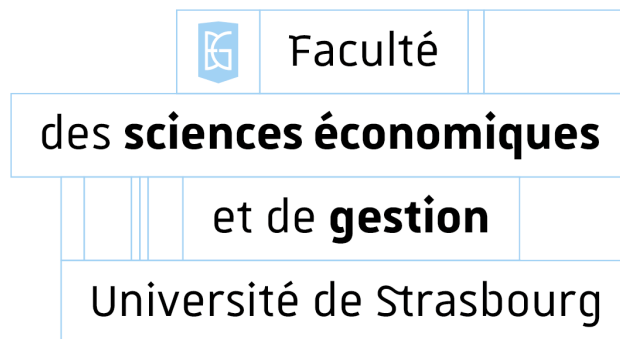


# Comment les outils numériques peuvent-ils contribuer à satisfaire les besoins liés à la gestion énergétique de manière propre et durable?

**Auteur:** Valentin Barthel\*  
**Supervisé par:** Stefano Bianchini

4 novembre 2023



## Résumé

De nos jours, l'impact négatif du numérique sur l'environnement est de plus en plus préoccupant. Cependant, les technologies numériques peuvent également être utilisées de manière positive pour contribuer à la transition énergétique avec une gestion plus propre et durable des énergies. Comment les outils numériques peuvent-ils être mobilisés pour répondre aux besoins énergétiques croissants de manière responsable et efficace? Nous étudierons dans cette revue de littérature plusieurs documents mettant en avant les technologies numériques dans des objectifs de gestion énergétique propre et durable afin de limiter les émissions de gaz à effet de serre. Nous partirons de l'hypothèse et des résultats obtenus lors de travaux empiriques sur les effets environnementaux de la transition "jumelle" verte et numérique, exprimant la plausibilité d'allier les technologies numériques aux technologies vertes. A partir de méthodes d'optimisation et de l'utilisation des réseaux de neurones artificiels, le recours de ces outils serviront à l'innovation des technologies vertes pour lutter contre les externalités négatives. Notre approche dans cette revue consiste à expliquer les bénéfices tirés de l'utilisation de ces outils numériques dans le processus de la recherche et du développement en y étudiant les retombées vertes ainsi qu'en explorant les divers mécanismes d'optimisation qui en découle, notamment par l'assistance de modèles de réseaux de neurones artificiels entraînés. De plus, il s'agit également d'étudier les perspectives d'avenir et le rôle de ces technologies numériques pour les méthodes de production énergétique compatibles avec nos objectifs de propreté et durabilité.

**Mots-clés :** Externalités négatives, gestion énergétique, innovation, technologies numériques, technologies vertes, optimisation, réseaux de neurones artificiels.

\*Magistère Génie Economique 1 et Licence 3 Economie Quantitative, Faculté des sciences Economiques et de Gestion, Université de Strasbourg, 61 avenue de la Forêt Noire, 67000 Strasbourg, France, valentin.barthel@etu.unistra.fr

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Liens entre technologies numériques et technologies vertes pour la transition énergétique</b>	<b>4</b>
2.1	Les coûts environnementaux des technologies numériques . . . . .	4
2.2	La transition "jumelle" verte et numérique . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Les Réseaux de Neurones Artificiels, un outil levier pour l'innovation et l'accélération des processus de Recherche et de Développement</b>	<b>5</b>
3.1	Le rôle des outils numériques pour la diffusion de la connaissance . . . . .	6
3.2	Observation et prédiction pour constater et prévenir . . . . .	6
3.3	Le rôle des agents conversationnels . . . . .	7
3.4	Les Réseaux de Neurones Artificiels pour les technologies vertes . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Les retombées vertes issues de l'utilisation des outils numériques pour la recherche</b>	<b>8</b>
4.1	Science des matériaux . . . . .	8
4.2	Data centers et leurs externalités . . . . .	9
<b>5</b>	<b>Les réseaux de neurones artificiels pour l'optimisation des ressources énergétiques</b>	<b>10</b>
5.1	Regard sur le processus d'optimisation assistés par Réseaux de Neurones Artificiels pour les réseaux de distribution publiques : Les Smart-Grids . . . . .	10
5.2	Le cas d'EcoJoko, une start-up innovante . . . . .	11
<b>6</b>	<b>Vers de nouveaux moyens de production assistés par Réseaux de Neurones Artificiels</b>	<b>11</b>
<b>7</b>	<b>Les technologies numériques comme levier pour les Objectifs de Développement Durable ?</b>	<b>13</b>
<b>8</b>	<b>Etude empirique sur les déterminants des émissions de Gaz à Effet de Serre</b>	<b>14</b>
8.1	Présentation du modèle . . . . .	14
8.2	Limites du modèle . . . . .	15
<b>9</b>	<b>Discussion et conclusion</b>	<b>16</b>

# 1 Introduction

L'essor du numérique révolutionne notre façon de vivre, de produire et d'interagir. A l'aube d'une quatrième révolution industrielle et à l'ère des mégadonnées, nous assistons au bouleversement de l'ensemble des processus économiques et sociaux, avec l'émergence de nouvelles technologies telles que les Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) et des modèles de Deep Learning<sup>1</sup> pour la surveillance et le traitement de données notamment. Toutefois, cette révolution numérique aspire à un coût en termes de capital environnemental important, particulièrement avec les Data centers<sup>2</sup> qui nécessitent des quantités importantes d'énergie et de ressources pour fonctionner.

Dans ce contexte, il est important d'explorer les bénéfices et coûts environnementaux tirés par l'usage des nouvelles technologies, afin de trouver des solutions durables pour répondre aux défis énergétiques du XXIe siècle. La question qui sera étudiée dans cette revue de littérature sera donc de savoir comment les outils du numérique peuvent contribuer à satisfaire les besoins liés à la gestion énergétique, tout en minimisant leur impact environnemental.

Cependant, l'utilisation des technologies numériques pour la gestion énergétique ne se fait pas sans coût. En effet, il existe un coût d'entrée important en termes de capital environnemental et de ressources énergétiques que ces technologies ont avant de pouvoir potentiellement donner des effets positifs sur la gestion énergétique durable. Nous examinerons tout d'abord le lien entre les technologies numériques et les technologies vertes dans un contexte environnemental pour déterminer la pertinence de notre approche. Nous nous concentrerons ensuite sur les outils de la Data science, qui peuvent accélérer le processus d'innovation pour les technologies vertes et numériques, en particulier en ce qui concerne la recherche de nouveaux matériaux assistée par RNA pour l'isolation des bâtiments, mais également dans le cadre de procédés permettant d'exploiter les externalités négatives issues des Data centers. Par ailleurs, nous verrons que les modèles de prédiction issus de RNA auront aussi un rôle à jouer dans la gestion optimale des ressources énergétiques, notamment dans le cadre des Smart grids. Enfin, nous explorerons les perspectives à long terme offertes par l'assistance des RNA pour les futures méthodes de production d'énergie issues de la fusion nucléaire.

---

1. Le "Deep Learning" ou "Apprentissage profond" est apparu en 1980 en tant que branche du Machine Learning s'inspirant du fonctionnement des réseaux de neurones biologiques et de leurs interactions. Un grand pouvoir de calcul est nécessaire pour l'entraînement de ce type de modèle, y compris les réseaux neuronaux convolutifs (CNN), les réseaux neuronaux récurrents (RNN) et les réseaux de fonctions de base radiales (RBFN).

2. Un centre de données est un édifice dans lequel des données sont hébergées dans des baies de stockage et traitées. Ce lieu abrite notamment des équipements informatiques, de réseaux et de télécommunications.

## 2 Liens entre technologies numériques et technologies vertes pour la transition énergétique

### 2.1 Les coûts environnementaux des technologies numériques

Les conséquences négatives du numérique sur l'environnement sont de plus en plus préoccupantes. Les technologies numériques, telles que les Data centers, les TIC ou encore les méthodes d'entraînement pour les modèles de Machine Learning<sup>3</sup> ont un impact significatif sur l'environnement. En effet, ces technologies exigent une quantité importante d'énergie pour leur fonctionnement, entraînant ainsi l'émission de Gaz à Effet de Serre (GES).

Les centres de données requièrent une quantité importante d'énergie pour faire fonctionner et entretenir leurs équipements informatiques, notamment des serveurs, ce qui entraîne des émissions de GES (*Siddik, Shehabi and Marston, 2021*). Les Data centers représenteraient près de 2% des émissions mondiales de GES, soit un nombre équivalent à celui de l'industrie aérienne mondiale. Cette empreinte carbone devrait augmenter jusqu'à 14% d'ici 2040 (*lebigdata.fr*). Les réseaux de télécommunication ont un impact sur l'environnement important dans la mesure où ces derniers vont exploiter les serveurs des Data centers pour les requêtes des utilisateurs ainsi que des équipements gourmands en énergie.

Par ailleurs, les méthodes d'entraînement de modèles de Machine Learning nécessitent d'importantes quantités de puissance de calcul. Cette puissance de calcul quant à elle exige de l'énergie, qui pour la majorité des cas sera produite à partir de combustibles fossiles qui vont à leur tour mener des émissions de GES. Comme en témoigne les statistiques présentées (cf. Figure 1), le marché du numérique prend davantage de place en s'avérant de plus en plus lucratif. Les statistiques prédisent une augmentation exponentielle des chiffres d'affaires générés par les intelligences artificielles<sup>4</sup>.

### 2.2 La transition "jumelle" verte et numérique

Cette sous-section nous servira de point d'appui quant à l'implication du numérique pour réduire les émissions de GES. En effet, les RNA peuvent être utilisées pour améliorer l'efficacité de la gestion des ressources énergétiques grâce aux méthodes de surveillance et de prédiction (*Vinuesa, Azizpour, Leite, Ba-laam, Dignum, Domisch, Felländer, Langhans, Tegmark and Fuso Nerini, 2020*). Nous allons étudier les résultats obtenus des estimations sur les régions européennes concernant les effets conjoints des technologies vertes et numériques (*Bianchini, Damioli and Ghisetti, 2022*).

---

3. "Machine Learning" ou "Apprentissage automatique" sont des méthodes d'apprentissage supervisé qui regroupent un ensemble de modèles (notamment les algorithmes de régression linéaire ou logistique, d'arbres de décision, de "clustering"...).

4. Terme désignant l'ensemble des modèles algorithmiques utilisés en Machine Learning.

Conformément aux hypothèses 1 et 2 de l'article « The environmental effects of the « twin » green and digital transition in European regions », il n'est pas étonnant d'observer les résultats obtenus lors de l'estimation tobit<sup>5</sup> (cf. table 2, « The environmental effects of the « twin » green and digital transition in European regions »). Les technologies numériques vont avoir un impact positif sur l'augmentation des émissions de GES en raison des externalités négatives générées par leur utilisation. Nous observons également dans les résultats que les technologies vertes ont un impact négatif sur les émissions de GES, puisqu'en effet celles-ci ont pour fonction de limiter les externalités négatives issues des autres technologies. Cependant, il est intéressant d'observer dans les résultats de l'estimation la validité de l'hypothèse 3 qui stipule que lorsque ces deux technologies sont simultanément utilisées, l'effet observé sera significativement négatif et plus important que l'effet de la technologie verte seule est vérifiée. Ainsi, notons que les technologies numériques peuvent potentiellement avoir un rôle important à jouer lors de la gestion optimale des ressources énergétiques. Nous considérerons donc la validité de l'hypothèse 3 et utiliserons les résultats obtenus dans cette estimation pour la suite de cette revue de littérature et considérerons donc que l'utilisation des technologies numériques joueront un rôle clé pour la gestion énergétique propre et durable. Par ailleurs, il est intéressant de remarquer que ce résultat peut rendre crédible les hypothèses issues des études théoriques de la courbe environnementale de Kuznet (*Dinda, 2004*) en considérant la possibilité que l'accumulation de capital en technologies numériques pourrait à long terme permettre une préservation du capital environnementale par le biais de la liaison avec les technologies vertes.

Dans les sections suivantes nous nous intéresserons donc aux processus grâce auxquels les technologies numériques, particulièrement les RNA vont pouvoir être utilisés afin d'agir sur la gestion énergétique et minimiser la consommation énergétique afin de justifier les résultats obtenus dans l'étude précédente. Nous nous intéresserons également à comment l'utilisation des outils du numérique va servir de levier à la recherche et par conséquent impacter positivement la qualité des innovations vertes et numériques.

### **3 Les Réseaux de Neurones Artificiels, un outil levier pour l'innovation et l'accélération des processus de Recherche et de Développement**

Dans cette section, nous allons nous intéresser à comment l'émergence du nouveau paradigme scientifique du numérique et de la Data peut contribuer à la Recherche et le Développement (R&D). Nous verrons comment ces nouvelles technologies numériques de par leur assistance, ont des effets positifs sur

---

5. L'estimation tobit est un modèle statistique qui peut s'appliquer pour décrire une relation entre une variable dépendante censurée et une variable indépendante.

l'utilisation des technologies numériques et comment celles-ci vont accroître la vitesse d'obtention de résultats et par conséquent augmenter la productivité pour la R&D pour développer des innovations. Nous expliquerons comment les RNA issues des méthodes de Deep learning interviennent dans la recherche, depuis l'identification des problèmes de recherche jusqu'à la rédaction du rapport de recherche.

### 3.1 Le rôle des outils numériques pour la diffusion de la connaissance

Tout d'abord, il est intéressant de voir comment les outils numériques permettent la diffusion de connaissances en aidant les chercheurs à trouver des sources exploitables pour leurs recherches. Dans ce contexte, nous pouvons discuter du moteur de recherche scientifique [Google scholar](#)<sup>6</sup>, qui permet de rechercher des sources parmi près de quatre cents millions d'articles universitaires indexés. Google Scholar utilise des Information Retrieval models (IR models)<sup>7</sup> afin de trouver les articles les plus pertinents à partir de mots-clés fournis au moteur de recherche. Cet outil va permettre d'une part de faciliter la recherche de publications intéressantes pour le chercheur, avec des résultats triés selon la pertinence, le nombre de citations, l'auteur notamment, mais également de fournir un accès rapide aux publications en ligne. D'autre part, l'outil va également pouvoir être utilisé pour créer des communautés scientifiques à partir de thématiques de recherche communes, d'un principe de citation, de reconnaissance et de visibilité. Ainsi, nous pouvons affirmer que la contribution des outils pour la diffusion, tels que Google Scholar, est importante et permet d'accroître drastiquement le processus de recherche.

### 3.2 Observation et prédiction pour constater et prévenir

L'une des premières étapes du processus de recherche est de trouver un vecteur, c'est à dire un élément déclencheur permettant de démarrer un questionnement sur un objet d'étude. Cet élément déclencheur peut survenir à la suite d'observations et d'analyses préliminaires d'éléments. Il est utilisé pour pouvoir tirer des hypothèses provenant des résultats obtenus et de pouvoir poser des problématiques autour des faits observés à partir de capteurs détectant le niveau de pollution, les températures ou des données satellites par exemple (*Siddik et al., 2021*). Pour illustrer nos propos, nous pouvons par exemple retrouver ce principe pour détecter l'impact environnemental des Data centers. Une fois les problèmes détectés, ils pourront être traités en analysant un grand nombre de données en surveillant par exemple les températures locales et le niveau de pénurie d'eau notamment pour explorer comment le placement géographique des Data centers peut conduire à de meilleurs résultats environnementaux. Pour donner suite à cette étude

---

6. Moteur de recherche regroupant des articles scientifiques, créé par Alex Verstak et lancé fin 2004.

7. « Information Retrieval models » ou « modèles de recherche d'information ». Ces algorithmes permettent d'extraire des informations pertinentes à partir d'une grande quantité de données non structurées, notamment des publications scientifiques.

il sera possible à l'aide des données traitées de parvenir à la localisation optimale pour le déploiement des Data centers, afin de minimiser l'impact environnementale en considérant l'empreinte en eau, de pénurie d'eau et d'empreinte carbone. Cependant, l'utilisation des outils de la Data science ne se contente pas uniquement d'observer et produire des analyses à l'aide de modèle de Machine Learning mais également de réaliser des prédictions sur l'évolution de variables dans le temps et des tendances futures pour anticiper les enjeux, notamment dans le cadre du progrès en termes de capacité des transistors avec la loi de Moore<sup>8</sup> mais également le potentiel d'amélioration de l'efficacité des dispositifs informatiques et de stockage à faible consommation d'énergie (*Masanet, Shehabi, Lei, Smith and Koomey, 2020*).

### 3.3 Le rôle des agents conversationnels

Concernant l'apparition de modèles de RNA et d'agents conversationnels<sup>9</sup> toujours plus performants, il est intéressant de se demander si ces derniers vont permettre d'approcher des résultats probants dans le cadre de l'analyse et du traitement de données ainsi que pour la R&D. Dans le contexte actuel avec l'apparition du modèle GPT-4 et de sa centaine de billions de paramètres édité par OpenAI (*Présentation du modèle GPT-4*), celui-ci pourrait grandement accélérer le processus d'innovation dans de nombreuses disciplines scientifiques (*van Dis, Bollen, Zuidema, van Rooij and Bockting, 2023*). Des modèles plus performants par la suite, pourraient structurer de nouvelles hypothèses scientifiques à partir d'idées en confrontant plusieurs idées à partir des supports présents sur le web et de diverses bases de données spécialisées avant d'analyser et d'interpréter des résultats d'études. Ainsi, les RNA pourraient significativement accélérer le processus de la R&D et prochainement, affecter davantage l'ensemble des étapes du processus de la publication scientifique. Par ailleurs, l'usage de ces agents conversationnels pourrait permettre l'acquisition de nouvelles compétences et d'une assistance en corrélation avec celles exigées pour l'adaptation des nouvelles générations de chercheurs aux nouvelles compétences techniques.

### 3.4 Les Réseaux de Neurones Artificiels pour les technologies vertes

La découverte et le développement de nouveaux matériaux dans le domaine de l'énergie sont essentiels pour accélérer la transition vers une économie à faible émission de carbone (*Tabor, Roch, Saikin, Kreisbeck, Sheberla, Montoya, Dwaraknath, Aykol, Ortiz, Tribukait et al., 2018*). C'est donc pour cette raison que nous nous intéressons aux avancées que permettent l'automatisation intelligente pour la science des matériaux.

---

8. La loi de Moore est une observation empirique formulée par Gordon Moore en 1965 selon laquelle le nombre de transistors sur une puce de circuit intégré double environ tous les deux ans, ce qui entraîne une augmentation exponentielle de la puissance de traitement des ordinateurs. Bien que cette loi ait été très précise au fil des décennies, elle atteint aujourd'hui certaines limites physiques et économiques (*Moore et al., 1965*).

9. L'agent conversationnel est un modèle de deep learning conçu pour interagir avec les humains.

Dernièrement, les innovations technologiques (robotique, informatique et automatisation des tâches) et le processus de synthétisation des matériaux ont permis de révolutionner la R&D traditionnelle, à la fois dans le monde industriel et universitaire. Cette révolution pourrait permettre d’accélérer drastiquement le processus de recherche pour les matériaux et par conséquent augmenter la productivité en termes de R&D pour les technologies vertes, affirmant donc que l’assistance par RNA pour la R&D sert de levier pour répondre aux problématiques de gestion énergétique propre et durable.

Nous avons vu dans cette section que l’émergence des nouvelles technologies s’inscrit donc parfaitement dans la théorie des révolutions scientifiques de Kuhn (*Kuhn, 2012*) dans un contexte de quatrième révolution industrielle avec une hausse de la productivité notamment pour la découverte scientifique mais également pour l’efficacité énergétique (*Schwab, 2017*) ainsi que son rôle pour l’innovation (*Aghion, Jones and Jones, 2018*).

Nous discuterons dans les sections suivantes des potentielles retombées qui pourront être exploitées avec cette utilisation du numérique, telles que les innovantes technologies numériques qui serviront à l’optimisation de nouveaux systèmes de gestion énergétique, ainsi que des résultats pouvant être recyclés pour améliorer à nouveau le processus de recherche ainsi que l’innovation de technologies vertes. La Data science pour la recherche s’auto-alimente puisqu’elle permet elle-même l’essor du numérique, mais également la R&D dans d’autres sciences (les matériaux, le quantique, le nucléaire, ...) qui seront également utiles dans le développement des technologies vertes et de prochaines révolutions scientifiques.

## 4 Les retombées vertes issues de l’utilisation des outils numériques pour la recherche

### 4.1 Science des matériaux

L’évolution rapide des RNA pour la recherche en matière de découverte autonome se matérialise de plus en plus. L’approche de cette découverte autonome nécessite des outils tels que le criblage virtuel à haut débit<sup>10</sup>, la planification de synthèse automatisée<sup>11</sup>, d’algorithme d’apprentissage automatique faisant intervenir les méthodes de Deep Learning ainsi que de laboratoires aménagés afin d’accueillir diverses technologies numériques. Ainsi, cette amélioration a pour objectif de faire diminuer les coûts des technologies vertes sur les marchés permettant ainsi de favoriser leur consommation, et par conséquent

---

10. Le criblage virtuel à haut débit est un ensemble de méthodes informatiques dans lequel interviennent des algorithmes afin de sélectionner des molécules provenant de chimiothèques et de ciblothèques. Ces méthodes consistent à répondre à des objectifs quant à diverses propriétés moléculaires (physicochimiques, pharmacocinétiques notamment).

11. La planification de synthèse automatisée est un processus qui utilise des algorithmes pour la conception de matériaux aux propriétés spécifiques.



l'utilisation d'énergies renouvelables réduisant les émissions de GES. Il s'agirait donc de parvenir via l'assistance des RNA, de produire du biopétrole ou encore des matériaux capables de capturer le dioxyde de carbone (*Tabor et al., 2018*). Les propriétés de prédiction pour la science des matériaux peuvent également s'avérer utiles pour diminuer les coûts énergétiques en permettant une meilleure composition du béton léger. A l'aide de tests effectués préalablement dans ces laboratoires aménagés, l'application consiste à l'aide des RNA à déterminer la relation optimale entre différentes propriétés mécaniques mais également des propriétés isolantes de ce matériau. Celle-ci va donc permettre d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments et par conséquent réduire le phénomène de « passoire thermique » (*Kurpińska, Kułak, Miruszewski and Byczuk, 2021*).

## 4.2 Data centers et leurs externalités

Une grande partie de l'énergie demandée se retrouve perdue sous forme d'énergie thermique générant ainsi une externalité négative. Si nous prenons l'exemple d'une pile, cette perte thermique représente entre 25% et 50% de l'énergie totale. Pour le cas des Data centers, nous allons voir qu'il existe une génération d'énergie perdue importante et observerons grâce aux technologies qu'il est possible de limiter les dépenses énergétiques pour le refroidissement des centres, et au plus optimiste d'exploiter ces externalités en les transférant vers d'autres infrastructures, limitant ainsi l'empreinte carbone.

Pour appliquer les méthodes du numérique, et plus précisément les TIC, il est nécessaire de stocker, gérer et distribuer une grande quantité de données à échelle mondiale dans des Data centers. Ces centres nécessitent une quantité importante d'énergie pour fonctionner mais également pour évacuer la chaleur thermique dégagée par les appareils électroniques. Cette dépense énergétique représente près de 2% de la consommation d'électricité aux Etats-Unis (*Siddik et al., 2021*). De plus, les événements exogènes tels que la crise Covid ont drastiquement augmenté la charge pesante sur les moyens de communication, augmentant la consommation d'énergie et d'autres ressources permettant la gestion des centre ainsi que l'impact environnemental. Le choix de la localisation des Data centers en fonction des conditions climatiques joue un rôle important puisque celle-ci permet de réduire la consommation énergétique liée au refroidissement et donc diminuer les externalités négative environnementale. A ce jour, les systèmes de refroidissement représentent en moyenne 40% des dépenses énergétiques d'un Data center, soit autant que les dépenses du maintien des serveurs (*ResearchGate*). De nouvelles technologies vertes innovantes moins gourmandes en énergie pour refroidir ces Data centers émergent. Celles-ci sont basés sur l'air naturel, des méthodes de water cooling et de refroidissement par géothermie notamment. De plus il est également possible d'exploiter les pertes thermiques grâce aux technologies vertes innovantes autour de la récupération de la chaleur provenant des Data centers. Ce procédé permet d'exploiter efficacement ces externalités liées aux pertes

thermiques en les réutilisant pour d'autres infrastructures et ainsi réduire l'impact carbone ((*Wahlroos, Pärssinen, Rinne, Syri and Manner, 2018*)). Il s'agit d'un procédé qui peut s'avérer efficace particulièrement dans les pays d'Europe du Nord qui représentent des régions stratégiques essentielles pour le déploiement des Data centers.

Par ailleurs, les avancées technologiques en termes de configuration des composants des serveurs permettent d'augmenter la productivité, et ainsi les résultats produits sans augmenter la quantité d'énergie utilisée. De plus, ce résultat est obtenu à l'aide d'une gestion plus intelligente de l'énergie permettant de calculer précisément la charge de refroidissement nécessaire grâce à un système de surveillance permis par des modèles de RNA. Nous détaillerons ces procédés d'optimisation dans la section suivante.

## 5 Les réseaux de neurones artificiels pour l'optimisation des ressources énergétiques

### 5.1 Regard sur le processus d'optimisation assistés par Réseaux de Neurones Artificiels pour les réseaux de distribution publiques : Les Smart-Grids

Dans cette sous-section, nous allons nous intéresser à la façon de rendre les infrastructures intelligentes et quel sera le rôle de la Data science pour répondre à la demande en énergie (*Amin (2013)*). Nous allons voir que ces infrastructures intelligentes assistées par RNA (*Collet and Rennard (2008)*) peuvent être utilisées pour améliorer la gestion des ressources énergétiques à l'aide de prédictions (cf. Figure 2). L'optimisation, et par conséquent l'utilisation d'algorithmes, joue un rôle décisif dans ces infrastructures ((*Gershenfeld, Samouhos and Nordman, 2010*)).

Il s'agit ici d'exploiter des réseaux de distribution dit « intelligents » afin de prédire la demande. Ces réseaux intelligents sont capables de prédire la demande d'énergie des consommateurs et ainsi adapter la production pour répondre de manière efficiente à cette demande variable dans le temps. En effet, par le biais l'assistance de méthodes de algorithmiques, notamment de Deep Learning, il est possible d'améliorer la planification et la gestion énergétique (*Ndlimabaka (2015)*).

Les réseaux de distribution d'électricité intelligents vont se caractériser par plusieurs procédés. Tout d'abord, une prédiction de la demande d'énergie et d'apprentissage automatique afin d'ajuster la production à la demande pour minimiser les pertes énergétiques. Ce procédé se fera par l'identification des tendances de consommation d'énergie observés. Il va ensuite y avoir l'intervention d'algorithmes d'optimisation évolutionnaires<sup>12</sup> pour ajuster la tension et optimiser la charge sur les lignes électriques. Des

---

12. Il s'agit d'une catégorie d'algorithmes inspirée de la théorie de l'évolution pour résoudre des problèmes d'optimisation.

algorithmes de contrôle de la charge et des algorithmes de détection de pannes interviendront pour répartir la charge sur les différents composants du réseau et surveiller les performances du réseau pour détecter le dysfonctionnement. Ces réseaux intelligents de distribution d'électricité se caractérisent donc par l'utilisation de modèles algorithmiques pour ajuster l'offre à la demande de consommation en minimisant les pertes.

## 5.2 Le cas d'EcoJoko, une start-up innovante

Nous avons étudié les réseaux de distribution publiques et constaté que les réseaux de neurones y jouent un rôle important. Cependant, les réseaux de neurones peuvent également servir, notamment dans le cadre privé. En effet, dans le domaine de l'optimisation énergétique, il existe de nombreuses initiatives visant à réduire la consommation d'énergie des foyers. L'une de ces initiatives est la promesse de la start-up française Ecojoko qui propose un système innovant de surveillance et d'interaction avec l'utilisateur pour réduire la consommation d'énergie domestique (*Technologie Ecojoko*). Le système d'Ecojoko est basé sur un dispositif de surveillance à l'aide d'algorithmes de clustering et de prédiction afin d'identifier les équipements les plus énergivores, les habitudes de consommation énergétique et proposer des recommandations personnalisées en temps réel pour les utilisateurs. Ce système didactique permet une prise de conscience des utilisateurs sur leur consommation ainsi qu'une réduction de la consommation énergétique de près d'un quart par ménage, soit un résultat significativement satisfaisant et prometteur pour le domaine de l'efficacité énergétique. Cette initiative de la start-up française permet de montrer comment les technologies numériques peuvent contribuer à réduire la consommation énergétique des foyers, tout en améliorant la prise de conscience des usagers quant à leur consommation énergétique.

## 6 Vers de nouveaux moyens de production assistés par Réseaux de Neurones Artificiels

De nos jours, la production d'énergie est encore largement basée sur les combustibles fossiles, tels que le charbon, le pétrole et le gaz naturel (*cf. Figure 3*) qui sont source d'impacts néfastes sur l'environnement. Ces dernières années, les émissions de GES ont atteint des niveaux records en contribuant au dérèglement climatique, c'est pourquoi nous nous intéresserons aux perspectives concernant les méthodes de productions liées à l'assistance des RNA. Nous verrons comment évoluent les méthodes de production d'énergie à partir de la production nucléaire et discuterons du rôle de l'assistance de RNA pour cette production. De nos jours, l'énergie commercialisée produite par réaction nucléaire provient du processus de fission.

Ce processus est le moyen de production électrique le plus utilisé en France et représente près de 70% de la production d'électricité en France, 35% pour les pays membres de l'Union européenne, 25% pour les pays membres de l'OCDE<sup>13</sup> et 10% de la production mondiale (*Rapport EDF*).

La fission consiste à diviser un noyau atomique lourd en deux noyaux plus légers, par conséquent elle nécessite de l'uranium-235. En considérant l'ensemble du processus de production, cette source d'énergie est considérée comme l'une des plus propres en tendant à être neutre en émission de carbone.

Cependant, cette méthode de production reste néanmoins gourmande en uranium, ressource minérale limitée et produisant des déchets radioactifs sur le très long terme<sup>14</sup> et pouvant s'avérer difficilement stockables. Il ne s'agit donc pas d'une solution viable à long terme en raison des contraintes qu'elle présente. Cependant, il serait possible de voir arriver une commercialisation d'un nouveau moyen de production énergétique prometteur : la fusion nucléaire. La fusion nucléaire se distingue de la fission nucléaire lors de son processus de libération d'énergie. Bien que les deux méthodes exploitent des propriétés du noyau atomique, celles-ci sont différentes. En effet, la fusion ne propose non pas de libérer une quantité d'énergie par la division d'un noyau atomique lourd en deux noyaux plus légers comme la fission pour libérer une réaction en chaîne mais plutôt de fusionner deux noyaux légers pour former un noyau plus lourd. Elle aura ainsi comme nécessité d'utiliser de l'hydrogène naturel, qui est présent dans l'air et l'eau, et d'isotopes : le deutérium présent dans l'eau de mer et le tritium pouvant être artificiellement produit. En d'autres termes, la fusion nucléaire nécessite des éléments abondants dans notre environnement. De plus, les déchets radioactifs ne resteront contaminés qu'à court terme<sup>15</sup>. Cette différence majeure donnera lieu à des contraintes moins pesantes, favorisant ainsi cette méthode de production énergétique à celle de la fission. Cependant des contraintes technologiques persistent depuis les premiers brevets portant à la production énergétique par fusion nucléaire, notamment celle de la gestion de divers paramètres tels que ceux associés à la stabilité du plasma<sup>16</sup> dans le tokamak<sup>17</sup>.

Les avancées en termes d'exploitation des RNA sont prometteuses, particulièrement dans le cadre de la fusion nucléaire par confinement magnétique. Les plasmas de tokamak sont utilisés pour la fusion, mais leur contrôle est difficile en raison de leur comportement complexe et instable. Un algorithme de Deep Learning par renforcement se veut innovant dans son intervention quant à la précision nécessaire pour obtenir une stabilité entre les particules durant la réaction physique en contrôlant les plasmas de tokamak (*Degrave, Felici, Buchli, Neunert, Tracey, Carpanese, Ewalds, Hafner, Abdolmaleki, de Las Casas et al., 2022*). Cette méthode de contrôle basée sur l'apprentissage par renforcement permet de trouver les meilleurs para-

---

13. Organisation de coopération et de développement économiques

14. 100 000 ans en moyenne

15. 12,5 ans en moyenne

16. Le plasma est un gaz ionisé obtenu par une température élevée (150 millions de degrés Celsius dans le cadre de réactions de fusion).

17. toroidalnaïa kamera s magnitnymi katouchkami, il s'agit du dispositif de confinement magnétique expérimental explorant la physique des plasmas et les possibilités de produire de l'énergie par fusion nucléaire.

mètres de contrôle pour optimiser les performances du plasma. Les résultats montrent que cette méthode permet d'améliorer significativement la stabilité du plasma et de réduire les pertes de confinement. Cette approche innovante ouvre la voie à de nouvelles méthodes de contrôle des plasmas dans les tokamaks, ce qui pourrait être décisif pour le développement de la fusion nucléaire en tant que source d'énergie renouvelable propre et durable.

## **7 Les technologies numériques comme levier pour les Objectifs de Développement Durable ?**

Nous avons vu dans les sections précédentes l'importance des outils de Machine et Deep Learning pour la découverte scientifique, représentant un nouveau paradigme pour le progrès technique, y compris dans le contexte des enjeux environnementaux. Cette section examine comment ces outils seront utilisés par les principaux acteurs mondiaux, en particulier l'Union Européenne (UE) et sa capacité à répondre aux Objectifs du Développement Durable (ODD).

Les principaux acteurs leaders dans ces nouvelles technologies, qui améliorent la productivité scientifique, sont la Chine dans l'ingénierie, les géosciences, la physique et les mathématiques, les États-Unis dans le domaine de la santé, et l'Union Européenne dans les sciences humaines et sociales. La Chine s'affirme comme leader en raison de sa prééminence dans les domaines scientifiques où les technologies numériques jouent un rôle essentiel. Comme nous l'avons vu précédemment, ces technologies sont des vecteurs d'innovations, notamment dans le domaine environnemental, en s'inscrivant dans un nouveau paradigme, les rendant ainsi indispensables à l'avenir. La Chine connaît une croissance scientifique impressionnante et économique, surpassant les États-Unis et l'UE qui enregistrent une croissance plus lente et une production scientifique moindre. Cependant, la Chine semble être en retard dans les domaines des sciences sociales par rapport aux deux autres puissances. L'UE est confrontée au défi de poursuivre son développement tout en prenant en compte les ODD formulés en 2015 pour faire face aux principaux enjeux environnementaux, économiques et sociaux. C'est pourquoi l'UE accorde une grande importance aux technologies numériques pour réaliser ses ambitions de développement. Pour ce faire, l'UE doit développer sa propre industrie de composants électroniques afin de devenir indépendante sur le plan mondial. Elle encourage ses entreprises à produire ces composants en mettant en place de nouvelles politiques instrumentales. C'est ainsi qu'est né l'European Chips Act le 22 juillet 2022, ayant pour objectif d'assurer l'autonomie de l'Europe dans la production de micro-puces nécessaires aux nouveaux outils numériques. Ce programme finance la recherche et le développement, la capacité de production de ces nouvelles puces, ainsi que la surveillance des marchés pour optimiser la production et minimiser le risque de pénuries. Au

total, un fonds de 43 milliards d’euros a été injecté, soit près de trois fois le PIB européen de 2022, dont 11 milliards seront dédiés à la recherche et au développement (*Dachs, n.d.*). Cependant, malgré les aspects positifs des technologies numériques pour le développement, il est intéressant de noter qu’elles peuvent également avoir un impact négatif sur la dimension sociale des ODD (*Ghisetti and Michoud, 2023*). En effet, certaines de ces technologies semblent être défavorables à la réduction des inégalités et à l’efficacité institutionnelle (ODD5, ODD10 et ODD16). Cependant, l’accroissement des inégalités, des discriminations et du sexisme peut être expliqué par les biais résultant de l’utilisation d’algorithmes dans les processus décisionnels (*Ferrer, van Nuenen, Such, Coté and Criado, 2021*). Pour surmonter ces biais, de nouveaux algorithmes sont développés dans le but de les éliminer, bien que la composition détaillée de ces algorithmes et leur démonstration d’absence de biais puissent être délicates.

Il est donc évident que l’émergence des technologies numériques en tant que nouvelle révolution industrielle pose de nouveaux défis en matière de développement. Un contexte de concurrence émerge entre l’UE, les États-Unis et la Chine concernant la production de composants électroniques nécessitant des ressources limitées pour le fonctionnement des technologies numériques. Le manque d’accords et les divergences entre les principaux acteurs économiques concernant les ODD risquent de compromettre une utilisation responsable de ces nouvelles technologies. De plus, même dans un contexte où les ODD sont respectés et où l’on considère les possibilités de combiner croissance économique et préservation de l’environnement grâce aux technologies numériques, il est difficile d’atteindre une compatibilité entre ces deux piliers tout en répondant aux objectifs sociétaux. Cela est dû aux effets néfastes émanant de ces technologies sans la mise en place de réglementations supplémentaires concernant l’utilisation des algorithmes.

## **8 Etude empirique sur les déterminants des émissions de Gaz à Effet de Serre**

### **8.1 Présentation du modèle**

Nous allons maintenant nous intéresser à l’impact actuel du numérique sur les émissions de GES à l’aide de l’équation suivante :

$$\begin{aligned}
\frac{\partial GHG_{it}}{\partial t} = & \alpha + \beta \cdot GreenKeywords_{i,t-2} + \gamma \cdot AIKeywords_{i,t-2} \\
& + \delta \cdot GreenKeywords_{i,t-2} \cdot AIKeywords_{i,t-2} + \zeta \cdot ProdIndus_{it} + \eta \cdot DensitePop_{it} \\
& + \iota \cdot \log(croissance)_{it} + \theta \cdot EffetEUDigitalStrategy_{it} \\
& + \iota \cdot Time_{it} + \kappa \cdot EffetEUDigitalStrategy_{it} \cdot Time_{it} + \epsilon_{it}
\end{aligned} \tag{1}$$

Nous avons pour objectif d’estimer l’effet des différentes variables sur l’accélération des émissions de GES à l’aide d’une équation économétrique. Cette équation est une estimation qui prend en compte la nature censurée des données en utilisant une régression en Tobit. Nous nous inspirons de l’estimation présentée dans [Bianchini et al. \(2022\)](#) pour expliquer les émissions de GES par des indicateurs potentiels d’utilisation de technologies numériques et vertes que nous allons lier conjointement. Nous allons examiner le lien entre l’augmentation du nombre d’articles sur Google Scholar traitant de technologies numériques ( $\cdot AIKeywords_{i,t-2}$ ) et de technologies vertes ( $\cdot GreenKeywords_{i,t-2}$ ) individuellement, ainsi que dans un terme d’interaction pour étudier leurs effets conjoints. Nous déterminerons leurs effets à l’aide des mots-clés présents dans ces articles et détaillerons la procédure dans la section annexe. Nous étudierons également le niveau de production industrielle ( $\cdot ProdIndus_{it}$ ) dans les régions concernées, la densité de population ( $\cdot DensitePop_{it}$ ), le taux de croissance ( $\cdot \log(croissance)_{it}$ ) et l’effet de la European Digital Strategy ( $\cdot EffetEUDigitalStrategy_{it}$ ) dans différents pays membres de l’Union européenne avec, pour contrefactuels, l’étude des pays membres de l’OCDE n’appartenant pas à l’Union européenne : l’Australie, la Corée du Sud, les États-Unis et le Japon.

## 8.2 Limites du modèle

Nous devons cependant noter quelques limites : en raison de la récence de certains évènements, cette analyse semble prématurée. L’European Digital Strategy vise des objectifs à long terme et ne peut donc pas, à ce jour, proposer d’effets sur les émissions de GES. De même, avec l’arrivée rapide de nouveaux modèles de RNA et de la prise de conscience récente de l’utilité de ces réseaux pour la gestion énergétique, il est difficile d’estimer leurs effets sur les émissions de GES. De plus, la transition vers le numérique exige un coût d’entrée important en termes de capital environnemental avant de potentiellement proposer des effets positifs conformément aux hypothèses de la courbe environnementale de Kuznet décrivant ce coup d’entrée à l’arrivée d’un nouveau paradigme permettant de la croissance jusqu’à atteindre un point d’inflexion qui redirigera vers une croissante constante tout en diminuant l’impact environnemental lié à l’usage de nouvelles technologies. De plus, les effets positifs liés à l’utilisation du numérique dans le but

d'améliorer l'efficacité énergétique pourraient également être accompagnés d'un nouveau comportement des agents en raison du nouveau contexte économique mené par la quatrième révolution industrielle.

## 9 Discussion et conclusion

La gestion énergétique est une problématique complexe en raison de plusieurs variables, y compris les externalités. Si nous acceptons qu'il y ait une substituabilité entre les énergies grâce aux avancées numériques (*Apostolakis, 1990*), une politique de gestion énergétique efficace pourrait mener à une production accrue, et par conséquent, à des problèmes de gestion de déchets et davantage d'émissions de GES. Il est également important de considérer les enjeux sociétaux tels que l'élargissement des moyens d'accès à l'éducation, ainsi que les problèmes potentiels liés à la surveillance des individus. Dans ce contexte, il serait intéressant d'approfondir l'analyse de la compatibilité des politiques économiques et de croissance des pays avec les dix-sept ODD, en proposant des éléments de réponses face au trilemme qui se compose. Les investissements dans les infrastructures, la R&D, les subventions et autres formes de dépenses pour la transition énergétique peuvent être coûteux et confrontés à un effet de seuil pour être efficaces, conformément aux mécanismes récurrents en économie du développement. Le retour de ces investissements dépendra également de l'efficacité des institutions pour mettre en cohérence l'ensemble des projets, tant en termes de politique sociale, qu'économique et environnementale (*Somanathan, 2016*).

Cependant, les technologies numériques peuvent avoir un impact positif sur l'environnement si elles sont utilisées de manière verte. Les méthodes de la Data science peuvent accélérer la recherche pour favoriser l'apparition de technologies innovantes ayant un effet dual en limitant l'impact des externalités négatives des technologies numériques et d'autre part en ré-alimentant le circuit de la R&D à l'aide de nouvelles méthodes d'application pouvant mener vers de nouveaux paradigmes scientifiques. De plus, l'émergence de ces technologies numériques permettront également la possibilité de déploiement de centrales à fusion nucléaire pour les moyens de production avec une empreinte neutre en carbone. Ainsi, bien que le déploiement du numérique face aux objectifs de développement durable soit un problème complexe, une gestion énergétique propre et durable pourrait être atteinte en utilisant les technologies numériques à bon escient.

Par ailleurs, il serait intéressant d'analyser au delà de la gestion énergétique, la gestion de l'eau qui est également une problématique cruciale pour laquelle les technologies numériques peuvent apporter des solutions innovantes. En effet, la gestion de l'eau représente un enjeu majeur pour le développement durable, en raison de la raréfaction des ressources en eau douce et des risques de pénurie dans certaines



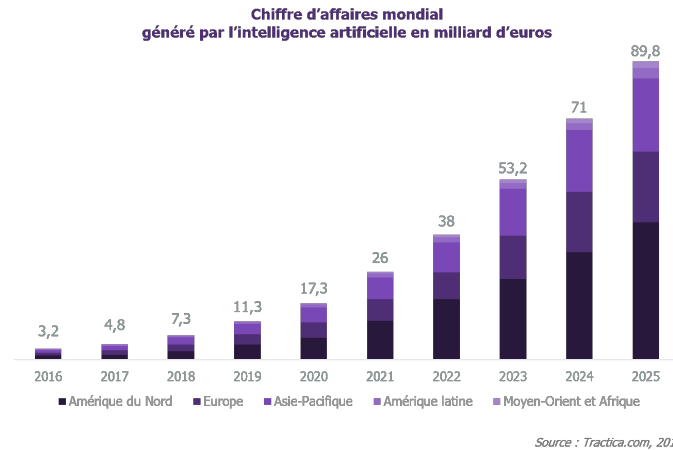
régions du monde. Les outils numériques, tels que des capteurs Internet of Things (IoT)<sup>18</sup>, l'analyse de données ou encore des modèles de prédiction, pourront aider à optimiser la gestion de l'eau à différentes échelles avec notamment le traitement des eaux usées, la surveillance des réseaux de distribution et la gestion des ressources en eau. En utilisant ces outils numériques de manière efficace en prenant en compte les contraintes environnementales, il serait possible de garantir un accès durable à l'eau potable ainsi qu'un système agricole péren, tout en minimisant les externalités négatives aux différents écosystèmes et en limitant les pertes liées à une mauvaise gestion de l'eau. Ainsi, la transition numérique peut également contribuer à atteindre les objectifs de développement durable en matière de gestion de l'eau.

---

18. "Internet of Things" ou "Internet des Objets" décrit le réseau de terminaux physiques, les "objets", qui intègrent des capteurs, des logiciels et d'autres technologies en vue de se connecter à d'autres terminaux et systèmes sur Internet et d'échanger des données avec eux. Ces terminaux peuvent aussi bien être de simples appareils domestiques que des outils industriels d'une grande complexité.  
Source : [Oracle](#)

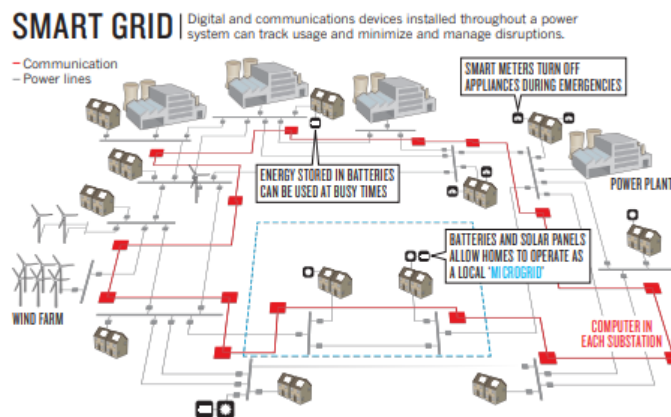
## Les Annexes

### Figures :



**Figure 1.** Chiffre d'affaire mondial généré par l'intelligence artificielle en milliard d'euros

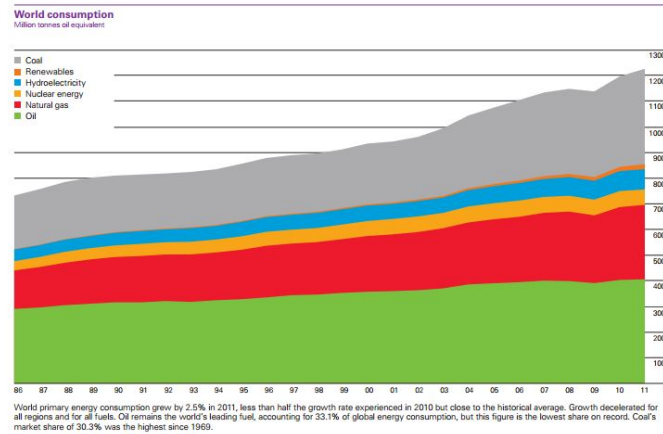
Source : <https://www.digitalcorner-wavestone.com/2019/03/tour-dhorizon-du-marche-de-lintelligence-artificielle/>



**Figure 2.** Smart Grid : Les dispositifs numériques et de communication installés dans l'ensemble d'un réseau électrique permettent de suivre l'utilisation et de minimiser et gérer les perturbations.

Source : (Amin, 2013)

foot



**Figure 3.** Consommation mondiale d'énergie en million de tonnes équivalent pétrole

Source : <https://www.planetoscope.com/Source-d-energie/229-.html>

## Démarche et programme pour la collecte des mots-clés :

Découvrons ensemble le développement du code Python utilisé pour déterminer le nombre de mots clés faisant référence aux technologies numériques et aux technologies vertes pour un échantillon d'articles traqués sur le site Google Scholar. Nous présentons ici un premier prototype de code Python permettant de compter le nombres de mots clés retrouvés pour un article.

Premier prototype de code d'extraction de mots clés :

```
#Importation de divers packages permettant l'affichages de output
import numpy as np
import csv
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
sns.set(color_codes = True)
sns.set(font_scale=1.5)
from scipy import stats
import warnings
warnings.filterwarnings("ignore")
import requests
import pandas as pd
from collections import Counter
#Importation du package BeautifulSoup servant a l'extraction des mots cles :
```

```

from bs4 import BeautifulSoup
from collections import Counter
#Les mots cles seront extraits dans l'article provenant du lien suivant :
url = "https://link.springer.com/article/10.1007/s10640-022-00741-7"
response = requests.get(url)
soup = BeautifulSoup(response.content)
text = soup.get_text()
#Afin de ne pas biaiser le compte, nous mettons tout les mots de l'article
#en majuscule pour pouvoir extraire l'ensemble des mots cles souhaitees
text = text.upper()
#Selection des mots cles a extraire
keywords = [ 'GREEN', 'GREEN_DEAL', 'GREEN_DEAL', 'ENVIRONMENT',
'SUSTAINABLE_DEVELOPMENT_GOALS', 'DEVELOPMENT_GOALS', 'AI', 'data',
'NEURAL_NETWORK', 'MACHINE_LEARNING', 'DEEP_LEARNING', 'ALGORITHM' ]
tokens = text.split()
#Compteurs de mots cles
counts = Counter(tokens)
keyword_counts = {keyword: counts.get(keyword, 0) for keyword in keywords}
print(keyword_counts)
results = {}
for keyword in keywords:
    results[keyword] = counts.get(keyword, 0)
#Creation d'un dataframe a partir du dictionnaire des resultats
df = pd.DataFrame.from_dict(results, orient='index', columns=['count'])
# Affichage du dataframe
print(df)

```

Code provenant de : <https://anasbrital98.github.io/blog/2021/Random-Forest/>

## Postface :

Travailler sur ce sujet me sensibilise particulièrement dans la mesure où je suis intéressé par les thématiques autour de l'économie du futur et de l'innovation. Dans un contexte de quatrième révolution industrielle, en considérant l'émergence de nouveaux modèles algorithmiques toujours plus performants, il est intéressant de lier l'utilisation de ces nouvelles technologies avec des enjeux actuels tels que les crises environnementales et énergétiques tout en proposant l'utilisation de théories économiques passées concernant l'innovation et le développement dans ce contexte de nouvelle révolution industrielle. Certaines théories économiques peuvent parfois être controversées ou considérées comme "obsolètes" en raison de l'absence de vérification empirique, notamment pour celles de la courbe environnementale de Kuznets. Par ailleurs, le choix de ce sujet est également un prétexte pour pouvoir étudier les propriétés de différents modèles de Machine Learning ainsi que leur utilité et leurs applications.

Dans le cadre du mémoire de Magistère, j'aimerais approfondir mon sujet sur quelques points. L'idée que le coût en termes de capital environnemental est élevé pour l'entraînement de modèles d'apprentissage a été abordée. Néanmoins, je n'ai pas pu développer le caractère de non-rivalité des modèles entraînés, pouvant permettre de justifier davantage la notion de "coûts d'entrée" pouvant être dépassés à long terme. En effet, nous pouvons citer OpenAI qui s'est basé sur des modèles déjà existants pour développer la série ChatGPT, notamment BERT (développé par Google Research) qui sert à traiter le langage naturel. La notion de "coût d'entrée" prend davantage de sens dans cette situation, puisque des modèles peuvent se greffer à d'autres afin de les rendre plus performants, sans avoir nécessairement besoin d'utiliser une quantité importante d'énergie pour produire une nouvelle fois un modèle ayant les mêmes caractéristiques qu'un autre. J'aimerais par ailleurs traiter le sujet des ordinateurs quantiques. Les ordinateurs quantiques pourraient également améliorer les capacités d'entraînement des modèles de RNA tout en réduisant les coûts énergétiques associés à cet entraînement en comparaison à un ordinateur binaire, pour lequel l'entraînement potentiel de ce même modèle prendrait des années et consommerait davantage d'énergie. Ces ordinateurs quantiques pourraient également avoir le potentiel d'accélérer le processus de recherche de la même manière que les technologies numériques du paradigme précédent. Cela confirmerait nos hypothèses concernant l'utilité d'un paradigme scientifique présent pour l'évolution des technologies jumelles et la préparation du terrain pour un nouveau paradigme. Cette "cinquième révolution industrielle" ou "deuxième partie de la quatrième révolution industrielle" aura nécessairement besoin de l'intégration de techniques de la Data science dans l'histoire. En effet, contrairement à la traditionnelle informatique binaire, la technologie quantique repose sur un principe de probabilité avec un terme d'erreur pouvant varier selon la situation. De plus, les ordinateurs quantiques étant sensibles aux rayons cosmiques, les techniques de la Data science sont nécessaires pour évaluer les localisations optimales pour leur déploie-

ment. J'aimerais également exploiter la piste des Data centers biologiques. De nos jours, il est déjà possible de nos jours de manipuler de l'ADN et d'y implémenter de l'information, la recherche dans ce domaine pourrait dans plusieurs décennies mener à des Data centers biologiques tendant à être neutre en carbone. Dans le contexte de mon stage de Magistère auprès de Jamel Saadaoui, chercheur au BETA, j'ai pour mission de traiter la thématique "Stata et Python, meilleurs ensemble?". Cette thématique me permettra d'utiliser le logiciel Stata associé au langage Python pour en observer les avantages, j'ai comme idée à ce jour de tester un modèle suivant les idées du mémoire en montrant le caractère de "cercle vertueux" dans le circuit de "R&D et technologies" qui s'auto-alimente dans une boucle à l'aide d'un algorithme évolutionnaire, dans la mesure du possible. Ce travail pourra être intégré dans la section 3 pour appuyer l'importance des logiciels et des langages de programmation dans le processus de recherche.

Par ailleurs, la production de ce mémoire m'a permis de pouvoir utiliser le langage Python autre que dans un contexte de statistiques descriptives et de réalisations de régressions en écrivant un petit programme d'extraction de données. Ce passage m'a permis d'apprendre à surmonter des difficultés en programmation notamment lorsque j'ai dû trouver une solution pour demander à Python de mettre l'intégralité des mots de l'article en majuscules étudié pour pouvoir capturer un maximum de mots clés sans avoir à demander plusieurs fois le même mot avec et sans majuscule pour ma recherche de mots clés. La rédaction du mémoire m'a également permis d'apprendre à utiliser l'éditeur Latex en comprenant les subtilités de présentation et de mise en page ainsi que de comprendre l'intérêt de cet éditeur pour l'écriture de caractères mathématiques.

Mon intérêt pour les thématiques abordées dans ce mémoire m'a permis de découvrir une curiosité plus importante autour de la littérature économique et de voir plus largement ce qu'est l'économie en dehors du cursus de licence en m'intéressant à des publications scientifiques d'une branche économique spécifique. En abordant des concepts scientifiques autres qu'économiques dans ce mémoire, j'ai par ailleurs pu comprendre à quel point les sciences économiques ont un lien important avec les autres sciences si l'on souhaite analyser des concepts clés.

## Références

- Aghion, Philippe, Benjamin F Jones, and Charles I Jones**, “Artificial intelligence and economic growth,” in “The economics of artificial intelligence : An agenda,” University of Chicago Press, 2018, pp. 237–282.
- Amin, Massoud**, “The smart-grid solution,” *Nature*, 2013, 499 (7457), 145–147.
- Apostolakis, Bobby E**, “Energy—capital substitutability/complementarity : the dichotomy,” *Energy Economics*, 1990, 12 (1), 48–58.
- Bianchini, Stefano, Giacomo Damioli, and Claudia Ghisetti**, “The environmental effects of the “twin” green and digital transition in European regions,” *Environmental and Resource Economics*, 2022, pp. 1–42.
- Collet, Pierre and Jean-Philippe Rennard**, “Stochastic optimization algorithms,” in “Intelligent information technologies : Concepts, methodologies, tools, and applications,” IGI Global, 2008, pp. 1121–1137.
- Dachs, Bernhard**, “Policy Brief No. 58, February 2023.”
- Degrave, Jonas, Federico Felici, Jonas Buchli, Michael Neunert, Brendan Tracey, Francesco Carpanese, Timo Ewalds, Roland Hafner, Abbas Abdolmaleki, Diego de Las Casas et al.**, “Magnetic control of tokamak plasmas through deep reinforcement learning,” *Nature*, 2022, 602 (7897), 414–419.
- Dinda, Soumyananda**, “Environmental Kuznets curve hypothesis : a survey,” *Ecological economics*, 2004, 49 (4), 431–455.
- Ferrer, Xavier, Tom van Nuenen, Jose M Such, Mark Coté, and Natalia Criado**, “Bias and discrimination in AI : a cross-disciplinary perspective,” *IEEE Technology and Society Magazine*, 2021, 40 (2), 72–80.
- Gershenfeld, Neil, Stephen Samouhos, and Bruce Nordman**, “Intelligent infrastructure for energy efficiency,” *Science*, 2010, 327 (5969), 1086–1088.
- Ghisetti, C and K Michoud**, “Measuring the Impact of Digital Technologies on Sustainable Development from Scientific Literature : a Natural Language Processing analysis,” 2023.
- Kuhn, Thomas S**, *The structure of scientific revolutions*, University of Chicago press, 2012.
- Kurpińska, Marzena, Leszek Kułak, Tadeusz Miruszewski, and Marcin Byczuk**, “Application of artificial neural networks to predict insulation properties of lightweight concrete,” *Applied Sciences*, 2021, 11 (22), 10544.
- Masanet, Eric, Arman Shehabi, Nuoa Lei, Sarah Smith, and Jonathan Koomey**, “Recalibrating global data center energy-use estimates,” *Science*, 2020, 367 (6481), 984–986.

**Moore, Gordon E et al.**, “Cramming more components onto integrated circuits,” 1965.

**Ndilimabaka, H**, “Réseaux électriques intelligents : défis technologiques et moyens de mesure,” *Techniques de l'ingénieur Instrumentation de mesures électriques*, vol. base documentaire : TIB413DUO., no. ref. article : r940, 2015.

**Schwab, Klaus**, *The fourth industrial revolution*, Currency, 2017.

**Siddik, Md Abu Bakar, Arman Shehabi, and Landon Marston**, “The environmental footprint of data centers in the United States,” *Environmental Research Letters*, 2021, 16 (6), 064017.

**Somanathan, Eswaran**, “INSTITUTIONS, THE ENVIRONMENT, AND DEVELOPMENT,” *THE HANDBOOK OF*, 2016, p. 733.

**Tabor, Daniel P, Loïc M Roch, Semion K Saikin, Christoph Kreisbeck, Dennis Sheberla, Joseph H Montoya, Shyam Dwaraknath, Muratahan Aykol, Carlos Ortiz, Hermann Tribukait et al.**, “Accelerating the discovery of materials for clean energy in the era of smart automation,” *Nature Reviews Materials*, 2018, 3 (5), 5–20.

**van Dis, Eva AM, Johan Bollen, Willem Zuidema, Robert van Rooij, and Claudi L Bockting**, “ChatGPT : five priorities for research,” *Nature*, 2023, 614 (7947), 224–226.

**Vinuesa, Ricardo, Hossein Azizpour, Iolanda Leite, Madeline Balaam, Virginia Dignum, Sami Domisch, Anna Felländer, Simone Daniela Langhans, Max Tegmark, and Francesco Fuso Nerini**, “The role of artificial intelligence in achieving the Sustainable Development Goals,” *Nature communications*, 2020, 11 (1), 233.

**Wahlroos, Mikko, Matti Pärssinen, Samuli Rinne, Sanna Syri, and Jukka Manner**, “Future views on waste heat utilization–Case of data centers in Northern Europe,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82, 1749–1764.