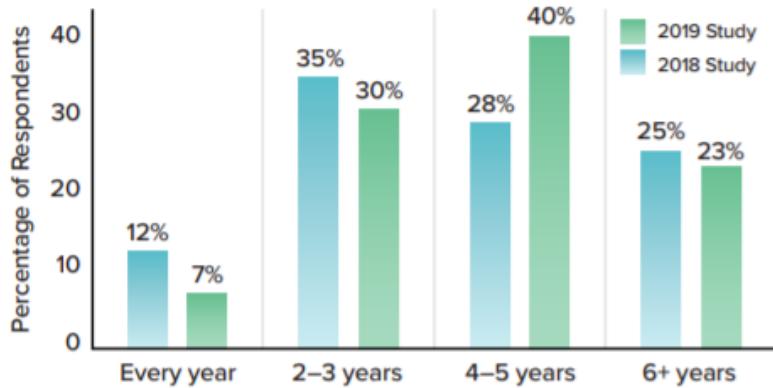


Figure 20 : Fréquence de remplacement des systèmes dans les datacenters

Source : Supermicro. (2019, décembre). *Datacenters & the Environment*. Récupéré de https://www.supermicro.com/white_paper/DataCenters_and_theEnvironmentDec2019.pdf

En général, la technologie des modules de calcul et de mémoire s'améliore tous les 1 à 2 ans, tandis qu'une alimentation électrique bien conçue peut durer plus de 10 ans. Les modules sont donc encore tout à fait fonctionnels lorsque les datacenters décident de les remplacer (De Spiegeleer, 2021).

Google a notamment communiqué sur le projet de faire tourner les datacenters sur 100 % d'énergie renouvelable. Un projet louable, même si nous pouvons nous demander quelles solutions les datacenters vont envisager lorsqu'il y a moins de vent ou de soleil, étant donné qu'un datacenter ne peut absolument pas tomber en panne. Mais au-delà du problème de l'approvisionnement en énergie, un disque dur est remplacé toutes les 20 minutes dans un datacenter Google. La quantité d'e-waste générée est donc énorme (Laubeuf, 2021).

Mais que font les datacenters des éléments qu'ils n'utilisent plus ? Cette question a également été soulevée dans la même étude de SuperMicro, et il en ressort que la majorité des entreprises ont soit des partenariats avec des entreprises externes qui vont recycler les déchets, soit réutilisent les éléments ou les recyclent en interne. Seuls 12 % des datacenters ne recyclent pas les éléments en fin de vie. Les raisons invoquées pour ne pas procéder au recyclage vont du processus trop long ou trop coûteux à la difficulté de trouver des solutions de recyclage, de la difficulté à trouver un partenaire à l'absence de planification adéquate de la gestion des déchets électroniques. Ces chiffres sont intéressants car ils nous montrent l'importance accordée par les datacenters aux moyens mis en place pour que les composants

soient réutilisés de façon optimale. Cela concorde avec les propos de Monsieur Demulder, qui nous a confirmé l'existence d'un système de recyclage des déchets des datacenters.

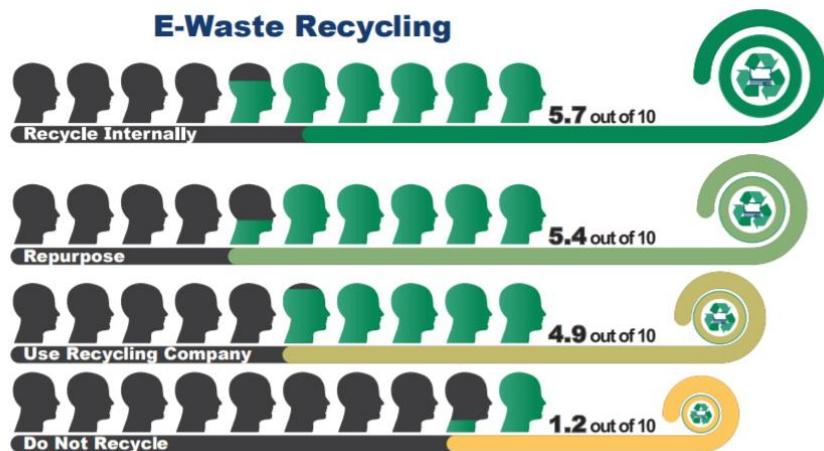


Figure 21 : Recyclage des déchets des datacenters

Source : Supermicro. (2019, décembre). *Datacenters & the Environment*. Récupéré de https://www.supermicro.com/white_paper/DataCenters_and_theEnvironmentDec2019.pdf

4.4 Pistes pour réduire l'empreinte carbone des datacenters

Si les datacenters sont énergivores, des solutions existent afin de réduire leur empreinte carbone.

4.4.1 Système de refroidissement

Comme expliqué précédemment, le système de refroidissement est l'un des postes les plus énergivores d'un datacenter. Il existe cependant des solutions permettant de réduire la consommation énergétique des systèmes de refroidissement.

Une des solutions consiste à **utiliser l'air extérieur** afin de refroidir le datacenter. Le datacenter ne peut jamais dépasser une certaine température, au risque de créer une surchauffe de tout le système. La température maximale autorisée dans un datacenter dépend de la limite opérationnelle des systèmes. En d'autres mots, si les systèmes ne fonctionnent plus à partir de 20 degrés Celsius, l'entièreté du datacenter devra toujours être maintenue à 20 degrés Celsius maximum. Cette température maximale de 20 degrés Celsius était la norme dans le passé, ce qui limitait l'utilisation de l'air extérieur. Il fallait en effet que la température extérieure soit inférieure à 20 degrés Celsius pour pouvoir utiliser l'air extérieur à des fins de refroidissement. Si la température extérieure dépassait les 20 degrés, il était nécessaire d'utiliser le système de refroidissement forcé, beaucoup plus énergivore que l'utilisation de l'air extérieur (De Spiegeleer, 2021).

Grâce aux progrès technologiques réalisés ces dernières années, les systèmes présents dans les datacenters ont une limite opérationnelle plus élevée. Aujourd’hui, les systèmes fonctionnent parfaitement jusqu’à 27 degrés Celsius. Les datacenters peuvent donc plus souvent utiliser l’air extérieur pour le refroidissement, ce qui résulte en un gain d’électricité non consommé. Comme nous l’a confirmé Monsieur Demulder, en appliquant ce principe, la consommation d’énergie nécessaire pour le refroidissement est bien inférieure à la consommation d’énergie des équipements actifs dans le datacenter, en moyenne sur l’année. Bien sûr, en été, quand il fait très chaud, la consommation d’énergie pour le refroidissement équivaut à la consommation des équipements.

Le datacenter d’Orange Belgium a ainsi pu réduire drastiquement sa consommation d’énergie et par conséquent son empreinte carbone. Bien que cela n’ait pas encore été traduit en nombre de tonnes de CO₂ non émis dans l’atmosphère, la réduction est substantielle, le datacenter ne devant pas recourir au refroidissement forcé pendant 90 % de l’année (Demulder, 2021).

4.4.2 Composants des datacenters

Un autre problème lié à la consommation énergétique des datacenters réside dans les composants.

Afin qu’un datacenter puisse rester compétitif, il est nécessaire d’utiliser la dernière technologie et donc de rafraîchir ses infrastructures de manière régulière. Le rafraîchissement de l’équipement ne doit cependant pas toujours consister en un remplacement complet du système de serveurs. Les sous-systèmes du serveur, tels que l’informatique, la mémoire, les ventilateurs, les blocs d’alimentation et les châssis, peuvent être rafraîchis à des rythmes différents en fonction de leur cycle de vie indépendant. Permettre un rafraîchissement modulaire des sous-systèmes est un autre moyen de réduire non seulement les coûts mais aussi les déchets électroniques (De Spiegeleer, 2021).

En général, la technologie des modules de calcul et de mémoire s’améliore tous les 1 à 2 ans, tandis qu’une alimentation électrique bien conçue peut durer plus de 10 ans. En désagrégant ces modules et en permettant leur rafraîchissement au niveau des sous-systèmes, les datacenters peuvent remplacer uniquement les pièces nécessaires et ainsi réutiliser les pièces qui ont un cycle de vie plus long. Ceci permet donc de combiner la réduction des coûts du cycle de rafraîchissement et la réduction des déchets électroniques (De Spiegeleer, 2021).

Cela dit, le rafraîchissement est toutefois nécessaire à l’évolution de la technologie. Sans le rafraîchissement des composants, les datacenters auraient encore toujours une limite opérationnelle plus basse et devrait donc utiliser plus souvent le système de refroidissement forcé des datacenters. Il faut donc trouver un juste équilibre entre l’évolution technologique et l’impact environnemental.

4.4.3 Conclusion

Même si des solutions potentielles existent ou sont en cours de recherche, nous pouvons conclure que l'utilisation de l'intelligence artificielle a un réel impact environnemental dont il faudra tenir compte lors du calcul de l'empreinte carbone de l'entreprise qui utilise cette technologie.

Nous devons bien entendu nuancer l'impact en fonction du type d'intelligence artificielle. L'importance de l'impact environnemental dépendra en effet de la taille et de la puissance des modèles. Plus un modèle est puissant, plus son impact environnemental sera grand et inversement. Il est donc recommandé d'adapter l'utilisation de l'intelligence artificielle à ses besoins ; utiliser une intelligence artificielle qui ne nécessite pas la capacité de calcul la plus élevée se traduira automatiquement par un impact environnemental plus limité.

5. Impact de l'intelligence artificielle sur l'empreinte carbone des entreprises

Après avoir analysé l'empreinte carbone de l'utilisation de l'intelligence artificielle, nous pouvons analyser l'impact que cela peut avoir sur l'empreinte carbone des entreprises.

Afin de déterminer l'impact de l'intelligence artificielle, il faut tout d'abord s'intéresser au but de l'utilisation de l'intelligence artificielle. En effet, comme nous l'avons vu dans l'analyse de la littérature, les utilisations de l'intelligence artificielle peuvent être variées. L'intelligence artificielle peut être notamment utilisée pour la cybersécurité, dans la lutte contre les fausses informations (fake-news), dans les voitures connectées, pour répondre à des questions à travers des assistants virtuels, dans la lutte contre la pandémie de Covid-19... Cependant, toutes les utilisations de l'intelligence artificielle n'ont pas un impact positif sur l'empreinte carbone. Il est donc important en tant qu'entreprise de se demander si l'utilisation d'une technologie qui n'est pas sans conséquence du point de vue environnemental est une nécessité. C'est un processus pédagogique qui doit se mettre en place afin d'informer les entreprises des conséquences de leurs choix.

Comme souligné précédemment, l'utilisation de l'intelligence artificielle peut aider les entreprises à améliorer leur empreinte carbone. Utiliser l'intelligence artificielle pour réduire ses déchets, faire de l'optimisation énergétique des bâtiments, optimiser les distances parcourues par les camions, etc. Toutes ces utilisations peuvent évidemment avoir un impact positif. Toutefois, l'impact doit être nuancé à la lumière de l'impact de l'utilisation même de l'intelligence artificielle qui, nous l'avons vu précédemment, est loin d'être neutre. Il faut en effet que la quantité de CO₂ non émis grâce à l'intelligence artificielle soit supérieure à la consommation énergétique liée à l'utilisation de l'intelligence artificielle. Ce n'est qu'à ce moment-là que l'impact de l'utilisation de l'intelligence artificielle sur l'empreinte carbone sera positif pour l'entreprise. Dans tous les autres cas de figure, l'impact sera négatif, et l'utilisation de l'intelligence artificielle contribuera à augmenter l'empreinte carbone de l'entreprise.

5.1 Complexité du calcul de l'impact

Pour pouvoir calculer l'impact de l'intelligence artificielle sur l'empreinte carbone des entreprises, il est indispensable de quantifier de manière précise l'impact environnemental de l'intelligence artificielle. Or, c'est ce calcul qui pose le plus problème.

En effet, sur base des informations que nous avons obtenues, nous ne sommes pas capables aujourd'hui de quantifier l'impact environnemental de la technologie. Nous pouvons uniquement en supposer l'impact. Madame De Ketelaere nous a confirmé qu'il est aujourd'hui extrêmement compliqué de mesurer l'impact carbone de l'utilisation de l'intelligence artificielle et elle a souligné deux raisons principales à cela.

La première raison réside dans le fait que souvent les entreprises ne sont pas au courant du système utilisé lors de l'utilisation d'un modèle d'intelligence artificielle. En effet, étant donné la **complexité de la technologie**, ce sont souvent des prestataires externes qui développent la technologie et qui l'implémentent dans une entreprise client. L'entreprise client achète un service en ayant une vague connaissance de la technologie utilisée et elle n'est donc bien souvent pas consciente du fait que l'utilisation de cette dernière contribue à augmenter l'empreinte carbone de l'entreprise.

La deuxième raison est liée aux **hébergeurs de données**. Les grands hébergeurs tels que Google ou Amazon ne sont pas transparents sur la consommation énergétique de leurs systèmes. Et comme de nombreuses entreprises sont dépendantes des serveurs Google et Amazon, quantifier l'empreinte carbone de l'intelligence artificielle est pour l'instant très compliqué.

Il n'y a actuellement pas d'outils qui permettent de calculer l'empreinte carbone de l'utilisation de l'intelligence artificielle, à part quelques sites web tels que **Machine Learning CO2 Impact**, qui permet d'estimer son empreinte en CO₂. Cependant, pour avoir un aperçu de cette estimation, il faut d'abord connaître une série de paramètres : le hardware utilisé pour l'entraînement de l'algorithme, le nombre d'heures nécessaires afin d'entraîner les algorithmes, le fournisseur du Cloud et la zone géographique de l'hébergeur de données - la zone géographique étant un facteur important dans l'analyse de l'impact en CO₂ car, comme dit précédemment, le refroidissement des datacenters représente 40 % de la facture énergétique.

Ci-dessous, un aperçu du site qui permet de quantifier le nombre de CO₂ émis pour une utilisation de l'intelligence artificielle en fonction du type de hardware, du nombre d'heures prestées, du fournisseur et de la région de calcul.

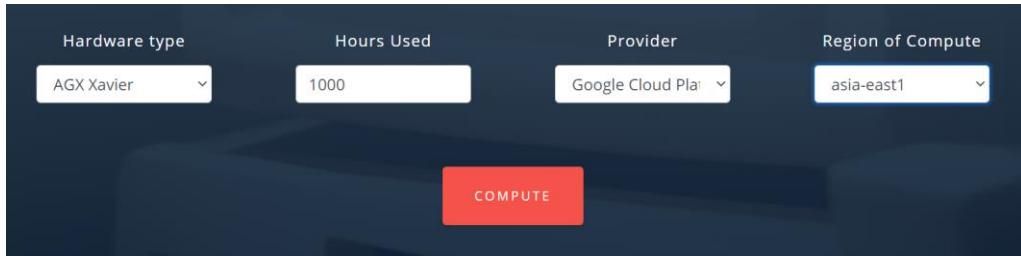


Figure 22 : Aperçu du site Machine Learning CO2 Impact

Source: Machine Learning CO2 Impact Calculator. (s. d.). *ML CO2 Impact*. Récupéré de <https://mlco2.github.io/impact/>

Une fois toutes ces données introduites, un résultat est transmis en kilogrammes d'équivalent CO₂ ainsi qu'une indication de la compensation carbone faite par le fournisseur.

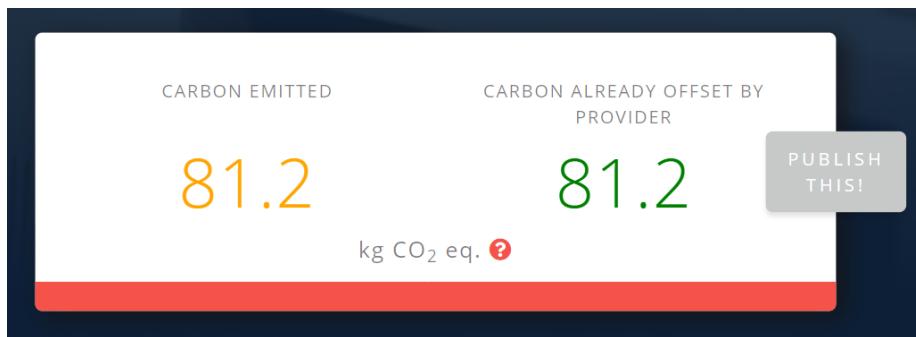


Figure 23 : Aperçu du résultat du site Machine Learning CO2 Impact

Source: Machine Learning CO2 Impact Calculator. (s. d.). *ML CO2 Impact*. Récupéré de <https://mlco2.github.io/impact/>

Selon Monsieur Laubeuf, doctorant à IMEC, la difficulté à récolter ces informations s'explique notamment par le fait qu'il faut retracer tout le parcours des éléments qui sont compris dans le système, que ce soient les puces, les processeurs etc. Il faut donc recréer toute la chaîne de valeur de l'intelligence artificielle et, pour chaque action réalisée, par exemple l'extraction du cobalt pour fabriquer les puces, calculer la quantité de CO₂ émise afin de récolter le cobalt nécessaire à la fabrication. C'est donc un processus extrêmement long et complexe, qui touche vraiment le cœur même des entreprises. C'est pourquoi certaines entreprises ne sont pas enclines à divulguer les informations, notamment pour des raisons de confidentialité par rapport à la concurrence.

Afin d'imaginer la quantité de CO₂ que pourrait émettre un système d'intelligence artificielle, prenons l'exemple d'une **requête à Siri**, l'assistant virtuel des téléphones Apple. IMEC, le laboratoire dans lequel travaille Madame De Ketelaere, a calculé l'impact en termes de CO₂ d'une demande toute simple : « Quel temps fera-t-il demain à Bruxelles ? ». Un premier algorithme va devoir s'occuper de la traduction de la question afin que le système, qui se situe aux Etats-Unis, puisse répondre à la question. Une fois la réponse trouvée, la réponse va être renvoyée vers le lieu de départ de la question, et va ensuite être retraduite pour que Siri puisse donner une réponse instantanément. Pour une simple requête comme celle-ci, 3 algorithmes différents entrent donc en jeu. Il faut ajouter à cela l'échange des données entre le lieu de la requête et l'endroit où la demande va être traitée, échange qui va lui aussi produire du CO₂. IMEC évalue le coût en termes de CO₂ de cette simple requête via Siri à 10-13g de CO₂.

Bien que cet exemple ne soit pas représentatif de la complexité de l'utilisation de l'intelligence artificielle, cela nous montre que nous sommes trop peu – voire pas du tout - conscients de l'impact environnemental de l'utilisation de la technologie.

Même s'il est aujourd'hui impossible de quantifier de manière précise l'empreinte carbone de l'intelligence artificielle et par conséquent l'impact de l'intelligence artificielle sur l'empreinte carbone des entreprises, certaines entreprises ont misé sur l'intelligence artificielle pour avoir un réel impact sur l'empreinte carbone et les résultats sont prometteurs.

5.2 Exemple concret : Centrica Business Solutions

Dans cette partie, nous montrerons via un exemple concret qu'il est possible aujourd'hui d'allier utilisation de la technologie et diminution de l'empreinte carbone.

Nous avons eu la chance de pouvoir poser nos questions à Monsieur Quetel, Sourcing & Sales Manager chez Centrica Business Solutions. Centrica Business Solutions est une filiale de Centrica, une entreprise britannique active dans le secteur énergétique. Centrica Business Solutions offre à ses clients une expertise énergétique afin qu'ils deviennent durables sur le plan écologique et économique. L'entreprise offre de nombreux services dont notamment le **Virtual Power Plant**, développé par REstore.

Afin d'être en mesure de comprendre le fonctionnement de REstore, il faut s'attarder sur le fonctionnement du réseau électrique en Belgique. Le **réseau électrique** est un point névralgique dans le bon fonctionnement d'un pays et d'une économie. En effet, la quantité totale d'électricité injectée dans un pays (production + importation) doit toujours être égale à la consommation du pays en question. En effet, sans cet équilibre, c'est tout le réseau du pays qui est mis hors circuit. Il existe deux cas de figure qui peuvent entraîner un non-équilibre du réseau.

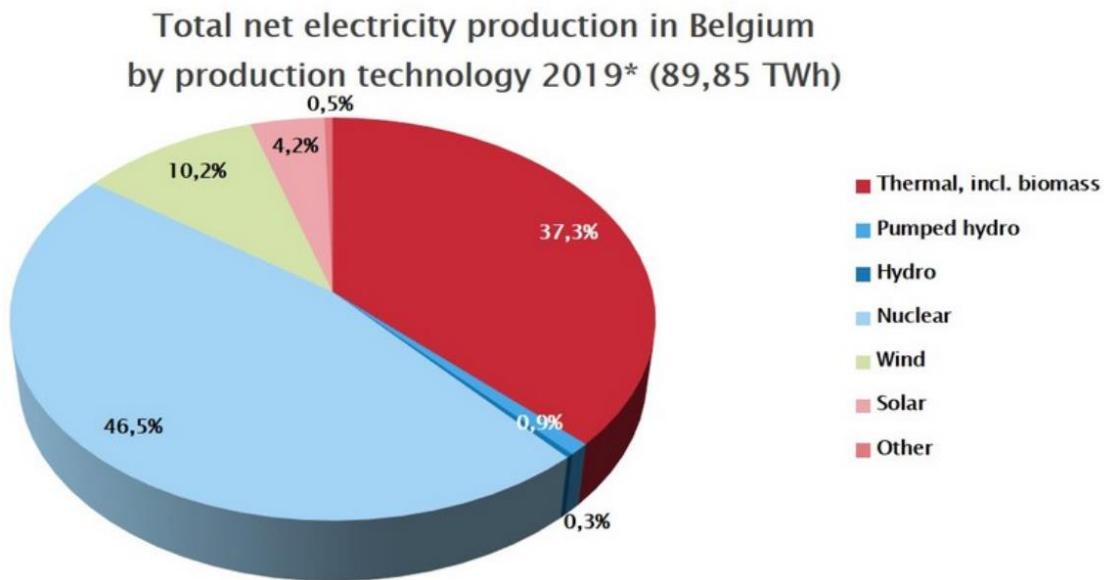
Dans le premier cas de figure, l'offre d'électricité est supérieure à la demande. Dans ce cas-là, trop peu d'électricité sera consommé et il y aura donc un surplus électrique sur le réseau. Nous pourrions nous dire qu'avoir trop d'électricité n'est pas un problème en soi et que l'électricité sera juste perdue. Or un surplus d'électricité sur le réseau augmente la fréquence électrique. Etant donné que les centrales qui produisent de l'électricité sont programmées pour fonctionner à une certaine fréquence, si la fréquence est trop haute pendant un certain temps, les centrales risquent de se déconnecter et créer un blackout. Un blackout est un effondrement du système électrique belge, ce qui entraîne une paralysie de la Belgique (Energuide, s. d.).

Dans le cas de figure inverse, l'offre d'électricité est inférieure à la demande. Dans ce cas, la consommation d'électricité sera trop importante et les fournisseurs d'électricité ne seront pas capables de répondre à la demande. S'il y a trop peu d'électricité disponible sur le réseau, la fréquence électrique risque de chuter, et comme pour le cas précédent, les centrales risquent de se déconnecter à cause d'une fréquence trop basse sur le réseau. Ceci entraînera également un blackout.

Nous le voyons, il est important que la demande d'électricité soit toujours égale à l'offre. C'est donc un véritable défi d'équilibre que les fournisseurs d'électricité doivent gérer tous les jours.

Cependant, l'**augmentation de la part d'énergies renouvelables** dans notre pays accroît aussi le risque de non-équilibre entre l'offre et la demande. En effet, les énergies renouvelables sont fortement dépendantes de facteurs externes comme le degré d'ensoleillement, la force du vent et des courants etc. Cela rend donc le défi d'équilibre encore plus difficile.

L'autre difficulté liée au maintien d'équilibre entre l'offre et la demande est l'utilisation de **centrales nucléaires** afin de produire de l'électricité. Les centrales nucléaires représentaient 46,5 % de l'électricité produite en 2019 (FEBEG, 2020).



Le graphique ci-dessous représente l'évolution de la production nette d'électricité en Belgique qui s'est établie à 89,9 TWh au cours de l'année 2019.

Figure 24 : Total net de la production d'électricité en Belgique par technologie en 2019

Source : FEBEG. (2020, juin). *Slide deck statistiques Rapport Annuel 2019*. Récupéré de https://www.febeg.be/sites/default/files/febeg_annual_report_slide_deck_2019_fr_final.pdf

Le problème des centrales nucléaires réside dans la nature et le fonctionnement de leurs infrastructures qui empêchent une adaptation flexible de la production en fonction de la demande (Quetel, 2021). C'est pourquoi les fournisseurs d'électricité ont acquis des centrales dites OCGT ou OpenCycle-GasTurbine. Ce sont des **centrales à gaz** utilisées afin de produire la quantité manquante d'électricité en période de non-équilibre entre la demande et l'offre. En effet, ces centrales permettent de produire rapidement l'électricité manquante nécessaire pour rester en équilibre. Ce sont donc des centrales qui contribuent à la sécurité d'approvisionnement d'électricité en Belgique.

Toutefois, ces centrales sont polluantes. En effet, les émissions de CO₂ des centrales à gaz sont bien supérieures à celle des centrales nucléaires ou des systèmes de production d'énergies renouvelables (Forum Nucléaire, 2019).

Afin d'assurer une disponibilité à tout moment, ce qui est nécessaire pour éviter tout risque de blackout, les centrales à gaz doivent opérer de façon constante à une puissance minimale requise afin de pouvoir garantir les pics de puissances à fournir. La centrale émet donc constamment du CO₂ dans l'atmosphère afin de pouvoir, au moment voulu, apporter la puissance électrique nécessaire.

De plus, les centrales à gaz sont construites de manière à émettre le moins de CO₂ dans l'atmosphère lorsqu'elles tournent à pleine puissance. Lorsqu'elles tournent à 30-50 % de leur capacité, la proportion de CO₂ émis est bien supérieure à la proportion de CO₂ émis quand les centrales tournent à plein régime (Centrica Business Solutions, s. d.).

Ces centrales à gaz ont donc un impact environnemental important mais elles sont indispensables à l'équilibre énergétique.

Au travers de REstore, Centrica Business Solutions est capable d'offrir une alternative aux centrales OCGT. Centrica Business Solutions propose une **centrale virtuelle de sécurisation de l'approvisionnement de l'électricité** sans avoir à utiliser de centrales à gaz, ce qui permet donc de réduire la quantité de CO₂ émis dans l'atmosphère. En utilisant de l'intelligence artificielle afin d'optimiser la demande d'électricité de gros industriels en Belgique, Centrica Business Solutions est capable d'augmenter ou de diminuer instantanément la demande en électricité.

En effet, certaines entreprises en Belgique sont de très gros consommateurs d'électricité, à tel point que leur consommation annuelle dépasse parfois celle des villes. Ce sont souvent des entreprises actives dans le secteur de la sidérurgie ou des sociétés pharmaceutiques telles que GSK. Centrica Business Solutions a noué des partenariats avec ces gros industriels pour faire fonctionner sa centrale virtuelle : grâce à ces partenariats, Centrica Business Solutions peut mobiliser à tout moment une quantité convenue de megawatts afin d'adapter en temps réel la consommation électrique de ces entreprises partenaires en fonction de l'offre et de la demande d'électricité. Prenons un exemple. Si la demande en électricité est trop forte, c'est-à-dire que trop de personnes désirent consommer de l'électricité en Belgique, Centrica Business Solutions va ralentir la production - et donc la consommation électrique - d'une ou plusieurs de ses entreprises-clients, ce qui augmentera automatiquement la quantité d'électricité disponible sur le réseau. Ainsi, les fournisseurs d'électricité ne devront pas mettre en marche les centrales à gaz polluantes afin de combler la différence pour atteindre l'équilibre du réseau (Quetel, 2021).

Ce même système s'applique également dans le cas de figure inverse, c'est-à-dire quand il y a trop d'électricité disponible sur le réseau, par exemple quand le renouvelable produit trop d'électricité. Centrica Business Solutions va alors pouvoir augmenter la production des entreprises et donc rétablir l'équilibre entre l'offre et la demande. Tout ceci se déroule de manière entièrement automatisée grâce à des algorithmes puissants qui vont optimiser la consommation énergétique en Belgique.

L'**intelligence artificielle** va être au service de la gestion et de la fiabilité de cette centrale virtuelle, en connaissant la nature des équipements propres à chaque entreprise, en faisant de l'acquisition de données en temps réel sur chacun des sites et en assemblant ces données grâce à un algorithme dédié. C'est donc la combinaison de ces deux algorithmes, la gestion du big data en temps réel couplée à une intelligence artificielle, qui permet de faire de l'équilibrage énergétique (Quetel, 2021).

L'intelligence artificielle est indispensable dans ce cas-ci car l'humain n'est pas capable de prendre en compte tous les paramètres nécessaires pour pouvoir optimiser la demande électrique et fournir une solution rapidement. Pour que les entreprises clients puissent bénéficier de la centrale virtuelle, il est indispensable que tous les procédés de ces entreprises soient automatisés. Il n'y a pas d'intervention humaine lors de l'activation d'une entreprise.

Centrica Business Solutions a réussi à mesurer l'**impact environnemental de sa centrale virtuelle**, exprimé en tonnes de CO₂, comme l'atteste un document interne transmis par Monsieur Quetel.

« Basé sur une émission de 400 g de CO₂/kWh produit pour une OCGT, cela représente une réduction de 1600 tonnes de CO₂ par MW de capacité flexible rendu disponible pour une année complète. »

En d'autres mots, 1 MW qui ne doit pas être produit via les centrales à gaz lors du rééquilibrage permet d'économiser 1600 tonnes de CO₂ émises dans l'atmosphère.

Centrica Business Solutions a, à ce jour, plus de 1 GW de capacité d'énergie fiable pour les opérateurs de réseaux. Etant donné que 1 GW équivaut à 1000 MW, 1.600.000 tonnes de CO₂ ne sont pas émises dans l'atmosphère (Centrica Business Solutions, s. d.).

Ceci reste bien sûr très théorique, car ce GW de capacité n'est pas utilisé dans son ensemble et est simplement disponible au cas où un rééquilibrage est nécessaire.

Nous pouvons cependant aisément conclure que dans ce cas précis, les avantages de l'utilisation de l'intelligence artificielle pourraient surpasser le coût énergétique lié à l'utilisation de la technologie. L'impact sur l'empreinte carbone de l'entreprise client pourrait donc s'avérer positif.

Ceci reste bien entendu une supposition car il n'est pas encore possible aujourd'hui de mesurer concrètement le nombre de grammes de CO₂ émis par l'utilisation de l'intelligence artificielle indispensable au fonctionnement de la centrale virtuelle. Ce n'est qu'à partir du moment où il sera possible de quantifier l'utilisation de l'intelligence artificielle en grammes de CO₂ émis que l'impact de l'intelligence artificielle sur l'empreinte carbone pourra être réellement calculé.

6. Conclusion

Tout au long de ce mémoire, nous avons voulu faire le lien entre l'utilisation de l'intelligence artificielle et l'empreinte carbone des entreprises. Nous avons commencé par faire une analyse de la littérature en nous focalisant sur la question de recherche suivante : *L'impact de l'utilisation de l'intelligence artificielle sur l'empreinte carbone des entreprises*. Cette étape était importante afin de se familiariser avec les concepts clés tels que l'empreinte carbone et l'intelligence artificielle.

Après cette première phase exploratoire, nous avons développé le concept de la réduction de l'empreinte carbone en abordant ses limites et ses solutions.

Nous avons ensuite développé tous les éléments qui ont un impact sur l'empreinte carbone de l'intelligence artificielle, que ce soient les datacenters ou les composants et algorithmes nécessaires à l'utilisation de l'intelligence artificielle.

Sur base de tous les éléments à prendre en compte lors du calcul de l'empreinte carbone, nous avons essayé de mesurer l'impact de l'intelligence artificielle sur l'empreinte carbone des entreprises.

Nous avons terminé notre analyse en prenant l'exemple d'une entreprise qui a réussi à allier utilisation de l'intelligence artificielle et réduction de l'empreinte carbone.

Toutes nos analyses se sont basées sur les interviews que nous avons effectuées tout au long de notre mémoire et sur la documentation récoltée lors de ces interviews.

Pour pouvoir calculer l'impact de l'utilisation de l'intelligence artificielle sur l'empreinte carbone des entreprises, nous devons calculer l'empreinte carbone de l'utilisation de l'intelligence artificielle que nous savons énergivore. Or, notre analyse s'est heurtée aux limites actuelles de la science et a mis en lumière les différents éléments qui complexifient le calcul. Nous nous sommes rendus compte qu'il n'était pas possible à ce jour de quantifier l'impact de l'utilisation de l'intelligence artificielle.

La réponse à la question de recherche reste donc aujourd'hui théorique. L'utilisation de l'intelligence artificielle n'aura un effet positif sur l'empreinte carbone des entreprises que si les gains en termes de CO₂ non émis réalisés grâce à l'utilisation de l'intelligence artificielle sont supérieurs à la consommation énergétique liée à l'intelligence artificielle.

La digitalisation des données, le stockage, l'hébergement de ces données, donc concrètement tout ce qu'il y a derrière l'intelligence artificielle, génère du CO₂. Mais ce ne doit pas être un point bloquant à l'utilisation de la technologie, car la recherche avance afin de trouver des solutions pour réduire l'empreinte carbone de l'utilisation de l'intelligence artificielle.

Elle avance également dans le domaine de l'utilisation de l'intelligence artificielle pour aider les entreprises à réduire leur empreinte carbone. Les applications positives de l'intelligence artificielle dans ce domaine sont déjà nombreuses et variées et elles continueront à évoluer au fil de la recherche.

Les années à venir sont prometteuses. Tout au long de ce mémoire, nous avons pu nous entretenir avec des experts passionnés et motivés. C'est grâce à leur motivation et à l'incroyable capacité de l'être humain à constamment innover et trouver des solutions que nous pourrons réussir la transition énergétique.

7. Limites de notre analyse

Nos conclusions ne pourraient être complètes sans mentionner les limites auxquelles notre analyse s'est heurtée.

La première limite que nous avons rencontrée était la limite de nos connaissances techniques à propos de l'intelligence artificielle. Nous avons fait un stage de trois mois chez Micropole, une société de consulting spécialisée dans la transformation digitale, mais en raison de la crise sanitaire, nous avons été contraints de le faire 100 % à distance. Si ce stage nous a certes permis de récolter des informations, nous n'avons pas pu rencontrer physiquement les sociétés et expérimenter la technologie. L'analyse de la littérature nous a bien évidemment permis d'acquérir des connaissances mais certaines interviews étaient très techniques et parfois difficiles à suivre.

La seconde limite a été celle de la technologie en tant que telle. Etant donné qu'il n'est pas encore possible aujourd'hui de calculer l'empreinte carbone de l'intelligence artificielle, nos analyses sont restées superficielles. Nous ne pouvons malheureusement pas aller plus vite que la technologie. Les recherches sur le sujet sont encore récentes : des laboratoires tels que IMEC-IDlab ont commencé les recherches sur le sujet il y a quelques années seulement. Nous devons donc laisser le temps à la science de mettre en place des techniques précises de calcul.

8. Pistes pour le futur

Tout au long des pages précédentes, nous avons répondu à notre question de recherche qui était la suivante : Quel est l'impact de l'utilisation de l'intelligence artificielle sur l'empreinte carbone d'une entreprise ? Malheureusement, trop de zones d'ombre ne nous permettent pas de tirer une conclusion unique. Les progrès à réaliser dans ce domaine sont énormes. Il serait donc intéressant d'approfondir le sujet en abordant des pistes de recherches différentes.

Il serait intéressant de refaire une **analyse similaire** au cours des prochaines années, lorsque la problématique fera l'objet de recherches plus poussées. Etant donné la vitesse à laquelle la technologie évolue, nous sommes convaincus que d'ici quelques années, davantage d'outils seront à la disposition de tous afin de mesurer l'impact écologique réel de l'intelligence artificielle et ainsi pouvoir répondre au mieux aux questions environnementales liées à l'intelligence artificielle.

Une autre piste consisterait à **impliquer tous les acteurs** de l'écosystème intelligence artificielle dans le processus de réflexion sur l'empreinte carbone de l'intelligence artificielle. Pour l'instant, les acteurs de l'intelligence artificielle mettent l'accent sur l'adoption de la technologie par les entreprises en Belgique, afin de ne pas prendre du retard par rapport à leurs voisins européens. Une collaboration entre les acteurs du monde de l'intelligence artificielle et les laboratoires de recherche pourrait être bénéfique pour tous et conduire à une intelligence artificielle durable.

Une troisième piste à envisager pourrait être **l'analyse de l'empreinte carbone d'une entreprise en deux temps** : avant l'implémentation d'un système d'intelligence artificielle destiné à réduire l'empreinte écologique de l'entreprise et après l'implémentation de ce système. Nous pourrions ainsi quantifier l'impact de l'utilisation de l'intelligence artificielle. Nous voulions adopter cette démarche pour notre mémoire mais nous nous sommes heurtés à la difficulté de quantifier l'impact écologique lié à l'utilisation de l'intelligence artificielle. Il est probable que dans les prochaines années, d'autres moyens seront mis à la disposition des chercheurs et des étudiants, ce qui permettra de tirer des conclusions plus précises.

Dans cette même optique, un **label écologique** pourrait être mis en place pour les différentes utilisations de l'intelligence artificielle. De même qu'il existe des labels pour la consommation énergétique des frigos par exemple, un label lié à la consommation énergétique des différents types d'intelligence artificielle permettrait aux entreprises de déterminer rapidement si la technologie qu'elles souhaitent implémenter cadre dans les objectifs de développement durable qu'elles se sont fixées.

9. Bibliographie

1ère Position. (2019, 25 novembre). *Altavista, le moteur de recherche déchu*. Récupéré le 20 mai 2021 de <https://www.1ere-position.fr/definitions/altavista/>

42U - Data Center Solutions. (2021, 2 février). *PUE Calculator*. Récupéré le 7 juin 2021 de <https://www.42u.com/measurement/pue-dcie.htm>

Accenture. (2016, 12 décembre). *Etude Accenture : la croissance via l'intelligence artificielle*. Récupéré le 10 mai 2021 de <https://www.accenture.com/fr-fr/company-news-release-growth-artificial-intelligence>

Actu-environnement. (s. d.). *Définition de Puits de carbone*. Récupéré le 27 juillet 2021 de https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/puits_de_carbone.php4

Agence de la transition écologique. (s. d.). *ADEME - Site Bilans GES*. Récupéré le 4 juin 2021 de <https://www.bilans-ges.ademe.fr/>

Agence Parisienne du Climat. (2019, 8 octobre). *Les GES (gaz à effet de serre)*. Récupéré le 16 mai 2021 de <https://www.apc-paris.com/gaz-serre>

Agoria. (s. d.). *Agoria / Sustainable AI In Business*. Récupéré le 6 juin 2021 de <https://www.agoria.be/sustainable-ai-in-business/fr/>

AlumniForThePlanet. (s. d.). *Représentation des 3 périmètres*. Récupéré de <https://alumnifortheplanet.org/je-m-informe-sur-les-enjeux>

Anderson, J., Bholat, D., Gharbawi, M., & Thew, O. (2021, 15 avril). *The impact of COVID-19 on artificial intelligence in banking*. Récupéré le 30 juin 2021 de <https://www.bruegel.org/2021/04/the-impact-of-covid-19-on-artificial-intelligence-in-banking/>

Bastien L. (2017, 10 juillet). *Data Lake : définition, avantages et inconvénients pour l'entreprise*. Récupéré le 13 mai 2021 de <https://www.lebigdata.fr/data-lake-definition>

Benjamin, J. (2019, 8 mai). *Carbon Tracker to Measure World's Power Plant Emissions from Space with Support from Google.org*. Récupéré le 17 mai 2021 de <https://carbontracker.org/carbon-tracker-to-measure-worlds-power-plant-emissions-from-space-with-support-from-google-org/>

Bordage, F. (2012, 10 janvier). *27 degrés, température idéale pour les data center*. Récupéré le 17 mai 2021 de <https://www.greenit.fr/2012/01/10/27-degres-temperature-ideale-pour-les-data-center/>

Bordage, F. (2019, septembre). *Empreinte environnementale du numérique mondial*. Récupéré de https://www.greenit.fr/wp-content/uploads/2019/10/2019-10-GREENIT-etude_EENM-rapport-accessible.VF_.pdf

Campana, M., Cueugniet, J., Schmitt, M., & Siben, C. (2019, décembre). *Réduire la consommation énergétique du numérique*. Récupéré le 19 juin 2021 de https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/cge/consommation-energique-numerique.pdf

Carbon Trust. (2020, 23 juin). *Briefing : What are Scope 3 emissions? The Carbon Trust.* Récupéré le 10 mai 2021 de <https://www.carbontrust.com/resources/briefing-what-are-scope-3-emissions>

Carbone4 & Net Zero Initiative. (2020, avril). *NET ZERO INITIATIVE UN RÉFÉRENTIEL POUR UNE NEUTRALITÉ CARBONE COLLECTIVE.* Récupéré le 11 mai 2021 de <http://www.carbone4.com/wp-content/uploads/2020/04/Carbone-4-Referentiel-NZI-avril-2020.pdf>

Centrica Business Solutions. (s. d.). *À propos de RESTORE.* Récupéré le 30 juillet 2021 de <https://www.centricabusinesssolutions.be/fr/solutions-energetiques/produits/solutions-doptimisation-energetique/propos-de-restore>

Cimino, V. (2019, 18 décembre). *Prévisions : 745 000 véhicules autonomes en circulation en 2023.* Récupéré le 19 mai 2021 de <https://siecledigital.fr/2019/12/18/previsions-745000-vehicules-autonomes-2023/>

Climate-KIC. (2020, 5 novembre). *AI and climate change : The promise, the perils and pillars for action.* Récupéré le 17 mai 2021 de <https://www.climate-kic.org/opinion/ai-and-climate-change-the-promise-the-perils-and-pillars-for-action/#:%7E:text=AI%20for%20climate%20action%20has,don't%20see%20or%20understand>

Coche, S. (2019, 30 juillet). *Prévoir les ressources nécessaires aux applications d'Intelligence Artificielle.* Récupéré le 20 mai 2021 de <https://www.ibm.com/blogs/ibm-france/2019/06/04/prevoir-les-ressources-necessaires-aux-applications-dintelligence-artificielle/>

Cohen, C. (2019, 23 avril). *Climat : les émissions mondiales de CO2 ont augmenté de 55% en vingt ans.* Récupéré le 16 mai 2021 de <https://www.lefigaro.fr/economie/le-scan-eco/dessous-chiffres/climat-les-emissions-mondiales-de-co2-ont-augmente-de-55-en-vingt-ans-20190419>

Comision Européa. (2021, 22 avril). *Afrique centrale - L'intelligence artificielle à la rescousse de. International Partnerships - European Commission.* Récupéré le 19 mai 2021 de https://ec.europa.eu/international-partnerships/stories/afrique-centrale-lintelligence-artificielle-la-rescousse-de-la-biodiversite_es

Commission Européenne. (2017, 28 juin). *Causes of climate change. Action pour le climat - European Commission.* Récupéré le 19 mai 2021 de https://ec.europa.eu/clima/change/causes_fr

Compte CO2. (s. d.). *Comment marche la compensation carbone ? - Compte CO2.* Récupéré le 1 août 2021 de <https://www.compteco2.com/article/comment-marche-la-compensation-carbone/>

DataLab. (2021). *Répartition, par source, des émissions de Gaz à Effet de Serre dans l'UE à 27 entre 1990 et 2018.* Récupéré de <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat/>

Dejoux, C. (2018, 18 mai). *Transformation numérique et intelligence artificielle : deux révolutions à ne pas rater pour les entreprises.* Récupéré le 19 mai 2021 de

<https://theconversation.com/transformation-numerique-et-intelligence-artificielle-deux-revolutions-a-ne-pas-rater-pour-les-entreprises-96598>

De Ketelaere, M. (2021, 26 mai). Directrice IA @Imec-IDLab. [Entretien]. Via téléphone

Delacharlerie, A. (2020, 20 novembre). *La transformation numérique des entreprises accélérée par la crise du COVID-19*. Récupéré de <https://www.digitalwallonia.be/fr/publications/covid-19-et-transformation-numerique-des-entreprises>

Deloitte. (2019, octobre). *Mettre le développement durable au cœur de la stratégie d'entreprise*. Récupéré de https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/fr/Documents/sustainability-services/deloitte_developpement-durable-au-coeur-strategies-entreprises.pdf

Demulder, W. (2021, 26 mai). Datacenter Manager @Orange Belgium. [Entretien]. Via téléphone

Deschamps, T. (2020, 9 mars). *La météo et l'IA pour aider l'agriculture « à produire mieux avec moins »*. Récupéré le 26 juin 2021 de <https://hubinstitute.com/2020/retail/interview-mustread-SophieDeBotton-TheWeatherCompany-EmmanuelLeCloirec-IBM-industrie-agriculture-meteo-IA>

De Spiegeleer, G. (2021, 1 juin). CFO @Ethernetics. [Entretien]. Via Google Meet

Diaz, J. (2020, 8 juin). *L'intelligence artificielle dans le domaine maritime*. Récupéré le 19 mai 2021 de <https://www.actuia.com/actualite/journee-mondiale-de-loceanquelques-exemples-dutilisation-de-lia-dans-le-domaine-maritime/>

Dickson, B. (2019, 8 février). *What is computer vision? TechTalks*. Récupéré le 16 mai 2021 de <https://bdtechtalks.com/2019/01/14/what-is-computer-vision/>

Economie.fgov. (2021, 29 avril). *Impact économique du coronavirus / SPF Economie*. Récupéré le 15 mai 2021 de <https://economie.fgov.be/fr/themes/entreprises/coronavirus/impact-economique-du>

Education, I. C. & IBM. (2021, 21 mai). *Machine Learning*. Récupéré le 16 mai 2021 de <https://www.ibm.com/cloud/learn/machine-learning>

Edwards, J. (2019, août 16). *What is predictive analytics ? Transforming data into future insights*. Récupéré le 16 mai 2021 de <https://www.cio.com/article/3273114/what-is-predictive-analytics-transforming-data-into-future-insights.html>

Elices, J. (2020, 27 octobre). *Al-Jazari, l'inventeur des premiers robots de l'Histoire*. Récupéré le 17 mai 2021 de <https://www.nationalgeographic.fr/histoire/2020/10/al-jazari-linventeur-des-premiers-robots-de-lhistoire>

Energuide. (s. d.). *Pourquoi le réseau électrique doit-il rester en équilibre ?* Récupéré le 12 juin 2021 de <https://www.energuide.be/fr/questions-reponses/pourquoi-le-reseau-electrique-doit-il-rester-en-equilibre/2136/>

European Commission. (s. d.). *Climate Action. Climate Action - European Commission*. Récupéré le 1 juin 2021 de <https://ec.europa.eu/clima/>

European Commission. (2019, 12 octobre). *Un pacte vert pour l'Europe. Commission européenne* - European Commission. Récupéré de https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_fr

European Commission. (2020, mai). *Energy-efficient Cloud Computing Technologies and Policies for an Eco-friendly Cloud Market.* Récupéré le 16 mai 2021 de [https://cdnx.nextinpath.com/data-next/file-uploads/FINALSTUDYEnglishKK-03-20-210-EN-N13072020pdf%20\(4\).pdf](https://cdnx.nextinpath.com/data-next/file-uploads/FINALSTUDYEnglishKK-03-20-210-EN-N13072020pdf%20(4).pdf)

European Parliament. (2020, 1 octobre). *Rendre l'intelligence artificielle éthique, sûre et innovante.* Récupéré le 22 mai 2021 de <https://www.europarl.europa.eu/news/fr/press-room/20200925IPR87932/rendre-l-intelligence-artificielle-ethique-sure-et-innovante>

European Parliament. (2021, 29 mars). *What is artificial intelligence and how is it used ?* Récupéré le 16 mai 2021 de <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20200827STO85804/what-is-artificial-intelligence-and-how-is-it-used>

Fallery, B. (2010). *Adoption, implantation et généralisation d'une nouvelle technologie : une interprétation en termes de changement stratégique.* Récupéré le 30 mai 2021 de <https://www.cairn.info/revue-systemes-d-information-et-management-2010-3-page-118.htm>

FEBEG. (2020, juin). *Slide deck statistiques Rapport Annuel 2019.* Récupéré de https://www.febeg.be/sites/default/files/febeg_annual_report_slide_deck_2019_fr_final.pdf

Forbes France. (2021, 16 mars). *L'Intelligence artificielle, première gagnante du monde post-Covid.* Récupéré le 30 juin 2021 de <https://www.forbes.fr/technologie/il-y-a-un-an-le-covid-19-lintelligence-artificielle-premiere-gagnante-du-monde-post-covid/>

Forum Nucléaire. (2019, 5 décembre). *Comment se fait-il que les centrales nucléaires soient si économies en émission de CO₂ ?* Récupéré le 15 juin 2021 de <https://www.forumnucleaire.be/theme/la-technologie-nucl%C3%A9aire-pour-les-nuls/comment-se-fait-il-que-les-centrales-nucl%C3%A9aires-soient-si-%C3%A9conomies-en-%C3%A9mission-de-co2>

Futura Sciences. (s. d.). *Loi de Moore : qu'est-ce que c'est ?* Récupéré le 1 juin 2021 de <https://www.futura-sciences.com/tech/definitions/informatique-loi-moore-2447/>

Gaidya, V. (2018). *Organizations to Leverage Artificial Intelligence to Transform their Businesses.* Récupéré de <https://doi.org/10.4172/2167-0234.1000327>

Garric, A. (2021, 19 février). *Les Etats-Unis ont réintégré l'accord de Paris et cela peut accélérer la lutte contre le dérèglement climatique.* Récupéré le 4 juillet 2021 de https://www.lemonde.fr/planete/article/2021/02/19/comment-le-retour-des-etats-unis-dans-laccord-de-paris-peut-accelerer-la-lutte-contre-le-dereglement-climatique_6070501_3244.html

Geo.fr. (2018, 11 décembre). *Pollutions anthropiques : définitions et enjeux.* Récupéré le 10 mai 2021 de <https://www.geo.fr/environnement/pollutions-anthropiques-definitions-et-enjeux->

193822#:%7E:text=L'expression%20pollution%20anthropique%20d%C3%A9signe,dioxyde%20de%20carbone%20ou%20CO2.

Guillaume, D. (2020, 9 janvier). *Composition de l'air*. Récupéré le 11 mai 2021 de <https://atmo-france.org/composition-de-lair/#:%7E:text=L'air%20est%20un%20m%C3%A9lange,au%20maintien%20de%20la%20vie>.

Hardison, S. (2017, 13 décembre). *Ligne du temps : les 4 révolutions*. Récupéré de <https://medium.com/@sarah.hardison/creative-collaboration-with-ai-39f147d25934>

Harvard Library. (2020). *Principled Artificial Intelligence : Mapping Consensus in Ethical and Rightsbased Approaches to Principles for AI*. Récupéré le 16 mai 2021 de [https://dash.harvard.edu/bitstream/handle/1/42160420/HLS%20White%20Paper%20Final_v3.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=%E2%80%9CArtificial%20intelligence%20\(AI\)%20systems,the%20physical%20or%20digital%20dimension](https://dash.harvard.edu/bitstream/handle/1/42160420/HLS%20White%20Paper%20Final_v3.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=%E2%80%9CArtificial%20intelligence%20(AI)%20systems,the%20physical%20or%20digital%20dimension)

Hendler, J. (2008). *Avoiding Another AI Winter*. Récupéré le 16 mai 2021 de https://www.researchgate.net/profile/James-Hendler/publication/3454567_Avoiding_Another_AI_Winter/links/558833d808ae8c4f3406358f/Avoiding-Another-AI-Winter.pdf

Henno, J. (2017, août 21). *1956 : et l'intelligence artificielle devint une science*. Récupéré le 19 mai 2021 de <https://www.lesechos.fr/2017/08/1956-et-lintelligence-artificielle-devint-une-science-181042>

HYDREOS. (2019, 10 septembre). *L'intelligence artificielle s'intègre dans tous les secteurs de l'eau*. Récupéré le 25 mai 2021 de <https://www.hydreos.fr/news/199/34/Lintelligence-artificielle-sint%C3%A8gre-dans-tous-les-secteurs-de-leau.html>

I4CE - Institute for Climate Economics. (2019). *Chiffres clés du climat France, Europe et Monde*. Récupéré de https://www.i4ce.org/wp-content/uploads/2018/11/Chiffres-Clefs-du-Climat_2019.pdf

IBM. (s. d.). *What is Computer Vision?* Récupéré le 1 juin 2021 de <https://www.ibm.com/topics/computer-vision>

IBM. (2021, 21 juin). *Natural Language Processing (NLP)*. Récupéré le 30 juin 2021 de <https://www.ibm.com/cloud/learn/natural-language-processing>

IMEC. (2021). *Représentation du processus de pruning*. Récupéré lors de la conférence IMEC-Energy Efficiency lors de la semaine d'intelligence artificielle du 15 au 19 mars 2021

Intrado GlobeNewswire. (2021, 18 juin). *The AI in computer vision market*. Récupéré le 30 juin 2021 de <https://www.globenewswire.com/news-release/2021/06/18/2249487/0/en/The-AI-in-computer-vision-market-is-estimated-to-be-valued-at-USD-15-9-billion-in-2021-and-reach-USD-51-3-billion-by-2026-at-a-CAGR-of-26-3-between-2021-and-2026.html>

i-SCOOP. (2021, 30 mai). *Data Age 2025 : the datasphere and data-readiness from edge to core*. Récupéré le 12 juin 2021 de <https://www.i-scoop.eu/big-data-action-value-context/data-age-2025-datasphere/>

- Jahnich, M. (2021, 5 mai). *La loi Climat va-t-elle permettre de freiner le « greenwashing » ?* Récupéré le 19 juin 2021 de <https://www.latribune.fr/opinions/tribunes/la-loi-climat-va-t-elle-permettre-de-freiner-le-greenwashing-884012.html>
- JDN. (2019, 19 février). *La loi de Moore définie simplement.* Récupéré le 1 juin 2021 de <https://www.journaldunet.fr/web-tech/dictionnaire-du-webmastering/1203331-loi-de-moore-definition-traduction/>
- Jouzel, J., Petit, M., & Duplessy, J-C. (2020). *Le changement climatique dû aux activités humaines.* Récupéré le 12 mai 2021 de https://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/livret_1.pdf
- Johner, B. (2021, 22 juin). Commercial @Samy. [Entretien]. Via Teams
- Josić, K. (2011, 11 janvier). *No. 2765 : The Mechanical Turk.* Récupéré le 17 mai 2021 de <https://www.uh.edu/engines/epi2765.htm>
- Laubeuf, N. (2021, 23 juin). Doctorant @IMEC-IDLab. [Entretien]. Via Teams
- Le Blanc, B. (2014). *Alan Turing : les machines à calculer et l'intelligence.* Hermès, n° 68(1), 123-126. Récupéré le 17 mai 2021 de <https://doi.org/10.3917/herm.068.0123>
- Le Parisien. (2015, 7 octobre). *CO2 : Internet pollue autant que les avions.* Récupéré le 3 juin 2021 <https://www.leparisien.fr/environnement/co2-internet-pollue-autant-que-les-avions-07-10-2015-5163373.php>
- Luminus. (s. d.). *Une nouvelle centrale gaz vapeur (TGV) sur le site de Seraing.* Récupéré le 14 juin 2021 de <https://www.luminus.be/fr/corporate/production-d-energie/les-centrales-thermiques/tgv-seraing/>
- Lutkevich, B., & Burns, E. (2021, 2 mars). *Natural language processing (NLP).* Récupéré le 17 mai 2021 de <https://searchenterpriseai.techtarget.com/definition/natural-language-processing-NLP>
- Machine Learning CO2 Impact Calculator. (s. d.). *ML CO2 Impact.* Récupéré de <https://mlco2.github.io/impact/>
- Marr, B. (2021, 4 janvier). *How Artificial Intelligence Can Power Climate Change Strategy.* Récupéré le 22 mai 2021 de <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2021/01/04/how-artificial-intelligence-can-power-climate-change-strategy/>
- MathWorks. (s. d.). *What Is Predictive Analytics ? - 3 Things You Need to Know.* Récupéré le 29 juillet 2021 de <https://nl.mathworks.com/discovery/predictive-analytics.html>
- MathWorks. (2020). *What Is Machine Learning ?* Récupéré le 29 juillet 2021 de <https://nl.mathworks.com/discovery/machine-learning.html>
- Mauguet, C. (2021, 23 juillet). *Définition bilan carbone : comment ça marche et pourquoi le réaliser.* Récupéré le 30 juillet 2021 de <https://agicap.com/fr/article/definition-bilan-carbone/>
- Mayer, N. (2021, 26 février). *Décryptage : comment le machine learning va révolutionner les prévisions météo.* Récupéré le 18 mai 2021 de <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/meteorologie-decryptage-machine-learning-va-revolutionner-previsions-meteo-85893/>

Meteo France. (s. d.). *Réchauffement climatique : évolution du climat mondial et en France - Météo-France*. Récupéré le 16 juin 2021 de <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/le-rechauffement-observe-a-l-echelle-du-globe-et-en-france>

Micheau, F. (2017, novembre). *L'usage des innovations par les français*. Récupéré le 19 juin 2021 de <https://www.opinion-way.com/fr/component/edocman/?task=document.viewdoc&id=1767&Itemid=0>

Microsoft. (2021, 1 mai). *Apprentissage supervisé et non supervisé : quelles différences*. . . Récupéré le 20 juin 2021 de <https://experiences.microsoft.fr/articles/intelligence-artificielle/apprentissage-supervise-et-non-supervise-quelles-differences/>

Ministère de la Transition Ecologique. (2020). *Chiffres clés du climat France, Europe et Monde*. Récupéré le 14 mai 2021 de <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat/8-panorama-europeen-des-gaz-a#ancre1>

Molloy, J. (2020, 31 janvier). *Scope 4 : do we need a new category of emissions to better address corporate climate action ?* Récupéré le 17 juin 2021 de <https://www.cdsb.net/corporate-reporting/1005/scope-4-do-we-need-new-category-emissions-better-address-corporate-climate>

Mulhern, O. (2021, 11 mars). *Artificial Intelligence : Can it help achieve Environmental Sustainability?* Récupéré le 23 mai 2021 de https://earth.org/data_visualization/ai-can-it-help-achieve-environmental-sustainable/

Nackaerts, A., & de Ketelaere, M. (2021, 18 mars). *Créer un label énergétique pour l'intelligence artificielle.* Récupéré le 29 juillet 2021 de <https://www.lecho.be/entreprises/technologie/creer-un-label-energetique-pour-l-intelligence-artificielle/10292029.html>

Nations Unies. (s. d.). *LES 17 OBJECTIFS / Sustainable Development*. Récupéré le 1 juin 2021 de <https://sdgs.un.org/fr/goals>

Numa. (2019, 3 mai). *Intelligence artificielle : quels métiers vont réellement disparaître ?* Récupéré le 17 mai 2021 de <https://medium.com/@numaparis/intelligence-artificielle-quels-m%C3%A9tiers-vont-r%C3%A9ellement-dispara%C3%AEtre-758bc2f25f87>

OECD. (2018, octobre). *Global Material Resources Outlook to 2060 Economic drivers and environmental consequences*. Récupéré de <https://www.oecd.org/environment/waste/highlights-global-material-resources-outlook-to-2060.pdf>

Parlement Européen. (2018a, mars 7). *Emissions de gaz à effet de serre par pays et par secteur (infographie)*. Récupéré le 13 mai 2021 de <https://www.europarl.europa.eu/news/fr/headlines/society/20180301STO98928/emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-par-pays-et-par-secteur-infographie>

Parlement Européen. (2020, 25 septembre). *Voitures autonomes, la question éthique*. Récupéré le 19 mai 2021 de https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/E-9-2019-004381_FR.html

Parlement Européen. (2021, 24 juin). *Qu'est-ce que la neutralité carbone et comment l'atteindre d'ici 2050 ?* Récupéré le 3 aout 2021 de <https://www.europarl.europa.eu/news/fr/headlines/society/20190926STO62270/qu-est-ce-que-la-neutralite-carbone-et-comment-l-atteindre-d-ici-2050>

Petersson, D. (2020, 24 novembre). *IA, machine learning, deep learning : quelles différences ?* Récupéré le 16 mai 2021 de <https://www.lemagit.fr/conseil/IA-machine-learning-deep-learning-quelles-differences>

Phosphoris. (2019, 21 juin). *Les enjeux majeurs des Data Centers.* Récupéré le 19 mai 2021 de <https://www.phosphoris.fr/fr/project/les-enjeux-majeurs-des-datas-centers/>

Power Technology. (2020, 30 janvier). *Xcel Energy, eSmart and EDM use AI for transmission grid inspection.* Récupéré le 3 juin 2021 de <https://www.power-technology.com/news/xcel-energy-esmart-edm-ai-transmission-grid-inspection/>

Predictive Analytics Today. (2021). *What is Predictive Analytics ? PAT RESEARCH : B2B Reviews, Buying Guides & Best Practices.* Récupéré le 16 mai 2021 de <https://www.predictiveanalyticstoday.com/what-is-predictive-analytics/>

PwC. (s. d.). *Domaines d'action prioritaires pour les défis environnementaux.* Récupéré de https://earth.org/data_visualization/ai-can-it-help-achieve-environmental-sustainable/

PwC. (2017, juillet). *Intelligence artificielle : un potentiel de 15 700 milliards de dollars de gains pour l'économie mondiale d'ici 2030.* Récupéré le 23 mai 2021 de <https://www.pwc.fr/fr/assets/files/cdp/2017/07/pwc-cp-ai-impact-index.100717.pdf>

Quetel, T. (2021, 11 juin). Sourcing & Sales Manager @Centrica Business Solutions. [Entretien]. Via Teams

Rahman, M. A. (2020, 19 septembre). *Five Core Technologies Of Artificial Intelligence.* Récupéré le 4 mai 2021 de <https://medium.com/born-to-lead/five-core-technologies-of-artificial-intelligence-5cea219f49ed>

Ramdas, S., Rajmane, P., Chauhan, T., Misrak, A., & Agonafer, D. (2019, octobre). *Impact of Immersion Cooling on Thermo-Mechanical Properties of PCB's and Reliability of Electronic Packages.* Récupéré de <https://doi.org/10.1115/IPACK2019-6568>

Rampe, D. (2021, 20 janvier). *A closer look at AI : data mining.* Récupéré le 13 mai 2021 de <https://brighterion.com/data-mining/>

Renard, G. (2021) *Histoire de l'intelligence artificielle.* Communication présentée le 18 mars 2021 lors de la semaine de l'intelligence artificielle

Rogati, M. (2017, 12 juin). *The AI Hierarchy of Needs.* Récupéré le 17 mai 2021 de <https://hackernoon.com/the-ai-hierarchy-of-needs-18f111fcc007>

Rogati, M. (2017, 12 juin). *The data science hierarchy of needs.* Récupéré de <https://hackernoon.com/the-ai-hierarchy-of-needs-18f111fcc007>

Roger, N. (2018, 7 septembre). *IA et data center, une relation stratégique.* Récupéré le 20 mai 2021 de <https://www.informatiquenews.fr/ia-et-data-center-une-relation-strategique-nicolas-roger-equinix-58025>

S. (2020, 23 avril). *The History of Artificial Intelligence*. Récupéré le 21 mai 2021 de <https://sitn.hms.harvard.edu/flash/2017/history-artificial-intelligence/>

Salecha, M. (2020, 24 juin). *Story of ELIZA, the first chatbot developed in 1966*. Récupéré le 3 aout 2021 de <https://analyticsindiamag.com/story-eliza-first-chatbot-developed-1966/>

SAS. (s. d.-a). *Artificial Intelligence – What it is and why it matters*. Récupéré le 8 avril 2021 de https://www.sas.com/en_us/insights/analytics/what-is-artificial-intelligence.html#howitworks

SAS. (s. d.-b). *Big Data Analytics : What it is and why it matters*. Récupéré le 1 juin 2021 de https://www.sas.com/en_us/insights/analytics/big-data-analytics.html#:~:text=Why%20is%20big%20data%20analytics,higher%20profits%20and%20happier%20customers

SAS. (s. d.-c). *Machine Learning : What it is and why it matters*. Récupéré le 8 avril 2021 https://www.sas.com/en_us/insights/analytics/machine-learning.html#machine-learning-today-world

SAS. (s. d.-d). *What is deep learning?* Récupéré le 8 avril 2021 de https://www.sas.com/en_us/insights/analytics/deep-learning.html

SAS. (s. d.-e). *What is Natural Language Processing?* Récupéré le 1 juin 2021 de https://www.sas.com/en_us/insights/analytics/what-is-natural-language-processing-nlp.html

SAS. (2018). *What is powering AI*. Récupéré de https://www.sas.com/content/dam/SAS/en_us/doc/infographic/artificial-intelligence-109282.pdf

Schuchmann, S. (2019, 12 mai). *History of the second AI winter*. Récupéré le 21 mai 2021 de <https://towardsdatascience.com/history-of-the-second-ai-winter-406f18789d45>

Schwartz, O. (2021, 24 juin). *In 2016, Microsoft's Racist Chatbot Revealed the Dangers of Online Conversation*. Récupéré le 2 aout 2021 de <https://spectrum.ieee.org/in-2016-microsofts-racist-chatbot-revealed-the-dangers-of-online-conversation>

Segone, T. (2021, 25 février). *Integrating New Technology and its Challenges*. Récupéré le 13 mai 2021 de <https://changefolio.com/articles/integrating-new-technology-and-its-challenges>

Siècle Digital. (2020, 18 décembre). *Histoire de l'intelligence artificielle*. Récupéré le 21 mai 2021 de <https://sieledigital.fr/2018/08/20/histoire-intelligence-artificielle/>

Slate.fr. (2020, 9 juin). *Changement climatique : une préoccupation mondiale*. Récupéré le 11 mai 2021 de <http://www.slate.fr/economie/electric-dreams/changement-climatique-preoccupation-mondiale-enquete-ipso-edf>

Soistier, J. (2009). *Comment devenir une entreprise « low carbon »*. (p. 50-56). Récupéré le 13 mai 2021 de <https://doi.org/10.3917/emr.135.0050>

Springer Nature Sustainability Community. (2021). *Impact de l'IA sur la réalisation de chaque cible des objectifs de développement durable*. Récupéré de https://earth.org/data_visualization/ai-can-it-help-achieve-environmental-sustainable/

Stahl, A. (2021, 17 avril). *How AI Will Impact The Future Of Work And Life*. Récupéré le 13 mai 2021 de <https://www.forbes.com/sites/ashleytahl/2021/03/10/how-ai-will-impact-the-future-of-work-and-life/?sh=5eabd31e79a3>

Stanford. (2020, 30 avril). *Ethics of Artificial Intelligence and Robotics (Stanford Encyclopedia of Philosophy)*. Récupéré le 3 juin 2021 de <https://plato.stanford.edu/entries/ethics-ai/>

Statista. (2021, 5 février). *Global datasphere real time data total size worldwide from 2010 to 2025*. Récupéré de <https://www.statista.com/statistics/949144/worldwide-global-datasphere-real-time-data-annual-size/#:%7E:text=Real%2Dtime%20data%20makes%20up,five%20zettabytes%20to%2051%20zettabytes>.

Supermicro. (2019, décembre). *Datacenters & the Environment*. Récupéré de https://www.supermicro.com/white_paper/DataCenters_and_theEnvironmentDec2019.pdf

Team, E. (2021, 11 février). *What is Machine Learning ? A definition*. Récupéré le 1 juin 2021 de <https://www.expert.ai/blog/machine-learning-definition/>

ThinkwithGoogle. (2020, 3 septembre). *Des données brutes aux informations exploitables : un plan d'action pour les entreprises*. Récupéré le 16 mai 2021 de <https://www.thinkwithgoogle.com/intl/fr-fr/strategies-marketing/donnees-et-mesure/des-donnees-brutes-aux-informations-exploitables-un-plan-daction-pour-les-entreprises/>

Toews, R. (2020, 21 juillet). *Deep Learning's Carbon Emissions Problem*. Récupéré le 3 aout 2021 de <https://www.forbes.com/sites/robtoews/2020/06/17/deep-learnings-climate-change-problem/>

The Turing Test (Stanford Encyclopedia of Philosophy). (2020, août 18). *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Récupéré le 16 mai 2021 de <https://plato.stanford.edu/entries/turing-test/>

United Nations. (s. d.-a). *17 SDG's*. Récupéré de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/news/communications-material/>

United Nations. (s. d.-b). *LES 17 OBJECTIFS / Sustainable Development*. Récupéré de <https://sdgs.un.org/fr/goals>

United Nations. (2020). *United Nations Climate Change*. Récupéré le 10 mai 2021 de <https://unfccc.int/fr>

United Nations Climate Change. (s. d.). *Nationally Determined Contributions (NDCs)*. Récupéré le 28 juillet 2021 de <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/nationally-determined-contributions-ndcs/nationally-determined-contributions-ndcs>

Zacklad, M. (2018). *Intelligence Artificielle : représentations et impacts sociétaux*. Récupéré le 22 mai 2021 de <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-02937255/document>