



HAL
open science

Analyse et modélisation de l'impact environnemental du système d'information

Guillaume Bourgeois

► **To cite this version:**

Guillaume Bourgeois. Analyse et modélisation de l'impact environnemental du système d'information. Ordinateur et société [cs.CY]. Université de La Rochelle, 2023. Français. NNT : 2023LAROS023 . tel-04470070

HAL Id: tel-04470070

<https://theses.hal.science/tel-04470070>

Submitted on 21 Feb 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



LA ROCHELLE UNIVERSITÉ

ÉCOLE DOCTORALE EUCLIDE

LABORATOIRE L3i

THÈSE présentée par :

Guillaume BOURGEOIS

soutenue le : **19/12/2023**

pour obtenir le grade de : **Docteur de La Rochelle Université**

Discipline : **Informatique et Applications**

**Analyse et modélisation de l'impact environnemental
du système d'information**

RAPPORTEURS	Anne-Laure LIGOZAT Mohamed CHERIET	Professeur des universités Professeur des universités	ENSIIE et Université Paris-Saclay ÉTS Montréal
EXAMINATEUR	Patricia PASCAL-STOLF Bénédicte BENOIT	Professeur des universités Director digital solutions	Université Toulouse Jean-Jaurès Ageas
DIRECTION	Vincent COURBOULAY Benjamin DUTHIL	Maitre de conférences HDR Docteur en informatique	La Rochelle Université EIGSI



Communauté
d'**Agglomération** de
La Rochelle

THÈSE RÉALISÉE AU Laboratoire L3i
La Rochelle Université - Institut LUDI
Avenue Michel Crépeau
17042 La Rochelle cedex 01

Tel : +33 5 46 45 82 62
Web : <http://l3i.univ-larochelle.fr>

SOUS LA DIRECTION DE Vincent COURBOULAY Maitre de conférences HDR
Benjamin DUTHIL Docteur en informatique

FINANCEMENT Allocation de recherche de la CDA

Résumé

Cette thèse porte sur l'analyse et la modélisation de l'impact environnemental du système d'information (SI) au sein des organisations. Il propose un cadre d'aide à la décision pour piloter l'empreinte carbone du SI, basé sur une méthodologie d'analyse de cycle de vie adaptée au contexte du numérique, ainsi qu'une modélisation utilisant des techniques d'intelligence artificielle, telles que le profilage, le pilotage et la recommandation. Ces travaux sont mis en œuvre à travers des applications concrètes, telles que les outils WeNR, qui permettent de mesurer et de réduire l'impact environnemental du numérique. Il présente également les perspectives d'un outil SaaS d'aide à la décision dans le numérique responsable.

Le premier chapitre introduit le contexte et les enjeux liés à la transition environnementale et numérique, ainsi que les objectifs et les contributions de la thèse. Il montre le lien entre le numérique responsable et les Objectifs de développement durable de l'Agenda 2030, ainsi que l'initiative "La Rochelle Territoire Zéro Carbone".

Le deuxième chapitre présente une revue de la littérature sur l'impact environnemental du numérique, en distinguant l'empreinte directe du secteur et son potentiel de réduction des émissions grâce à ses effets indirects. Il compare les résultats des différentes études et identifie les sources de variabilité et d'incertitude.

Le troisième chapitre décrit la méthodologie d'analyse de cycle de vie développée pour évaluer l'impact environnemental du SI au sein des organisations. Il explique les éléments constitutifs du modèle, tels que la base de données, le calcul et la définition du périmètre, l'analyse quantitative et qualitative. Il discute également des limites et des perspectives de cette approche.

Le quatrième chapitre expose le processus d'évaluation proposé pour guider les organisations vers la mise en place d'une stratégie numérique responsable. Il présente une vision SIAD (Système Interactif d'Aide à la Décision), qui repose sur quatre composantes : la base de connaissance, le profilage, le pilotage et la recommandation. Il décrit les concepts et les techniques utilisés pour chaque composante, ainsi que l'architecture globale du SIAD.

Le cinquième chapitre illustre l'application pratique de la méthodologie à travers l'utilisation de l'outil WeNR, qui permet aux organisations de mesurer leur empreinte carbone numérique et de bénéficier de conseils personnalisés pour la réduire. Il présente l'architecture, le fonctionnement, la mise en œuvre, le retour d'expérience et les opportunités de cet outil.

Le sixième chapitre se penche sur l'outil WeNR Light, qui offre une variante simplifiée de la méthodologie pour les organisations qui souhaitent une approche plus légère, tout en restant soucieuses de leur impact environnemental. Il présente les caractéristiques, les avantages et les limites de cet outil.

Le septième chapitre aborde l'outil WeNR+, qui propose une version avancée liée à la partie modélisation de la méthodologie, avec des fonctionnalités additionnelles pour une évaluation plus approfondie et personnalisée. Il présente les résultats des expérimentations menées avec cet outil, ainsi qu'un exemple d'implémentation au sein des Hôpitaux universitaires de Genève.

Enfin, le huitième et neuvième chapitre marque la conclusion de la thèse en présentant les principales conclusions, les limites et les perspectives de recherche futures.

**Analysis and modelling of the environmental impact of
information system**

Abstract

This thesis focuses on the analysis and modeling of the environmental impact of the Information System (IS) within organizations. It proposes a decision support framework for managing the carbon footprint of the IS, based on a life cycle analysis methodology adapted to the digital context, as well as modeling using artificial intelligence techniques such as profiling, control, and recommendation. These works are implemented through concrete applications, such as the WeNR tools, which allow for the measurement and reduction of the environmental impact of digital technology. It also presents the prospects of a SaaS tool for decision-making in responsible digital technology.

The first chapter introduces the context and challenges related to environmental and digital transition, as well as the objectives and contributions of the thesis. It shows the connection between responsible digital technology and the Sustainable Development Goals of the 2030 Agenda, as well as the "La Rochelle Zero Carbon Territory" initiative.

The second chapter presents a literature review on the environmental impact of digital technology, distinguishing between the direct footprint of the sector and its potential for emissions reduction through its indirect effects. It compares the results of various studies and identifies sources of variability and uncertainty.

The third chapter describes the life cycle analysis methodology developed to assess the environmental impact of the IS within organizations. It explains the components of the model, such as the database, calculation, and definition of the scope, quantitative and qualitative analysis. It also discusses the limitations and prospects of this approach.

The fourth chapter outlines the proposed evaluation process to guide organizations toward implementing a responsible digital strategy. It presents an SIAD (Interactive Decision Support System) vision, based on four components : knowledge base, profiling, control, and recommendation. It describes the concepts and techniques used for each component, as well as the overall architecture of SIAD.

The fifth chapter illustrates the practical application of the methodology through the use of the WeNR tool, which allows organizations to measure their digital carbon footprint and receive personalized advice on how to reduce it. It presents the architecture, operation, implementation, feedback, and opportunities of this tool.

The sixth chapter focuses on the WeNR Light tool, which offers a simplified variant of the methodology for organizations seeking a lighter approach while still being mindful of their environmental impact. It presents the features, benefits, and limitations of this tool.

The seventh chapter addresses the WeNR+ tool, which offers an advanced version related to the modeling part of the methodology, with additional features for a more in-depth and personalized assessment. It presents the results of experiments conducted with this tool, as well as an example of implementation within the University Hospitals of Geneva.

Finally, the eighth and ninth chapters conclude the thesis by presenting the main findings, limitations, and future research perspectives.

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes parents et à ma sœur. Leur soutien inconditionnel a été un pilier tout au long de mon parcours académique. De même, tous les membres de ma famille ont joué un rôle indéniable dans mon parcours.

En outre, je souhaite exprimer ma reconnaissance envers le CIRODD et toute son équipe pour leur précieuse collaboration. Mes directeurs de thèse, Vincent et Ben, ont été des guides essentiels dans l'accomplissement de ce travail.

Je tiens également à remercier le professeur Mohamed qui m'a offert l'opportunité de venir au Québec lors de ma thèse. Sa confiance en moi a été un véritable moteur. De plus, je suis reconnaissant envers Géraldine et Hassana pour leur aide précieuse.

Par ailleurs, je tiens à exprimer ma gratitude envers toutes les personnes de l'INR, notamment Laurent, Mathieu, Guillaume, Jules, Olivier et Rémy. Leur soutien et leurs conseils ont été inestimables pendant ces trois années.

Je souhaite également remercier le laboratoire L3I et la Rochelle agglomération pour leur soutien. Leur confiance en moi a été un véritable encouragement.

Mon ami Julien, tous mes amis, ainsi que Christine Morriveau méritent également une mention spéciale pour leur soutien et leur amitié tout au long de ce voyage.

Enfin, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers le jury de ma thèse pour leur temps, leur expertise et leurs précieux commentaires. Leur contribution a été essentielle pour l'achèvement de ce travail.

Pour conclure, je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont accompagné de près ou de loin tout au long de ma thèse. Votre aide et votre soutien ont été essentiels. Un seul mot peut résumer mes sentiments : MERCI.

Table des matières

I	Contexte général	13
1	Introduction	15
1.1	Contexte et enjeux de la transition environnementale et numérique	15
1.2	Objectifs et contributions	16
1.3	Lien avec les ODD et LRTZC	17
1.4	Organisation	18
2	Etat de l'art	21
2.1	Présentation et contexte	22
2.2	Terminologie	22
2.3	Entre empreinte directe et effets indirects	23
2.4	Impact du numérique (effets directs)	25
2.4.1	Matériels et méthodes	25
2.4.2	Vue d'ensemble	25
2.4.3	Méthodologies des études	28
2.4.4	Résultats et discussion	29
2.4.4.1	Empreinte absolue	29
2.4.4.2	Empreinte par sous-domaine	31
2.4.4.3	Empreinte par étape du cycle de vie	33
2.4.4.4	Différences de portée et de méthodes d'estimation entre les études	34
2.4.4.5	Prise en compte des effets rebond	35
2.5	Capacité du secteur à diminuer son impact	37
2.5.1	Matériels et méthodes	37
2.5.2	Vue d'ensemble	37
2.5.3	Méthodologies des études	39
2.5.4	Résultats et discussion	41
2.5.4.1	Potentiels de réduction absolus et relatifs	41
2.6	Conclusion	43

II	Analyse et modélisation	47
3	Analyse	49
3.1	Introduction	50
3.2	Analyse du cycle de vie	51
3.2.1	Méthodologie	51
3.2.2	Bases de données	52
3.2.3	Évaluation de l’empreinte carbone	53
3.3	Limites	56
3.3.1	Disponibilité et qualité des données	56
3.3.2	Complexité et coûts	57
3.3.3	Intégration des aspects sociaux et économiques	58
3.4	Méthodologie	59
3.4.1	Approche	59
3.4.1.1	Base de données	59
3.4.1.2	Simplification et accessibilité	60
3.4.1.3	Analyse qualitative et bonnes pratiques	60
3.4.2	Calcul et définition du périmètre	61
3.4.2.1	Champ d’application et exclusions	62
3.4.3	Base de données	63
3.4.4	Analyse quantitative	65
3.4.5	Analyse qualitative	67
3.5	Vers l’intégration du cloud	69
3.6	Conclusion	70
4	Modélisation	75
4.1	Introduction	75
4.2	État de l’art	78
4.3	Vision SIAD	80
4.3.1	Base de connaissance	80
4.3.1.1	État de l’art	81
4.3.1.2	Concept	83
4.3.2	Profilage	84
4.3.2.1	État de l’art	84
4.3.2.2	Concept	89
4.3.3	Pilotage	90
4.3.3.1	État de l’art	90
4.3.3.2	Concept	93
4.3.4	Recommandation	94
4.3.4.1	État de l’art	94
4.3.4.2	Concept	97
4.3.5	Architecture	98
4.4	Limites	98
4.5	Conclusion	100

III Applications	103
5 WeNR	105
5.1 Introduction	106
5.1.1 Objectifs	106
5.1.2 Historique	106
5.1.3 Partenaires et contribution	106
5.2 WeNR	107
5.2.1 Architecture	107
5.2.2 Fonctionnement	109
5.2.3 Mise en œuvre	109
5.2.4 Retour d'expérience et limites	111
5.2.5 Opportunités et ambition	112
5.3 Adaptabilité	112
5.3.1 Importance du mix énergétique	114
5.3.2 Impact du transport dans l'ACV	115
5.4 Synthèse	115
5.5 Résultats de la campagne 2021	116
5.5.1 Présentation de l'échantillon	116
5.5.2 Interprétation des résultats	118
5.6 Analyse de la maturité Numérique Responsable	123
5.6.1 Intégration de la démarche Numérique Responsable	126
5.6.2 Maturité des répondants	128
5.6.3 Analyse des résultats	129
5.7 Résultats	130
5.7.1 Tendances observées	131
5.7.2 Scénarios pour l'horizon 2030	133
5.7.3 Méthodologie de calcul des scénarios	135
5.7.4 Scénarios prospectifs	137
5.8 Conclusion et perspectives	138
6 WeNR Light	141
6.1 Introduction	141
6.2 WeNR Light	142
6.2.1 Objectifs	142
6.2.2 Source	142
6.2.3 Intérêt	144
6.2.4 Conception	144
6.2.5 Implementation	144
6.3 Méthodologie détaillée	145
6.3.1 Agrégation des données	145
6.3.2 Méthode K-Means et Pearson	145
6.3.2.1 Résultats	145
6.3.2.2 Discussion	147

6.3.3	Méthode régression linéaire multivariée	148
6.3.3.1	Régression linéaire multivariée	148
6.3.3.2	Équations	148
6.3.3.3	Résultats	149
6.3.3.4	Discussion	150
6.4	Conclusion	150
7	WeNR Plus	153
7.1	Introduction	154
7.2	Méthodes	154
7.3	Résultats	156
7.4	Systèmes de recommandation	156
7.4.1	Contrainte	157
7.4.2	Résultats	159
7.4.3	Discussion	159
7.5	Séries chronologiques	160
7.5.1	Ajustement	160
7.5.2	Résultats	165
7.5.3	Discussion	166
7.6	Clustering	167
7.6.1	Résultats	167
7.6.2	Discussion	169
7.7	Applications	170
7.7.1	Interface	171
7.7.2	Pilotage	171
7.7.3	Prédiction	173
7.7.4	Recommandation	173
7.8	Une application : HUG	174
7.8.1	Les HUG	174
7.8.2	Stratégie	174
7.8.3	Déclinaison NR	175
7.8.4	Application	175
7.8.4.1	Utilisation de WeNR+ aux HUG	175
7.8.4.2	Impact de WeNR+ sur les HUG	177
7.8.4.3	Conclusion	178
7.9	Perspective SAAS	179
7.10	Conclusion	179
IV	Perspectives et conclusion	183
8	Perspectives	185

9 Conclusion	189
Annexes 1 ODD et numérique	224
Annexes 2 Source WeNR	227
Annexes 3 WeNR Light	229
Annexes 4 Logigramme WeNR	233
Annexes 5 Revue Critique	234
Annexes 6 Rapport comparatif LRZTC	236
Annexes 7 Exemple Fiche BP	253

Table des figures

1.1	Architecture thèse.	20
2.1	Schéma de cycle de vie.	25
2.2	Émissions prospective.	32
2.3	Part de l’empreinte GES par sous-domaine du secteur des TIC, année d’étude et d’observation.	32
3.1	Le processus d’évaluation	51
3.2	Hierarchie des différentes méthodologies.	52
3.3	Différents outils et logiciels ACV.	54
3.4	Définition du périmètre.	61
3.5	Périmètre de la méthodologie.	62
3.6	Base de données.	63
3.7	Exemple d’image d’incertitude prise sur la base empreinte	64
3.8	Calcul.	65
4.1	Liste des concepts.	77
4.2	Base de connaissance.	81
4.3	Profilage.	84
4.4	Pilotage.	90
4.5	Recommandation.	94
4.6	Schéma d’architecture.	99
5.1	Parties prenantes WeNR.	107
5.2	Diagramme des flux	108
5.3	Création du rapport WeNR.	110
5.4	Résultats.	116
5.5	Reporting.	116
5.6	Répartition des entreprises par taille.	117
5.7	Répartition des entreprises par secteur d’activité.	117
5.8	Répartition par domaine d’activité.	118
5.9	Nombre moyen d’employés impliqués dans la démarche de responsabilité numérique.	118

5.10	Temps moyen écoulé depuis l'introduction de l'approche de la responsabilité numérique.	119
5.11	Répartition des entreprises par classe d'émission de gaz à effet de serre. . .	119
5.12	Représentation des émissions de gaz à effet de serre par secteur d'activité. .	120
5.13	Ventilation de l'impact environnemental de la fabrication et de l'utilisation des équipements inventoriés.	121
5.14	Durée de vie moyenne par catégorie d'équipement de bureau.	122
5.15	Taux moyen de récupération des équipements en fin de vie par taille d'entreprise.	124
5.16	Méthodologie de traitement et de catégorisation des bonnes pratiques de l'enquête WeNR au modèle de maturité SICT-CMF	126
5.17	Répartition par pourcentage de collaborateurs impliqués dans la démarche NR	128
5.18	Répartition des actions par temps d'introduction de la démarche NR . . .	128
5.19	Degré de maturité de l'ensemble des répondants des WeNR2021 et 2022 .	129
5.20	Émissions totales par collaborateur.	137
6.1	Fonctionnement général de l'outil.	145
6.2	Nuage de nos 5 clusters.	147
7.1	Comparatif outil de pilotage (Source lecko).	155
7.2	Valeurs normalisées pour chaque organisation et chaque bonne pratique. .	157
7.3	Liste des bonnes pratiques.	158
7.4	Matrice SVD.	159
7.5	Recommandations.	159
7.6	tendance linéaire.	161
7.7	tendance croissante.	162
7.8	tendance décroissante.	162
7.9	saisonnalité.	163
7.10	fluctuations aléatoires.	163
7.11	événements exceptionnels.	164
7.12	cycles économiques.	164
7.13	Carte chaleur du dataset WeNR.	168
7.14	Nuage des 5 clusters.	170
7.15	Page principal WeNR+.	172
7.16	Page Pilotage WeNR+.	172
7.17	Page Prédiction WeNR+.	173
7.18	Page Recommandation WeNR+.	174
7.19	Interface.	176
7.20	Indicateur avec tendance.	176
7.21	Comparaison avec alerte.	177
1	Liste des ODD.	224
2	Page d'accueil.	229

3	Exemple de questions.	230
4	Page de fin.	231
5	Page de recommandations.	231

Liste des tableaux

2.1	Aperçu des effets directs et indirects basé sur [BHHB23].	24
2.2	Aperçu des études sur l’empreinte mondiale de GES du secteur des TIC (effets directs).	27
2.3	Résumé des méthodologies d’études sur l’impact environnemental des TIC.	30
2.4	Récapitulatif des études Empreinte GES	31
2.5	Aperçu des études sur le potentiel de réduction des GES	38
2.6	Comparaison des différentes méthodologies	42
3.1	Solution de calcul de l’empreinte carbone.	55
3.2	Solution d’analyse de l’empreinte carbone des TIC.	55
3.3	Comparaison des solutions de calcul de l’empreinte carbone général. . . .	55
3.4	Comparaison des solutions de mesure carbone des TIC.	56
3.5	Liste des équipements.	66
3.6	Calculatrices de calcul environnemental des cloud providers	71
4.1	Classification par domaine des applications des SIAD selon [RA15]	79
4.2	Comparaison des méthodes de base de connaissances	82
4.3	Avantages et inconvénients des méthodes de corrélation	87
4.4	Comparatif avantages et inconvénients des techniques de clustering	89
4.5	Comparaison des méthodes d’analyse de séries temporelles	93
4.6	Avantages et inconvénients des méthodes de recommandation	96
5.1	Etapes de la creation des rapports WeNR	109
5.2	Description des catégories du SICT-CMF	127
5.3	Les tendances observées	132
7.1	Les résultats obtenus	166

Première partie
Contexte général

Chapitre 1

Introduction

Sommaire

1.1	Contexte et enjeux de la transition environnementale et numérique	15
1.2	Objectifs et contributions	16
1.3	Lien avec les ODD et LRTZC	17
1.4	Organisation	18

1.1 Contexte et enjeux de la transition environnementale et numérique

Face au changement climatique, l'humanité doit relever le défi de la transition environnementale, qui consiste à adopter des pratiques durables pour réduire son impact sur la planète. Ce défi a été reconnu par les gouvernements du monde entier depuis les années 1970, avec la création de la Commission mondiale de l'environnement et du développement (CMED) et la publication du rapport Brundtland en 1983 [B⁺87], qui a introduit le concept de "développement durable". Ce concept vise à concilier les besoins des générations présentes et futures, tout en respectant les limites des écosystèmes naturels.

Depuis lors, plusieurs initiatives internationales ont été lancées pour promouvoir le développement durable, telles que la Déclaration de Rio en 1992, l'Agenda 21, la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques, l'Agenda 2030 pour le développement durable et le Green Deal européen [Fet20]. Ces initiatives ont pour objectif commun de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES), qui sont responsables du réchauffement climatique, et de favoriser la transition vers une économie plus verte et plus résiliente.

Dans ce contexte, les technologies de l'information et de la communication (TIC) jouent un rôle ambivalent. D'une part, elles sont sources d'impact environnemental, en raison de leur consommation d'énergie, de leur utilisation de matières premières et de leur production de déchets électroniques. Selon une étude du Shift Project [FBB⁺19], le secteur des TIC représente environ 4% des émissions mondiales de GES. D'autre part, elles sont porteuses d'opportunités pour réduire l'impact environnemental d'autres secteurs, en permettant d'optimiser les processus, de favoriser les modes de consommation plus sobres et de soutenir l'innovation.

Ainsi, il est essentiel d'avoir une vision globale et responsable du numérique, qui prenne en compte ses impacts environnementaux directs et indirects, ainsi que ses bénéfices potentiels pour la transition environnementale. Cela implique d'évaluer l'impact environnemental du numérique de manière rigoureuse et multidimensionnelle, en considérant les différentes étapes du cycle de vie des équipements électroniques (fabrication, utilisation et fin de vie) et les différents aspects de l'activité numérique (terminaux, centres de données, réseaux, services).

Les organisations doivent également intégrer le numérique responsable dans leur stratégie, afin d'assurer leur pérennité et leur compétitivité. En effet, le numérique a transformé les modes de fonctionnement et les méthodes de travail des organisations, en leur offrant des outils pour améliorer leur productivité, leur efficacité, leur capacité d'adaptation et d'innovation. Les organisations peuvent également tirer parti du numérique pour communiquer avec leurs clients, vendre leurs produits et services, collecter et analyser des données. Cependant, le numérique est également source de risques et d'enjeux pour les organisations, tels que la sécurité des données, la protection de la vie privée, l'éthique ou la gouvernance. Il est donc primordial pour les organisations de rester à la pointe des tendances et des évolutions technologiques, tout en adoptant une approche responsable du numérique.

1.2 Objectifs et contributions

Cette thèse s'inscrit dans cette perspective et vise à apporter une contribution à la connaissance et à la pratique du numérique responsable. Notre objectif est de proposer des méthodes et des outils pour évaluer l'impact environnemental du numérique au sein des organisations, en tenant compte des différentes dimensions et sources de cet impact. Pour ce faire, nous allons réaliser une revue de la littérature sur les méthodes et les indicateurs existants pour quantifier l'impact environnemental du numérique, en évaluant leur pertinence et leur fiabilité.

Nous allons ensuite élaborer un modèle qualitatif et quantitatif pour évaluer l'impact environnemental d'une organisation en utilisant une approche multidimensionnelle, qui prendra en compte les différentes étapes du cycle de vie des équipements électroniques, ainsi que les différents aspects de l'activité numérique. Ce modèle permettra d'identifier les leviers d'action pour réduire l'impact environnemental du numérique, tout en tenant compte des contraintes opérationnelles des organisations. L'outil WeNR [BC], développé par le réseau des Instituts du Numérique Responsable en Europe (INR), est le résultat

tat direct des travaux de cette thèse. Il offre une méthode d'analyse et de mesure de l'empreinte carbone du système d'information.

A partir de cette analyse, l'objectif de cette thèse est de fournir des outils d'aide à la décision pour accompagner les organisations dans la mise en place d'une stratégie numérique responsable. Nous allons proposer un processus d'évaluation de l'impact environnemental du numérique qui sera facile à utiliser pour les organisations et qui leur permettra de comprendre les impacts de leurs activités et d'adopter des mesures concrètes pour les réduire.

1.3 Lien avec les ODD et LRTZC

Cette thèse s'inscrit également dans le cadre des 17 Objectifs de développement durable (ODD) de l'Agenda 2030 [Fet20], qui représentent des engagements universels visant à construire un avenir meilleur et plus durable pour tous. Ces objectifs ont pour ambition de relever les défis mondiaux majeurs tels que la pauvreté, les inégalités, le changement climatique, la dégradation de l'environnement, la prospérité, la paix et la justice. Ils sont interdépendants et nécessitent la mobilisation de tous les acteurs et secteurs pour les atteindre d'ici 2030. En annexe, nous présentons les 17 objectifs ainsi que leurs principaux enjeux.

Plusieurs ODD sont directement liés au numérique responsable, notamment :

-  L'ODD 9, qui vise à "bâtir une infrastructure résiliente, promouvoir une industrialisation inclusive et durable et favoriser l'innovation". Il s'agit de veiller à ce que les technologies soient développées et utilisées de manière responsable, en prenant en compte leurs impacts environnementaux et sociaux.
-  L'ODD 12, qui concerne la "consommation et la production responsables". Il s'agit de réduire l'empreinte environnementale du numérique, en adoptant des modes de consommation plus sobres et plus durables.
-  L'ODD 13, qui vise à "prendre des mesures d'urgence pour lutter contre les changements climatiques et leurs répercussions". Il s'agit de contribuer à la réduction des émissions de GES du numérique, mais aussi de tirer parti du numérique pour soutenir la transition vers une économie plus verte et plus résiliente.
-  L'ODD 17, qui concerne les "partenariats pour la réalisation des objectifs". Il s'agit de favoriser la collaboration entre les différents acteurs du numérique et de

l'environnement, afin de garantir une approche cohérente et efficace du numérique responsable.

Cette thèse propose ainsi un cadre d'aide à la décision pour mettre en place une stratégie numérique responsable, en parfaite adéquation avec l'initiative "La Rochelle Territoire Zéro Carbone" [Ezv22]. Cette initiative vise à faire de la ville de La Rochelle un modèle exemplaire dans la lutte contre le changement climatique en réduisant ses émissions de GES d'ici 2040. Le numérique responsable peut jouer un rôle clé dans cette transition vers un territoire zéro carbone, notamment en contribuant à la réduction de l'impact environnemental des autres secteurs, en optimisant les processus, en favorisant les modes de consommation plus sobres et en soutenant l'innovation.

1.4 Organisation

Cette thèse est divisée en neuf chapitres qui se structurent de manière à garantir une progression logique et fluide de l'exposé (Voir Figure 1.1). Dans ce premier chapitre, nous introduisons le contexte et les enjeux cruciaux liés à la transition environnementale et numérique. De plus, nous exposons les objectifs de recherche et les contributions essentielles que cette thèse apporte.

Le second chapitre est consacré à une revue de la littérature exhaustive portant sur les méthodologies et les indicateurs déjà existants pour quantifier l'impact environnemental du numérique. Cette étape permet de situer notre travail dans le contexte actuel de la recherche.

Le troisième chapitre se penche sur la présentation de notre modèle conçu spécifiquement pour évaluer l'impact environnemental des organisations. Nous expliquons en détail les éléments constitutifs de ce modèle, mettant en avant ses caractéristiques distinctives.

Le quatrième chapitre s'attache à décrire en profondeur le processus d'évaluation que nous préconisons pour guider les organisations vers la mise en œuvre d'une stratégie numérique responsable. Ce processus est conçu pour être à la fois rigoureux et adaptable aux besoins spécifiques de chaque organisation.

Le cinquième chapitre illustre l'application pratique de notre méthodologie à travers l'utilisation de l'outil WeNR. Ce cas d'étude concret permet de démontrer l'efficacité de notre approche dans un contexte réel.

Dans le sixième chapitre, nous abordons l'outil WeNR Light, offrant ainsi une variante simplifiée de notre méthodologie pour les organisations qui souhaitent une approche plus légère, tout en restant soucieuses de leur impact environnemental.

Le septième chapitre se penche sur l'outil WeNR+, une version avancée de notre méthodologie qui propose des fonctionnalités additionnelles pour une évaluation encore plus approfondie et personnalisée.

Enfin, les huitième et neuvième chapitres marquent la conclusion de cette thèse en présentant les principales conclusions que nous avons pu tirer de notre travail, tout en identifiant clairement les limites inhérentes à notre démarche. Nous mettons également en avant les perspectives de recherche futures

En conclusion, cette thèse vise à contribuer à la connaissance et à la pratique du numérique responsable, en proposant des méthodes et des outils pour évaluer l'impact environnemental du numérique au sein des organisations. Elle s'inscrit dans le cadre des Objectifs de développement durable de l'Agenda 2030 et de l'initiative "La Rochelle Territoire Zéro Carbone". Nous espérons que notre travail aidera les organisations à comprendre et à réduire leur impact environnemental, tout en tirant parti des opportunités offertes par le numérique pour soutenir la transition environnementale.

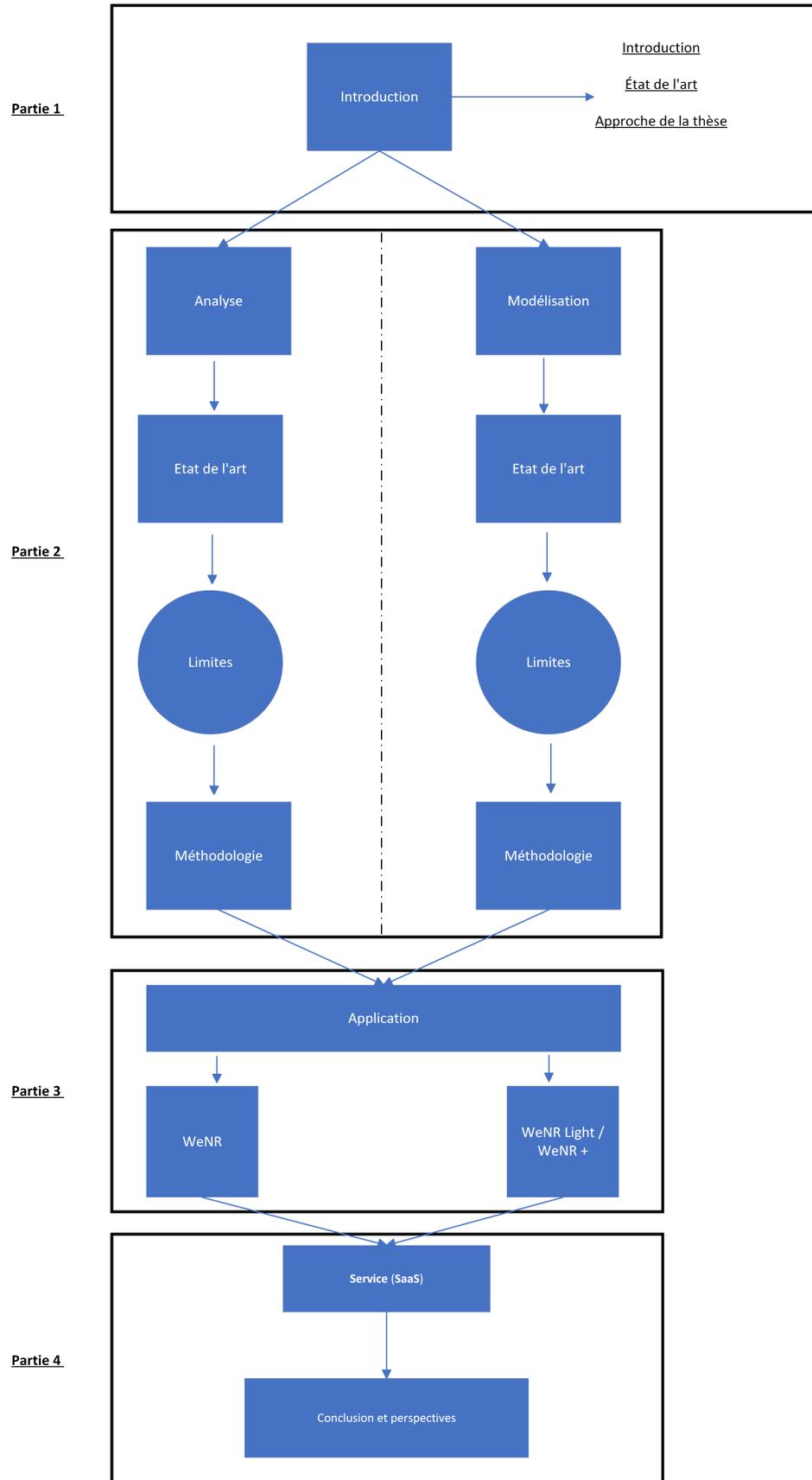


FIGURE 1.1 – Architecture thèse.

Chapitre 2

Etat de l'art

Sommaire

2.1	Présentation et contexte	22
2.2	Terminologie	22
2.3	Entre empreinte directe et effets indirects	23
2.4	Impact du numérique (effets directs)	25
2.4.1	Matériels et méthodes	25
2.4.2	Vue d'ensemble	25
2.4.3	Méthodologies des études	28
2.4.4	Résultats et discussion	29
2.4.4.1	Empreinte absolue	29
2.4.4.2	Empreinte par sous-domaine	31
2.4.4.3	Empreinte par étape du cycle de vie	33
2.4.4.4	Différences de portée et de méthodes d'estimation entre les études	34
2.4.4.5	Prise en compte des effets rebond	35
2.5	Capacité du secteur à diminuer son impact	37
2.5.1	Matériels et méthodes	37
2.5.2	Vue d'ensemble	37
2.5.3	Méthodologies des études	39
2.5.4	Résultats et discussion	41
2.5.4.1	Potentiels de réduction absolus et relatifs	41
2.6	Conclusion	43

2.1 Présentation et contexte

La préalable introduction a souligné l'impact considérable qu'exercent les technologies de l'information et de la communication sur divers pans de la société et de l'environnement, notamment en ce qui concerne le changement climatique, l'un des enjeux environnementaux les plus pressants du XXI^e siècle.

Ce chapitre s'attelle à offrir une vue d'ensemble des connaissances actuelles sur deux aspects cruciaux de l'impact des technologies numériques : d'une part, l'empreinte carbone du secteur correspondant et, d'autre part, le potentiel de réduction des émissions grâce à leur utilisation. Notre démarche se distingue par son approche globale, privilégiant l'évaluation de l'empreinte carbone de l'intégralité du secteur, plutôt que de se cantonner à des sous-domaines spécifiques, comme cela est parfois de mise, par exemple, dans le domaine de la visioconférence.

Notre analyse se déploiera dans le dessein de confronter les résultats émanant de ces deux types d'études, de scruter les nuances dans les paramètres et les méthodologies employés, et de déceler les conclusions robustes ainsi que les perspectives de recherche à venir.

Malgré l'existence de nombreux articles traitant des impacts environnementaux des technologies numériques, avec des travaux notables tels que ceux de [Bie18], [HSA16], [KB16], [PHF19], et [VRH⁺17], il est important de noter qu'à notre connaissance, aucune étude n'a encore été réalisée pour comparer de manière approfondie les recherches sur l'empreinte carbone totale de ce secteur et son potentiel de réduction des émissions grâce à ces technologies.

L'objectif principal de ce chapitre est donc de combler cette lacune dans la littérature en effectuant une comparaison systématique. Pour ce faire, nous commencerons par définir les termes utilisés dans ces études, ainsi que les principaux effets de l'innovation technologique sur les émissions. Ensuite, nous présenterons les résultats des études portant sur l'impact climatique du secteur technologique, en examinant attentivement les limites du système, et les méthodologies d'évaluation.

Nous aborderons également les conclusions des études concernant le potentiel de réduction des émissions. Enfin, nous terminerons par une discussion des implications des résultats, des incertitudes identifiées et des lacunes dans les études, tout en évoquant les pistes de recherche futures.

2.2 Terminologie

Les recherches sur l'impact des technologies numériques en termes d'émissions de gaz à effet de serre englobent généralement les appareils utilisés par les utilisateurs finaux (tels que les smartphones, les ordinateurs portables), les centres de données, ainsi que les réseaux de télécommunications fixes et mobiles.

En ce sens, les recherches sur le potentiel de réduction des émissions grâce aux technologies numériques se concentrent généralement soit sur un cas d'utilisation¹ spécifique

1. Les cas d'utilisation désignent des logiciels ou ensembles de logiciels permettant aux utilisateurs

qui fait l'objet d'une enquête détaillée, soit sur une estimation approximative du potentiel de réduction des émissions de plusieurs cas d'utilisation dans différents secteurs tels que les bâtiments, l'énergie, les transports ou la production industrielle [Bie18].

Par conséquent, afin de mieux cerner les implications de ces divers effets dans les études intersectorielles, il est nécessaire de sélectionner certains cas d'utilisation en fonction de leur adoption actuelle ou de leur potentiel de réduction des émissions prévu, car il existe actuellement un grand nombre de cas d'utilisation, et ce nombre continue de croître. Pour un aperçu des cas d'utilisation couramment étudiés dans les études intersectorielles, on peut se référer à [Bie18]. Les études sur l'impact du secteur numérique et le potentiel de réduction prennent en compte différents types d'effets. Le tableau 2.1 présente un aperçu des effets les plus importants.

2.3 Entre empreinte directe et effets indirects

Les technologies numériques ont un impact à double tranchant sur les émissions de gaz à effet de serre. D'un côté, l'empreinte directe correspond aux émissions produites par la fabrication, l'utilisation et la fin de vie des équipements numériques, tandis que de l'autre, les effets indirects se réfèrent aux variations des émissions induites par l'utilisation de ces technologies [BH01] [BC21] [HA15].

Les effets directs augmentent les émissions, tandis que les effets indirects peuvent soit les réduire, grâce aux gains d'efficacité et aux substitutions permises par les technologies numériques comme la conduite automatisée ou la vidéo conférence, soit les amplifier en raison de phénomènes de rebond ou d'induction qui entraînent une consommation accrue de ressources [HA15].

Ces effets ont été l'objet de nombreuses études au cours des deux dernières décennies [BH01] [BSHH20] [BC21] [CH14] [HA15] [KDNH15] [Ple02][WX21] et ont suscité un intérêt croissant du public en raison de l'enjeu climatique associé aux émissions numériques [Fus19].

Pour ce chapitre, nous avons sélectionné et évalué les études selon une démarche rigoureuse, en nous concentrant sur les trois principaux sous-domaines du secteur numérique : les appareils des utilisateurs finaux, les centres de données et les réseaux de télécommunication.

Dans la suite, nous allons d'abord examiné les effets directs de ce secteur sur les émissions, puis examiné les études portant sur le potentiel de réduction des émissions du numérique et analysant les effets indirects. Notre objectif est d'étudier comment le numérique peut contribuer à la baisse des émissions.

Enfin, une comparaison des différentes études est présentée afin de mettre en évidence les écarts entre les effets directs et indirects du numérique sur les émissions, ce qui nous a

d'accomplir des tâches spécifiques, impactant les émissions. Par exemple, les outils de vidéoconférence et le stockage en nuage permettent aux employés de bureau de travailler à domicile et d'éviter les émissions liées aux déplacements, tandis qu'un lecteur de livres électroniques permet aux utilisateurs de lire des livres sous forme électronique, évitant ainsi les émissions associées à la production et à la distribution de livres papier.

TABLE 2.1 – Aperçu des effets directs et indirects basé sur [BHBB23].

Catégorie	Effet	Description	Exemple
Effets directs	Production	Utilisation des ressources et de l'énergie pour la production de matériel et de logiciels TIC	Énergie nécessaire pour produire un smartphone
	Fonctionnement	Consommation d'électricité pour le fonctionnement du matériel TIC	Énergie nécessaire pour faire fonctionner un smartphone
	Élimination	Utilisation des ressources et de l'énergie pour la mise au rebut du matériel TIC	énergie nécessaire au recyclage d'un smartphone
	Effet d'optimisation	Augmentation de l'efficacité des ressources ou de l'énergie induite par les TIC	Des applications de navigation qui optimisent les itinéraires pour réduire la consommation de carburant
	Effet de substitution	Remplacement d'un service physique par un service TIC	La vidéoconférence remplace les voyages d'affaires
	Effet rebond direct	Réduction des prix d'un service induite par les TIC, entraînant une augmentation de la consommation de ce service	Les services de streaming augmentent la consommation de vidéos
Effets indirects	Effet indirect rebond	les réductions de prix d'un service induites par les TIC entraînant une augmentation de la consommation d'un autre service	Réutilisation de l'argent économisé sur les trajets domicile-travail pour des voyages d'agrément
	Effet d'induction	L'utilisation des TIC stimule l'utilisation d'une autre ressource	Imprimantes stimulant l'utilisation du papier
	Effet rebond sur l'ensemble de l'économie	L'utilisation des TIC entraîne des ajustements macroéconomiques dans tous les secteurs	le commerce électronique favorise la croissance de l'industrie logistique.

permis de mieux appréhender l'impact global du secteur du numérique sur le changement climatique.

2.4 Impact du numérique (effets directs)

2.4.1 Matériels et méthodes

Il a été décidé de se concentrer exclusivement sur les études évaluant l'empreinte carbone du secteur mondial des technologies de l'information, à l'exception de quelques exemples spécifiques.

Dans un premier temps, nous avons rassemblé et comparé les études identifiées en fonction de l'année d'observation et de l'estimation absolue de l'empreinte carbone du secteur. Par la suite, nous avons confronté les résultats en fonction des GES estimée pour chaque sous-domaine du secteur, ainsi que les émissions de gaz à effet de serre associées à chaque étape du cycle de vie (production, utilisation, élimination). Voir Figure 2.1.

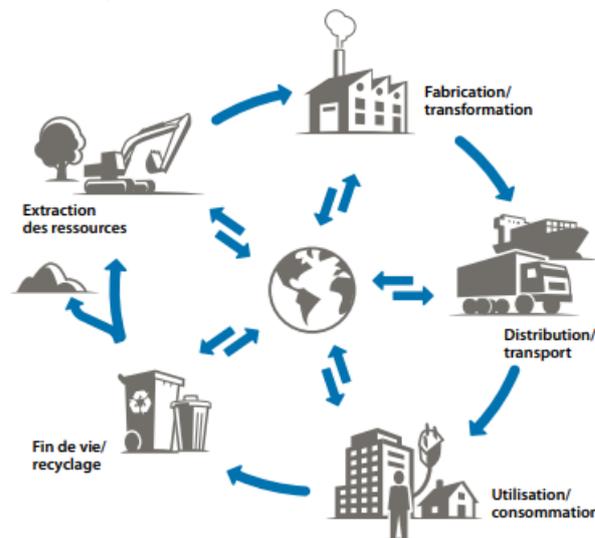


FIGURE 2.1 – Schéma de cycle de vie.

Ces comparaisons nous ont permis d'identifier les principales différences dans la portée et les méthodes d'estimation utilisées dans ces études, ce qui explique les résultats divergents obtenus. Cette conclusion intermédiaire nous a permis d'établir une conclusion générale : il est essentiel d'harmoniser les méthodes d'estimation pour obtenir des résultats plus cohérents et précis.

2.4.2 Vue d'ensemble

En totalité, sept études ont été identifiées pour évaluer l'impact global des gaz à effet de serre dans le secteur des technologies de l'information et de la communication.

Parmi celles-ci, une enquête de Malmodin Lundén s'est concentrée sur la période 2010-2015 [ML18], GeSI BCG sur l'année 2020 [GeS12], celle de Frédéric Bordage de 2010 à 2025 [Bor19], tandis que GeSI Accenture et GeSI Deloitte se sont projetées vers 2030 [Str15] [GeS19]. Les travaux d'Andrae et Edler [AE15] ainsi que ceux de Belkhir et Elmehligi [BE18] ont couvert plusieurs années d'observation. Pour assurer une comparaison équitable, seules les données des années 2020, 2030 et 2040 sont présentées dans le tableau 2.2. Il convient de noter que toutes ces études, à l'exception de celle de Malmodin et Lundén [ML18], sont prospectives, c'est-à-dire qu'elles estiment l'impact environnemental pour une année future par rapport à leur année de publication.

Il est important de mentionner que 2 études ont été exclues de notre comparaison.

Premièrement, SMART 2020 a été remplacé par SMARTer 2020 [GeS12].

Deuxièmement, "Économie numérique et son impact sur le climat" par Schneider Electric [noab], bien qu'elle traite des besoins énergétiques et de l'empreinte carbone du secteur, est qualifiée de "livre blanc" par Schneider Electric. Les hypothèses sous-jacentes aux calculs ne sont que partiellement documentées. Les résultats de cette étude se situent entre ceux des études répertoriées dans le tableau 2, avec des émissions estimées à 955 Mt CO_{2e} pour 2020 et une fourchette de 899 à 1201 Mt CO_{2e} pour 2030.

Pour faciliter la comparaison avec d'autres recherches, nous nous concentrerons exclusivement sur les émissions de gaz à effet de serre (GES) dans notre chapitre. Il convient de noter qu'une étude conjointe menée par l'Arcep et l'ADEME a révélé que le secteur numérique représentait 2,5% de l'empreinte carbone en France [ACC⁺22]. Cette empreinte carbone résulte de divers impacts environnementaux, notamment la consommation d'énergie, la production de déchets, ainsi que la pollution des sols et des eaux.

Les impacts environnementaux du secteur numérique sont répartis entre les terminaux, qui représentent de 65% à 92% de l'empreinte carbone totale du secteur. Les centres de données ont également une contribution allant de 4% à 20%. Enfin, les réseaux jouent un rôle important, contribuant de 4% à 13%.

Cependant, il est important de noter que l'étude conjointe de l'Arcep et de l'ADEME se limite au territoire français et ne sera pas intégrée à notre analyse comparative.

Certaines études ont élaboré jusqu'à trois scénarios futurs, différenciés par les hypothèses relatives à la pénétration des dispositifs technologiques et aux améliorations futures de l'efficacité énergétique. En général, ces études englobent des estimations pour un scénario du "pire cas" et du "meilleur cas".

Il est pertinent de souligner que 5 des 7 études identifiées ont été commissionnées et réalisées par des entreprises ou des associations de l'industrie du secteur technologique, notamment Ericsson, Telia Company, Huawei, et GeSI. Seule une étude [BE18] a été menée par des chercheurs universitaires.

En parallèle, certaines études se sont focalisées sur des aspects spécifiques, tels que les smartphones [LPJH20] [Erc13] [EMB⁺16] [SL15], les centres de données [HH19] [ML20] [SSM21] ou encore les réseaux de télécommunication [BSHH20][CH14][SHJ06] [WSF22].

Par ailleurs, d'autres recherches se sont penchées sur les émissions environnementales générées par des applications spécifiques du secteur technologique. Par exemple, le streaming vidéo a été largement analysé suite à un rapport du groupe de réflexion fran-

TABLE 2.2 – Aperçu des études sur l’empreinte mondiale de GES du secteur des TIC (effets directs).

2.4. IMPACT DU NUMÉRIQUE (EFFETS DIRECTS)

Auteurs	Titre	Commanditaire	Année	Années considérées
Malmmodin Lundén	Énergie et empreinte carbone des TIC mondiales	Ericsson, Telia Company	2018	2010
Club Green IT	Empreinte environnementale du numérique mondial et des secteurs EM 2010-2015	GreenIT.fr	2019	De 2010 à 2025
GeSI BCG	SMARTer 2020	GeSI	2012	2020
GeSI Accenture	SMARTer 2030	GeSI	2015	2030
Strategy				
GeSI Deloitte	Numérique avec objectif : Réaliser un SMARTer 2030	GeSI	2019	2030
Andrae Edler	Utilisation mondiale de l’électricité par les technologies de communication : Tendances jusqu’en 2030	Huawei	2015	2020
Belkhir Elmeligi	Évaluation mondiale de l’empreinte carbone des TIC : Tendances jusqu’en 2040 recommandations	Université McMaster	2018	2020 2030

çais The Shift Project, suscitant un débat controversé sur les méthodes d'évaluation de l'empreinte environnementale des applications technologiques [Fus19] [Kam20] [SWM14] [FBB⁺19].

D'autres applications du secteur technologique ont également fait l'objet d'explorations, telles que les réunions virtuelles [CMH15] [WHKR16], les lecteurs de livres électroniques [MBF11], le streaming musical [TW21][WKM10], les journaux en ligne [BK14][CH14] [MJFJ07], entre autres.

Des études plus récentes se sont également penchées sur les applications blockchain, notamment les crypto-monnaies [DVGKS22] [JLL⁺21], ainsi que sur la formation de modèles d'apprentissage automatique [PGH⁺22]. Les travaux d'Arushanian [AEPF14] et de Grimm [GWEZ14] fournissent un aperçu, bien que partiellement daté, de ces études.

2.4.3 Méthodologies des études

Dans cette section, nous présentons les principales méthodologies utilisées dans les différentes études. Elles sont classées par ordre chronologique des scénarios considérés.

Malmodin Lundén

Les auteurs [ML18] ont estimé l'empreinte énergétique et carbone des secteurs de l'information et de la communication et du divertissement et des médias au niveau mondial pour les années 2010-2015 et ont fait une prévision pour 2020. Ils ont utilisé une combinaison de données sur la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre (CO₂e) sur l'ensemble du cycle de vie des produits et services inclus dans ces secteurs. Ils ont également collecté des données sur les ventes et les prévisions d'équipements pour estimer le volume des produits et l'empreinte carbone associée. Ils ont comparé leurs résultats avec ceux d'études antérieures et ont analysé les tendances et les facteurs d'influence.

Collectif Green IT

L'étude du collectif Green IT [Bor19] se base sur le cycle de vie simplifiée visant à évaluer l'empreinte environnementale du numérique à l'échelle mondiale pour la période de 2010 à 2025. Trois modèles spécifiques sont utilisés pour quantifier les impacts des équipements des utilisateurs, des réseaux de communication et des centres informatiques, puis un méta-modèle les agrège. L'étude s'appuie sur environ 2 000 données primaires collectées entre février et juillet 2019.

GeSI BCG

L'article scientifique [GeS12] utilise une méthode d'évaluation basée sur le cycle de vie pour mesurer les émissions de gaz à effet de serre liées au secteur des technologies de l'information et de la communication. L'article considère trois catégories d'émissions : les émissions directes du secteur du numérique, les émissions indirectes liées à la consommation d'énergie, et les émissions évitées grâce aux solutions informatique qui permettent de réduire les émissions d'autres secteurs. L'article compare ensuite les émissions totales du secteur avec les émissions mondiales de GES pour estimer son impact global.

GeSI Accenture

Les auteurs [Str15] ont utilisé des modèles mathématiques pour quantifier les impacts potentiels des solutions numérique sur les émissions de CO₂e à l'horizon 2030, en com-

parant un scénario de référence (business as usual) basé sur les projections du GIEC et un scénario optimisé intégrant les solutions numérique. Les auteurs ont également analysé les impacts des solutions TIC sur d'autres indicateurs environnementaux, tels que la consommation d'eau, d'énergie et de ressources naturelles.

GeSI Deloitte

La méthodologie employée dans l'étude GeSI Deloitte [GeS19] combine l'utilisation des travaux développés dans divers organismes de normalisation européens et internationaux, tels que l'ETSI, l'UIT-T, la CEI, l'ISO et d'autres, autour des méthodologies pour évaluer cet impact environnemental, actuellement axées sur la gestion de l'énergie, y compris la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre.

Andrae Edler

L'article [AE15] présente trois scénarios pour l'utilisation et la production de dispositifs de consommation, de réseaux de communication et de centres de données. Ces scénarios sont basés sur des données relatives au nombre d'unités vendues, au trafic de données et à l'efficacité énergétique pour chaque catégorie de technologies de communication. L'étude calcule la consommation électrique associée aux phases de production et d'utilisation, ainsi que les émissions de gaz à effet de serre correspondantes. Les résultats sont ensuite comparés à la production mondiale d'électricité, en prenant en compte la part des sources renouvelables.

Belkhir Elmeligi

Les auteurs de cette étude [BE18] ont collecté et analysé des données relatives à la production d'énergie, à la durée de vie utile, à la consommation énergétique, au nombre d'unités en service et aux émissions annuelles de gaz à effet de serre (GES) pour chaque composant du secteur des TIC. Ces données ont été projetées jusqu'en 2040 en utilisant des scénarios minimaux et maximaux, puis comparées aux émissions mondiales totales de GES.

Une comparaison de ces méthodologies est disponible sur la Table 2.3.

2.4.4 Résultats et discussion

2.4.4.1 Empreinte absolue

Les estimations des émissions de gaz à effet de serre sont sujettes à d'importantes variations, principalement en fonction des périodes temporelles considérées. Pour l'année 2020, les chiffres oscillent entre 887 et 3634 millions de tonnes d'équivalent CO₂ (Mt CO₂e), tandis qu'en 2030, cette fourchette s'élargit davantage, allant de 741 à 19 947 Mt CO₂e (Voir Table 2.4).

L'étude la plus alarmiste, conduite par Andrae et Edler [AE15], prévoit une empreinte maximale pour 2030 atteignant 19 947 Mt CO₂e, surpassant largement la deuxième estimation la plus élevée pour cette période, soit 2 620 Mt CO₂e, calculée par Belkhir et Elmeligi [BE18]. Cette divergence découle principalement de l'hypothèse d'une croissance exponentielle des émissions provenant des centres de données et des réseaux de télécommunication dans le scénario pessimiste d'Andrae et Edler.

Étude	Méthodologie	Base de données	Avantages	Inconvénients
Maimonich Lundén	Combinaison d'approches ascendantes et descendantes basées sur des données primaires et secondaires provenant de plus de 100 entreprises et sources publiques.	Consommation d'énergie opérationnelle et émissions de CO ₂ sur l'ensemble du cycle de vie pour les sous-secteurs inclus, tels que les appareils utilisateurs, les réseaux, les centres de données, les médias papier, etc.	Permet d'avoir une vue d'ensemble et actualisée des impacts environnementaux des secteurs TIC, des équipements et du matériel. Montre que les empreintes énergétiques et carbone ont diminué malgré la croissance des abonnements et du trafic de données.	Présente des incertitudes liées à la qualité, à la disponibilité et à la représentativité des données. Néglige certains aspects comme les effets du changement d'utilisation des appareils, les impacts indirects des services numériques ou l'empreinte carbone secondaire du papier.
Collectif green IT	Analyse de cycle de vie (ACV) simplifiée selon les normes ISO 14044/40	Environ 2 000 données primaires collectées entre février et juillet 2019	Utilise 4 indicateurs environnementaux facilement compréhensibles par le grand public	Ne prend pas en compte la distribution, la fin de vie et les consommables des équipements numériques, ni certains impacts comme l'acidification ou l'eutrophisation.
GeSI BCG	Une analyse des émissions de GES grâce aux solutions TIC dans six secteurs d'activité : énergie, transport, industrie, agriculture, bâtiment et service et consommation.	Des sources variées, notamment l'Agence internationale de l'énergie, l'OCDE, la base de données EDGAR et des experts consultés.	Une estimation actualisée et plus précise du rôle des TIC dans le changement climatique.	Des limites liées aux données et à la méthodologie, qui sont identifiées et expliquées dans le rapport.
GeSI Accenture	Modélisation détaillée de l'impact des technologies de l'information et de la communication (TIC) sur les émissions de CO ₂ e	Données provenant de sources telles que WRJ, IPCC, FAO, Gartner, etc.	Montre comment les TIC peuvent contribuer à stimuler la croissance économique, à améliorer la qualité de vie et à atteindre les objectifs de développement durable.	Ne tient pas compte des incertitudes et des contingences liées aux prévisions à long terme. Ne considère pas les effets négatifs potentiels des TIC sur l'emploi, la sécurité ou l'équité.
GeSI Deloitte	Une analyse quantitative et qualitative de l'impact des technologies numériques basée sur plus de 500 cas d'utilisation et l'avis d'experts	Des sources variées, telles que l'ONU, l'AIE, la Banque mondiale, l'OCDE, etc.	Une vision globale et intégrée des opportunités et des risques liés au numérique pour le développement durable	Une projection incertaine de la croissance et de l'empreinte du secteur des TIC à l'horizon 2030. Des scénarios hypothétiques qui dépendent de nombreux facteurs externes
Andrae Edler	Modélisation basée sur les scénarios de meilleur, attendu et pire cas pour la production et l'utilisation des appareils de consommation, des réseaux et des centres de données, ainsi que sur la croissance du trafic de données et l'efficacité électrique	Données provenant de diverses sources, telles que Cisco, Ericsson, Huawei, IEA, etc.	Fournit une analyse détaillée et complète de l'impact potentiel de la technologie de communication sur la demande mondiale d'électricité et les émissions de gaz à effet de serre	Repose sur des hypothèses et des extrapolations qui peuvent être incertaines ou imprécises, ne tient pas compte de certains facteurs tels que le transport, le recyclage ou les générateurs diesel
Bekhtir Elmehigi	Estimation de l'empreinte carbone du secteur des TIC, incluant la production et la consommation d'énergie des appareils et des infrastructures, et projection jusqu'en 2040	Données secondaires provenant de diverses sources, telles que Statista, Apple, EPA, etc.	Étude rigoureuse et transparente, basée sur des données récentes et fiables. Présente les contributions individuelles de chaque type d'appareil et d'infrastructure.	Néglige pas tous les types d'appareils et d'équipements TIC, tels que les téléviseurs, les imprimantes, etc. Néglige l'impact de l'extraction des métaux et de l'élimination des déchets. Ne tient pas compte de l'évolution des technologies et des modes de consommation

TABLE 2.3 – Résumé des méthodologies d'études sur l'impact environnemental des TIC.

TABLE 2.4 – Récapitulatif des études Empreinte GES

Etude	Année(s)	Empreinte GES	
		Min	Max
Malmodin Lunden	2010	720	720
	2015	730	730
Collectif Green IT	2010	738	738
	2019	1400	1400
	2025	2278	2278
	2030	2278	2278
GeSI BCG	2020	1270	1270
GeSI Accenture Strategy	2030	1250	1250
GeSI Deloitte	2030	741	903
Andrae Edler	2020	887	3634
	2030	1491	19947
Belkhir Elmeligi	2020	1110	1310
	2030	2480	2620
	2040	5100	5300

Les recherches menées par Belkhir et Elmeligi [BE18] ainsi que par Andrae et Edler [AE15] prévoient une expansion notable de l’empreinte du secteur dans le futur. Toutefois, les études SMARTer menées par GeSI anticipent une augmentation modeste entre 2020 et 2030. Malmodin et Lundén [ML16] ont observé une relative stabilité de l’empreinte entre 2010 et 2015.

Il est essentiel de noter que certaines de ces études envisagent une augmentation substantielle des émissions dans ce secteur. Par exemple, Andrae et Edler [AE15] estiment que la demande énergétique pourrait représenter jusqu’à 23% des émissions mondiales d’ici 2030 dans le scénario le plus pessimiste. Belkhir et Elmeligi [BE18] avancent que les émissions pourraient dépasser 16% des émissions mondiales d’ici 2040. Le Shift project [FBB⁺19] envisage, quant à lui, que le secteur pourrait être responsable de plus de 8% des émissions mondiales d’ici 2025, selon des hypothèses pessimistes, avec une possibilité d’augmentation ultérieure. D’autres études prévoient une croissance plus modérée. Par exemple, selon la GeSI et Accenture Strategy [Str15], le secteur représente actuellement et à l’avenir moins de 2% des émissions mondiales.

Pour une visualisation de ces projections, nous vous invitons à consulter le graphique 2.2.

2.4.4.2 Empreinte par sous-domaine

Dans la première illustration 2.3, une analyse comparative s’opère entre les diverses subdivisions du secteur de l’informatique, en ce qui concerne les émissions. À noter que cette comparaison n’est réalisable que pour quatre des six études examinées, deux d’entre elles ne fournissant pas de données détaillées par subdivision.

Trois études apportent des éclairages sur les principales sources d’émissions dans le

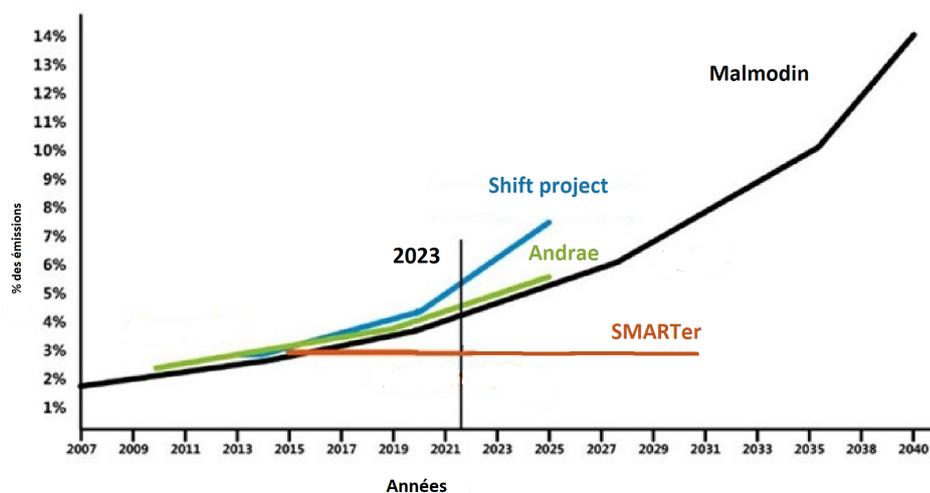


FIGURE 2.2 – Émissions prospective.

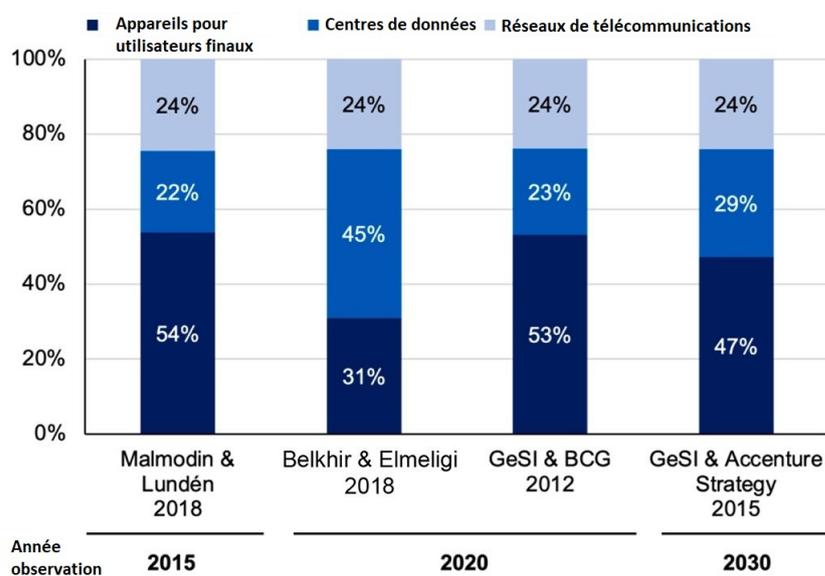


FIGURE 2.3 – Part de l'empreinte GES par sous-domaine du secteur des TIC, année d'étude et d'observation.

domaine du numérique. Il ressort que les dispositifs utilisés par les consommateurs finaux représentent la part la plus importante, entre 47 et 54% des émissions totales du secteur. Les centres de données et les réseaux de télécommunication contribuent également de manière significative, avec des niveaux comparables.

En comparant les études SMARTer 2020 et SMARTer 2030, on observe une diminution progressive de la contribution relative des émissions du secteur pour les appareils des utilisateurs finaux, tandis qu'elle augmente pour les centres de données. Cette diminution

est principalement attribuée à l’hypothèse selon laquelle ces dispositifs deviendront plus économes en énergie. Belkhir et Elmelig [BE18] ainsi qu’Andrae et Edler [AE15] ont également observé des tendances similaires. Ce changement est induit par une augmentation rapide du traitement des données dans les centres de données mondiaux, dépassant les améliorations de l’efficacité énergétique de ces centres [BHB⁺20].

Les études SMARTer 2020 et 2030 révèlent une légère diminution des émissions des appareils des utilisateurs finaux, une augmentation des émissions des centres de données, et une stabilité des émissions des réseaux de télécommunication entre 2020 et 2030. Malmmodin et Lundén [ML18] ont conclu que les émissions liées aux réseaux de télécommunication ont augmenté entre 2010 et 2015, tandis que celles des appareils des utilisateurs finaux ont connu une diminution.

2.4.4.3 Empreinte par étape du cycle de vie

Les études sur l’impact du numérique présentent une complexité inhérente en raison des divergences dans les phases du cycle de vie prises en compte et des définitions associées, ce qui complique la comparaison des émissions totales et par phase entre différentes recherches. Cependant, la majorité des études examinent les émissions liées à la production et à l’utilisation des appareils par les utilisateurs finaux, ainsi que celles provenant des centres de données et des réseaux de télécommunication. Certaines d’entre elles englobent également les émissions associées au traitement des appareils en fin de vie. Il convient de noter que Belkhir et Elmelig [BE18] n’ont pas pris en compte les émissions provenant de la production des centres de données et des réseaux de télécommunication.

En ce qui concerne les appareils utilisés par les utilisateurs finaux, les émissions liées à la production sont prédominantes tout au long du cycle de vie, dépassant souvent les 50% [BBH⁺21] [LPJH20] [JBB⁺20]. L’importance de la phase de production devrait croître à l’avenir en raison de l’amélioration de l’efficacité énergétique lors de l’utilisation. Néanmoins, certains développements pourraient atténuer les impacts de la phase de production, tels que le remplacement des ordinateurs de bureau par des appareils mobiles plus économes comme les tablettes ou les ordinateurs portables [HB17], ainsi que l’amélioration des matériaux et de l’efficacité énergétique des technologies d’affichage [ML18].

Pour ce qui est des centres de données, la majeure partie des émissions tout au long du cycle de vie survient lors de la phase d’utilisation [AE15] [BE18] [ML18]. Environ 60% des émissions sont attribuables aux composants tels que les serveurs, les systèmes de stockage et les réseaux, tandis que les 40% restants sont imputables aux infrastructures de refroidissement, de climatisation, d’alimentation électrique sécurisée et autres services connexes [ABC17][Law19] [MSL⁺20].

En ce qui concerne les réseaux de télécommunication, la principale source présumée d’émissions tout au long du cycle de vie réside dans la consommation d’électricité nécessaire au fonctionnement des infrastructures [AE15] [ML18]. Bien que les réseaux fixes et mobiles contribuent de manière équivalente à l’impact environnemental des réseaux de télécommunication à l’heure actuelle, on prévoit que la part relative des réseaux mobiles augmentera à l’avenir [And19] [ML18].

2.4.4.4 Différences de portée et de méthodes d'estimation entre les études

S'agissant des équipements des utilisateurs finaux, toutes les études se fondent sur la croissance du nombre d'unités pour estimer les GES pour le climat. En revanche, les méthodes d'évaluation des besoins énergétiques des centres de données et des réseaux de télécommunication présentent des variations notables.

Par exemple, une étude menée en 2015 par Andrae et Edler [AE15] évalue les émissions en fonction des projections de l'augmentation du trafic de données, tandis que Belkhir et Elmehri [BE18], postulent des taux de croissance constants pour la demande énergétique des centres de données et des réseaux de télécommunication. Malmmodin et Lundén [ML18] basent leurs calculs pour les centres de données sur les équipements existants, comme les serveurs, tandis que les données des opérateurs de réseaux sont utilisées pour les calculs liés aux réseaux de télécommunication, selon les études menées par GeSI.

Ces différentes approches compliquent la comparaison de certaines hypothèses des études, telles que les taux de croissance, la prise en compte des différents types d'émissions nuisibles pour l'environnement ou encore les limites du système. De plus, les études varient également dans leurs suppositions concernant l'intensité carbone de l'électricité. Par exemple, Malmmodin et Lundén [ML18] supposent une intensité de 0,6 kg de CO₂e par kilowatt-heure (kg CO₂e/kWh), tandis que Belkhir et Elmehri postulent 0,5 kg CO₂e/kWh. Les hypothèses d'Andrae et Edler [AE15] varient entre 0,54 et 0,65 kg CO₂e/kWh en fonction du scénario et de l'année. De même, les études de GeSI utilisent différentes intensités de carbone pour différents pays.



La France dispose d'un mix énergétique relativement propre, en grande partie grâce à sa dépendance envers l'énergie nucléaire (58 gCO₂e) [noac]. Cette source d'énergie à faible émission de carbone a permis à la France de réduire significativement ses émissions de gaz à effet de serre par rapport à de nombreux autres pays européens. En revanche, l'Allemagne dépend davantage des énergies fossiles, notamment du charbon, ce qui rend son mix énergétique plus carboné (348 gCO₂e) [noac]. Cette disparité dans les sources d'énergie utilisées entre les deux pays illustre parfaitement la manière dont les résultats des études sur l'impact environnemental peuvent varier en fonction du contexte et des choix énergétiques nationaux.

Équipements utilisateurs

En ce qui concerne les équipements, plusieurs recherches ont évalué leur impact sur l'environnement, couvrant une variété d'appareils, tels que les ordinateurs de bureau, les portables, les smartphones, les tablettes, les téléphones mobiles, ainsi que divers types de moniteurs, y compris les écrans LCD. Il est important de noter que certains chercheurs ont également pris en compte les appareils de divertissement, tels que les téléviseurs, en raison de leur présence répandue dans les foyers et de leur importante empreinte carbone en termes de production et de consommation d'énergie.

Il est largement admis, selon une étude menée par Ferreboeuf en 2019 [FBB⁺19], que la phase de production constitue la principale origine des émissions de GES tout au long

du cycle de vie, notamment dans des pays à faible empreinte carbone comme la France.

Cependant, des incertitudes subsistent concernant les données disponibles sur les impacts environnementaux liés à la production de ces équipements. Une étude menée par [LPJH20] met en évidence cette incertitude en examinant les émissions liées à la production des smartphones, qui varient considérablement en fonction de diverses hypothèses, notamment celles relatives à la production des circuits intégrés (CI) et à la localisation des usines de production. La consommation d'électricité joue un rôle clé dans ces émissions, ce qui doit être pris en compte lors de l'évaluation globale de l'impact environnemental des smartphones.

Centres de données et réseaux de télécommunication

Un autre élément crucial à considérer est la consommation électrique des centres de données et des réseaux de télécommunication. Plusieurs recherches [Mas10] [BHB⁺20] ont examiné cette consommation électrique. Cependant, elles ont abouti à des conclusions divergentes, avec des estimations variant de 200 à 1300 TWh pour l'année 2020. Les prévisions futures restent incertaines et dépendent des hypothèses formulées en ce qui concerne l'expansion du volume de données et l'amélioration de l'efficacité énergétique des centres de données. Ces améliorations découlent de changements technologiques, de modes d'utilisation et de modèles de déploiement.

De plus, les hypothèses concernant les émissions de gaz à effet de serre (GES) liées à la production d'électricité varient d'une étude à l'autre, et cette variabilité s'étend également aux réseaux de télécommunication. En résumé, il existe une grande incertitude entourant la consommation d'électricité des centres de données en raison des divergences dans les hypothèses formulées concernant la croissance du volume de données, l'efficacité énergétique des centres de données, et les émissions associées à la production d'électricité.

En conclusion, ces mêmes incertitudes s'appliquent également aux réseaux de télécommunication. Par conséquent, il est impératif d'approfondir ces aspects afin d'obtenir une image plus précise et fiable de l'impact environnemental de ces technologies.

2.4.4.5 Prise en compte des effets rebond

Deux phénomènes revêtent une importance singulière : le paradoxe de Jevons [Jev65], communément désigné sous l'appellation d'effet rebond, et l'effet d'induction, exploré par Gossart [Gos15] et Coroamă et Mattern [CM19]. L'évaluation environnementale des technologies de l'information et de la communication, une préoccupation systématiquement soulignée dans plusieurs études [Bie20] [CM19], requiert une attention rigoureuse envers ces phénomènes. Toutefois, il est pertinent de noter que la majorité des recherches examinées n'incorporent pas ces éléments dans leur analyse.

L'effet rebond surgit lorsqu'une amélioration de l'efficacité engendre une augmentation concomitante de la demande en services ou en biens, ce qui diminue les économies d'énergie absolues par rapport aux économies théoriques [MA11]. Par exemple, une amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules peut inciter les individus à parcourir de plus longues distances en voiture, du fait de la diminution des coûts par kilomètre. En revanche, l'effet d'induction englobe l'augmentation de la consommation résultant de l'adoption de nouvelles technologies, sans nécessairement être corrélée à une redistribu-

tion des facteurs d'entrée due à une amélioration de l'efficacité. A titre d'illustration, les télécommunications, en réduisant la distance physique entre les individus et les lieux, suscitent le désir de visiter ces personnes et ces lieux, entraînant ainsi une demande accrue de déplacements [Mok90].

Cependant, il est à noter que les rares études tentant de prendre en considération l'effet rebond et d'induction présentent une grande incertitude. Par exemple, l'étude [HB17] examine l'effet rebond, directs et/ou indirects, dans divers scénarios d'utilisation, en s'appuyant sur des travaux antérieurs. Les estimations de l'effet rebond varie entre 4% pour les économies d'énergie résultant de l'automatisation des bâtiments et des systèmes de récupération d'énergie, à 37% pour le commerce électronique, en raison de l'accroissement des services logistiques nécessaires à la livraison des biens. Une autre étude menée par [Pam08] aborde également l'effet rebond, sans toutefois spécifier leur inclusion dans ses hypothèses.

Parallèlement, GeSI et Accenture Strategy [Str15] évaluent l'impact potentiel de l'effet rebond, bien qu'ils ne les intègrent pas dans leurs résultats définitifs. Leurs investigations, basées sur une revue exhaustive de la littérature, indiquent que l'effet rebond varie de 7% dans des secteurs tels que la e-santé, le e-commerce, le e-banking, l'e-learning, le covoiturage, jusqu'à 27,4% pour le télétravail à domicile et les réunions virtuelles. Les autres études examinées omettent systématiquement d'aborder ces effets.

Il convient de mentionner que les recherches antérieures se sont principalement concentrées sur les effets rebonds directs et indirects, négligeant les répercussions à l'échelle macroéconomique. Ces dernières, tributaires de relations dynamiques et complexes entre l'offre et la demande, s'avèrent ardues à anticiper, exigeant une approche systémique pour être appréhendées dans leur intégralité [BH18].

Dans le contexte des impacts climatiques des technologies de l'information et de la communication, la prise en compte de ces effets macroéconomiques revêt une importance cruciale. En effet, ces technologies se caractérisent par des "modèles d'impact divers et complexes", leur véritable impact dépendant du contexte socio-économique dans lequel elles sont mises en œuvre [EH10].

À ce jour, les études actuelles, en n'intégrant pas systématiquement ces paramètres, ne reflètent que les potentiels théoriques de réduction des émissions de gaz à effet de serre. En réalité, les réductions effectives pourraient s'avérer plus modestes.

Il est, par conséquent, impératif d'approfondir la recherche sur l'effet rebond (cachés) à l'échelle macroéconomique, en vue d'une compréhension plus approfondie et d'une évaluation plus précise des réductions effectives. Il est tout aussi essentiel d'intégrer ces considérations dans la conception des solutions technologiques et dans les politiques afférentes.

Pour conclure, certains auteurs avancent que des réglementations environnementales, telles que les taxes sur le carbone, pourraient se révéler des mesures efficaces pour contrer les effets rebonds [DUK⁺20] [BKH⁺22].

2.5 Capacité du secteur à diminuer son impact

2.5.1 Matériels et méthodes

Cette section se concentre sur des technologies numériques pour atténuer les émissions de gaz à effet de serre. Les recherches retenues sont celles qui examinent au moins cinq applications numériques dans au moins deux secteurs d'activité.

Nous avons procédé à une classification de ces recherches en fonction de divers critères : année, région, nombre d'applications numériques et potentiel de réduction des émissions. Nous avons également déterminé le potentiel relatif de chaque recherche, en le mettant en relation avec les émissions totales de la région et de l'année correspondantes. Cette démarche nous permet d'établir une comparaison des potentiels identifiés, indépendamment des variations régionales et temporelles.

Enfin, nous avons vérifié si les recherches prenaient en compte les effets susceptibles d'accroître les émissions, tels que les effets rebond ou d'induction [HA15].

2.5.2 Vue d'ensemble

Au total, huit études ont été recensées (Voir Table 2.5) et publiées respectivement par GeSI, The Climate Group, WWF Canada, Swisscom, WWF Switzerland, University of Zurich, WWF Sweden et Ericsson, portant sur l'impact potentiel du numérique sur la réduction des émissions de carbone. Parmi ces études, six ont examiné le potentiel à l'échelle mondiale, tandis que deux autres ont analysé spécifiquement les contextes canadien et suisse. Il convient de noter que certaines de ces études ont exploré des scénarios particuliers. De manière complémentaire, six des huit études ont également évalué l'empreinte carbone du secteur des nouvelles technologies.

Les recherches sur les effets indirects de ces technologies ont révélé un spectre d'impact comprenant à la fois des contributions positives et négatives aux émissions. Ces études, menées respectivement par [UDK20], [LPS20],[SBF⁺23], [Bie20], ainsi que [BC21], ont mis en évidence ces différents aspects. Cependant, une attention particulière a été portée à l'évaluation du potentiel de réduction des émissions grâce aux TIC. Ce potentiel est défini comme la capacité des applications informatiques, telles que les systèmes de maison intelligente, le covoiturage et les réseaux intelligents, à prévenir les émissions de CO₂e dans d'autres secteurs tels que les bâtiments, les transports ou l'énergie.

Par exemple, une estimation effectuée par GeSI et Accenture Strategy en 2015 a suggéré que douze applications informatiques pourraient permettre de réduire jusqu'à 20% des émissions mondiales annuelles d'ici à 2030. Par ailleurs, les entreprises du secteur ont évalué le potentiel de réduction des émissions de leurs clients grâce à l'utilisation de leurs produits et services. Pour illustrer, en 2020, Swisscom [Swi17] a calculé que ses clients avaient évité près de trois fois plus d'émissions grâce à leurs services qu'ils n'en avaient générées eux-mêmes. De même, British Telecom a estimé un facteur de réduction de 3,1 pour l'année 2019/20, tandis que Vodafone a avancé un facteur de réduction de 5,2 pour l'année 2020 [BHHB23].

TABLE 2.5 – Aperçu des études sur le potentiel de réduction des GES

Chercheurs/auteurs	Année de considération	Cible géographique	Potentiel de réduction des GES [MtCO ₂ e]		Potentiel de réduction des GES [%]	
			Min	Max	Min	Max
GeSI McKinsey	2020	Monde	7800	7800	15,00%	15,00%
GeSI BCG	2020	Monde	9100	9100	16,50%	16,50%
WWF Canada	2020	Canada	19,1	36	n. a.	n. a.
Hilty Bieser	2025	Suisse	0,72	6,99	n. a.	n. a.
Pamlin	2030	Monde	1168	8711	n. a.	n. a.
Mahmodin Bergmark	2030	Monde	4699	9716	7,40%	15,30%
GeSI Accenture Strategy	2030	Monde	12,08	12,08	20,00%	20,00%
GeSI Deloitte	2030	Monde	668	3496	1,30%	8,90%

2.5.3 Méthodologies des études

Dans cette section du chapitre, nous abordons plusieurs études qui se penchent sur la réduction des émissions à l'échelle mondiale, et qui s'appuient sur diverses méthodologies pour évaluer le potentiel et les coûts des mesures d'atténuation des GES, avec un intérêt particulier pour l'utilisation du numérique. Elles sont classées par ordre chronologique d'année de considération.

GeSI McKinsey

McKinsey présente une analyse mondiale des opportunités et des coûts de réduction des émissions d'ici 2030 [GeS08]. L'analyse repose sur une vaste base de données évaluant le potentiel et les coûts de plus de 200 mesures d'atténuation des GES dans 10 secteurs et 21 régions du monde. Une courbe de coût d'abattement des GES est utilisée pour comparer l'efficacité et la rentabilité des différentes mesures et technologies. L'article examine également les besoins en investissements, les impacts temporels, les scénarios et les sensibilités, ainsi que les domaines clés de la régulation. Il s'efforce de fournir un ensemble de données objectif et cohérent pour enrichir le débat sur la transition vers une économie à faible émission de carbone, sans prendre position sur les choix politiques ou les questions scientifiques liées au climat.

GeSI BCG

GeSI se base sur une enquête réalisée en 2022 [GeS12] auprès d'organisations du monde entier pour évaluer leurs progrès en matière de mesure et de réduction des émissions de carbone. Cette enquête évalue la maturité des organisations en termes de mesure et de réduction des émissions selon trois catégories : Scope 1, Scope 2 et Scope 3. Les résultats de l'enquête de 2022 sont comparés à ceux de 2021, et une analyse est menée pour identifier les facteurs influençant la performance des organisations, tels que l'adoption de solutions numériques, le soutien du leadership et les incitations politiques. L'article met également en lumière les avantages économiques et non économiques découlant de la réduction des émissions.



Les concepts de Scope 1, Scope 2 et Scope 3 sont essentiels pour évaluer et gérer l'empreinte environnementale d'une organisation. Le Scope 1 englobe les émissions directes de gaz à effet de serre produites par l'entreprise elle-même, telles que les émissions provenant de ses installations, de sa flotte de véhicules ou de ses processus de production. Le Scope 2 concerne les émissions indirectes résultant de la production d'énergie achetée et utilisée par l'entreprise, comme l'électricité provenant du réseau. Enfin, le Scope 3 englobe toutes les autres émissions indirectes, souvent plus complexes à quantifier, liées aux activités de l'entreprise, comme les déplacements des employés, la chaîne d'approvisionnement, et même l'utilisation finale de ses produits. Une gestion efficace de ces trois scopes est cruciale pour réduire l'impact environnemental global d'une organisation et contribuer à la lutte contre le changement climatique.

La WWF présente six recommandations [GBP08] visant à réduire les émissions carbone au Canada grâce à l'utilisation du numérique. Chaque recommandation est évaluée en termes de potentiel de réduction du carbone, d'impacts économiques et sociaux, d'exemples de bonnes pratiques et de pistes d'innovation. L'analyse s'appuie sur des données statistiques, des études de cas, des hypothèses raisonnables et des sources fiables. Le CO_{2e} est utilisé comme unité de mesure des GES, conformément aux normes du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

Hilty Bieser

Les auteurs ont mené une revue systématique de la littérature (RSL) [HB17] pour identifier les études évaluant les effets environnementaux indirects des TIC. Ces études ont été classées en fonction de quatre critères : (i) le domaine d'application des TIC, (ii) le nombre de cas d'utilisation étudiés, (iii) la focalisation sur les modes de production ou de consommation, et (iv) la méthodologie utilisée. Au total, 54 études couvrant sept domaines d'application principaux ont été identifiées, utilisant 15 approches méthodologiques distinctes. Les avantages et les inconvénients de ces différentes approches sont discutés, et des lacunes dans la recherche sur les effets environnementaux indirects des TIC sont identifiées.

Pamlin

Pamlin [Pam08] propose une méthodologie pour analyser le potentiel de réduction des émissions de CO_{2e} grâce à l'utilisation du digital. Cette méthodologie repose sur une revue de la littérature existante et des projections pour l'année 2030. Une classification hiérarchisée des différentes applications du secteur IT ayant un impact sur les émissions de CO_{2e} est suggérée, et le potentiel de réduction de chacune de ces applications est évalué de manière quantitative. De plus, des synergies et des boucles vertueuses entre ces applications sont identifiées, pouvant entraîner des changements structurels et des réductions plus importantes. Enfin, une approche pragmatique basée sur la sélection de 10 solutions digital capables de réduire d'un milliard de tonnes les émissions de CO_{2e} d'ici 2030 est proposée, tout en favorisant les boucles vertueuses.

Malmodin Bergmark

Les auteurs [MB15] ont estimé le potentiel de réduction des émissions en 2030 grâce à diverses solutions numérique, en utilisant des données réelles ou projetées. Ils ont développé un modèle des émissions par secteur d'activité, en tenant compte du cycle de vie des ressources primaires et en les répartissant entre les secteurs utilisateurs finaux. De là, des données sur les réductions de carbone réalisées ou possibles par différentes solutions numérique dans les secteurs de l'énergie, des bâtiments, des transports, du travail, des services et de l'agriculture ont été collectées. Deux scénarios ont été définis, un avec un potentiel de réduction moyen (MRPS) et un avec un potentiel de réduction élevé (HRPS). Les réductions potentielles de dioxyde de carbone pour chaque solution numérique et chaque scénario ont été calculées en évitant tout double comptage.

GeSI Accenture Strategy

L'étude GeSI Accenture Strategy [Str15] repose sur une modélisation détaillée qui quantifie les bénéfices environnementaux, économiques et sociaux des solutions dans divers secteurs et pays. Il compare les scénarios du GIEC avec et sans l'adoption des

solutions technologique, en mesurant leur impact sur les émissions de CO₂e, la consommation de ressources, le revenu, les coûts et la qualité de vie. De plus, il analyse le rôle des parties prenantes (politiques, entreprises et consommateurs) dans l'accélération du déploiement des solutions digital. L'article illustre ses résultats à l'aide d'études de cas et fournit des recommandations pour l'action.

GeSI Deloitte

Cet article [GeS19] utilise une combinaison de recherche documentaire, de dialogues avec plus de 40 membres et partenaires de GeSI, ainsi que l'avis d'un panel d'experts distingués pour analyser le lien entre le développement et le déploiement des technologies numériques et la réalisation des Objectifs de développement durable (ODD). Il utilise un cadre explicatif des "fonctions d'impact" pour catégoriser des exemples de "cas d'utilisation" illustrant ce lien pour chacun des 17 ODD. Pour chaque ODD, une nouvelle modélisation quantitative explore la contribution potentielle des technologies numériques à la réalisation de cibles prioritaires, comparativement à un scénario de référence où l'adoption des technologies numériques reste constante. Une analyse quantitative additionnelle explore l'impact du secteur informatique lui-même.

Une comparaison de ces méthodologies est disponible sur la Table 2.6.

2.5.4 Résultats et discussion

2.5.4.1 Potentiels de réduction absolus et relatifs

Les recherches actuelles sur le potentiel de réductions présentent des divergences qui compliquent leur comparaison. Ces différences résultent principalement des contextes spatiaux et temporels variés dans lesquels elles ont été menées. Pour l'année 2020, deux études, conduites respectivement par GeSI, The Climate Group et McKinsey [GeS08] [BHHB23], ainsi que par GeSI et BCG [GeS12], sont comparables. L'étude la plus récente a identifié a révélé un potentiel de réduction des émissions légèrement plus élevé, tant en termes absolus que relatifs. Il est notable que ces études sont d'intérêt historique puisqu'elles proposent des estimations prospectives pour une année déjà révolue, à savoir 2020.

Les quatre dernières études du tableau 2.5 se concentrent sur l'année 2030 et le secteur mondial de l'informatique et des communications. Elles sont également comparables entre elles. En examinant les potentiels de réduction absolus, on constate que les estimations optimistes des trois premières études se situent toutes aux alentours de 10 000 millions de tonnes d'équivalent en dioxyde de carbone (Mt CO₂e). Cependant, la dernière étude menée par GeSI et Deloitte [GeS19] présente un potentiel de réduction des émissions plus faible, estimé à environ 3500 Mt CO₂e dans le scénario optimiste, avec seulement 668 Mt CO₂e dans le scénario pessimiste. Cette différence s'explique en partie par le fait que les études plus anciennes sur l'année 2030 prenaient en compte entre 12 et 17 cas d'utilisation, tandis que l'étude de GeSI et Deloitte [GeS19] en examine seulement 7.

Les potentiels de réduction relatifs des émissions (c'est-à-dire la part du potentiel de réduction par rapport aux émissions totales estimées pour l'année et la région en question) permettent de comparer ces potentiels de réduction indépendamment des paramètres

Étude	Méthodologie	Base de données	Avantages	Inconvénients
GéSI McKinsey	Une analyse de plus de 200 mesures d'atténuation des GES dans 10 secteurs et 21 régions, avec une perspective à 2030.	Une courbe de coût d'abattement des GES qui compare le potentiel et le coût des mesures d'atténuation.	Une base de données objective et cohérente qui peut servir de point de départ pour les discussions entre les acteurs concernés par la transition vers une économie faible en carbone.	Une étude qui ne prend pas en compte les aspects politiques, réglementaires et comportementaux de la réduction des émissions, ni les effets dynamiques sur l'économie.
GéSI BCG	Un sondage en ligne auprès de 1 500 dirigeants et employés d'organisations de divers secteurs et régions.	Un indice de maturité CO2e AI by BCG basé sur les réponses au sondage.	Des bénéfices financiers, réputationnels et humains pour les organisations qui réduisent leurs émissions.	Une faible mesure des émissions, en particulier des émissions externes (Scope 3), et une réduction insuffisante pour atteindre les objectifs de neutralité carbone.
WWF Canada	Une analyse des opportunités de réduction des émissions de GES grâce aux TIC dans six domaines : le télétravail, le covoiturage, l'optimisation du transport, la collaboration électronique, les produits et transactions électroniques, et l'efficacité énergétique des bâtiments.	Des données statistiques provenant de sources canadiennes et internationales, ainsi que des études de cas d'entreprises et d'organisations qui utilisent les TIC pour réduire leur empreinte carbone.	Les TIC peuvent permettre des réductions de GES de 19 à 36 millions de tonnes par an au Canada, tout en générant des économies financières de 7,5 à 12,9 milliards de dollars par an. Les TIC peuvent aussi avoir des bénéfices sociaux, tels que l'amélioration de la productivité, de la qualité de vie et de l'accès aux services.	Les obstacles à l'adoption des TIC sont principalement liés aux attitudes, aux habitudes et aux politiques des entreprises et des gouvernements. Il faut donc sensibiliser, éduquer, inciter et réglementer pour favoriser le déploiement et l'utilisation des TIC. Il faut aussi tenir compte des impacts environnementaux directs et indirects des TIC, tels que la consommation d'énergie et la production de déchets électroniques.
Hilly Bieser	Revue systématique de la littérature	Web of Science, Scopus, Google Scholar, Google, ICTS, EnviroInfo	Fournit un aperçu des méthodes utilisées pour évaluer les effets environnementaux indirects de l'ICT	Ne compare pas les résultats des évaluations, ne discute pas en détail les avantages et les inconvénients des méthodes
Panlin	Une analyse de la littérature, une proposition d'une méthode d'évaluation, une estimation du potentiel de réduction des émissions de différentes solutions TIC, une proposition d'une approche pour atteindre 1 milliard de tonnes de réduction des émissions de CO2e	Le rapport s'appuie sur des sources existantes, pass sur une base de données propre.	Le rapport montre les bénéfices des TIC pour diminuer les GES, et propose 10 solutions TIC qui peuvent chacune réduire de 100 millions de tonnes de CO2e d'ici 2030.	Le rapport admet les limites et les incertitudes de son analyse, et appelle à une meilleure compréhension des liens entre les TIC et les GES, ainsi qu'à des politiques et des stratégies adaptées. Le rapport se focalise surtout sur les pays développés et néglige les pays en développement.
Malmroth Bergmark	Modélisation des émissions futures de GES par secteur et estimation des potentiels de réduction grâce à des solutions TIC spécifiques	Données publiées sur les réductions réelles de GES réalisées par différentes solutions TIC	Permet d'évaluer l'impact global des TIC sur la mitigation du changement climatique	Ne prend pas en compte l'empreinte des TIC elles-mêmes, ni d'autres solutions TIC existantes ou futures
GéSI Accenture Strategy	Modélisation détaillée de l'impact du TIC sur 12 cas d'utilisation dans 8 secteurs et 9 pays	Données provenant de WRI, IPCC, Gartner, FAO, GéSI, Accenture et autres sources	Montre le potentiel du TIC pour réduire les émissions de CO2e, générer des bénéfices économiques et sociaux, et améliorer la qualité de vie	Ne tient pas compte des incertitudes et des contingences liées aux prévisions à long terme, ni des coûts et des risques associés au déploiement du TIC
GéSI Deloitte	Une analyse quantitative et qualitative de l'impact des technologies numériques sur les Objectifs de développement durable (ODD) de l'ONU, basée sur plus de 500 cas d'utilisation et les contributions de plus de 40 membres et partenaires du GéSI.	Une base de données mondiale sur les émissions de gaz à effet de serre, la consommation d'énergie, les indicateurs socio-économiques et les tendances technologiques.	Une étude approfondie et rigoureuse qui identifie et quantifie les opportunités et les risques des technologies numériques pour la réalisation des ODD, ainsi que les actions à entreprendre par les différents acteurs.	Une étude qui ne prend pas en compte les changements significatifs de technologie, de politique ou d'infrastructure qui pourraient affecter les projections, et qui ne couvre pas tous les aspects des ODD.

TABLE 2.6 – Comparaison des différentes méthodologies

régionaux et temporels. Ces valeurs varient entre 1,3% et 20% lorsque tous les scénarios sont pris en compte, et entre 8,9% et 20% lorsque seuls les scénarios optimistes sont considérés. Ces pourcentages dépendent également du scénario de référence supposé, c'est-à-dire les émissions de GES prévues en l'absence de l'adoption supplémentaire des cas d'utilisation étudiés, ce qui ajoute une certaine incertitude.

Malgré les efforts récents visant à standardiser les méthodes d'estimation du potentiel de réduction des émissions dans le domaine de l'informatique et des communications, il n'existe pas encore de méthode internationalement reconnue, ce qui explique la variation significative des résultats entre les différentes études. D'autres recherches portent sur les effets indirects et se concentrent sur des domaines spécifiques tels que le télétravail, les maisons intelligentes, le covoiturage ou des secteurs particuliers tels que le bâtiment, l'énergie ou les transports. Certaines études se penchent également sur des effets indirects spécifiques, tels que les effets de rebond.

Étant donné que toutes les études du tableau 2.5 mettent en lumière le potentiel des cas d'utilisation de l'informatique et des communications pour réduire les émissions. Par conséquent, il est théoriquement possible d'accroître le potentiel global de réduction des émissions en incluant d'autres cas d'utilisation dans l'évaluation. Cependant, il n'existe pas de corrélation évidente entre le nombre de cas d'utilisation étudiés dans une recherche et l'ampleur du potentiel de réduction des émissions identifié. À titre d'exemple, dans un scénario optimiste, une étude estime un potentiel mondial de réduction des émissions de 9716 Mt CO_{2e} en se basant sur 17 cas d'utilisation, tandis qu'une autre étude avance un potentiel mondial de réduction des émissions de 12 080 Mt CO_{2e} en se fondant sur seulement 12 cas d'utilisation. Les raisons de ces variations peuvent être multiples, englobant différentes hypothèses relatives aux émissions de référence, des ensembles de cas d'utilisation différents, leur niveau d'abstraction, ainsi que les limites du système, un sujet également exploré par d'autres chercheurs.

2.6 Conclusion

Le secteur numérique est à la fois un contributeur et un acteur de la transition écologique. D'une part, il génère des émissions liées à sa consommation d'énergie et à sa production de matériel. D'autre part, il offre des solutions pour réduire les émissions d'autres secteurs, grâce à l'optimisation des processus, la substitution des activités physiques par des activités virtuelles, ou encore la sensibilisation et l'engagement des citoyens. Ce chapitre a eu pour objectif d'évaluer l'impact environnemental du secteur numérique, en se basant sur une revue de la littérature scientifique. Nous avons synthétisé les résultats de sept études portant sur l'empreinte carbone directe du secteur, et de huit études portant sur son potentiel de réduction des émissions. Nous avons également discuté des incertitudes, des limites et des perspectives de ces travaux.

Selon les études analysées, l'empreinte carbone directe du secteur numérique varie entre 1,5% et 4% des émissions mondiales de GES en 2020. Cette fourchette reflète les différences de portée, de méthodologie et de scénarios utilisés par les auteurs. La portée peut inclure ou exclure certains éléments du secteur, tels que les équipements utilisa-

teurs, les réseaux, les centres de données, la fabrication, l'utilisation ou le recyclage. La méthodologie peut reposer sur des approches ascendantes (bottom-up) ou descendantes (top-down), qui présentent des avantages et des inconvénients en termes de précision et de représentativité. Les scénarios peuvent prendre en compte ou non les tendances futures du secteur, telles que la croissance du trafic internet, le déploiement de la 5G, ou l'évolution du mix énergétique. Ces choix méthodologiques ont une influence significative sur les résultats obtenus, ce qui rend difficile la comparaison et la consolidation des études.

Le potentiel de réduction des émissions grâce au numérique est estimé entre 15% et 20% des émissions mondiales de GES en 2030. Ce potentiel repose sur l'application des technologies numériques à différents cas d'utilisation, tels que le télétravail, le covoiturage, l'agriculture intelligente, ou la gestion intelligente de l'énergie. Ces cas d'utilisation peuvent avoir des effets directs ou indirects sur les émissions de GES. Les effets directs sont ceux qui résultent de l'optimisation ou de la substitution d'une activité par une autre. Les effets indirects sont ceux qui résultent du changement de comportement ou de mode de vie induit par les technologies numériques. Ces effets peuvent être positifs (effet d'éviction) ou négatifs (effet rebond). Les études analysées ne prennent pas toujours en compte ces effets indirects, ce qui peut conduire à une surestimation ou une sous-estimation du potentiel de réduction.

Les travaux existants sur l'impact environnemental du secteur numérique présentent donc des résultats variés et incertains, qui ne permettent pas d'avoir une vision claire et complète du sujet. Il existe plusieurs sources d'incertitude et de lacune dans ces travaux, qui appellent à des efforts supplémentaires de recherche et d'amélioration. Parmi ces sources, on peut citer :

- La qualité et la disponibilité des données : les données utilisées par les études sont souvent incomplètes, imprécises ou obsolètes. Il existe un manque de transparence et d'harmonisation dans la collecte et le partage des données sur le secteur numérique. Il est donc nécessaire de développer des bases de données fiables et actualisées, qui couvrent l'ensemble du cycle de vie du secteur.
- La cohérence et la comparabilité des méthodes : les méthodes utilisées par les études sont souvent divergentes, voire contradictoires. Il existe un manque de consensus et de normalisation dans le choix des indicateurs, des hypothèses et des scénarios. Il est donc nécessaire de définir des cadres méthodologiques communs et robustes, qui permettent d'évaluer l'impact environnemental du secteur de manière cohérente et comparable.
- La prise en compte des effets indirects : les effets indirects des technologies numériques sur les émissions de GES sont souvent négligés ou mal estimés. Il existe un manque de connaissance et de modélisation des mécanismes socio-économiques qui lient le numérique et l'environnement. Il est donc nécessaire d'intégrer les effets indirects dans l'évaluation de l'impact environnemental du secteur, en utilisant des approches systémiques et prospectives.

En conclusion, ce chapitre a montré que le secteur numérique a un impact environnemental complexe et ambigu, qui nécessite une analyse approfondie et rigoureuse. Nous avons identifié les principaux enjeux et les principales pistes d'amélioration pour évaluer cet impact. Dans le chapitre suivant, nous présenterons notre contribution à ce domaine de recherche, en proposant une méthode originale et innovante pour mesurer l'empreinte carbone du secteur numérique.

Positionnement

- Un aperçu des connaissances actuelles sur l'incidence des technologies numériques sur le changement climatique, en examinant deux impacts centraux : l'empreinte GES du secteur des TIC et le potentiel de réduction des GES des TIC.
- Une comparaison systématique entre les études qui évaluent ces deux impacts à l'échelle globale, en mettant en évidence les différences dans les limites et les méthodes des systèmes.
- La compréhension de l'impact environnemental des technologies numériques et à l'identification des pistes de recherche future.

Contributions

- Ce chapitre propose une comparaison systématique entre les études portant sur l'empreinte carbone globale du secteur des TIC et le potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) des TIC (à notre connaissance, une telle comparaison n'existe pas).
- La fourniture d'un ensemble de sources cohérentes pour enrichir le débat sur la transition vers une économie à faibles émissions de carbone, sans prendre position sur les choix politiques ou les questions scientifiques liées au climat.

Deuxième partie

Analyse et modélisation

Chapitre 3

Analyse

Sommaire

3.1	Introduction	50
3.2	Analyse du cycle de vie	51
3.2.1	Méthodologie	51
3.2.2	Bases de données	52
3.2.3	Évaluation de l’empreinte carbone	53
3.3	Limites	56
3.3.1	Disponibilité et qualité des données	56
3.3.2	Complexité et coûts	57
3.3.3	Intégration des aspects sociaux et économiques	58
3.4	Méthodologie	59
3.4.1	Approche	59
3.4.1.1	Base de données	59
3.4.1.2	Simplification et accessibilité	60
3.4.1.3	Analyse qualitative et bonnes pratiques	60
3.4.2	Calcul et définition du périmètre	61
3.4.2.1	Champ d’application et exclusions	62
3.4.3	Base de données	63
3.4.4	Analyse quantitative	65
3.4.5	Analyse qualitative	67
3.5	Vers l’intégration du cloud	69
3.6	Conclusion	70

3.1 Introduction

Après une analyse des connaissances actuelles et une synthèse préliminaire, il devient impératif d'adopter une méthodologie de mesure appropriée pour une évaluation précise des émissions de gaz à effet de serre (GES).

L'une des méthodes reconnues pour évaluer l'impact environnemental des produits et services est l'analyse du cycle de vie (ACV). Cette approche prend en compte toutes les étapes de l'existence des produits, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à leur fin de vie. L'ACV permet d'identifier les sources d'émissions de GES, les consommations énergétiques, les impacts sur la qualité de l'air, de l'eau et des sols, ainsi que les potentiels d'amélioration. Il est important de noter que l'ACV s'applique également aux produits et services numériques tels que les équipements informatiques, les réseaux de télécommunication, les centres de données, les logiciels et les applications en ligne.

Cependant, l'application de l'ACV au secteur du numérique présente des défis particuliers qui la rendent complexe et coûteuse, à la fois en termes financiers et en temps. Parmi ces défis, on peut mentionner la disponibilité et la qualité des données, la diversité et la rapidité de l'évolution des technologies, la prise en compte des usages et des comportements des utilisateurs, ainsi que l'intégration des aspects sociaux et économiques. Ces difficultés entravent l'adoption généralisée de l'ACV par les acteurs du numérique, qui souvent manquent des ressources et de l'expertise nécessaires pour mener à bien cette démarche.

Face à ces enjeux, ce chapitre propose une méthodologie visant à simplifier l'évaluation quantitative et qualitative des systèmes d'information (SI). Cette méthodologie repose sur la création d'une base de données ouverte regroupant des indicateurs d'impact, fournissant ainsi des données fiables et régulièrement mises à jour concernant les répercussions environnementales du numérique. Cette base de données permet d'effectuer des évaluations rapides et transparentes à l'aide d'outils et de modèles intuitifs.

Pour garantir à la fois la validité de notre méthodologie et la qualité des données que nous avons utilisées, une revue critique¹ exhaustive a été menée et est disponible en annexe, complétée le 13 juillet 2023 à La Rochelle. Cette méthodologie intègre également une analyse qualitative, basée sur le guide des bonnes pratiques du numérique responsable², qui tient compte des dimensions sociales et économiques liées à l'utilisation du numérique. Cette analyse qualitative complète l'analyse quantitative et offre des recommandations concrètes pour améliorer la durabilité numérique des organisations.

Notre approche pour estimer l'empreinte du numérique consiste en plusieurs étapes, résumées dans la Figure 3.1.

La structure de ce chapitre se décompose comme suit : la section 3.1 présente les principes et les enjeux de l'ACV appliquée au numérique, la section 3.2 expose les limites des méthodologies existantes, la section 3.3 décrit la méthodologie proposée et ses

1. La revue critique est un processus permettant de vérifier si une Analyse du Cycle de Vie a satisfait aux exigences de méthodologie, de données, d'interprétation et de communication et si elle est conforme aux principes de la méthodologie tels qu'ils sont indiqués par les normes en vigueur.

2. <https://ecoresponsable.numerique.gouv.fr/publications/bonnes-pratiques/>

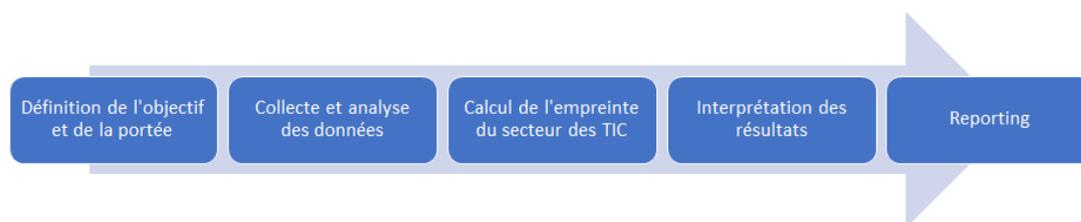


FIGURE 3.1 – Le processus d'évaluation

particularités, la section 3.4 détaille le processus d'évaluation et les outils utilisés, et la section 3.5 conclut le chapitre.

3.2 Analyse du cycle de vie

3.2.1 Méthodologie

L'ACV est une méthode d'analyse qui englobe un ensemble de règles et d'étapes de calcul visant à apprécier l'impact environnemental d'un système analytique, dans le but de quantifier et d'analyser cet impact tout en anticipant les conséquences néfastes [JPS12]. Elle vise à mesurer l'empreinte écologique d'un produit ou service tout au long de son cycle de vie, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à sa fin d'utilisation.

Ce processus se divise généralement en plusieurs phases, notamment la définition des objectifs et du périmètre de l'analyse, l'inventaire du cycle de vie, l'évaluation des impacts du cycle de vie, la communication et la revue critique de l'analyse environnementale, ainsi que l'identification des limites de l'analyse et des conditions d'utilisation. Plusieurs normes et guides régissant cette méthode ont été publiés [Eva], notamment ISO 14040 et 14044 (2006), le WRI/WCBSD :GHG PROTOCOL (2006), et PAS 2050 (2008), fournissant des informations détaillées sur les principes et le cadre de cette démarche.

En outre, des normes telles qu'ISO 14067 (2018) et le JCR FOOTPRINT GUIDE (2021) sont disponibles pour mesurer l'empreinte carbone de diverses familles de produits, notamment les ordinateurs portables, les téléviseurs et les ordinateurs de bureau. Des produits simples et génériques, tels que les ampoules à LED, sont également éligibles à une analyse du cycle de vie orientée produit.

En ce qui concerne les contributions du secteur des TIC, des recommandations ont été émises par le biais de l'INEMI ECO-IMPACT EVALUATOR (2011), le GHG PROTOCOL ICT SECTOR SUPPLEMENT (2017), et le PROJET MIT PAIA (2021). Ces directives offrent un aperçu complet des méthodes nécessaires pour calculer les émissions de gaz à effet de serre sur le cycle de vie du secteur des TIC, en tenant compte de l'évolution des technologies et des tendances liées au changement climatique. Des références supplémentaires, telles qu'ETSILCA OF ICT (ts103-199) (2011), IECTR 62625 (2016), et ITU Study Group 5 q18 l1410 (2018), sont également pertinentes dans ce contexte.

La figure 3.2 illustre diverses approches et initiatives connexes, avec leur degré de spécificité par rapport aux TIC sur l'axe vertical, les approches plus générales en haut et

les approches spécifiques en bas. L'orientation contextuelle est indiquée sur l'axe horizontal, classifiant les méthodes en fonction de leur spécificité contextuelle. Les approches se concentrant sur le changement climatique (où le carbone est un indicateur majeur) sont situées à gauche, tandis que celles couvrant des impacts environnementaux plus larges se trouvent en bas de l'axe horizontal.

Il convient de noter que plus une méthode est standardisée, moins la variabilité des résultats est importante. Par conséquent, il peut être bénéfique de développer des versions spécialisées de ces méthodes pour examiner en détail des secteurs spécifiques, comme le Greenhouse Gas Protocol [Pro11] l'a fait en émettant des directives sectorielles pour d'autres domaines, tels que la foresterie.

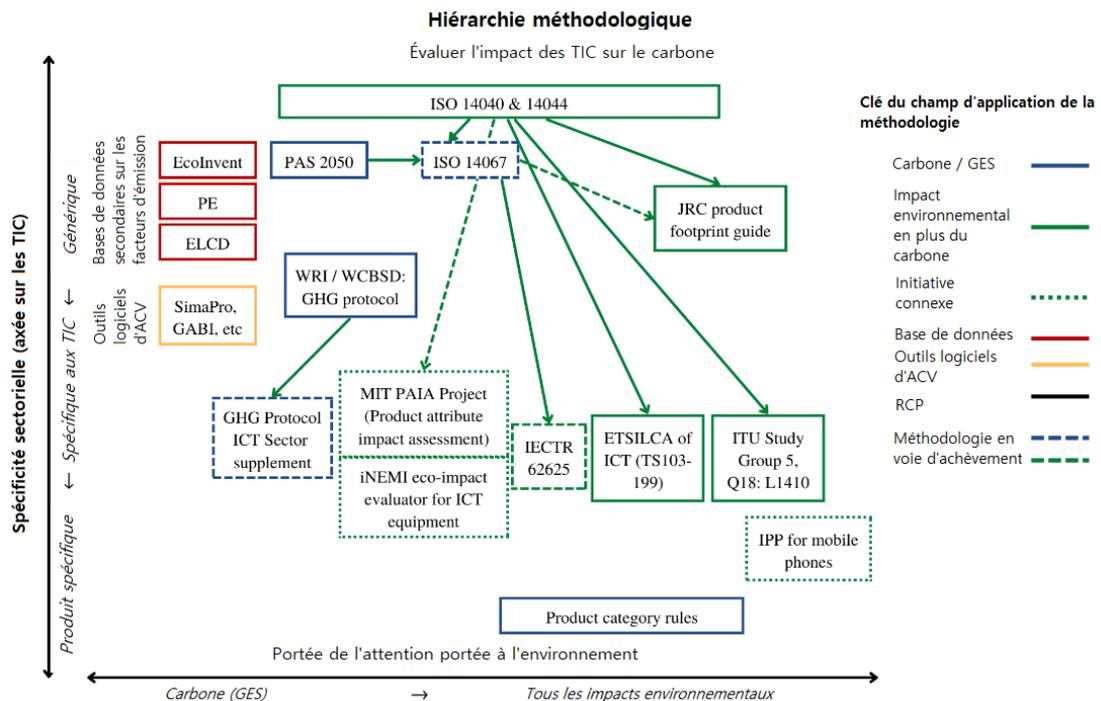


FIGURE 3.2 – Hiérarchie des différentes méthodologies.

3.2.2 Bases de données

Pour introduire cette section, il est important de mentionner l'existence de diverses bases de données en ACV. Parmi les cinq principales bases de données examinées dans cette étude, on trouve "GaBi" (version 6, base de données professionnelle et architecturale), "ecoinvent" (version 3.0 de la base de données ecoinvent), "IBO" (base de données de référence éditée par l'Institut de la Santé et du Bâtiment Vert), "CFP" (base de données japonaise portant sur l'empreinte carbone des produits) et "Synergia" (ensemble de données de l'outil d'empreinte carbone SYNERGIA, développé par l'Institut finlandais

de recherche sur l'environnement). Toutes ces bases de données ont été comparées en utilisant les versions les plus récentes disponibles au moment de la recherche [Nik22].

Les bases de données en Analyse du Cycle de Vie (ACV) et les solutions d'évaluation du cycle de vie, qu'elles soient populaires ou anciennes, telles que SimaPro, GaBi, oneClickLCA et openLCA, constituent deux composantes essentielles dans le domaine de l'ACV, mais elles diffèrent fondamentalement dans leur nature et leur utilisation.

Les bases de données d'ACV, telles que "ecoinvent" et "CFP", sont essentiellement des référentiels de données environnementales et technologiques. Elles regroupent une vaste quantité d'informations sur les caractéristiques des matériaux, des processus de fabrication, des émissions de gaz à effet de serre, et bien plus encore. Ces bases de données servent de sources d'informations essentielles pour réaliser des analyses du cycle de vie, en fournissant des données de base sur lesquelles les professionnels peuvent s'appuyer pour évaluer l'impact environnemental des produits, des services ou des systèmes.

En revanche, les solutions d'évaluation du cycle de vie, comme SimaPro, GaBi, oneClickLCA et openLCA, sont des logiciels spécifiquement conçus pour faciliter la réalisation d'analyses du cycle de vie. Ils utilisent les données provenant des bases de données d'ACV pour effectuer des calculs complexes, générer des rapports détaillés et faciliter la prise de décisions éclairées en matière de durabilité. Ces solutions offrent des fonctionnalités avancées, telles que la modélisation de scénarios, l'analyse de sensibilité et la comparaison entre différentes options. En somme, les bases de données de l'ACV constituent la matière première, tandis que les solutions d'évaluation du cycle de vie sont les outils permettant de transformer ces données en informations utiles et pertinentes pour les entreprises et les décideurs cherchant à minimiser leur impact environnemental.

Récemment, l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) a lancé une initiative en fusionnant sa base de données avec un outil d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) simplifié et gratuit appelé "Bilan Produit". Cette démarche vise à fournir aux utilisateurs une solution unifiée, regroupant à la fois les ressources de la base de données de l'ADEME et un outil simplifié d'ACV, le tout accessible depuis un même point d'accès. Cependant, il convient de noter que cette initiative ne sera pas intégrée à notre représentation graphique, en raison des importantes incertitudes associées à la base de données de l'ADEME.

La Figure 3.3 illustre la comparaison entre divers outils d'évaluation du cycle de vie, qu'ils soient populaires ou anciens, tels que SimaPro, GaBi, oneClickLCA et openLCA. Pour chacun de ces outils, nous avons synthétisé les informations essentielles et précisé s'ils sont en accès libre. En outre, nous avons inclus des informations complémentaires concernant leur nature en tant que logiciels ou bases de données.

Cette figure s'avère être un précieux outil pour mieux appréhender les caractéristiques de ces outils et bases de données, nous permettant ainsi de prendre une décision éclairée en fonction de nos besoins.

3.2.3 Évaluation de l'empreinte carbone

Parallèlement, plusieurs solutions ont été développées pour évaluer l'empreinte carbone des organisations en général et de secteurs spécifiques. Au niveau international, di-

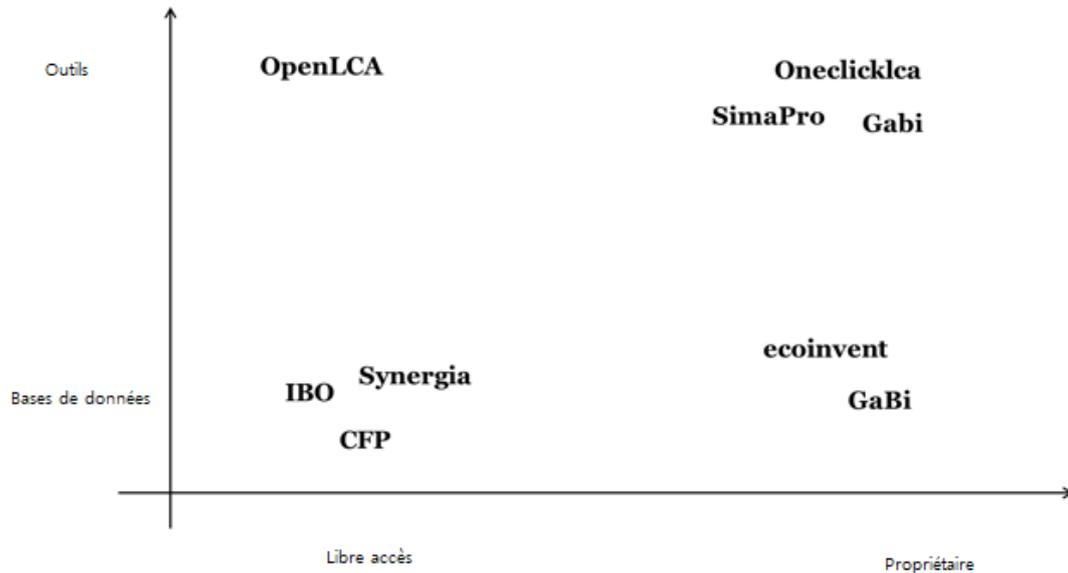


FIGURE 3.3 – Différents outils et logiciels ACV.

verses solutions informatiques sont disponibles à cette fin. Parmi celles-ci, nous pouvons citer CarbonFootprint (CF, 2020), CarbonFund (CFund, 2021), Coolclimate (CoolCalifornia, 2021 ; Simpson, 2009), SimplifiedGHGEmissionsCalculator (SGEC, 2020), myclimate (Foundationmyclimate, 2021), SimpleCarbonCalculator (NationalEnergyFoundation) et TerrapassCalculator (Terrapass, 2021). De plus, le Greenhouse Gas Protocol (2004) a élaboré son propre instrument (Greenhouse Gas Protocol, 2021), actuellement en développement au sein du groupe [VVB22].

En ce qui concerne l'évaluation de l'empreinte carbone dans des secteurs spécifiques, plusieurs solutions méritent d'être mentionnées. Par exemple, la solution de calcul des gaz à effet de serre BioGrace (Biograce, 2015) est dédiée à l'analyse des émissions dans le secteur agricole. De même, l'outil CoolFarm (CFT, 2015) se concentre sur l'agriculture, tandis que l'Illinois Agricultural Sustainability Calculator (IFSC, 2009) s'applique également au secteur agricole.

Par ailleurs, certains auteurs ont développé des solutions spécifiques pour des domaines particuliers. Par exemple, Lital (2015) a créé une solution pour évaluer l'empreinte carbone dans le secteur de la construction, Pirlo et Carè (2013) se sont penchés sur les produits laitiers, et Sévigné Itoiz et al. (2013) ont élaboré une solution pour la gestion des déchets solides.

Toutes ces différentes solutions sont présentées et comparées dans la Table 3.1 et la Table 3.3.

Enfin, en ce qui concerne les solutions liés à l'analyse du carbone des TIC, les principaux outils sont présentés et comparés dans la Table 3.2 et la Table 3.4.

TABLE 3.1 – Solution de calcul de l’empreinte carbone.

Solution	Application par pays
Carbon Footprint (CF, 2020)	WW
Carbon Fund (CFund, 2021)	USA
Cool climate (CoolCalifornia, 2021 ; Simpson, 2009)	USA
GHG Protocol Calculator (GHG Protocol, 2021)	AU, CA, CH, USA
myclimate (Foundation myclimate, 2021)	WW
Simple Carbon Calculator (National Energy Foundation, 2017)	WW
Simplified GHG Emissions Calculator (SGEC, 2020)	USA
Terrapass Calculator (Terrapass, 2021)	USA
CA-CP (CA-CP, 2020)	CA, USA
SIMAP (SIMAP, 2020)	CA, USA

TABLE 3.2 – Solution d’analyse de l’empreinte carbone des TIC.

Nom	Périmètre	Type
Carbonalyser	Web	Extension de navigateur
Cloud Carbon Footprint	Cloud	Application Web à installer
Code Carbon	Intelligence Artificielle	Paquet
EcoDiag	Organisation	Outil en ligne
GreenIT-Analysis	Web	Extension de navigateur
Lighthouse	Web	Extension de navigateur, CLI
PowerAPI	Logiciel	Paquet
Scaphandre	Serveur	Supervision
Yellow Lab Tools	Web	Outil en ligne, CLI

TABLE 3.3 – Comparaison des solutions de calcul de l’empreinte carbone général.

Nom	Accessibilité	Évolutivité	Application
Carbon Footprint (CF, 2020)	●●●	●	●●●
Carbon Fund (CFund, 2021)	●●	●●	●●
Cool climate (CoolCalifornia, 2021 ; Simpson, 2009)	●●	●	●●
GHG Protocol Calculator (GHG Protocol, 2021)	●	●	●●●
myclimate (Foundation myclimate, 2021)	●●●	●●	●●
Simple Carbon Calculator (National Energy Foundation, 2017)	●●●	●●	●●
Simplified GHG Emissions Calculator (SGEC, 2020)	●●●	●●	●●●
Terrapass Calculator (Terrapass, 2021)	●●●	●	●●
CA-CP (CA-CP, 2020)	●●	●●	●●
SIMAP (SIMAP, 2020)	●	●●	●●

TABLE 3.4 – Comparaison des solutions de mesure carbone des TIC.

Nom	Mesure de l'ensemble du SI	Vitesse	Approche socio-économique
Carbonalyser	•	••	••
Cloud Carbon Footprint	••	•	•
Code Carbon	••	••	•
EcoDiag	•••	•	••
GreenIT-Analysis	•	•••	•••
Lighthouse	••	••	•
PowerAPI	•	••	••
Scaphandre	••	••	•
Yellow Lab Tool	•	•••	••

3.3 Limites

Les méthodologies existantes pour évaluer l'impact environnemental du numérique ont été le point focal de nombreuses discussions et préoccupations ces dernières années. Cette préoccupation est parfaitement justifiée, car à l'ère numérique actuelle, où la technologie est omniprésente et en constante évolution, il est essentiel de comprendre comment nos activités numériques influent sur l'environnement qui nous entoure. Cependant, malgré les efforts déployés pour développer des méthodologies d'évaluation, il est devenu de plus en plus évident que ces approches présentent plusieurs limites importantes qui compromettent leur efficacité et leur précision. Ces limites ne sont pas simplement des questions techniques, mais elles touchent également des aspects fondamentaux tels que la disponibilité des données, la complexité des systèmes numériques, et la nécessité de prendre en compte l'évolution rapide de la technologie. Pour cette raison, il est impératif d'examiner de manière approfondie ces limites, de les comprendre en détail, et d'envisager des solutions pour améliorer notre capacité à évaluer de manière précise et holistique l'impact environnemental du numérique. Dans cette optique, nous allons nous pencher sur les principales limites des méthodologies actuelles.

3.3.1 Disponibilité et qualité des données

Les méthodologies d'évaluation de l'impact environnemental du secteur informatique sont confrontées à des défis majeurs, notamment la disponibilité et la qualité des données. En effet, pour réaliser une évaluation précise et transparente de l'impact environnemental, il est impératif de disposer de données fiables et complètes. Cependant, dans le contexte complexe du numérique d'aujourd'hui, la collecte, la consolidation et la fiabilité de ces données posent des défis significatifs, entravant ainsi la réalisation d'une analyse du cycle de vie complète et précise.

La fragmentation des données est l'un de ces défis. Pour évaluer l'impact environnemental, une multitude de données est nécessaire, couvrant divers aspects tels que les émissions de gaz à effet de serre et les consommations énergétiques spécifiques. Cependant, ces données sont souvent fragmentées et dispersées parmi différents acteurs de l'industrie, tels que les fabricants, les fournisseurs d'énergie, les opérateurs de télécom-

munications et les hébergeurs de données. Cette fragmentation complique la collecte et la consolidation des données, limitant ainsi la capacité à obtenir une image complète et précise de l'impact environnemental.

De plus, l'incomplétude des données constitue un défi majeur. Il arrive que des informations cruciales soient manquantes ou non disponibles, ce qui entraîne des approximations dans les évaluations. Par exemple, l'absence d'une base de données exhaustive concernant les émissions de gaz à effet de serre liées aux équipements numériques rend difficile la modélisation précise de leur impact environnemental.

La qualité des données joue un rôle crucial dans l'ensemble du processus d'évaluation. Des données fragmentées, incomplètes ou peu fiables peuvent entraîner des erreurs d'estimation significatives. Une évaluation basée sur de telles données incorrectes ou manquantes peut conduire à des conclusions erronées, remettant ainsi en question la validité des résultats obtenus. Par exemple, des données incorrectes concernant les émissions de gaz à effet de serre pour un équipement spécifique peuvent entraîner des décisions mal orientées.³

La transparence est un élément essentiel pour garantir la crédibilité des évaluations environnementales. Lorsque les données utilisées ne sont ni transparentes ni fiables, la crédibilité de l'évaluation est mise en doute, ce qui peut susciter le scepticisme des parties prenantes et du public à l'égard des résultats présentés, entravant ainsi les efforts visant à prendre des mesures pour réduire l'impact environnemental.

Pour surmonter ces défis liés à la disponibilité et à la qualité des données, des efforts collaboratifs sont nécessaires. Les gouvernements, les industries et les organismes de normalisation peuvent jouer un rôle essentiel dans la création de normes et de protocoles pour la collecte et le partage de données environnementales. L'accent devrait être mis sur la transparence, permettant ainsi de partager des données pertinentes.

De plus, la technologie peut jouer un rôle crucial en automatisant la collecte et la gestion des données. Les systèmes de collecte de données automatisés et les capteurs intégrés aux équipements peuvent fournir des informations en temps réel, améliorant ainsi la disponibilité et la qualité des données.

En résumé, la disponibilité et la qualité des données sont des enjeux cruciaux dans l'évaluation de l'impact environnemental des produits et services numériques. Les défis liés à la fragmentation des données, et à leur incomplétude peuvent limiter la précision et la crédibilité des évaluations. Cependant, grâce à des efforts concertés et à l'utilisation de technologies avancées, il est possible de surmonter ces défis et de fournir des évaluations environnementales plus précises, transparentes et fiables.

3.3.2 Complexité et coûts

L'évaluation des impacts environnementaux à travers l'analyse du cycle de vie présente des défis significatifs, notamment en termes de complexité et de coûts, ce qui limite son adoption généralisée.

3. Exemple : <https://theshiftproject.org/article/shift-project-vraiment-surestime-empreinte-carbone-video-analyse/>

L'aspect complexe de l'ACV réside dans sa démarche visant à évaluer les impacts environnementaux des produits ou services sur l'ensemble de leur cycle de vie, de la phase de production jusqu'à leur élimination. Ce processus comporte plusieurs étapes, dont la définition du périmètre, une étape souvent délicate, qui requiert la détermination des phases spécifiques du cycle à inclure. De plus, il implique un suivi minutieux des flux de matières et d'énergie, exigeant la collecte de données précises. Le choix des indicateurs pertinents, comme les émissions de gaz à effet de serre, est une autre étape cruciale, et les données sont quantifiées à l'aide de modèles mathématiques sophistiqués. Cette complexité exige une expertise technique variée, ce qui peut constituer un obstacle pour les organisations n'ayant pas accès à ces compétences spécialisées.

En plus de cette complexité, l'ACV engendre des coûts significatifs. La collecte de données provient de diverses sources et implique des enquêtes, des études de marché et des collaborations. L'expertise technique est également essentielle, mais elle peut être onéreuse, notamment si elle est externalisée à des experts spécialisés. De plus, l'utilisation de logiciels spécifiques et la création de modèles personnalisés ajoutent des coûts supplémentaires. Enfin, la réalisation complète d'une ACV nécessite du temps et un investissement en ressources humaines considérables.

Ces aspects de complexité et de coûts constituent des barrières significatives qui entravent l'adoption généralisée de l'ACV. Les petites et moyennes entreprises (PME) ainsi que les organisations disposant de ressources limitées peuvent trouver ces coûts prohibitifs, créant ainsi une disparité dans l'évaluation environnementale.

Pour favoriser une utilisation plus étendue de l'ACV, il est nécessaire de surmonter ces obstacles. Cela implique de réduire les barrières financières en rendant les ressources plus accessibles, de simplifier les méthodes et de promouvoir la collaboration entre les parties prenantes. En fin de compte, en surmontant ces défis, l'ACV pourrait jouer un rôle clé dans la prise de décision éclairée et durable tant dans le monde des affaires que dans d'autres domaines.

3.3.3 Intégration des aspects sociaux et économiques

Les méthodologies traditionnelles d'analyse de cycle de vie ont enrichi notre compréhension des impacts environnementaux, mais elles ont souvent négligé les répercussions sociales et économiques des activités numériques, limitant leur pertinence.

Le numérique influence profondément la société et l'économie en remodelant nos modes de vie. Il peut promouvoir l'accès à l'éducation, l'inclusion sociale, mais aussi créer des inégalités et des risques liés à la technologie.

Intégrer ces aspects sociaux et économiques dans l'ACV est complexe. Les impacts sont qualitatifs, varient selon la culture et le contexte. Les données pertinentes sont souvent qualitatives et dépendent du contexte.

Pour relever ces défis, une approche flexible est nécessaire. Elle comprend des analyses qualitatives, des indicateurs adaptés, une approche multi-critères et des modèles adaptatifs pour évaluer les impacts.

En somme, intégrer les aspects sociaux et économiques dans l'ACV est essentiel pour des évaluations environnementales pertinentes et durables dans notre monde numérique

en constante évolution.

3.4 Méthodologie

3.4.1 Approche

Dans cette section, nous exposons une méthodologie conçue pour relever les défis posés par le contexte numérique, en tenant compte des limites mentionnées précédemment. Cette méthodologie se distingue par plusieurs caractéristiques clés, que nous détaillerons dans les sections suivantes.

3.4.1.1 Base de données

Notre méthode repose sur la création d'une base de données ouverte de facteurs d'impact⁴. Cette base de données joue un rôle central en fournissant des données que nous espérons fiables et régulièrement mises à jour sur les impacts environnementaux des produits et services numériques. Nous cherchons à surmonter les défis liés aux données en rassemblant des informations provenant de diverses sources respectées, dans l'espoir de faciliter une évaluation précise des impacts environnementaux.

Dans ce cadre, nous avons pour objectif de combler les lacunes en matière de données et de relever les défis liés à l'évaluation précise des impacts environnementaux du numérique. Nous effectuons une collecte initiale de données auprès de multiples sources, notamment l'ADEME, NegaOctet, Boavizta, ainsi que d'autres acteurs clés de l'industrie. Ces données comprennent divers détails sur les impacts environnementaux des équipements numériques, les sources d'énergie, les modes de transfert de données, et les types de services numériques. Par la suite, nous nous efforçons de les agréger et de les normaliser rigoureusement afin d'assurer leur cohérence et leur comparabilité.

Ainsi, notre base de données résultante offre des facteurs d'impact spécifiques pour chaque catégorie d'équipement numérique, source d'énergie, mode de transfert de données, et type de service numérique. À titre d'exemple, pour un smartphone, ces facteurs d'impact tiennent compte de divers aspects tels que la fabrication, la consommation énergétique, le transport, l'utilisation, et le recyclage. Pour un service de streaming vidéo, ils englobent des éléments comme la quantité de données transmises, les serveurs impliqués, et les dispositifs de visualisation utilisés.

Nous croyons que cette base de données ouverte peut apporter plusieurs avantages importants. Nous espérons qu'elle contribuera à améliorer la qualité et la fiabilité des évaluations environnementales des produits et services numériques en réduisant les incertitudes et les biais potentiels. De plus, nous avons l'espoir qu'elle facilitera la comparaison entre les produits et services numériques, permettant ainsi aux organisations de prendre des décisions éclairées en matière de durabilité.

En conclusion, nous considérons que la base de données ouverte de facteurs d'impact joue un rôle essentiel dans notre méthodologie, en fournissant des données que nous

4. Le lien vers notre base : <https://github.com/gbourgeois28/Base-WeNR-Revue-critique>

espérons être fiables pour des évaluations environnementales précises.

3.4.1.2 Simplification et accessibilité

Au cœur de notre approche, réside une volonté de simplifier le processus complexe d'évaluation environnementale, tout en le rendant accessible à un éventail diversifié d'organisations. Nous sommes donc confrontés aux défis posés par la complexité et les coûts associés aux méthodologies traditionnelles d'analyse du cycle de vie. Notre approche s'efforce donc de démocratiser l'analyse environnementale dans le domaine du numérique.

Cette question de l'expertise technique requise par les méthodologies d'ACV traditionnelles peut constituer un obstacle majeur pour de nombreuses entreprises et acteurs. Ainsi, notre approche a été conçue avec pour objectif de réduire cette barrière à l'entrée et de rendre l'analyse environnementale accessible à un public plus large.

Pour atteindre cet objectif, nous avons développé des outils et des modèles intuitifs qui simplifient considérablement les étapes complexes de l'analyse environnementale. Même pour les utilisateurs dépourvus de connaissances spécialisées en ACV, ces outils automatisent plusieurs aspects critiques de l'analyse. De plus, la simplification ne se limite pas aux outils. Nous mettons à disposition des utilisateurs des guides détaillés et des ressources éducatives pour aider à comprendre les concepts fondamentaux de l'analyse de cycle de vie et interpréter les résultats obtenus. Notre méthodologie aspire à éduquer et à autonomiser les organisations dans leurs démarches environnementales.

En résumé, notre approche vise à simplifier le processus d'analyse environnementale et à le rendre accessible à un large public, en fournissant des outils conviviaux et des ressources éducatives.

3.4.1.3 Analyse qualitative et bonnes pratiques

Notre méthodologie se distingue par l'intégration d'une analyse qualitative, en accord avec le guide des bonnes pratiques du numérique responsable.

Contrairement aux méthodologies conventionnelles d'analyse de cycle de vie, qui se focalisent principalement sur des mesures quantitatives environnementales, notre approche embrasse une perspective qualitative. Elle tient compte des dimensions sociales et économiques grâce à l'utilisation du guide des bonnes pratiques du numérique responsable, qui offre des recommandations concrètes pour promouvoir une utilisation plus responsable des technologies numériques.

L'intégration de cette analyse qualitative dans notre méthodologie offre une vision holistique de l'impact des produits et services numériques sur la durabilité numérique des organisations, couvrant les aspects environnementaux, sociaux et économiques. En utilisant ce guide, nous identifions des mesures spécifiques pour améliorer la durabilité environnementale et sociétale des organisations. Ainsi, nos recommandations ne se limitent pas aux seuls aspects environnementaux, mais englobent également les avantages sociaux et économiques liés à une utilisation responsable des technologies numériques.

En résumé, ce qui caractérise notre méthodologie d'évaluation de l'impact environnemental des produits et services numériques, c'est son approche qualitative basée sur

le guide des bonnes pratiques du numérique responsable. Cette dimension qualitative élargit le champ de l'évaluation en prenant en compte les dimensions sociales et économiques souvent négligées, contribuant ainsi à une utilisation plus responsable et durable des technologies numériques.

3.4.2 Calcul et définition du périmètre



FIGURE 3.4 – Définition du périmètre.

Pour mener à bien une évaluation des émissions de gaz à effet de serre (GES) au sein d'une organisation, il est essentiel de définir clairement le périmètre de cette évaluation, qui constitue le premier élément dans notre Figure 3.4. Ce périmètre peut englober divers éléments tels que plusieurs sites, l'ensemble ou une partie des activités de l'entité, un service spécifique, etc. Ce qui importe avant tout, c'est la transparence dans la description du périmètre. Il est possible de distinguer le périmètre opérationnel, qui englobe les catégories d'émissions et les projets liés aux activités de l'organisation.

Dans notre démarche d'évaluation, nous prenons en compte l'ensemble du cycle de vie des équipements, notamment la phase de fabrication. Nous accordons une attention particulière aux achats d'équipements de l'année en cours, ce qui nous pousse à privilégier des unités limitant ces achats. De plus, nous incluons une analyse des Déchets Électriques et Électroniques (DEEE) [Aus13] en intégrant leur impact en équivalent CO₂e dans notre évaluation.

Nous avons délibérément choisi de nous concentrer exclusivement sur les gaz à effet de serre (GES), malgré la reconnaissance des limites d'une analyse monocritère. Cette décision découle principalement de la nécessité de démontrer l'utilité et la faisabilité de notre approche. Idéalement, nous souhaiterions inclure un éventail plus large d'indicateurs environnementaux, mais les bases de données actuelles ne le permettent pas toujours de manière exhaustive.

L'objectif principal demeure la production de données précises concernant les émissions de gaz à effet de serre au sein des organisations, tout en respectant les lois en vigueur. Cette approche vise à aider les organisations à mieux comprendre les répercussions de leurs activités sur l'écosystème et à adopter des pratiques plus respectueuses de l'environnement pour minimiser leur impact sur le climat. En mettant l'accent sur les gaz à effet de serre, l'étude ultérieure dont nous discuterons génère des résultats exacts et crédibles, tout en respectant les réglementations en vigueur. À mesure que les bases de données se développent et s'améliorent, nous espérons élargir notre palette d'indicateurs pour fournir une analyse environnementale plus complète.

Il est essentiel de souligner qu'en dépit de la densité actuelle des données, une certaine incertitude subsiste dans les chiffres fournis en raison de la complexité inhérente à la

prise en compte de tous les paramètres et de la précision parfois limitée des données disponibles. Par conséquent, certaines organisations pourraient avoir des impacts non évalués en raison de l'absence de données exactes à 100%.



L'incertitude en Analyse du Cycle de Vie réside dans la variabilité des données et des hypothèses utilisées pour évaluer l'impact environnemental d'un produit ou d'un processus, ce qui peut rendre les résultats moins précis.

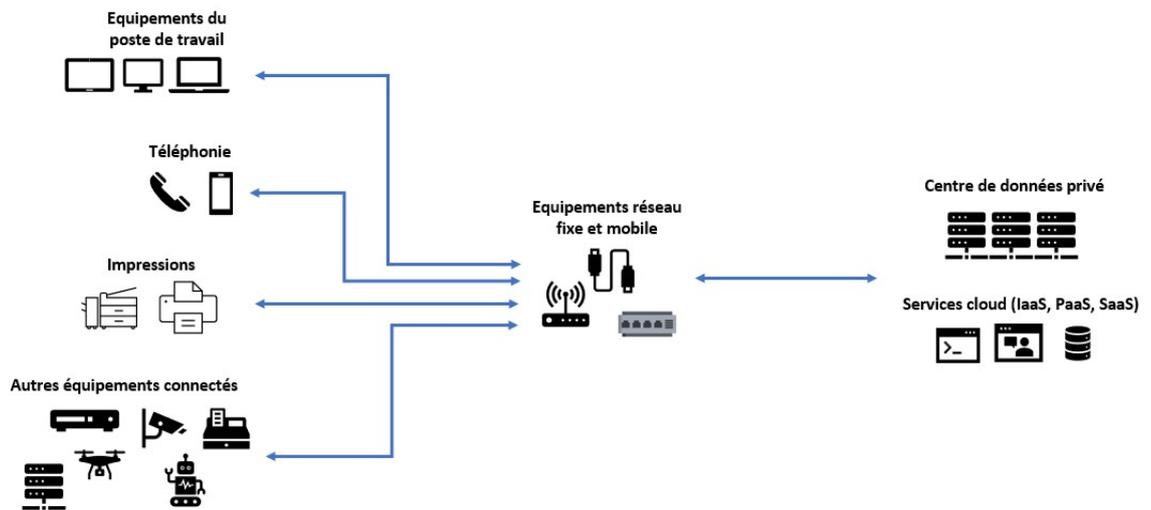


FIGURE 3.5 – Périmètre de la méthodologie.

3.4.2.1 Champ d'application et exclusions

L'impact environnemental des équipements numériques, tant matériels qu'immatériels, suscite de plus en plus d'inquiétudes en raison de leur contribution aux émissions de GES, tant dans leur utilisation que dans leur production. C'est pourquoi il est crucial d'intégrer l'empreinte carbone de ces équipements dans l'évaluation des émissions de GES liées à une organisation [MSM⁺19].

Dans le cadre de notre démarche, l'évaluation des émissions de GES englobe une variété d'équipements de bureau, tels que les ordinateurs, les ordinateurs portables, les tablettes, les périphériques standards tels que les moniteurs, les claviers et les souris, les imprimantes de bureau, ainsi que les périphériques de stockage tels que les clés USB et les disques durs externes. Les téléphones professionnels, les téléphones IP et les ordinateurs de bureau utilisés comme serveurs sont également pris en compte.

De plus, nous avons inclus la salle des serveurs dans notre évaluation, en couvrant les gammes 2 et 3 de serveurs et de postes de travail, les équipements de réseau, les racks de stockage et les équipements communs tels que les vidéoprojecteurs et les copieurs

multifonctions. Cependant, il est à noter que le climatiseur est exclusivement lié aux scopes 1 et 2, tandis que l'onduleur ne concerne que le scope 2 (Voir Figure 3.5).

Il convient de souligner que certaines composantes ne sont pas prises en compte dans notre évaluation des émissions de GES, notamment les serveurs partagés et l'hébergement externe, en raison de la diversité des opérations partagées et des types d'hébergement. De même, nous excluons les câbles de l'inventaire en raison de leur longueur, qui semble peu pertinente, et leur impact environnemental, qui est principalement lié à la production de plastique, à l'extraction de cuivre et à l'utilisation de métaux spécifiques.

Ce qui distingue notre mode opératoire, c'est son approche de calcul, qui permet une évaluation rapide et simple de l'empreinte carbone des produits et services numériques. Cette évaluation s'appuie sur une base de données accessible de facteurs d'impact, fournissant des données cohérentes et fiables pour quantifier les émissions de GES à chaque étape du cycle de vie numérique. Le processus de calcul implique la multiplication des facteurs d'impact par les données d'utilisation, conduisant ainsi à une estimation précise et personnalisée de l'empreinte carbone, sans nécessiter de modélisation complexe ou de logiciels spécialisés.

3.4.3 Base de données



FIGURE 3.6 – Base de données.

Notre processus offre aux organisations la possibilité d'évaluer l'empreinte environnementale de leur Système d'Information (SI) en se basant sur une base de données de facteurs d'impact provenant de diverses sources, faisant partie du processus de notre Figure 3.6. Les principales sources de ces données sont les suivantes :

- La base empreinte de l'ADEME spécialisé dans l'évaluation des Gaz à Effet de Serre (GES).
- Le programme ENERGY STAR, qui fournit des données relatives à la phase d'utilisation.
- Les informations fournies par les fabricants concernant les émissions de GES de leurs équipements, notamment celles liées à leur fabrication.

Dans le cadre du développement de notre base de données, nous avons entrepris une analyse approfondie pour estimer les émissions de GES tout au long de la chaîne de production, depuis l'extraction des métaux jusqu'à l'assemblage final. Les analyses réalisées par des entreprises telles que Dell, HP, Lenovo et CISCO ont utilisé l'outil d'analyse simplifié PAIA développé par le MIT. Cependant, il convient de noter que

leurs résultats étaient entachés d'incertitudes, nécessitant une réévaluation ultérieure. En effet, nous avons constaté des divergences significatives entre les différentes sources que nous avons consultées, contribuant ainsi à l'incertitude entourant nos résultats.

Plusieurs facteurs expliquent cette incertitude. Tout d'abord, il est complexe d'évaluer avec précision l'ensemble des émissions de GES provenant des différents acteurs intervenant dans la chaîne de production. Les chiffres que nous utilisons sont des moyennes, notamment en ce qui concerne les émissions de GES par kilogramme de cuivre provenant de diverses mines. De plus, les émissions de GES sont généralement basées sur la moyenne de plusieurs modèles d'une même série, dans des configurations de référence. Enfin, dans certains cas, nous utilisons des données provenant d'appareils similaires, ce qui nous fournit une estimation approximative plutôt qu'une valeur précise.

Pour évaluer la fiabilité de nos résultats, nous tenons compte de plusieurs facteurs, notamment l'impartialité du commanditaire de l'étude, la validation par des pairs, ainsi que les hypothèses et la portée de l'évaluation pour en évaluer la pertinence.

Il est essentiel de prendre en compte les facteurs d'incertitude lors de l'évaluation des facteurs d'impact environnemental. Par exemple, les mesures de CO₂e issues de la combustion d'un litre de carburant présentent une précision de l'ordre de 5%, mais cette précision peut varier en présence d'autres composants lors de la combustion. Les niveaux d'incertitude augmentent davantage avec l'introduction de paramètres tels que le poids du fret routier, qui dépend de multiples variables telles que le style de conduite, les conditions météorologiques et la topographie. En résumé, il existe une probabilité de 50% que l'incertitude diffère de la valeur calculée, et dans certains cas, cette différence peut atteindre 100% (Voir Figure 3.7).



FIGURE 3.7 – Exemple d'image d'incertitude prise sur la base empreinte

Après avoir examiné nos bases de données, il est essentiel de comprendre comment calculer l'impact global annuel du système d'information, ce qui se traduit par l'impact global annualisé.

3.4.4 Analyse quantitative



FIGURE 3.8 – Calcul.

L'analyse quantitative est une approche essentielle dans de nombreux domaines, de la finance à la recherche scientifique en passant par l'économie et la statistique. Dans ce contexte, nous explorerons l'analyse quantitative, avec les principaux concepts qui la sous-tendent, en suivant le bloc de notre processus de la figure 3.8.

Impact global Nous allons tout d'abord examiner l'équation de calcul qui permet la mesure de l'impact des gaz à effet de serre (GES) du système d'information à l'année.

$$I_{\text{global}} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{I_{\text{Fab}}^{(i)}}{D^{(i)}} + I_{\text{Util}}^{(i)} \right) \quad (3.1)$$

où :

- I_{global} = Impact global (en eq-CO2)
- $I_{\text{Fab}}^{(i)}$ = Impact de la fabrication de l'équipement i (en eq-CO2)
- $I_{\text{Util}}^{(i)}$ = Impact de l'utilisation de l'équipement i (en eq-CO2)
- $D^{(i)}$ = Durée de vie de l'équipement i (en années)

Dans le cadre de notre analyse quantitative, nous examinons maintenant de plus près l'impact de la fabrication des équipements à l'année.

Impact de la fabrication L'impact environnemental est un aspect important à considérer lors de la production d'équipements numériques. La deuxième équation, $I_{\text{Fab}}^{(i)}$, calcule l'impact de la production de l'équipement i en multipliant le facteur d'impact de la production (Fab_{BD}) par le nombre d'équipements de ce type (N_i).

$$I_{\text{Fab}}^{(i)} = \text{Fab}_i \cdot N_i \quad (3.2)$$

où :

- $I_{\text{Fab}}^{(i)}$ = Impact de la fabrication de l'équipement i (en CO2e)
- Fab_i = Facteur d'impact de fabrication que nous pouvons retrouver à la section 3.4.3
- N_i = Nombre d'équipements i

Dans la continuité de notre analyse quantitative, nous explorerons désormais l'impact de l'utilisation de ces équipements à l'année, en distinguant entre les équipements de bureau et les datacenters (Voir Table 3.5).

Équipements de Bureau	Équipements DataCentres
Box Internet	Firewall
Écrans	Mainframe
Enceinte Connectée	Rack Onduleur
Imprimantes	Serveur Lame Blade
Ordinateurs Fixes (Desktops)	Serveur Rack
Ordinateurs Portables (Laptops)	Serveur Autre
Point d'Accès Wi-Fi	Switch Routeur
Smartphones	
Stations d'Accueil (Docking Stations)	
Switch Bureautique	
Tablettes	
Téléphone Fixe IP ou Analogique	
Téléphone sans Fil DECT	
Télévisions	
Vidéo Projecteurs	

TABLE 3.5 – Liste des équipements.

Impact de l'utilisation : L'impact carbone résultant de l'utilisation d'équipements numériques à l'année peut être quantifié à l'aide des expressions suivantes :

Afin de distinguer le calcul de l'utilisation des équipements de bureau ($I_{\text{Util,Bureau}}^{(i)}$) de celui des datacenters ($I_{\text{Util,DCn}}^{(i)}$), des ajustements aux équations sont nécessaires.

$$I_{\text{Util}}^{(i)} = I_{\text{Util,Bureau}}^{(i)} + I_{\text{Util,DCn}}^{(i)} \quad (3.3)$$

L'impact de l'utilisation de l'équipement de bureau ($I_{\text{Util,Bureau}}^{(i)}$) est donné par :

$$I_{\text{Util,Bureau}}^{(i)} = P_i \cdot \text{F}_{\text{GES}} \quad (3.4)$$

où :

- $I_{\text{Util,Bureau}}^{(i)}$ représente l'impact de l'utilisation de l'équipement i de bureau en CO2e.

- P_i correspond à la consommation annuelle de l'équipement i en kilowattheures (KWh), conforme aux normes ENERGY STAR ou ADEME, que l'on peut retrouver à la section 3.4.3.
- F_{GES} désigne le facteur d'émission du pays en kilogrammes CO2e par kilowattheure (kg CO2e/KWh). Que l'on peut aussi retrouver à la section 3.4.3.

L'impact de l'utilisation du datacenter ($I_{\text{Util,DCn}}^{(i)}$) est calculé comme suit :

$$I_{\text{Util,DCn}}^{(i)} = P_i \cdot F_{\text{GES}} \cdot \text{PUE}_{\text{DCn}} \quad (3.5)$$

où :

- $I_{\text{Util,DCn}}^{(i)}$ représente l'impact de l'utilisation de l'équipement i dans un datacenter n en CO2e.
- P_i correspond toujours à la consommation annuelle de l'équipement i en KWh selon les normes ENERGY STAR ou ADEME. Que l'on peut retrouver à la section 3.4.3.
- F_{GES} est le facteur d'émission du pays en kg CO2e/KWh, que l'on peut aussi retrouver à la section 3.4.3.
- PUE_{DCn} est l'indicateur d'efficacité énergétique spécifique aux datacenters n .

Pour résumer, cette analyse quantitative nous permet d'évaluer avec précision l'impact environnemental des équipements numériques.

3.4.5 Analyse qualitative

L'évaluation de la maturité indique le degré de mise en œuvre de chaque bonne pratique. Ainsi, l'évaluation comprend le calcul du niveau moyen d'avancement de chaque bonne pratique correspondant à chacune des 10 catégories principales du guide des bonnes pratiques numérique responsable.

Si aucune valeur n'est fournie pour l'une des pratiques listées, ces données ne seront pas incluses dans le calcul de la moyenne.

Pour cette partie, la répartition du calcul est la suivante :

- La première étape consiste à calculer la moyenne des différentes catégories associées à la bonne pratique correspondante.
- Par défaut, les bonnes pratiques associées à la catégorie sont calculées avec une moyenne pondérée de 1. Cette moyenne est automatiquement égale à 0 si aucune valeur ne peut être utilisée.

L'équation pour calculer la moyenne pondérée d'une bonne pratique est la suivante :

$$M(y)_{BP} = \frac{\sum_{j=1}^C M(y, j) \cdot W(y, j)}{\sum_{j=1}^C W(y, j)} \quad (3.6)$$

où :

- M_{BP} représente la moyenne des bonnes pratiques.
- y représente la bonne pratique en cours d'évaluation (de 1 à N).
- j représente la catégorie en cours d'évaluation (de 1 à C).
- $M(y, j)$ est la valeur de maturité de la bonne pratique y dans la catégorie j .
- $W(y, j)$ est le poids de la catégorie j pour la bonne pratique y .

Cette équation calcule la moyenne pondérée de chaque bonne pratique en multipliant la valeur de maturité de cette pratique dans chaque catégorie par le poids de cette catégorie pour cette pratique, puis en divisant la somme de ces produits par la somme des poids.

Le guide des bonnes pratiques de la Direction interministérielle du numérique (DINUM), dont toutes les bonnes pratiques sont issues, propose une série de bonnes pratiques adaptées à différents types d'organisations et à différents niveaux de complexité. Il inclut des tableaux récapitulatifs pour chaque bonne pratique, fournissant des informations sur des aspects tels que la priorité, la difficulté de mise en œuvre, les exemples pilotes et les indicateurs pilotes.

Ces fiches permettent une planification méthodique de la mise en place de bonnes pratiques numériques responsables. Bien que certaines de ces bonnes pratiques ne soient pas nécessairement adaptées à toutes les situations, elles peuvent néanmoins contribuer à réduire l'empreinte numérique globale de l'organisation.

Le guide peut également servir de référence pour les organisations qui souhaitent améliorer leur performance en matière de durabilité numérique. En utilisant ces bonnes pratiques, les organisations peuvent non seulement minimiser leur impact sur l'environnement, mais également améliorer leur efficacité opérationnelle et la qualité de leurs produits et services numériques.

Pour chaque bonne pratique, nous trouverons :

- Des exemples d'indicateurs de pilotage : exemples de données chiffrées à suivre permettant d'évaluer les progrès réalisés dans la mise en œuvre de cette bonne pratique.
- Des exemples de pilotes : personne ou groupe de personnes en charge de piloter cette bonne pratique.
- Retour d'expérience sur la mise en œuvre de la bonne pratique.
- Difficulté de mise en œuvre : facile, moyenne ou difficile.

- Priorité : prioritaire, recommandée ou aller plus loin.

La méthodologie présentée se démarque par son approche particulière d'analyse qualitative. Cette approche enrichit l'analyse quantitative en évaluant les meilleures pratiques liées au numérique responsable. Cette évaluation s'appuie sur l'application du guide des bonnes pratiques du numérique responsable, lequel offre des recommandations concrètes pour atténuer l'impact environnemental associé aux produits et services numériques. L'analyse qualitative implique la comparaison entre les pratiques existantes et les directives du guide. Cette démarche permet de mettre en lumière les points forts et les points faibles en termes de durabilité. En conséquence, elle identifie les possibilités d'amélioration tout en sensibilisant les parties prenantes aux enjeux du numérique responsable, tout en intégrant les dimensions économiques et sociales de la question. Vous pouvez retrouver en annexe un exemple de fiche de bonnes pratiques.

Actuellement, nous sommes engagés dans un processus visant à pondérer la maturité des répondants en fonction de la difficulté des bonnes pratiques, conformément à la fusion du baromètre Alliance Green IT (AGIT). Cette approche de pondération permettra une évaluation plus précise et équilibrée de la maturité des différents intervenants, en prenant en compte la complexité des bonnes pratiques auxquelles ils sont confrontés. Cette collaboration s'effectue en étroite coordination avec l'AGIT, conformément aux recommandations et partenariats établis dans le cadre du chapitre 5, renforçant ainsi notre engagement envers la promotion de pratiques numériques responsables et durables.

3.5 Vers l'intégration du cloud

La migration massive vers le cloud est une étape incontournable de l'évolution technologique de nos entreprises. Cette transition inéluctable nous force à repenser fondamentalement la manière dont nous intégrons le cloud dans nos méthodologies.

Jusqu'à présent, l'impact estimé du traitement des données dans le cloud reste limité, principalement en raison des résultats mitigés des études existantes. Notre analyse se concentre principalement sur le stockage de fichiers, en excluant les coûts de transfert et en se limitant à l'empreinte carbone, tout en négligeant d'autres impacts cruciaux tels que l'utilisation de l'eau, ainsi que les considérations relatives à la suppression ou à l'accès aux données. De plus, nous considérons que la suppression des données est irréversible, éliminant ainsi toute redondance ou sauvegarde.

Pour approfondir notre réflexion, nous avons choisi de nous appuyer sur l'étude "Green Cloud Computing" (2021) [GLS⁺21], basée sur les travaux de l'Umweltbundesamt (Agence fédérale allemande pour l'environnement). Notre choix s'est basé sur plusieurs critères, à savoir la prise en compte exclusive des coûts de stockage et de l'empreinte carbone, ainsi que la couverture de l'ensemble du cycle de vie des serveurs. Les résultats de cette étude s'alignent de manière cohérente avec une étude similaire de Stanford [Mag17], centrée sur le transport et le stockage, qui a estimé une empreinte carbone du cloud à 400 g CO₂e/Go/an.

Les données brutes que nous avons recueillies indiquent une moyenne de 209,5 g

CO₂e/Go/an pour les émissions de carbone des quatre centres de données en Allemagne, comme le montre la figure 20 intitulée "CO₂-Fußabdruck für Online-Storage im Vergleich".

Toutefois, il convient de souligner certaines limitations de notre démarche. Cette étude s'appuie sur un échantillon restreint de quatre centres de données en Allemagne, alors que les grandes entreprises de cloud computing pourraient opter pour des solutions plus respectueuses de l'environnement. De plus, nos données sont basées sur le mix énergétique allemand, qui peut différer dans d'autres régions du monde. Par exemple, en France, les émissions s'élèvent à 80 g CO₂e/Go/an, en moyenne en Europe à 155 g CO₂e/Go/an, aux États-Unis à 190 g CO₂e/Go/an et à l'échelle mondiale à 221 g CO₂e/Go/an, selon une source récente [XLX⁺22]. Ces chiffres ont été calculés en ajustant le facteur énergétique allemand par rapport à d'autres pays ou continents [noaa]. Il est important de noter que les données personnelles peuvent être hébergées n'importe où dans le monde, ce qui peut influencer leur empreinte carbone.

Ces chiffres reflètent les émissions de gaz à effet de serre liées à la consommation énergétique nécessaire au stockage et au traitement des données, évaluées annuellement par gigaoctet (Go) dans chaque région. Ils prennent en compte les différentes sources d'énergie utilisées pour alimenter les centres de données et les infrastructures de stockage dans chaque pays ou continent.

La méthodologie que nous présentons se distingue par son approche pour évaluer l'impact environnemental du cloud, un élément essentiel dans le contexte de la transformation numérique. Cette méthode se fonde sur l'utilisation d'une base de données ouverte contenant des indicateurs d'impact, garantissant ainsi des données fiables et cohérentes pour quantifier les émissions de GES liées aux services cloud.

L'approche consiste à identifier les caractéristiques des services cloud utilisés, telles que leur nature, leur durée, leur fréquence et le volume de données associé, afin de sélectionner les indicateurs d'impact appropriés disponibles dans la base de données. De cette manière, cette démarche permet d'obtenir une estimation précise et personnalisée de l'empreinte carbone du cloud, sans recourir à des modèles complexes ou à des logiciels spécialisés.

Enfin, il convient de noter qu'il existe aujourd'hui une multitude de calculatrices carbone proposées par les principaux fournisseurs de services cloud (Voir Table 3.6). Bien que nous ayons pris en compte ces outils dans notre analyse, il est important de souligner qu'il subsiste de nombreuses incertitudes liées à ces calculatrices, principalement en raison du manque de transparence entourant leurs méthodologies de calcul. La variabilité des données et des hypothèses utilisées par ces fournisseurs peut entraîner des écarts significatifs dans les estimations de l'empreinte carbone.

3.6 Conclusion

Ce chapitre a exposé une approche exhaustive et spécifique pour évaluer l'impact environnemental des technologies numériques au sein des organisations. Cette approche repose sur l'utilisation de données ouvertes et d'outils d'analyse dédiés, permettant ainsi

TABLE 3.6 – Calculatrices de calcul environnemental des cloud providers

Fournisseur	Calculatrice	Lien
Amazon Web Services	AWS Calculateur d'empreinte carbone	https://aws.amazon.com/fr/sustainability/tools/
Google Cloud Platform	Simulateur de coût Google Cloud	https://cloud.google.com/carbon-footprint?hl=fr
Microsoft Azure	Outil de calcul de tarification Azure	https://www.microsoft.com/en-us/sustainability/emissions-impact-dashboard
OVHcloud	Calculatrice carbone OVHcloud	https://corporate.ovhcloud.com/en/newsroom/news/carbon-calculator-launch/
Linode	Cloud Computing Calculator	https://www.linode.com/cloud-computing-calculator/

une évaluation complète des émissions de gaz à effet de serre tout au long du cycle de vie des équipements numériques et en lien avec la consommation de services cloud.

Une caractéristique distinctive de cette méthode réside dans sa prise en compte exhaustive des différentes phases de vie des équipements numériques, englobant leur fabrication, leur utilisation et leur stockage. De surcroît, elle intègre les impacts environnementaux du cloud computing, souvent négligés par les méthodologies traditionnelles. Cette approche globale assure ainsi une évaluation plus précise de l'impact environnemental réel des technologies numériques au sein des organisations.

Un autre aspect significatif de cette approche réside dans sa transparence. La divulgation des sources de données et des méthodes de calcul employées pour estimer les émissions offre aux parties prenantes la possibilité de comprendre et de vérifier les résultats obtenus, ce qui renforce la crédibilité des évaluations.

Cependant, il convient de souligner que, malgré ses avantages, cette méthode n'est pas exempte de limites. En tant que méthode fondée sur des modèles et des hypothèses, elle comporte naturellement des incertitudes inhérentes aux résultats. Les hypothèses et simplifications utilisées peuvent influencer la précision des évaluations, mettant en évidence la nécessité d'une interprétation prudente des chiffres obtenus.

En outre, cette approche se concentre principalement sur l'évaluation des émissions de CO₂e et néglige d'autres impacts environnementaux significatifs, tels que la consommation d'eau et la perte de biodiversité.

Pour remédier à ces limitations et améliorer davantage cette approche, plusieurs pistes de recherche futures peuvent être envisagées. Il serait pertinent, par exemple, d'élargir la gamme d'indicateurs environnementaux pris en considération, en incluant des mesures telles que l'énergie grise et l'empreinte écologique. De plus, il serait judicieux d'approfondir l'analyse des impacts sociaux et économiques des technologies numériques en utilisant des méthodes telles que l'analyse coût-bénéfice ou l'analyse multicritère. Cette question est actuellement en cours de développement dans le cadre d'une thèse menée par Aiste

Rugeviciute. [RC23]

En résumé, ce chapitre a apporté une contribution à la compréhension de l'impact environnemental des technologies numériques au sein des organisations. L'approche présentée offre une méthode complète pour évaluer cet impact tout en soulignant l'importance d'inclure d'autres dimensions environnementales, sociales et économiques dans cette évaluation. En fin de compte, cette approche peut servir d'outil essentiel pour sensibiliser les organisations à leur impact environnemental et les orienter vers des pratiques numériques plus responsables.

Positionnement

- L'un des éléments clés de notre démarche est de proposer une méthode innovante et facilement applicable pour mesurer l'impact environnemental du numérique. Nous fournissons une approche qui simplifie la tâche de l'évaluation environnementale tout en étant efficace.
- Nous avons également effectué une analyse qualitative approfondie en nous appuyant sur le guide des bonnes pratiques du numérique responsable. Cette analyse aidera à mettre en évidence les domaines où des améliorations sont nécessaires et à fournir des recommandations pratiques.

Contributions

- L'une de nos contributions réside dans l'avancement de la recherche sur l'évaluation environnementale des systèmes d'informations. Nous avons mené des études approfondies pour développer des méthodologies innovantes et des outils spécifiques qui permettront de mieux comprendre et de quantifier l'impact environnemental. Le Référentiel méthodologique d'évaluation environnementale des Systèmes d'Information fait partie de ces recherches.
- Une autre contribution essentielle de notre travail est de fournir une aide concrète aux organisations souhaitant adopter des pratiques plus responsables en matière de numérique. Nous proposons des recommandations pratiques et des directives spécifiques pour aider les entreprises et les institutions à réduire leur empreinte environnementale tout en maintenant leur efficacité opérationnelle.

Chapitre 4

Modélisation

Sommaire

4.1	Introduction	75
4.2	État de l'art	78
4.3	Vision SIAD	80
4.3.1	Base de connaissance	80
4.3.1.1	État de l'art	81
4.3.1.2	Concept	83
4.3.2	Profilage	84
4.3.2.1	État de l'art	84
4.3.2.2	Concept	89
4.3.3	Pilotage	90
4.3.3.1	État de l'art	90
4.3.3.2	Concept	93
4.3.4	Recommandation	94
4.3.4.1	État de l'art	94
4.3.4.2	Concept	97
4.3.5	Architecture	98
4.4	Limites	98
4.5	Conclusion	100

4.1 Introduction

Dans le précédent chapitre, nous avons élaboré une méthodologie dédiée à la mesure, toutefois, il est crucial de noter que la mesure seule ne saurait garantir une compréhension complète et approfondie de la situation. Pour obtenir une perspective plus riche

et opérationnelle, il devient impératif d'intégrer cette méthodologie dans un écosystème plus vaste, un environnement facilement exploitable par les décideurs. C'est ainsi que se profile la nécessité de mettre en place un cadre d'aide à la décision.

Les Cadres d'Aide à la Décision (CAD) [SCP⁺18] se présentent sous la forme de modèles conceptuels ou de structures méthodologiques utilisés pour orienter le processus de prise de décision. Ils offrent un cadre ou une approche structurée pour organiser les informations, identifier les objectifs, les critères et les contraintes, ainsi que pour évaluer les différentes options disponibles. Les CAD adoptent diverses formes, telles que des méthodologies d'analyse multicritère, des arbres de décision, des matrices de décision, etc. Ils demeurent généralement indépendants des systèmes informatiques spécifiques et peuvent être appliqués manuellement ou avec l'aide d'outils logiciels.

En revanche, le Systèmes Interactifs d'Aide à la Décision (SIAD) [Dut12], également connu sous l'acronyme DSS (Decision Support System) en anglais, représente un outil informatique conçu pour mettre à la disposition des décideurs des informations pertinentes, des données, des analyses et des outils de modélisation. Il recourt aux données en temps réel ou historiques afin d'assister les utilisateurs dans la compréhension de la situation actuelle, l'exploration de diverses alternatives, et l'évaluation des conséquences de leurs choix. Le SIAD s'appuie sur des technologies informatiques avancées telles que les bases de données, les logiciels d'analyse, les systèmes experts, entre autres. Son objectif est d'automatiser une partie du processus de prise de décision tout en fournissant des recommandations basées sur des données objectives.

Nous opterons pour le SIAD en raison de sa conception spécifiquement axée sur l'informatique, ce qui revêt une grande importance dans le domaine du numérique responsable.

Ainsi, les SIAD [Dut12] se présentent comme des outils informatiques d'aide au pilotage. Ils peuvent être déployés dans divers secteurs tels que la gestion des opérations [ZMS13], les finances [OEMCEM16], les ressources humaines [BB02] et l'environnement [LDLM⁺12].

Les SIAD se répartissent en trois catégories principales, chacune caractérisée par sa fonctionnalité et son mode d'application.

Ces catégories sont les suivantes : les systèmes de support à la décision [Pay00], qui mettent à disposition des informations et des instruments pour guider les décideurs dans leurs choix ; les systèmes de décision automatisés [Wal19], qui prennent des décisions de manière autonome en se basant sur des algorithmes préétablis ; enfin, les systèmes [Wat85], qui sont des systèmes informatiques exploitant une expertise spécifique pour résoudre des problèmes et prendre des décisions.

Malgré la diversité des solutions d'aide à la décision disponibles, il manque un modèle complet qui puisse être pleinement exploité au sein des organisations dans le contexte du numérique responsable. Pour combler cette lacune, nous présentons une nouvelle approche de modélisation de l'empreinte carbone numérique des organisations, qui s'accompagne d'un système d'aide à la décision basé sur les avancées récentes en la matière. [FAF⁺22] [AJ21] [NAC22].

Notre modèle se concentre sur l'analyse de l'empreinte carbone liée au numérique des

organisations, en tenant compte de divers facteurs tels que la consommation d'énergie des centres de données, les émissions de gaz à effet de serre liées à la production et au transport d'équipements électroniques, ainsi que l'utilisation des ressources numériques par les employés et les clients.

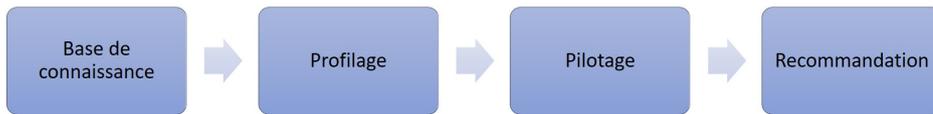


FIGURE 4.1 – Liste des concepts.

En utilisant ces informations, notre modèle permettra aux organisations de prendre des décisions éclairées en matière de responsabilité numérique, en les aidant à comprendre les impacts environnementaux de leurs activités numériques et en les encourageant à adopter des pratiques plus durables. De plus, notre modèle offrira également une transparence aux consommateurs et aux investisseurs sur les efforts de durabilité numérique des organisations, ce qui peut renforcer la confiance et l'engagement envers ces dernières.

Le cadre théorique pour le développement d'un outil d'aide à la décision pour le pilotage de l'empreinte carbone numérique doit tenir compte de plusieurs facteurs clés. Tout d'abord, il doit permettre de mesurer l'empreinte carbone numérique de manière précise et fiable, en intégrant des données sur l'utilisation de l'énergie, les émissions de gaz à effet de serre et les impacts environnementaux liés aux activités numériques.

En outre, le cadre doit inclure des mécanismes pour évaluer les impacts potentiels des différentes stratégies de réduction de l'empreinte carbone numérique, en les évaluant en fonction de critères tels que la viabilité, l'efficacité et les coûts. Cela permettra aux entreprises de prendre des décisions informées en matière de réduction de l'empreinte carbone numérique en fonction de leurs objectifs stratégiques et opérationnels.

Enfin, le cadre théorique doit inclure des mécanismes de recommandation pour aider les entreprises à identifier et à mettre en œuvre les stratégies de réduction de l'empreinte carbone numérique les plus efficaces et les plus viables. Cela peut inclure des suggestions sur les technologies à adopter, les processus à améliorer et les politiques à mettre en place. Les recommandations doivent être basées sur des données actualisées sur les meilleures pratiques et les innovations les plus prometteuses en matière de numérique responsable.

Dans ce chapitre, nous commencerons par dresser un état de l'art des Systèmes d'Aide à la Décision (SIAD). Ensuite, nous examinerons les définitions des divers éléments que nous utiliserons dans notre modèle d'aide à la décision, en effectuant des comparaisons entre différentes méthodes. Après avoir présenté notre SIAD, nous explorerons les perspectives liées au modèle en tant que service (SAAS) [BHL08]. Enfin, nous conclurons ce

chapitre.

4.2 État de l'art

Les Systèmes Interactifs d'Aide à la Décision (SIAD) ont vu le jour simultanément avec l'avènement des ordinateurs personnels, des réseaux informatiques, des bases de données volumineuses, et l'émergence des modèles informatiques [DMRZ⁺21]. La littérature récente offre plusieurs définitions de ces SIAD. Marakas [Mar03] les décrit comme des dispositifs sous le contrôle de décideurs, offrant des outils structurés pour améliorer l'efficacité des processus décisionnels. Turban et al. [TRP05] simplifient cette notion en les qualifiant de "démarche d'aide à la décision", tandis que Morge [Mor07] les définit comme des systèmes informatisés soutenant la prise de décision, englobant les systèmes experts et l'analyse multicritère.

En somme, un SIAD se présente comme une architecture informatique qui assiste l'utilisateur dans ses prises de décision sans le remplacer. Il s'appuie sur des systèmes de traitement de données et de gestion de l'information pour offrir un support interactif. Ainsi, toutes les informations nécessaires pour appréhender un problème sont constamment accessibles, permettant à l'utilisateur d'explorer les données sous divers angles à sa convenance et d'évaluer les conséquences de ses choix. Une définition similaire est proposée par Nelson Ford [For85], qui considère un SIAD comme un système interactif permettant aux décideurs d'utiliser des données et des modèles pour résoudre des problèmes non structurés ou semi-structurés, le distinguant ainsi des systèmes experts (SE) nécessitant des connaissances spécialisées. Cette distinction est également soulignée par Pfeifer et Lüthi [PL87].

Les définitions énoncées par Pfeifer et Lüthi [PL87] ne sont pas exhaustives, mais elles présentent les caractéristiques générales d'un SIAD. Turban et al. [TRP05] précisent que ces systèmes sont spécifiquement conçus pour orienter les décideurs dans des situations semi-structurées et non structurées, en intégrant les données informatisées et les jugements humains. Ils doivent offrir un soutien à tous les niveaux de gestion tout en favorisant la communication entre les décideurs. L'adaptabilité et la flexibilité sont des critères cruciaux, permettant au SIAD de s'adapter à différentes approches de prise de décision. Enfin, il doit être en mesure d'accéder à une variété de sources, de formats et de types de données, tout en pouvant fonctionner de manière autonome ou s'intégrer à l'infrastructure organisationnelle via les technologies Web et réseau.

Pour concevoir un SIAD efficace dans le domaine du numérique responsable, il est essentiel de comprendre les différentes catégories de SIAD disponibles. En 1980, Alter [Alt80] a élaboré une classification basée sur le niveau de contrôle exercé par les SIAD sur la prise de décision. Sa taxonomie a identifié sept catégories distinctes, chacune adaptée à un type spécifique de décision. Toutefois, en raison de la diversité croissante des SIAD, la classification d'Alter a été révisée pour inclure un nouveau cadre englobant les SIAD basés sur les données, les modèles et les connaissances. Cette mise à jour permettra une meilleure compréhension des différents types de SIAD disponibles et aidera à identifier celui qui conviendra le mieux à notre système de prise de décision dans le contexte du

numérique responsable. En utilisant cette taxonomie actualisée, notre système sera en mesure de fournir des informations et des analyses décisionnelles fiables aux décideurs cherchant à adopter des pratiques numériques durables, tout en restant flexible et adaptable pour répondre aux futurs besoins du domaine du numérique responsable.

Razmak et al. ont effectué une classification des SIAD en fonction du domaine d'application, comme illustré dans la table 4.1.

TABLE 4.1 – Classification par domaine des applications des SIAD selon [RA15]

Domaine	Références
Production et gestion de la chaîne d'approvisionnement	[GO98], [TT01], [HMH02], [KKK ⁺ 99],[LDV ⁺ 08], [BCT07], [KR07], [MGA12], [ODPU05], [BSL11], [PDP07], [GZL09], [BR88]
Éducation	[WJ92], [AS00], [ZSW97]
Gestion des ressources humaines	[AGK ⁺ 06], [Con89], [SGKM07], [CBM02], [TFS12]
Finance et investissements	[ZP13], [Lee81] [Lee73], [Eom85], [Sur91], [MAG ⁺ 99], [FC11], [HWFB08]
Immobilier et constructions	[NJCRA07], [LVLK99], [EME05], [ŠKSŽ08], [ARA09]
Aspects environnementaux	[Mak10], [ASAKP97], [RDH ⁺ 01], [PWHF04], [CDH ⁺ 07], [EW08], [CRHMF ⁺ 12], [GWR09], [RIGJM06], [BR13], [ZBB ⁺ 01], [JRIM06], [WHL10], [MBM03], [DFZ03], [TSA07], [GBT ⁺ 09], [SH07]
Santé et services médicaux	[RRG ⁺ 12], [Y ⁺ 96], [S ⁺ 99], [JRIM03]

Notre focus se porte sur le développement d'un système d'aide à la décision dédié à l'évaluation des solutions en faveur du développement durable. Pour ce faire, la communauté scientifique a élaboré divers modèles pour évaluer la durabilité dans des contextes organisationnels et commerciaux. Par exemple, Bottani [BGR17] et son équipe ont conçu un outil basé sur la logique floue, intégrant cette architecture d'inférence. De manière similaire, Zhao [ZZZL19] et ses collaborateurs ont élaboré un cadre théorique pour évaluer l'efficacité des systèmes de développement durable en utilisant l'analyse d'enveloppement de données (DEA).

Actuellement, une variété d'indicateurs est employée dans les systèmes de mesure Bibri et al. [SAS⁺20] bien que des progrès aient été réalisés au niveau européen pour définir un ensemble cohérent d'indicateurs de performance.

Jusqu'en 2015, la recherche se concentrait principalement sur l'analyse de la durabilité dans le contexte du cycle de vie des projets industriels ou de construction. Les modèles identifiés dans la littérature étaient essentiellement quantitatifs en raison de leur aptitude à mesurer et à comparer divers aspects du développement durable, notamment

les modèles de simulation, les modèles économiques, ainsi que les modèles quantitatifs approuvés par les politiques [BLB⁺23].

Cependant, depuis 2015 [BLB⁺23], de nouveaux modèles d'allocation de ressources financières orientés vers la durabilité ont enrichi la littérature scientifique. La plupart de ces modèles se concentrent sur l'application de méthodes de prise de décision multicritères. Par exemple, Marcelino-Sádaba [MSGJPE15] et ses collaborateurs mettent en évidence les interrelations entre la durabilité et la gestion de projet, proposant un cadre conceptuel novateur pour la gestion de projets durables. Ils partent du principe que les produits issus d'un projet doivent être développés selon des critères de durabilité, et que les projets doivent intégrer des processus de gestion durable, des organisations orientées vers la durabilité et des chefs de projet formés à la durabilité. De manière similaire, Dobrovolskienė et Tamošiūnienė [DT16] ont mené une étude intéressante intégrant la durabilité dans le processus décisionnel de sélection d'un portefeuille de projets, en utilisant des méthodes décisionnelles multicritères (MCDM).

L'analyse décisionnelle multicritère (MCDA) constitue une approche multidisciplinaire qui examine les problèmes sous différentes perspectives, notamment économiques, sociales, éthiques, esthétiques, environnementales et culturelles [BLB⁺23].

Néanmoins, à notre connaissance, il n'existe actuellement aucun système d'aide à la décision appliqué au numérique responsable et à ses enjeux.

Ainsi, pour résoudre cette problématique, notre objectif est de créer un système d'aide à la décision spécifiquement dédié au domaine du numérique responsable. Ce système vise à fournir des informations et des analyses décisionnelles fiables aux décideurs engagés dans la promotion de pratiques numériques durables. Il se focalisera sur des enjeux clés tels que l'efficacité énergétique, l'éthique des données et la durabilité des produits numériques, en s'appuyant sur des données en temps réel et des analyses pour offrir des informations décisionnelles pertinentes et opportunes. De plus, il encouragera la communication et la collaboration entre les différents acteurs du domaine du numérique responsable, tout en étant conçu avec flexibilité et adaptabilité pour répondre aux évolutions futures des enjeux et des besoins en matière de numérique responsable.

4.3 Vision SIAD

Pour une compréhension approfondie de notre modèle d'aide à la décision, nous devons commencer par établir des définitions précises pour les bases de connaissances, puis plonger dans une exploration détaillée des concepts clés de profilage, de pilotage et de recommandation, et expliquer nos choix d'outils dans notre SIAD distribué, tout comme dans notre figure 4.1.

4.3.1 Base de connaissance

Nous allons maintenant commencer par détailler le premier bloc de notre SIAD, qui concerne les bases de connaissances (Voir Figure 4.2).

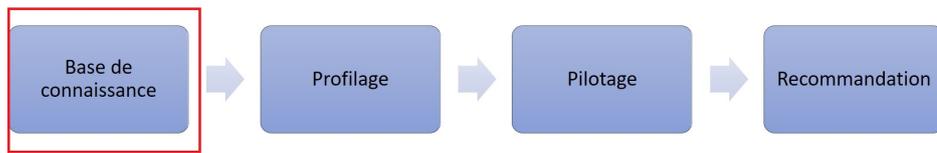


FIGURE 4.2 – Base de connaissance.

4.3.1.1 État de l'art

Diverses approches sont employées dans le domaine des systèmes de base de connaissances, parmi lesquelles figurent les réseaux de neurones artificiels [Kro08], les arbres de décision [KS08] et la programmation logique [KC03] ou encore le CBR [WM94] .

Pour commencer, explorons les réseaux de neurones artificiels. Malgré leur efficacité reconnue dans la résolution de tâches complexes, ils sont associés à des inconvénients significatifs, en particulier leur complexité inhérente. Ces réseaux se composent fréquemment de nombreuses couches et de nombreux paramètres, ce qui les rend difficiles à interpréter. Dans des contextes de prise de décision où la transparence revêt une importance cruciale, cette complexité peut s'avérer un obstacle majeur. De plus, l'évaluation des résultats produits par les réseaux de neurones artificiels peut être ardue en raison de leur opacité.

En ce qui concerne les arbres de décision, leur simplicité de compréhension et de mise en œuvre les distingue des réseaux de neurones artificiels. Toutefois, ils présentent leurs propres limites. Ils ne se prêtent pas aussi bien à la gestion de l'incertitude et des données imprécises, des situations fréquentes dans des environnements complexes et dynamiques. De plus, la sensibilité des arbres de décision aux choix de variables et de seuils peut engendrer des biais dans les décisions.

Enfin, la programmation logique, malgré sa robustesse en matière de raisonnement formel, peut ne pas être la solution optimale pour des problèmes complexes ou imprécis. Elle trouve son plein potentiel dans des domaines où la logique formelle prédomine, mais peut être moins performante lorsque l'on doit traiter des données complexes et faire face à l'incertitude. Pour élargir cette discussion, intégrons également le Case-Based Reasoning (CBR). Cette approche s'appuie sur l'apprentissage tiré de cas antérieurs pour résoudre de nouvelles problématiques. Cette méthode se révèle particulièrement efficace lorsque l'expérience passée constitue une source précieuse d'informations. Cependant, elle peut aussi montrer ses limites si les cas passés ne correspondent pas adéquatement aux situations actuelles ou si la base de cas s'avère insuffisante.

En conclusion, le choix entre les réseaux de neurones, les arbres de décision, la programmation logique et le Case-Based Reasoning dépendra des caractéristiques spécifiques du problème à résoudre ainsi que des préférences concernant la transparence, la robustesse

et l'adaptabilité.

Un tableau de comparaison des avantages et inconvénients avec le CBR peut être vu à la table 4.2.

TABLE 4.2 – Comparaison des méthodes de base de connaissances

Méthode	Avantages	Inconvénients
Réseaux de Neurones Artificiels (RNA)	Efficaces pour résoudre des tâches complexes.	Complexité élevée et manque de transparence.
Arbres de Décision (AD)	Faciles à comprendre et à mettre en œuvre.	Moins adaptés à l'incertitude et à la complexité.
Programmation Logique (PL)	Raisonnement formel solide.	Moins performante pour des problèmes complexes.
Cas-Based Reasoning (CBR)	Approche basée sur l'expérience.	Nécessite une grande base de cas et complexité dans la recherche de cas.

C'est dans ce contexte que le CBR se démarque. Le CBR repose sur l'expérience passée, capitalisant sur des cas similaires pour résoudre de nouveaux problèmes. Cette approche est particulièrement adaptée aux environnements en constante évolution, où les données historiques sont précieuses. De plus, le CBR offre une flexibilité remarquable grâce à ses étapes de récupération, de révision et de réutilisation des cas. Cette flexibilité permet de s'adapter rapidement à des situations changeantes et imprévisibles, ce qui est un atout majeur dans le domaine de la prise de décision.

Un autre avantage significatif du CBR est sa capacité à gérer les incertitudes. Il peut trouver des solutions même lorsque les données ne correspondent pas parfaitement, ce qui est souvent le cas dans des environnements complexes et incertains. Cette adaptabilité est cruciale pour prendre des décisions éclairées malgré les incertitudes persistantes.

De plus, la transparence du CBR est un atout important. Chaque décision prise par le CBR peut être retracée en examinant les cas similaires utilisés pour résoudre le problème. Cette transparence renforce la confiance dans le système d'aide à la décision et permet une analyse approfondie des résultats.

En résumé, la comparaison avec d'autres méthodes met en évidence les avantages distinctifs du CBR en termes de gestion de l'incertitude, de flexibilité, de transparence et de capacité à capitaliser sur l'expérience passée. Ces caractéristiques font du CBR la meilleure option pour notre système d'aide à la décision numérique, et nous sommes convaincus que cette approche contribuera grandement à améliorer nos performances organisationnelles en fournissant des solutions précises et personnalisées en temps réel.

4.3.1.2 Concept

Dans le chapitre, Nous avons décidé d'utiliser le raisonnement par cas, "Case-Based Reasoning" en anglais (CBR), [WM94] comme méthode de soutien à la prise de décision. Le CBR peut offrir des informations sur l'intégration des pratiques environnementales dans le système d'information (SI), en prenant en compte les aspects sociaux, environnementaux, et économiques de l'informatique. De plus, il peut contribuer à la proposition de solutions visant à déployer des infrastructures informatiques respectueuses de l'environnement, tout en réduisant les coûts économiques et tenant compte des considérations sociales.

Le CBR, initialement introduit par Roger et Al. en 1982 [Sch82] dans le domaine de l'intelligence artificielle, est un paradigme évolutif pour le développement de systèmes intelligents qui améliorent l'efficacité de la prise de décision dans des situations non structurées et complexes. Il résout de nouveaux problèmes en appliquant des solutions éprouvées à des problèmes similaires précédents. Dans le cadre du CBR, une base de cas stockée est la principale source de connaissances, permettant aux praticiens de l'informatique d'utiliser l'expérience passée pour sélectionner le cas le plus similaire au problème actuel, en partant du principe que des problèmes similaires ont des solutions similaires. Cette recherche contribue à l'étude de la durabilité dans le contexte de l'entreprise collaborative en utilisant le CBR pour soutenir les praticiens de l'informatique dans la prise de décision, favorisant ainsi l'adoption de pratiques environnementales et la réduction des émissions de CO₂e.

Dans le cadre du concept numérique responsable, le CBR peut jouer un rôle de premier plan en proposant des solutions rapides et fiables à des problèmes tels que la gestion de l'énergie, la protection de la vie privée et la sécurité des données.

Les méthodes existantes de CBR comprennent les étapes suivantes [RW16] :

- Récupération de cas : cette première étape du processus CBR consiste à rechercher des cas similaires dans la base de données pour résoudre le problème en cours.
- Adaptation de cas : une fois un cas similaire identifié, l'algorithme adapte les informations du cas pour les rendre pertinentes pour la situation actuelle.
- Évaluation de la solution : le CBR évalue la qualité de la solution proposée en tenant compte des informations du cas et de la situation actuelle.
- Sélection de la solution : enfin, le CBR sélectionne la meilleure solution parmi les options disponibles.

Pour intégrer le modèle CBR dans la prise de décision en matière de numérique responsable, il est essentiel de construire une base de données de cas antérieurs, régulièrement mise à jour pour refléter les dernières informations. Ce modèle peut être intégré aux systèmes informatiques existants pour en faciliter l'utilisation, permettant ainsi aux organisations de prendre des décisions éclairées. Il nécessite une maintenance régulière pour garantir son efficacité et sa pertinence.

Il est impératif que la base de cas du système CBR soit suffisamment vaste et diversifiée pour trouver des cas similaires à différentes situations. La validation et la mise à jour fréquente des cas sont également essentielles pour assurer la qualité des résultats. Les incertitudes peuvent être gérées grâce à des techniques d'inférence probabiliste. De plus, les systèmes CBR peuvent être associés à d'autres méthodes d'apprentissage automatique pour améliorer leur performance [RS13].

Les applications des systèmes CBR couvrent divers domaines, tels que la planification, la prévision, et la gestion de projet. Les systèmes de recommandation basés sur le CBR proposent des produits ou services similaires en fonction des préférences des utilisateurs. Ils peuvent être intégrés facilement aux systèmes existants pour en faciliter l'utilisation.

Néanmoins, pour garantir l'efficacité des systèmes de recommandation basés sur le CBR, il est essentiel de disposer d'une base de données de cas suffisamment étendue et diversifiée.

Enfin, il est important de noter que les systèmes de recommandation basés sur le CBR ne peuvent pas toujours tenir compte de toutes les variables perturbatrices, telles que les tendances du marché ou les événements mondiaux, qui peuvent influencer les préférences des utilisateurs. Par conséquent, il est souvent nécessaire de combiner ces systèmes avec d'autres techniques pour maximiser leur efficacité.

En résumé, le CBR est une approche efficace pour fournir des recommandations personnalisées en prenant en compte les préférences des utilisateurs et en s'appuyant sur des données historiques. Toutefois, il est crucial de reconnaître ses limites et de le compléter par d'autres méthodes pour obtenir les meilleurs résultats.

4.3.2 Profilage

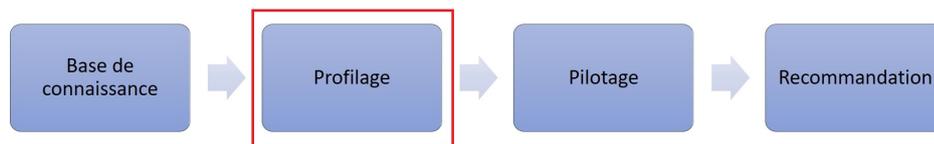


FIGURE 4.3 – Profilage.

Ensuite, nous allons détailler le bloc de profilage, qui nous permettra, au sein de notre SIAD, de nous comparer à autrui (Voir Figure 4.3).

4.3.2.1 État de l'art

Pour étendre le raisonnement initié par l'analyse des cas où un décideur est en mesure de prendre des décisions, il est impératif qu'il puisse désormais se comparer à d'autres.

Le domaine du profilage informatique englobe un vaste éventail de techniques visant à élaborer des modèles de comportement ou de préférences à partir des données recueillies auprès d'individus ou de groupes. Ces méthodes comprennent l'analyse de données (corrélations) [WW16], l'étude des réseaux sociaux [BCRR10], l'analyse de séquences [GSS91], l'apprentissage automatique [Str05], le clustering, entre autres. Chacune de ces approches offre des avantages spécifiques en fonction du contexte d'application, que ce soit pour la personnalisation de recommandations [ZZQ⁺23], la détection de fraudes [BH02], l'analyse des tendances ou la compréhension des comportements humains [RPD⁺11]. Ces différentes techniques contribuent ainsi à la diversité et à la puissance du profilage informatique dans divers domaines [SVP14]. Dans cette perspective, nous allons procéder à un examen approfondi des méthodes d'analyse de corrélation et de clustering.

Le clustering [OES07] est une technique de profilage qui vise à regrouper des individus ou des groupes en fonction de leurs caractéristiques similaires. Cette méthode est couramment utilisée dans les domaines tels que la publicité ciblée, la détection de fraude, la recommandation de produits, ou encore la sélection de personnel.

Pour réaliser le clustering, des données sont collectées auprès d'utilisateurs provenant de divers canaux, notamment les réseaux sociaux, les sites web, les applications mobiles, les enquêtes et les capteurs. Ensuite, une analyse de corrélation est effectuée en utilisant des coefficients tels que Pearson afin d'identifier des schémas de comportement et des préférences récurrents au sein de ces données.

Ces motifs identifiés servent ensuite de base pour segmenter les individus en clusters homogènes, regroupant des personnes partageant des caractéristiques similaires telles que l'âge, le sexe, la localisation, les centres d'intérêt, les habitudes d'achat et le niveau d'éducation.

Une fois les clusters établis, des profils détaillés de chaque groupe sont élaborés, permettant ainsi de cibler des publicités, des offres ou des produits spécifiques. Par exemple, une entreprise de vente en ligne peut personnaliser ses recommandations en fonction des préférences et des besoins de chaque cluster.

Cependant, il est crucial de souligner que l'utilisation du clustering comporte des risques éthiques, comme évoqué dans l'étude de McRae et al. [McR11]. Pour garantir une utilisation responsable, il est impératif de se conformer aux lois et aux règlements relatifs à la protection des données et à la transparence vis-à-vis des individus concernant l'utilisation de leurs données. De plus, il est essentiel de maintenir la qualité et la fiabilité des données utilisées dans le processus de clustering, tout en veillant à l'équité et à l'explicabilité des algorithmes employés.

L'évaluation de la corrélation revêt une importance cruciale lors de la sélection des critères à employer lors du processus de clustering [Mar68], jouent un rôle de premier plan dans le domaine de la statistique en ce qui concerne l'analyse de la relation entre deux variables quantitatives. Ces mesures permettent d'évaluer la vigueur et la direction de cette relation, fournissant ainsi un éclairage précieux pour une meilleure compréhension des interconnexions entre divers phénomènes ou variables. Trois mesures de corrélation couramment employées sont la corrélation de Pearson, la corrélation de Spearman et la corrélation de Kendall.

La corrélation de Pearson [BCH08] mesure la force et la direction de la relation linéaire entre deux variables en utilisant la covariance entre les variables et leurs écarts types. La corrélation de Spearman mesure la force et la direction de la relation monotone entre les variables en utilisant les rangs des observations. La corrélation de Kendall [Abd07a] mesure la force et la direction de la relation de rang entre les variables en utilisant le nombre de couples d'observations concordants et discordants.

Corrélation de Pearson [Sed12] : mesure la force et la direction de la relation linéaire entre deux variables. La formule mathématique est donnée par :

$$\rho_{X,Y} = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y}$$

où $\text{cov}(X,Y)$ est la covariance entre les variables X et Y et σ_X et σ_Y sont les écarts types des variables X et Y .

Corrélation de Spearman [BCH08] : mesure la force et la direction de la relation monotone (croissante ou décroissante) entre deux variables. La formule mathématique est donnée par :

$$\rho_S = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

où d_i est la différence entre les rangs des observations i dans les deux variables, et n est le nombre d'observations.

Corrélation de Kendall [Abd07a] : mesure la force et la direction de la relation de rang entre deux variables. La formule mathématique est donnée par :

$$\tau = \frac{2(C - D)}{n(n - 1)/2}$$

où C est le nombre de couples d'observations qui sont concordants (ont le même ordre) dans les deux variables, D est le nombre de couples qui sont discordants (ont un ordre différent) et n est le nombre d'observations.

Les mesures de corrélation peuvent être utiles pour comprendre la relation entre des variables quantitatives dans différents domaines. Par exemple, en examinant les données sur la consommation d'énergie d'une organisation, une mesure de corrélation peut être utilisée pour déterminer si cette consommation est liée à d'autres facteurs tels que la taille de l'organisation ou le nombre d'employés. Si une forte corrélation est trouvée, cela peut aider à cibler les zones à améliorer pour réduire l'empreinte numérique CO2e de l'organisation.

Chacune de ces mesures a ses avantages et inconvénients (Voir Table 4.3). La corrélation de Pearson est sensible aux valeurs aberrantes et suppose une relation linéaire. La corrélation de Spearman est robuste aux valeurs aberrantes et adaptée aux relations monotones, tandis que la corrélation de Kendall est également robuste aux valeurs aberrantes et convient aux relations non linéaires.

En conclusion, le choix entre ces mesures dépendra de la nature des données et de la relation que l'on cherche à étudier. Il est souvent recommandé d'utiliser plusieurs

méthodes de corrélation pour obtenir une vue d'ensemble complète de la relation entre les variables.

Méthode	Avantages	Inconvénients
Corrélation de Pearson	Sensible aux relations linéaires. Convient aux relations proportionnelles.	Sensible aux valeurs aberrantes. Suppose une relation linéaire.
Corrélation de Spearman	Robuste aux valeurs aberrantes. Adaptée aux relations monotones.	Moins sensible aux relations linéaires. Peut ne pas détecter des relations non monotones.
Corrélation de Kendall	Robuste aux valeurs aberrantes. Adaptée aux relations non linéaires.	Non sensible aux relations linéaires. Moins efficace pour les grandes séries de données.

TABLE 4.3 – Avantages et inconvénients des méthodes de corrélation

De plus, afin d'optimiser le processus de clustering, il est important de souligner que les mesures de corrélation peuvent jouer un rôle crucial en aidant à identifier les variables les plus pertinentes à inclure dans ces analyses. En effet, elles permettent de trouver les meilleurs caractéristiques pour le clustering, en mettant en évidence les relations les plus significatives entre les différentes variables. Par conséquent, l'utilisation conjointe des mesures de corrélation et des algorithmes de clustering peut grandement renforcer la capacité des organisations à prendre des décisions éclairées dans leur quête de durabilité.

Il existe plusieurs algorithmes de clustering [MC87], chacun ayant ses propres avantages et inconvénients en termes de complexité, de précision et d'interprétabilité. Les algorithmes les plus courants incluent :

K-means [Bur09] : c'est un algorithme itératif qui divise un ensemble de données en k clusters en utilisant la moyenne arithmétique. La formule mathématique pour trouver le centre de chaque cluster est donnée par :

$$\mu_j = \frac{1}{|C_j|} \sum_{x_i \in C_j} x_i$$

où μ_j est le centre du cluster j , C_j est l'ensemble des points appartenant au cluster j , et $|C_j|$ est le nombre de points dans le cluster j .

Clustering hiérarchique [NN16] : cet algorithme crée une hiérarchie de clusters en regroupant d'abord les deux points les plus proches en un seul cluster, puis en continuant à fusionner les clusters les plus proches jusqu'à ce qu'il ne reste plus qu'un seul cluster ou un nombre spécifié de clusters. Il existe deux approches pour le clustering hiérarchique : l'agglomération et la division.

La formule mathématique de l'analyse de regroupement hiérarchique est définie comme suit :

$$d_{ij} = \|x_i - x_j\|_p$$

où :

d_{ij} est la distance entre les observations i et j , x_i et x_j sont les vecteurs d'observations pour les observations i et j , $\|\cdot\|_p$ est la norme de Minkowski, qui peut être définie comme :

$$\|x\|_p = \left(\sum_{k=1}^n |x_k|^p \right)^{\frac{1}{p}}$$

DBSCAN [KRA⁺14] : cet algorithme utilise une approche de densité pour regrouper les points proches en clusters. La formule mathématique pour déterminer si un point appartient à un cluster est donnée par :

$$N_\epsilon(p) \geq \text{MinPts}$$

où $N_\epsilon(p)$ est le nombre de points à une distance inférieure ou égale à ϵ de p , et MinPts est le nombre minimum de points nécessaires pour former un cluster.

GMM (Modèle de mélange gaussien) [R⁺09] : cet algorithme utilise une approche probabiliste pour modéliser chaque cluster sous la forme d'une distribution gaussienne. La formule mathématique pour trouver les paramètres de chaque distribution gaussienne est donnée par :

$$\theta = \mu_j, \Sigma_j, \pi_j = \arg \max_{\theta} \prod_{i=1}^N \sum_{j=1}^k \pi_j \mathcal{N}(x_i | \mu_j, \Sigma_j)$$

où θ est le vecteur de paramètres, μ_j et Σ_j sont respectivement la moyenne et la matrice de covariance pour le cluster j , π_j est la proportion d'éléments dans le cluster j , N est le nombre total d'éléments dans les données, k est le nombre de clusters, et $\mathcal{N}(x_i | \mu_j, \Sigma_j)$ est la fonction de densité de probabilité normale pour x_i donnée les paramètres μ_j et Σ_j .

Il est important de noter que le choix de l'algorithme de clustering dépendra des données et des objectifs spécifiques de l'analyse. Par exemple, K-means peut être rapide et simple, mais peut souffrir de la sensibilité aux choix initiaux et de la difficulté à gérer des formes de clusters complexes. D'autre part, DBSCAN peut gérer des formes complexes de clusters, mais peut souffrir de la difficulté à choisir les bonnes valeurs pour les hyperparamètres ϵ et MinPts.

Ainsi, le clustering est un outil puissant pour explorer et comprendre la structure des données. Il existe plusieurs algorithmes de clustering avec leurs propres avantages et inconvénients (Voir Table 4.4), et le choix de l'algorithme dépendra des données et des objectifs de l'analyse. Les algorithmes populaires incluent K-means, clustering hiérarchique, DBSCAN et GMM, chacun ayant sa propre formule mathématique associée.

Lorsque l'on compare ces différentes méthodes, le clustering K-Means est souvent privilégié pour les systèmes d'aide à la décision numériques responsables en raison de sa simplicité, de sa rapidité et de ses performances dans le traitement de grandes quantités de

données. Cependant, le choix de la méthode de clustering dépendra du contexte spécifique du système d'aide à la décision numérique, et il est important de tenir compte d'autres facteurs tels que les hypothèses sous-jacentes des données, la complexité de la mise en œuvre, les critères de sélection des clusters et les contraintes de temps de traitement.

TABLE 4.4 – Comparatif avantages et inconvénients des techniques de clustering

Technique	Avantages	Inconvénients
K-means	Rapidité et simplicité d'utilisation. Facilité à paralléliser pour améliorer les performances.	Sensibilité aux choix initiaux. Difficulté à gérer les formes complexes de clusters.
Clustering hiérarchique	Capacité à visualiser la structure des clusters en utilisant un dendrogramme. Flexibilité pour gérer des formes complexes de clusters.	Lenteur pour de grandes quantités de données. Difficulté à choisir le nombre optimal de clusters.
DBSCAN	Capacité à gérer des formes complexes. Capacité à trouver des clusters de densité variable.	Difficulté à choisir les bonnes valeurs pour les hyperparamètres.
GMM	Capacité à gérer des distributions complexes de clusters, telles que des clusters de forme libre. Flexibilité pour gérer des données multidimensionnelles.	Lenteur pour de grandes quantités de données. Difficulté à trouver les bons paramètres pour les distributions des clusters.

Nous avons sélectionné la méthode de clustering, en mettant particulièrement en avant l'algorithme de K-Means. De plus, nous avons opté pour l'utilisation du coefficient de Pearson afin d'évaluer les corrélations entre les données. Cette décision découle d'une réflexion, étayée par des arguments qui soulignent la pertinence de cette approche dans notre contexte spécifique.

4.3.2.2 Concept

Dans un premier temps, le choix du clustering K-Means s'avère judicieux en raison de sa simplicité et de son efficacité. Il s'adapte parfaitement à notre ensemble de données, nous permettant ainsi de regrouper des observations similaires en clusters cohérents, ce qui facilite la compréhension de la structure sous-jacente de nos données. De plus, cette méthode offre une grande flexibilité, nous permettant de sélectionner le nombre de clusters approprié en fonction de nos besoins.

Ensuite, le coefficient de Pearson revêt une importance pour évaluer les corrélations

entre nos variables. En quantifiant la relation linéaire entre deux variables, il nous permet de mesurer à la fois la force et la direction de leurs interactions. Cette mesure nous aidera à identifier les relations significatives entre les différentes caractéristiques de nos données.

Enfin, notre choix en faveur de ces méthodes est renforcé par leur large utilisation et leur validation au sein de la communauté scientifique. Le clustering K-Means et le coefficient de Pearson sont des approches bien établies, largement documentées et éprouvées dans de nombreuses disciplines [DGJ16].

En conclusion, Ces méthodes s’adaptent parfaitement à notre contexte spécifique et bénéficient du soutien de leur efficacité, et de leur flexibilité. Elles joueront un rôle essentiel dans notre quête visant à extraire des informations précieuses de nos données et à éclairer notre compréhension de notre domaine d’étude.

4.3.3 Pilotage

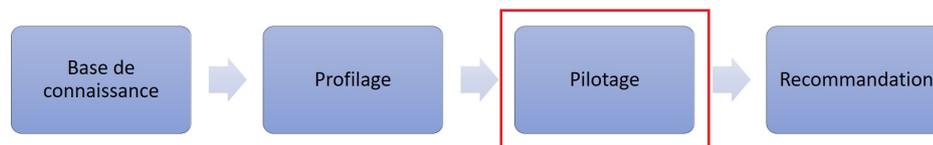


FIGURE 4.4 – Pilotage.

Dans l’avant-dernier concept de notre bloc, nous allons explorer le concept de pilotage (Voir Figure 4.4), et plus particulièrement, la prédiction.

4.3.3.1 État de l’art

Le lien entre prédiction et pilotage se manifeste clairement lorsque nous comprenons que la prédiction est essentielle pour alimenter le processus de pilotage. En effet, le pilotage s’appuie sur les prédictions ainsi que sur les données en temps réel pour prendre des décisions éclairées et guider les actions présentes et futures. En d’autres termes, il consiste à surveiller de près les indicateurs clés et à ajuster les stratégies en fonction des informations disponibles, tel que souligné par Van et al. (1997) [VLMvW97].

La prédiction, quant à elle, repose sur la capacité à anticiper des événements futurs en utilisant des données historiques. Que ce soit pour anticiper les tendances du marché, prédire les résultats sportifs ou estimer les ventes de produits, les techniques de prédiction les plus couramment employées incluent les modèles statistiques (Davison, 2003) [Dav03], les réseaux de neurones (Laughlin, 2003) [LS03], ainsi que les algorithmes d’apprentissage automatique (Bonaccorso, 2017) [Bon17]. Ces prédictions fournissent les

données essentielles nécessaires au processus de pilotage, créant ainsi un lien inextricable entre la prévision et l'action stratégique.

Les modèles statistiques reposent sur des équations mathématiques décrivant les relations entre les variables, ajustées grâce à des données historiques pour prédire les événements futurs. Les réseaux de neurones, quant à eux, s'inspirent du fonctionnement du cerveau humain pour apprendre à partir de données passées et ainsi prédire des événements futurs.

En parallèle, les algorithmes d'apprentissage automatique, notamment les arbres de décision et les méthodes de forage de données, identifient les tendances et les relations cachées dans les données, ouvrant la voie à la prédiction d'événements futurs.

La prédiction est un domaine en constante évolution, où de nouvelles techniques et outils émergent régulièrement pour améliorer la précision des prévisions. Grâce aux avancées en traitement et analyse des données, ainsi qu'en apprentissage automatique, les entreprises et organisations exploitent de plus en plus ces méthodes pour améliorer leurs décisions et performances.

L'état de l'art dans le domaine de la prédiction s'est considérablement développé ces dernières années grâce à l'évolution des techniques d'apprentissage automatique et à l'explosion des données disponibles. Parmi les approches de prédiction, les séries temporelles occupent une place centrale en raison de leur capacité à modéliser et à anticiper les tendances dans des données qui évoluent avec le temps. Les séries temporelles permettent de capturer des dépendances temporelles complexes, ce qui les rend particulièrement adaptées à la prévision dans des domaines tels que la finance, la météo, la santé et la gestion de la chaîne d'approvisionnement.

Plusieurs études récentes confirment l'efficacité des méthodes de prédiction. Par exemple, une recherche menée par Makridakis et al. [MSA18] a comparé plusieurs modèles de prévision, et les méthodes basées sur les séries temporelles et le machine learning ont obtenu de très bons résultats dans de nombreux cas. De plus, l'essor de l'apprentissage profond a permis de développer récemment des réseaux de neurones récurrents (RNN) et des réseaux de neurones convolutifs (CNN) [She20].

Nous nous focaliserons sur les séries temporelles, car celles-ci sont spécifiquement conçues pour leur capacité à modéliser et anticiper les tendances dans des données qui évoluent avec le temps, ce qui est largement approuvé dans la littérature scientifique [SSS00] [Tsa05] [BD02] [HA18] [BJRL15].

Les séries temporelles, mesurant une variable à intervalles réguliers, servent à étudier les tendances au fil du temps, notamment dans des domaines tels que l'économie, la finance, la météo et les sciences sociales. Elles permettent également de prédire des tendances futures dans des secteurs comme la finance, la gestion des opérations ou la prévision météorologique [EA12].

Il existe plusieurs technologies pour l'analyse des séries chronologiques, chacune présentant ses avantages et ses inconvénients (Voir Table 4.5). Cette comparaison examine quelques-unes des plus couramment utilisées.

Modèle ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average)

L'ARIMA [SSSS17] est un modèle statistique adapté à la prédiction des séries chro-

nologiques, capable de traiter les tendances et les saisons des données. L'un de ses atouts majeurs réside dans sa capacité à fonctionner efficacement avec des ensembles de données limités, ce qui en fait un choix prisé pour les séries chronologiques peu fréquentes. Cependant, sa configuration peut s'avérer complexe et son utilisation peut représenter un défi pour les utilisateurs moins expérimentés. Les équations mathématiques associées à l'ARIMA sont formulées comme suit :

$$(1 - \phi_1 B)(1 - \phi_2 B^2) \dots (1 - \phi_p B^p)(y_t - \mu) = \theta(B)e_t$$

Ici, B représente l'opérateur de décalage, ϕ les coefficients autorégressifs, θ les coefficients de moyenne mobile, μ la moyenne, e_t le terme d'erreur, et y_t la valeur de la série chronologique à un instant donné.

Réseaux de Neurones Récurrents (RNN)

Les RNN [She20] sont une catégorie de réseaux de neurones adaptée à l'analyse des séries chronologiques. Leur capacité à conserver l'information passée à travers les couches du réseau les rend particulièrement efficaces pour les tâches de prédiction chronologique. Cependant, ils nécessitent généralement des ensembles de données substantiels pour obtenir des performances optimales et peuvent présenter une complexité de configuration et d'utilisation. Un RNN est caractérisé par une séquence d'étapes de calcul récurrentes, où chaque étape calcule une sortie h_t en fonction de l'entrée courante x_t et de la sortie précédente h_{t-1} :

$$h_t = f(x_t, h_{t-1})$$

Dans cette équation, f est une fonction d'activation non linéaire transformant la combinaison de x_t et h_{t-1} en une nouvelle sortie h_t . Cette sortie peut être exploitée pour prédire des valeurs futures ou accomplir des tâches de classification. Les RNN sont entraînés par rétropropagation du gradient pour ajuster les poids des connexions neuronales et minimiser la fonction de perte du modèle. Une variante populaire est le LSTM (Long Short-Term Memory), qui emploie une cellule mémoire pour stocker des informations à long terme et résoudre les problèmes de disparition du gradient rencontrés dans les RNN classiques. Une autre variante, le GRU (Gated Recurrent Unit), utilise une porte de réinitialisation pour contrôler la gestion des informations à court et à long terme dans la cellule mémoire.

Modèles de Machine Learning

En parallèle, des modèles de machine learning [Mah20] tels que les régressions linéaires, les arbres de décision, et les algorithmes de forêt aléatoire peuvent également être appliqués aux séries chronologiques. Ces modèles offrent une grande performance et flexibilité, mais nécessitent généralement des ensembles de données substantiels pour produire des résultats solides. Par exemple, l'Elastic Net, une méthode de régularisation en apprentissage automatique, s'avère utile pour prévenir le surapprentissage des modèles linéaires. La fonction de perte de l'Elastic Net [GNGGPS21] est formulée comme suit :

$$\mathcal{L}(\beta) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^p \beta_j x_{ij})^2 + \lambda_1 \sum_{j=1}^p |\beta_j| + \lambda_2 \sum_{j=1}^p \beta_j^2$$

Dans cette équation, n représente le nombre d'observations, p le nombre de variables indépendantes, y_i la variable dépendante pour la i -ème observation, x_{ij} la valeur de la j -ème variable indépendante pour la i -ème observation, β_0 l'ordonnée à l'origine, β_j le coefficient de régression pour la j -ème variable indépendante, et λ_1 ainsi que λ_2 sont des paramètres de régularisation. Le premier terme dans la fonction de perte exprime la somme des carrés des différences entre les valeurs prédites \hat{y}_i et les valeurs réelles y_i . Le deuxième terme constitue une pénalité L1 (Lasso) encourageant les coefficients à devenir exactement nuls, favorisant ainsi la sélection de variables. Le troisième terme représente une pénalité L2 (Ridge) qui incite les coefficients à être petits, mais non nuls, améliorant ainsi la stabilité et la généralisation du modèle.

TABLE 4.5 – Comparaison des méthodes d'analyse de séries temporelles

Méthode	Avantages	Inconvénients
ARIMA	Capable de modéliser tendances et saisons. Efficace avec des données limitées.	Configuration complexe. Utilisation difficile pour les utilisateurs inexpérimentés.
RNN	Capables de conserver l'information passée. Efficaces pour la prédiction chronologique.	Nécessitent des données substantielles. Configuration et utilisation complexes.
Machine Learning	Grande performance et flexibilité. Peuvent utiliser des techniques de régularisation.	Nécessitent généralement des données substantielles. Ajustement des hyperparamètres parfois nécessaire.

Nous avons choisi d'adopter la méthode ARIMA (*Auto-Regressive Integrated Moving Average*) pour l'analyse de nos séries chronologiques, et cette décision est étayée par plusieurs arguments qui en font l'approche optimale pour notre contexte spécifique.

4.3.3.2 Concept

En premier lieu, ARIMA est une méthode éprouvée dans l'analyse des séries chronologiques. Elle jouit d'une reconnaissance étendue au sein de la communauté académique et professionnelle en raison de sa capacité à modéliser efficacement les relations temporelles entre les données. En optant pour ARIMA, nous nous appuyons sur une base solide en matière d'analyse statistique, élément essentiel pour garantir la crédibilité de nos résultats.

De plus, ARIMA s'adapte particulièrement bien aux séries chronologiques caractérisées par des données limitées. Dans notre situation, où nous sommes susceptibles de

traiter des ensembles de données de taille réduite, cette méthode se révèle être un choix judicieux. Elle nous permet d'extraire des informations significatives à partir de données restreintes, une situation fréquente dans le domaine de la gestion opérationnelle.

Un autre atout majeur de l'utilisation d'ARIMA réside dans sa capacité à anticiper les tendances futures. En analysant les coefficients d'autorégression et de moyenne mobile, nous sommes en mesure non seulement de comprendre les tendances passées, mais aussi de formuler des prévisions fiables pour l'avenir. Cette capacité revêt une importance cruciale dans le processus décisionnel, car elle nous permet de planifier de manière éclairée et d'ajuster nos opérations en fonction des tendances anticipées.

Enfin, ARIMA offre une approche transparente pour détecter les anomalies et les événements imprévus. En surveillant les résidus de nos modèles ARIMA, nous pouvons rapidement repérer tout écart par rapport aux prévisions, ce qui nous permet de réagir promptement aux perturbations et de minimiser les risques potentiels.

En résumé, notre choix d'utiliser la méthode ARIMA pour l'analyse de nos séries chronologiques repose sur sa robustesse, sa pertinence pour des données limitées, sa capacité prédictive, et sa sensibilité à la détection d'anomalies. Cette méthode constitue la meilleure option pour notre situation, offrant une base solide pour la prise de décision dans le domaine de la gestion opérationnelle.

4.3.4 Recommandation

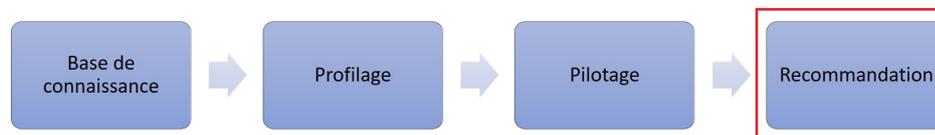


FIGURE 4.5 – Recommandation.

Et pour conclure, nous allons détailler le bloc de recommandations de notre SIAD (Voir Figure 4.5).

4.3.4.1 État de l'art

En dernier lieu, l'objectif principal de la recommandation, comme décrit dans l'étude de Lu et al. [LMY⁺12], est de proposer des suggestions pertinentes à un utilisateur en se basant sur ses préférences et son historique d'utilisation. Ces recommandations peuvent englober divers types de contenu, tels que des films, des livres, des produits ou des services, dans le but d'améliorer l'expérience utilisateur en offrant des options qui correspondent à ses goûts et à ses besoins.

Les algorithmes de recommandation mettent en œuvre diverses techniques pour analyser ces données et identifier des tendances et modèles. Ils peuvent recourir à l'apprentissage automatique pour évaluer les données historiques de l'utilisateur et anticiper ses préférences à venir, ou encore au filtrage collaboratif pour identifier des utilisateurs similaires et proposer des choix appréciés par ces pairs.

Plusieurs types d'algorithmes de recommandation existent [DSD17].

Les systèmes de recommandation trouvent leur utilisation dans de multiples domaines, notamment les médias en ligne, le commerce électronique, les réseaux sociaux, les services de streaming musical et vidéo, ainsi que dans des secteurs tels que la santé, la finance et les sciences de la vie. Ils ont le potentiel d'améliorer l'expérience utilisateur, d'accroître la satisfaction et la conversion, et de renforcer l'engagement et la fidélisation des utilisateurs.

Plusieurs approches sont employées pour créer des systèmes de recommandation, telles que le filtrage collaboratif, le filtrage basé sur le contenu, et la recommandation hybride.

Pour approfondir notre compréhension, chaque méthode comporte ses propres avantages et inconvénients distincts. Parmi les approches les plus fréquemment employées figurent :

1. Filtrage collaboratif (CF) [SK09] : Cette approche se fonde sur les interactions passées entre utilisateurs et éléments pour recommander des éléments similaires à ceux appréciés par un utilisateur par le passé. Ses avantages incluent son efficacité avec de grandes quantités de données et sa capacité à suggérer des éléments inhabituels. Toutefois, elle ne tient pas compte des caractéristiques spécifiques des éléments et peut recommander des éléments populaires mais non pertinents.

La formule mathématique du filtrage collaboratif se présente comme suit :

$$\hat{r}_{u,i} = \frac{\sum_{v \in U} \text{sim}(u,v) r_{v,i}}{\sum_{v \in U} \text{sim}(u,v)} \quad (4.1)$$

où :

$\hat{r}_{u,i}$ représente la prédiction de l'évaluation de l'utilisateur u pour l'élément i , U désigne l'ensemble des utilisateurs, $\text{sim}(u,v)$ indique la similarité entre l'utilisateur u et l'utilisateur v , $r_{v,i}$ correspond à l'évaluation de l'utilisateur v pour l'élément i .

La mesure de similarité entre deux utilisateurs peut être calculée selon diverses méthodes telles que la corrélation de Pearson, la distance euclidienne ou la similarité cosinus.

2. Filtrage basé sur les contenus (CBF) [VMVS00] : Cette approche se fonde sur les caractéristiques des éléments pour recommander des éléments similaires en fonction de ces caractéristiques. Elle prend en compte les caractéristiques spécifiques des éléments et peut recommander des éléments pertinents même si l'utilisateur n'a pas d'historique d'interactions. Cependant, elle nécessite une grande quantité de données sur les caractéristiques des éléments et peut ne pas tenir compte des préférences des utilisateurs.

La formule mathématique du filtrage basé sur les contenus est la suivante :

$$\hat{r}_{u,i} = \sum_{j \in I_u} w_{i,j} r_{u,j} \quad (4.2)$$

où :

$\hat{r}_{u,i}$ est la prédiction de l'évaluation de l'utilisateur u pour l'élément i , I_u représente l'ensemble des éléments évalués par l'utilisateur u , $r_{u,j}$ correspond à l'évaluation de l'utilisateur u pour l'élément j , $w_{i,j}$ représente le poids de similarité entre l'élément i et l'élément j , calculé à partir de leurs caractéristiques communes.

Le calcul des poids de similarité peut s'effectuer selon diverses mesures telles que la corrélation de Pearson, la distance cosinus ou la similarité Jaccard.

3. Recommandation hybride [CHZ⁺20] : Cette approche combine différentes techniques de recommandation pour offrir des suggestions personnalisées aux utilisateurs. Ils visent à exploiter les avantages des différentes approches de recommandation, telles que la recommandation collaborative, la recommandation basée sur le contenu et d'autres méthodes, pour améliorer la précision et la pertinence des recommandations.

Il n'existe pas une équation unique pour décrire un système de recommandation hybride, car il peut prendre diverses formes en fonction de la manière dont les différentes techniques sont combinées.

Nous pouvons retrouver les avantages et inconvénients en 4.6.

TABLE 4.6 – Avantages et inconvénients des méthodes de recommandation

Méthode	Avantages	Inconvénients
Filtrage collaboratif (CF)	Peut suggérer des éléments inhabituels. Utilise les interactions passées entre utilisateurs.	Ne tient pas compte des caractéristiques spécifiques des éléments. Peut recommander des éléments populaires mais non pertinents.
Filtrage basé sur les contenus (CBF)	Prend en compte les caractéristiques spécifiques des éléments. Peut recommander des éléments pertinents sans historique d'interactions.	Nécessite une grande quantité de données sur les caractéristiques des éléments. Peut ne pas tenir compte des préférences des utilisateurs.
Recommandation hybride	Exploite les avantages de différentes approches de recommandation. Améliore la précision et la pertinence des recommandations.	Plus complexe à mettre en œuvre en raison de l'absence d'une équation unique. Nécessite une combinaison efficace des techniques pour fonctionner.

Nous avons décidé d'adopter la méthode du filtrage collaboratif en tant que pilier de notre système de recommandation. Dans le cadre de nos expérimentations dans le filtrage collaboratif que nous verrons après, nous utiliserons la technique du SVD [Abd07b].

Le SVD, comme nous pouvons le définir, est une factorisation matricielle qui permet de décomposer une matrice en trois matrices plus simples, généralement notées U , Σ (Sigma), et V^T (la transposée de V). Si nous avons une matrice A de dimensions $m \times n$, alors la SVD s'exprime comme suit :

$$A = U\Sigma V^T$$

- U est une matrice orthogonale de dimension $m \times m$.
- Σ est une matrice diagonale de dimension $m \times n$, où les éléments diagonaux (les valeurs singulières) sont ordonnés de manière décroissante.
- V^T est la transposée de la matrice V , une matrice orthogonale de dimension $n \times n$.

La SVD est largement utilisée pour réduire la dimension des données, extraire des informations significatives, et effectuer des opérations de recommandation.

Imaginons un ensemble de données qui contient des indicateurs, où chaque indicateur est associé à une entité (comme un utilisateur, une entreprise, ou un site web). Nous pouvons utiliser la SVD pour recommander des pratiques à ces entités en fonction de leurs comportements passés.

Nous pouvons construire une matrice A où les lignes représentent les entités et les colonnes représentent les indicateurs. Chaque élément de la matrice $A[i][j]$ contient une valeur indiquant le niveau d'adoption ou de conformité de l'entité i à l'indicateur j .

Appliquons la SVD à cette matrice A :

$$A = U\Sigma V^T$$

Cette décomposition permet de représenter les données de manière compacte en identifiant les dimensions (valeurs singulières) les plus importantes.

Nous pouvons réduire la dimension de la matrice en ne conservant que les premières k valeurs singulières et les colonnes correspondantes de U et V , où k est un paramètre choisi.

Une fois la matrice réduite, nous pouvons calculer des recommandations pour chaque entité en utilisant les vecteurs de colonnes de U . En d'autres termes, nous pouvons estimer le niveau d'adoption attendu de chaque indicateur pour chaque entité.

4.3.4.2 Concept

Tout d'abord, le filtrage collaboratif est une approche qui excelle lorsque les données sont limitées. Lorsque nous disposons d'un ensemble restreint d'informations sur les utilisateurs et les éléments, le filtrage collaboratif demeure efficace en exploitant les similarités entre les utilisateurs ou les éléments, plutôt que de dépendre exclusivement de

caractéristiques explicites. Cette flexibilité est cruciale, car elle nous permet de fournir des recommandations pertinentes même en l'absence de données exhaustives.

De plus, le filtrage collaboratif tient compte simultanément des caractéristiques des éléments et des préférences des utilisateurs. Cette approche prend en considération les interactions passées entre les utilisateurs et les éléments, permettant ainsi de comprendre les nuances des préférences individuelles. Cette capacité à capturer des informations subtiles sur les préférences des utilisateurs améliore la qualité des recommandations, créant ainsi une expérience utilisateur plus satisfaisante.

En outre, le filtrage collaboratif repose sur des méthodes de calcul en temps réel. Cette caractéristique est cruciale pour notre objectif de fournir des recommandations en temps réel, garantissant ainsi des décisions rapides et efficaces. L'instant T est un moment critique où les utilisateurs attendent des réponses immédiates, et le filtrage collaboratif nous permet de répondre à cette exigence avec efficacité.

En résumé, notre choix du filtrage collaboratif comme méthode centrale repose sur sa capacité à exceller dans des conditions de données limitées, sa prise en compte simultanée des caractéristiques des éléments et des préférences des utilisateurs, ainsi que sa capacité à générer des recommandations en temps réel. Ces caractéristiques font du filtrage collaboratif la meilleure option pour répondre à nos besoins spécifiques en matière de recommandation, tout en garantissant une expérience utilisateur optimale.

4.3.5 Architecture

L'illustration 4.6 représente l'architecture de notre SIAD pour une utilisation responsable du numérique. Ce système vise à guider les utilisateurs dans leurs choix technologiques en prenant en compte les impacts sociaux et environnementaux de leurs actions en ligne. Le schéma détaille la collecte et l'analyse de diverses sources d'informations pour générer des recommandations personnalisées en fonction des objectifs et des préférences de chaque utilisateur. Ces informations permettent aux utilisateurs de prendre des décisions éclairées, conscients de leur impact positif sur la société et l'environnement.

4.4 Limites

Le développement d'un système d'aide à la décision visant à réduire l'empreinte carbone numérique revêt une importance cruciale pour contribuer à la transition écologique et énergétique. Son objectif premier consiste à fournir aux acteurs du secteur numérique des informations pertinentes et des recommandations personnalisées afin d'optimiser leurs pratiques et de minimiser leur impact environnemental. Néanmoins, la conception et la mise en œuvre de ce système sont confrontées à plusieurs défis majeurs qui peuvent entraver son efficacité.

En premier lieu, l'un des principaux obstacles réside dans la précision de la mesure de l'empreinte carbone numérique des activités et des services numériques. Cette empreinte dépend de nombreux facteurs tels que le type de matériel utilisé, la modalité de consommation d'énergie, l'emplacement du stockage des données et le volume de

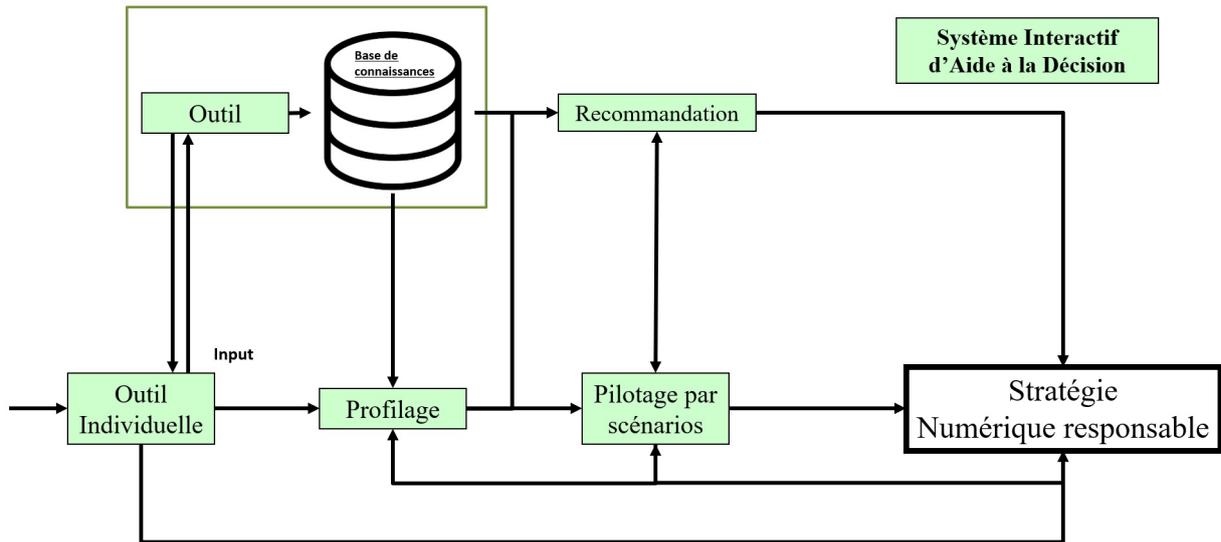


FIGURE 4.6 – Schéma d'architecture.

données transférées. Ces éléments varient considérablement en fonction des systèmes informatiques et des sources d'énergie, rendant difficile l'établissement d'une méthode de calcul universelle et standardisée. Pour surmonter cet obstacle, il est possible d'utiliser des techniques telles que le regroupement des activités similaires en termes d'empreinte carbone, par le biais du clustering, pour permettre une analyse plus cohérente.

De plus, un autre défi majeur réside dans la disponibilité de données fiables concernant les émissions de gaz à effet de serre associées aux activités numériques. Souvent, ces données sont fragmentées ou incomplètes, compliquant ainsi la mise en place d'un système de mesure précis. Par exemple, l'accès aux données sur la consommation électrique des serveurs ou sur la composition du mix énergétique utilisé par les fournisseurs d'énergie peut s'avérer ardu. Pour pallier cette lacune, l'utilisation de séries chronologiques peut servir à estimer les émissions futures à partir des données historiques.

De surcroît, un troisième défi se pose lors de l'évaluation des impacts potentiels des différentes stratégies de réduction de l'empreinte carbone numérique. Anticiper les résultats futurs des diverses actions envisageables, telles que le changement de matériel, l'optimisation du code source ou la réduction du volume de données transférées ou stockées, peut s'avérer complexe. De plus, quantifier les bénéfices par rapport aux coûts, qu'ils soient économiques, sociaux ou environnementaux, pose un défi supplémentaire. Par exemple, il peut être difficile d'évaluer les économies d'énergie ou les réductions des émissions par rapport aux investissements nécessaires ou aux possibles impacts sur la qualité de service ou la satisfaction des utilisateurs. Pour surmonter cette problématique,

l'utilisation de méthodes multicritères se révèle nécessaire pour comparer et hiérarchiser les différentes options envisageables.

Enfin, un quatrième défi réside dans la conception et l'utilisation des systèmes de recommandation visant à aider les acteurs du secteur numérique à choisir les meilleures stratégies de réduction de leur empreinte carbone. Ces systèmes doivent prendre en compte la complexité des technologies et des processus liés au numérique responsable, ainsi que les influences externes, telles que les opinions et les intérêts des différents acteurs impliqués, tels que les développeurs, les gestionnaires, les clients et les fournisseurs. Ces influences peuvent influencer sur la fiabilité des recommandations, ainsi que sur leur acceptabilité et leur mise en œuvre. Il est donc essentiel d'intégrer les bonnes pratiques de la DINUM pour garantir la fiabilité des résultats et favoriser l'adhésion et l'engagement des acteurs concernés.

Cependant, malgré leurs avantages indéniables, les systèmes d'aide à la décision ne sont pas exempts de limites qui peuvent influencer leur capacité à fournir des conseils fiables et utiles.

En premier lieu, les systèmes d'aide à la décision dépendent souvent de données et d'algorithmes qui peuvent être biaisés, ce qui peut entraîner des recommandations partielles. Par exemple, si les données utilisées ne représentent pas correctement la population cible, les recommandations peuvent être inexactes.

De plus, ces systèmes peuvent générer des erreurs d'analyse, ce qui peut conduire à des recommandations incorrectes. Si les algorithmes n'intègrent pas tous les facteurs pertinents, les décisions prises sur la base de ces recommandations peuvent s'avérer inefficaces.

Par ailleurs, les systèmes d'aide à la décision peuvent manquer de flexibilité et ne pas tenir compte des contextes locaux ou des circonstances uniques susceptibles d'affecter les décisions. Cela peut rendre les recommandations inappropriées dans certaines situations.

De surcroît, ils collectent et traitent souvent des données sensibles, ce qui peut soulever des préoccupations en matière de confidentialité et de protection des données. Il est essentiel de garantir une sécurité adéquate pour prévenir les fuites de données et les violations de la vie privée.

Enfin, le développement et la maintenance des systèmes d'aide à la décision peuvent s'avérer coûteux, ce qui peut les rendre inaccessibles pour les petites entreprises et les organisations à budget limité.

En conclusion, les systèmes d'aide à la décision sont des outils précieux pour les décideurs en matière de stratégie de réduction de l'empreinte carbone numérique. Cependant, il est essentiel de reconnaître leurs limites afin d'éviter des erreurs d'analyse et des recommandations inappropriées.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre approche de modélisation d'un système interactif d'aide à la décision (SIAD) pour le pilotage de l'empreinte carbone numérique des organisations. Notre SIAD se compose de quatre modules principaux : la base

de connaissance, le profilage, le pilotage et la recommandation. Nous avons décrit les concepts et les méthodes utilisés pour chaque module, en comparant les avantages et les inconvénients des différentes techniques existantes. Nous avons également expliqué l'architecture globale de notre SIAD, ainsi que ses limites et ses perspectives.

Notre SIAD vise à fournir un soutien efficace et personnalisé aux décideurs cherchant à adopter des pratiques numériques responsables et durables. Il s'appuie sur des données objectives et actualisées pour mesurer l'empreinte carbone numérique des organisations, évaluer les impacts potentiels des différentes stratégies de réduction, et proposer des recommandations basées sur l'expérience passée et les préférences des utilisateurs. Notre SIAD offre également une transparence aux consommateurs et aux investisseurs sur les efforts de durabilité numérique des organisations, ce qui peut renforcer la confiance et l'engagement envers ces dernières.

Notre SIAD se distingue par son caractère, qui repose sur l'utilisation de techniques telles que le raisonnement par cas, le filtrage collaboratif, l'analyse de séries temporelles, et la génération automatique de contenu. Ces techniques nous permettent de créer un système intelligent, adaptable et évolutif, capable de gérer la complexité et l'incertitude du domaine du numérique responsable.

Notre SIAD constitue une contribution à la recherche sur le numérique responsable, ainsi qu'un outil pratique et utile pour les organisations soucieuses de leur impact environnemental. Nous espérons que notre SIAD contribuera à sensibiliser les acteurs du numérique aux enjeux du développement durable, et à les inciter à agir en faveur d'un avenir plus vert.

Positionnement

- Proposition d'un système d'aide à la décision basé sur le raisonnement par cas pour réduire l'empreinte carbone numérique
- Intégration de diverses techniques d'analyse des données, telles que la prédiction, le profilage, la corrélation et la recommandation
- Adaptabilité et flexibilité du système pour répondre aux besoins et aux évolutions du domaine du numérique responsable.

Contributions

- Création d'un modèle de base de connaissances pour capitaliser sur les expériences passées et résoudre des problèmes complexes
- Conception d'un modèle de profilage pour regrouper les organisations selon leurs caractéristiques et leurs performances en matière de numérique responsable
- Élaboration d'un modèle de pilotage pour évaluer les impacts potentiels des différentes stratégies de réduction de l'empreinte carbone numérique
- Mise en place d'un système de recommandation pour suggérer les meilleures pratiques et les innovations en matière de numérique responsable

Troisième partie

Applications

Chapitre 5

WeNR

Sommaire

5.1	Introduction	106
5.1.1	Objectifs	106
5.1.2	Historique	106
5.1.3	Partenaires et contribution	106
5.2	WeNR	107
5.2.1	Architecture	107
5.2.2	Fonctionnement	109
5.2.3	Mise en œuvre	109
5.2.4	Retour d'expérience et limites	111
5.2.5	Opportunités et ambition	112
5.3	Adaptabilité	112
5.3.1	Importance du mix énergétique	114
5.3.2	Impact du transport dans l'ACV	115
5.4	Synthèse	115
5.5	Résultats de la campagne 2021	116
5.5.1	Présentation de l'échantillon	116
5.5.2	Interprétation des résultats	118
5.6	Analyse de la maturité Numérique Responsable	123
5.6.1	Intégration de la démarche Numérique Responsable	126
5.6.2	Maturité des répondants	128
5.6.3	Analyse des résultats	129
5.7	Résultats	130
5.7.1	Tendances observées	131
5.7.2	Scénarios pour l'horizon 2030	133
5.7.3	Méthodologie de calcul des scénarios	135
5.7.4	Scénarios prospectifs	137
5.8	Conclusion et perspectives	138

5.1 Introduction

5.1.1 Objectifs

Le WeNR est un outil de mesure élaboré par le réseau des Instituts du Numérique Responsable en Europe (INR)¹ afin d'évaluer l'empreinte environnementale des systèmes d'information au sein des organisations. Cet instrument de mesure découle directement de la méthodologie que nous avons détaillée dans le chapitre 3.

L'objectif premier de cet outil est de permettre à toutes les entités de mieux appréhender les zones d'impact de leurs activités numériques et de quantifier leur niveau de maturité en matière de Numérique Responsable, en se basant sur les trois piliers fondamentaux du développement durable : le peuple (People), la planète (Planet) et la prospérité (Prosperity) [Ham06].

5.1.2 Historique

Le WeNR trouve son origine dans le travail réalisé par le collectif Green IT sur une période étalée de 2014 à 2018. En effet, le collectif Green IT, précurseur de l'INR, a élaboré trois benchmarks successifs en 2016, 2017 et 2018 dans le but de calculer l'empreinte environnementale du numérique au sein des grandes entreprises françaises.

L'année 2018 a marqué un tournant, avec la publication de l'étude WeGreenIT² en partenariat avec WWF. Cette étude a été présentée en personne à Madame Brune Poirson, secrétaire d'État à la Transition écologique, en 2019. Elle s'appuie sur les résultats du benchmark précédemment mentionné, jetant ainsi les bases du WeNR que nous connaissons aujourd'hui.

5.1.3 Partenaires et contribution

WeNR est le fruit d'une collaboration étroite entre plusieurs institutions. La Rochelle Université, l'EIGSI, la Région Nouvelle-Aquitaine, la DINUM et l'ADEME ont joué un rôle essentiel dans le financement de ce projet. De plus, une précieuse contribution scientifique provient de partenariats internationaux avec l'INR Suisse, l'INR Belge et l'Université de Louvain (UCLouvain) "Figure 5.1".

L'implication de ces acteurs est cruciale pour la réussite de WeNR. En travaillant en partenariat, ils ont permis de perfectionner le modèle de calcul à la base de WeNR et d'enrichir la base de données initiale qui alimente le moteur de WeNR. Cette collaboration a favorisé une synergie d'expertise et de ressources, renforçant ainsi la qualité et la portée du projet.

1. <https://isit-europe.org/>

2. Lien vers l'étude : <https://www.wwf.fr/vous-informer/actualites/etude-wegreenit-quel-impact-environnemental-du-numerique-dans-les-entreprises>



FIGURE 5.1 – Parties prenantes WeNR.

5.2 WeNR

5.2.1 Architecture

Ce chapitre est consacré à la description de l'architecture de l'outil WeNR que nous avons développé, qui utilise la méthodologie précédemment expliquée. L'architecture est ici définie comme l'ensemble des composants de l'outil et de leurs interactions. Elle constitue les fondations sur lesquelles repose l'outil, tout en définissant les différents éléments qui le constituent. Cette architecture joue un rôle essentiel dans la conception et le fonctionnement de l'outil, en établissant les règles et les contraintes qui guident son utilisation, ainsi que les critères de qualité à respecter, tels que la performance, la scalabilité et la sécurité. Cette présentation de l'architecture de WeNR offre une vue d'ensemble des divers éléments qui composent l'outil et de leur interaction pour offrir les fonctionnalités recherchées.

Notre outil repose sur une architecture distribuée, qui répartit les tâches et les fonctionnalités sur plusieurs nœuds du système qui sont décrits dans la Figure 5.2 et la Table 5.1. Cette approche optimise les performances, assure une gestion efficace des données et facilite l'évolution de l'outil.

Concernant la gestion des données, aucun modèle de données spécifique n'est employé, il s'agit de NoSQL. Les données sont contenues dans des fichiers JSON. Ces fichiers JSON sont ensuite importés dans le logiciel MongoDB pour consolider les données.

Pour les scripts, les principaux sont « MainWeNR.java » et « MainWeENGLISH.java » pour la version anglaise. Deux fichiers Excel s'ajoutent à la liste des fichiers utilisés, servant à stocker les facteurs d'émission des centres de données et des équipements de bureau, nommés « donneesutiliser1.xlsx » et « donneesutiliser2.xlsx ».

Dans ce projet, nous avons recours à une liste de scripts pour mettre en place l'outil, répartis dans deux sous-répertoires, MoteurCalcul et Transformation, tous deux situés dans le répertoire WeNR.

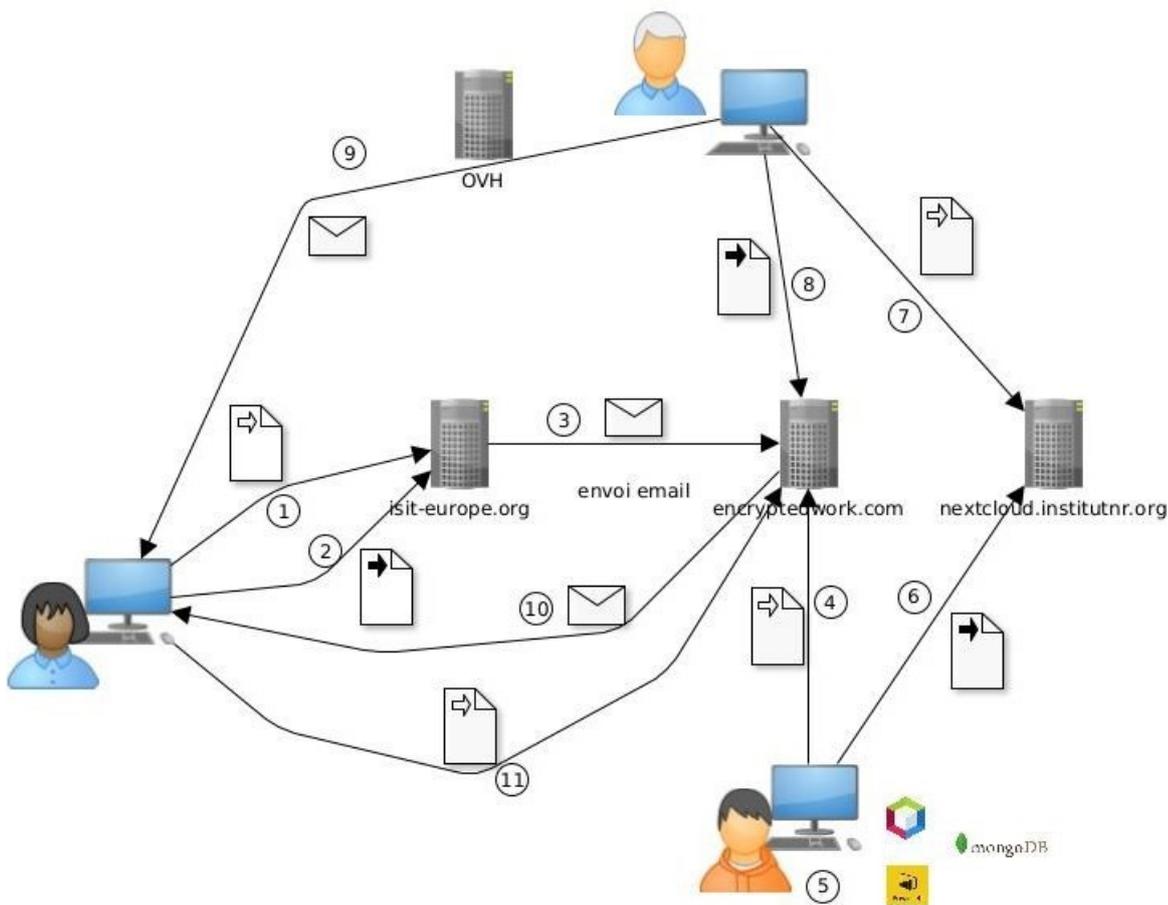


FIGURE 5.2 – Diagramme des flux

Le sous-répertoire MoteurCalcul intègre les scripts nécessaires à l'accomplissement des calculs et au traitement des données. Le script `Calcul.java` renferme toutes les fonctionnalités de calcul indispensables au projet. Le script `ImporterEtCalculer.java` est employé pour importer les données et les exploiter dans les calculs. Le script `JsonFileFilter.java` sert à filtrer les fichiers JSON.

Le sous-répertoire `Projetwenr` comprend les scripts indispensables à l'établissement de l'application. On y trouve des scripts tels que `BonPR.java` (informations sur les bonnes pratiques), `Cloud.java` (informations sur l'utilisation des services Cloud), `DC.java` (informations sur les centres de données), `Données.java` (informations sur les données), `Entité.java` (informations sur les entités), `Equipements.java` (informations sur les équipements), `ExcelFileFilter.java` (filtrage des fichiers Excel), `FichierWeNR.java` (informations sur les fichiers WeNR), `MainWeNRENGLISH.java` (version anglaise de l'application principale), `MainWeNR.java` (version principale de l'application), `Organisation.java` (informations sur les organisations), et `Utilisation.java` (informations sur l'utilisation des

TABLE 5.1 – Etapes de la creation des rapports WeNR

Etape	Action
1	Téléchargement du questionnaire depuis le site wenr.isit-europe.org
2	Envoi du questionnaire vers le site wenr.isit-europe.org
3	Envoi d'un email automatique depuis le site wenr.isit-europe.org vers encryptedwork.com
4	Récupération des fichiers dans la boîte mail encryptedwork
5	Traitement des questionnaires
6	Sauvegarde des questionnaires, fichiers JSON, rapports générés, organization.xls sur le NextCloud de l'INR
7	Récupération des rapports
8	Envoi des rapports sur encryptedwork
9	Envoi d'un email depuis wenr@institutnr.org pour expliquer la procédure de réception des rapports
10	Envoi du lien de téléchargement depuis la boîte encryptedwork
11	Téléchargement du rapport sur le site encryptedwork

équipements).

Le sous-répertoire Transformation renferme un unique script, MainTransform.java, contenant les instructions pour effectuer les transformations de données. Ce script est employé pour opérer des changements structurels sur les données afin de les rendre exploitables pour le projet.

En résumé, nous avons utilisé une série de scripts répartis dans deux sous-répertoires, MoteurCalcul et Transformation, tous situés dans le répertoire WeNR. Ces scripts nous permettent de mettre en place l'application, effectuer les calculs et les traitements des données, ainsi que d'opérer les transformations nécessaires sur ces dernières.

5.2.2 Fonctionnement

En synthèse, le fonctionnement de WeNR se subdivise en deux volets : la première partie décrit le processus tel qu'il est perçu par les organisations, tandis que la seconde partie expose le fonctionnement de WeNR du point de vue de l'INR.

Du côté des organisations, le fonctionnement de WeNR comporte plusieurs étapes : le téléchargement et la soumission d'un formulaire, la réception d'un courriel expliquant la procédure pour obtenir le rapport, la mise à disposition du rapport de l'organisation via une plateforme de partage en ligne, et enfin, la réception du rapport.

Du côté de l'INR, le fonctionnement de WeNR englobe la communication relative au lancement de la campagne, la préparation du questionnaire, le traitement des formulaires et l'envoi des rapports à chaque organisation.

Ce processus permet à l'INR de rassembler et d'analyser les données des organisations, et de produire des rapports détaillés sur l'empreinte numérique de ces dernières.

5.2.3 Mise en œuvre

La création du rapport WeNR se fait en trois étapes principales (Voir Figure 5.3) :

- Collecte des données, par la récupération du formulaire rempli et son extraction avec comme sortie un fichier au format JSON. Le fichier est stocké dans une base de données au format MongoDB.
- Traitement des données, à l'aide de l'outil PowerBI.
- La création des différents rapports WeNR au format PDF.

Les rapports créés, composés d'environ 15 pages, fournissent des informations sur l'empreinte du Système d'Information. Les organisations membres de l'INR en Belgique, en Suisse et en France reçoivent un rapport plus complet et plus détaillé que les organisations non membres. Elles bénéficient également de rapports supplémentaires livrés plus tard dans l'année pour leur permettre de comparer leurs résultats, de manière anonyme, à plusieurs moyennes (globale, par taille d'organisation ou par secteur d'activité). Vous pouvez retrouver en exemple celui utilisé par la Ville de La Rochelle en annexe dans le cadre du projet LRZTC.

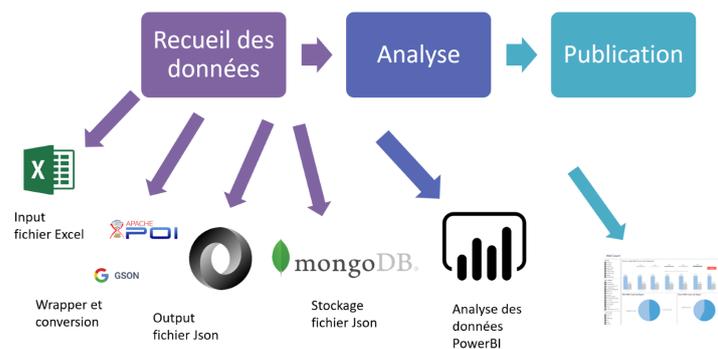


FIGURE 5.3 – Création du rapport WeNR.

La veille informationnelle revêt une importance cruciale dans l'évaluation de l'automatisation des processus. Notre responsabilité consiste à maintenir une veille constante sur les bases de données exploitables, à mettre à jour les bases de données existantes et à explorer de nouveaux outils.

Pour collecter les données essentielles à notre évaluation, nous utilisons un questionnaire comportant deux versions, en français et en anglais, intégrant de nombreuses formules de calcul. Ces questionnaires sont périodiquement actualisés pour corriger des anomalies, ajouter des fonctionnalités et mettre à jour les listes d'équipements. Ils sont hébergés sur le NextCloud de l'INR.

Avant de traiter les données, nous mettons à jour notre base interne WeNR en utilisant les données d'émissions de différentes sources. La méthodologie de traitement des données est détaillée à l'adresse <https://wenr.isit-europe.org/fr/note-methodologique-wenr/>. Les principales étapes de ce processus comprennent la collecte des questionnaires,

la vérification de la conformité des fichiers, l'extraction des données, le calcul des résultats et la création d'un fichier Excel destiné aux rapports.

La génération des rapports s'effectue avec l'outil PowerBI de Microsoft. Quatre modèles ont été élaborés, en français et en anglais, pour les membres et les non-membres. Pour générer un rapport, il suffit de copier le fichier Excel issu de l'étape précédente dans un dossier prédéfini, de mettre à jour les données du modèle correspondant, puis de créer le fichier PDF.

Après la génération des rapports, la prochaine étape consiste à les envoyer aux participants. Dans un premier courrier électronique, nous informons les participants qu'ils recevront leur rapport et nous précisons le mode de réception. Quelques jours plus tard, un second courrier électronique contenant un lien de téléchargement est envoyé. Ce lien renvoie vers une page sécurisée sur <https://encryptedwork.com/connect/XXXXX>, où les participants peuvent télécharger leur rapport. Un exemple de ce courrier est également disponible en Annexe, de même qu'un exemple de la page de téléchargement. L'exemple de rapport fourni vous est présenté en annexe.

La dernière étape de ce processus consiste à archiver les données. Les fichiers JSON des organisations sont stockés dans une base MongoDB. Les fichiers JSON et Excel de chaque organisation sont conservés sur les serveurs NextCloud de l'INR et de l'Université de La Rochelle. Les fichiers de programmation sont également sauvegardés sur ces serveurs. Les programmes sont exécutés soit depuis notre ordinateur personnel, soit depuis un ordinateur mis à disposition par l'Université de La Rochelle pour les tâches nécessitant une puissance de calcul accrue. Une procédure détaillée pour la préparation de l'environnement d'exécution des programmes nécessaires à WeNR est accessible en Annexe.

5.2.4 Retour d'expérience et limites

Le projet WeNR, dont l'objectif est de quantifier l'empreinte carbone des systèmes d'information des organisations, présente de nombreux avantages pour les organisations participantes. Ces avantages incluent la possibilité de comparer les performances environnementales entre organisations d'un même secteur ou avec la moyenne, ainsi que l'accès à des rapports détaillés permettant de comprendre les impacts de leur système d'information. Les organisations ont également la flexibilité de recevoir leur rapport en français ou en anglais, et la méthodologie est transparente. De plus, un support technique est disponible en cas de problèmes techniques ou pour clarifier des points particuliers, si nécessaire.

Cependant, des défis subsistent pour les organisations participantes. Ces défis comprennent des problèmes de compatibilité avec des outils autres qu'Excel, une liste d'équipements incomplète, des libellés interprétés de manière variable entre les organisations, ainsi que des libellés manquant de précision. Dans la section qualitative du questionnaire, les objectifs peuvent prêter à confusion, et l'échelle de notation des objectifs de maturité suscite des débats. Enfin, le processus de remplissage du questionnaire peut s'avérer chronophage pour les grandes organisations possédant de nombreux modèles.

Du côté des administrateurs de l'INR, des améliorations sont également nécessaires.

Ces améliorations concernent la gestion de plusieurs versions de fichiers, la présence de caractères non reconnus dans certains documents reçus, des champs obligatoires non renseignés, ainsi que de nombreuses tâches manuelles requises pour traiter les questionnaires remplis. De plus, il existe de nombreuses étapes semi-automatisées pour générer les rapports, ainsi que des chemins absolus codés en dur dans le code. Enfin, de nombreuses interventions sont nécessaires en cas de non-réception des rapports.

Les organisations participantes ont des attentes de développement pour le projet WeNR. Elles souhaitent notamment une intégration avec le Label NR, une prise en compte de la réglementation, une décomposition de l’empreinte carbone par entité dans le rapport individuel, des recommandations d’actions concrètes, la possibilité de simuler des scénarios d’actions pour estimer les économies de CO₂e, la participation à l’élaboration de WeNR, ainsi que des documents ou un accompagnement pour automatiser la collecte des données.

5.2.5 Opportunités et ambition

Les propositions d’amélioration englobent la résolution des problèmes rencontrés par les organisations et l’équipe technique de l’INR, la réponse aux attentes des organisations, l’aide aux organisations dans la collecte de données en amont du questionnaire, l’amélioration de la documentation, l’internationalisation des fichiers et de la documentation pour travailler avec des personnes non francophones, la simplification de la saisie de l’inventaire des équipements, ainsi que l’affichage des premiers résultats de l’empreinte carbone et de la maturité dès la soumission du questionnaire.

Les ambitions pour WeNR incluent la création d’une vision produit plus aboutie en adéquation avec les attentes des organisations, en particulier les grandes entreprises. Il s’agit également d’accroître la transparence sur le fonctionnement, les facteurs utilisés, les calculs, etc. À terme, l’objectif est de rendre WeNR Open Source, de faciliter la collaboration sur le développement de l’outil, et de le rendre entièrement accessible en ligne dans un espace sécurisé, permettant une génération immédiate des rapports sur l’empreinte environnementale (en équivalent carbone) directement depuis un espace personnel et collaboratif.

5.3 Adaptabilité

Dans le cadre de cette thèse, j’ai eu l’opportunité de réaliser une mobilité internationale au Québec, sous la supervision du Professeur Cheriet, d’une durée de 6 mois. Cette mission avait pour objectif la mise en place de l’outil WeNR au Québec.

Dans le contexte de la québéçisation³ de l’outil WeNR, le principal acteur engagé est le CIRODD, acronyme désignant le Centre interdisciplinaire de recherche en opérationnalisation du développement durable. Le CIRODD réunit des chercheurs issus de diverses disciplines, collaborant de concert en vue de concevoir des solutions novatrices et

3. <https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/26501200/quebeciser>

pérennes pour répondre aux défis contemporains de la société. L'objectif central du CIRODD consiste à apporter une contribution significative à la transition vers une économie circulaire, fondée sur des principes tels que la réduction, la réutilisation, le recyclage et la valorisation des ressources. Parallèlement, l'organisme se penche sur l'analyse des répercussions sociales et environnementales des activités humaines, ainsi que sur l'élaboration et l'amélioration des outils et méthodes destinés à les évaluer.

Dans cette perspective, le CIRODD⁴ assume un rôle crucial en favorisant la convergence d'expertises variées au sein de ses équipes, stimulant ainsi l'émergence de solutions holistiques. Cette approche interdisciplinaire permet une analyse approfondie des enjeux liés au développement durable et favorise l'émergence d'approches innovantes pour y faire face. En mettant l'accent sur la réflexion et l'action concertées, le CIRODD contribue activement à la mise en œuvre d'une vision stratégique pour une société plus durable au Québec.



L'École de technologie supérieure (ETS), qui héberge en son sein le CIRODD, fondée en 1974, est une institution d'enseignement en génie basée à Montréal, au Canada. Affiliée à l'Université du Québec, elle propose des programmes de premier, deuxième et troisième cycles en ingénierie. L'ETS se démarque par son approche pédagogique orientée vers la pratique et l'application, ainsi que par son étroite collaboration avec le secteur industriel. Comptant plus de 11 000 étudiants, dont environ 25% proviennent de l'étranger, l'établissement héberge plus de 40 laboratoires de recherche et de transfert technologique. De plus, un parc technologique abrite des entreprises innovantes.

L'objectif premier de l'ETS consiste à former des ingénieurs compétents, créatifs et responsables, prêts à relever les défis technologiques et sociaux du XXI^e siècle. Cette école entretient ainsi un lien solide entre l'enseignement, la recherche et l'industrie, favorisant ainsi l'éclosion de solutions novatrices et le développement de compétences essentielles pour l'avenir. En somme, l'ETS joue un rôle essentiel dans la formation des ingénieurs du futur et la promotion de l'innovation technologique.

Toutefois, WeNR ne convient pas parfaitement à la réalité québécoise, caractérisée par ses particularités culturelles, économiques, et environnementales. Pour cette raison, une adaptation spécifique à la province, nommée WeNR-Qc, s'avère nécessaire. Cette démarche vise à accroître la pertinence et la fiabilité de l'outil pour les organisations québécoises désireuses d'évaluer leur niveau de maturité numérique responsable et de réduire leur empreinte de gaz à effet de serre (GES). L'adaptation de WeNR-Qc exige notamment la prise en considération des sources d'énergie propres prédominantes au Québec [VBL19], des pratiques locales de recyclage des équipements numériques, des normes et réglementations en vigueur, ainsi que des attentes et des besoins des acteurs locaux [HMW23].

L'énergie hydraulique représente plus de 95% de la production électrique au Québec

4. <https://cirodd.org/>

[VBL19] et joue un rôle primordial. Cette source d'énergie renouvelable à faible émission de GES confère un avantage concurrentiel par rapport à d'autres régions du monde fortement tributaires des combustibles fossiles. Par conséquent, il est essentiel d'adapter WeNR-Qc afin de refléter cette réalité énergétique et de mettre en avant les efforts des organisations québécoises utilisant le SI comme levier pour une transition écologique.

En outre, le Québec dispose d'un système de recyclage novateur pour les équipements numériques, favorisant la récupération de matières premières et la réduction des déchets. WeNR-Qc doit intégrer cette dimension en prenant en compte les taux de recyclage et le potentiel de réutilisation des appareils dans le calcul de l'empreinte environnementale du SI [BGCSA17].

Enfin, le Québec est doté de normes et de réglementations spécifiques concernant la protection de l'environnement et la responsabilité sociale des entreprises. WeNR-Qc doit respecter ces exigences légales et éthiques tout en permettant aux organisations québécoises de se comparer avec d'autres acteurs internationaux en matière de performance numérique responsable [Bou13].

Ainsi, naît WeNR-Qc, une version adaptée au contexte québécois qui prend en compte toutes ces spécificités pour offrir une évaluation plus précise et pertinente du système d'information des organisations de la province.

5.3.1 Importance du mix énergétique

L'un des éléments cruciaux à prendre en compte pour adapter WeNR au contexte québécois est le mix énergétique de la province, c'est-à-dire la répartition des différentes sources d'énergie utilisées pour la production et la consommation d'électricité. Selon les données du bilan énergétique du Québec, la production d'électricité au Québec provient à 94% de sources hydroélectriques, ce qui positionne le Québec en tant que leader mondial en matière d'énergie renouvelable et propre. Les sources d'énergie restantes comprennent l'éolien, le solaire, la biomasse, le gaz naturel et le pétrole. Ce mix énergétique se distingue de celui des autres provinces canadiennes et des pays européens, qui ont une plus grande dépendance envers les énergies fossiles ou nucléaires. Cette particularité se traduit par une empreinte carbone relativement faible au Québec, avec environ 34 grammes de CO₂e par kWh, en comparaison à la moyenne canadienne de 140 grammes de CO₂e par kWh et à la moyenne européenne de 295 grammes de CO₂e par kWh [LMBP⁺21].

Ainsi, pour adapter WeNR au contexte québécois, il est nécessaire d'intégrer ces spécificités énergétiques, qui influencent directement le calcul de l'impact des émissions de gaz à effet de serre (GES) des systèmes d'information. Cela implique l'ajustement des coefficients d'émission utilisés pour estimer les émissions directes et indirectes liées à la consommation d'électricité des équipements numériques. De plus, il convient d'incorporer les données relatives aux autres sources d'énergie présentes au Québec, qui peuvent avoir un impact environnemental plus ou moins significatif. Enfin, il est essentiel de prendre en considération les objectifs et les mesures du gouvernement québécois en matière de transition énergétique, visant à réduire la dépendance aux énergies fossiles et à accroître la part des énergies vertes dans le mix énergétique [LMBP⁺21].

5.3.2 Impact du transport dans l'ACV

Une autre dimension à questionner pour l'intégration de la québécoisisation au sein de WeNR concerne le domaine des transports. En effet, les déplacements des équipements numériques, des matières premières et des déchets sont responsables de l'émission de gaz à effet de serre (GES), dont la quantité varie selon les modes de transport utilisés et les distances à parcourir. Néanmoins, il est essentiel de noter que le Québec se distingue de l'Europe par des facteurs géographiques, climatiques et un réseau de transport particuliers. Par exemple, le territoire québécois est vaste, ce qui engendre souvent des trajets plus longs et plus gourmands en carburant que ceux observés en Europe. De plus, le Québec dispose d'un réseau ferroviaire moins développé que l'Europe, limitant ainsi les possibilités de recourir au transport ferroviaire, qui est un mode plus respectueux de l'environnement que le transport routier ou aérien. Enfin, les conditions climatiques plus rigoureuses au Québec peuvent affecter la performance et la durabilité des équipements numériques pendant leur transport [DR14].

Par conséquent, pour québécoisier la composante transport au sein de WeNR, il est essentiel de prendre en compte ces spécificités et d'adapter les coefficients d'émission des GES en fonction du contexte québécois.

5.4 Synthèse

WeNR demeure actuellement un outil emblématique de l'action menée par l'Institut du Numérique Responsable (INR). Il est largement plébiscité par les organisations, tant membres que non-membres, car il permet de mesurer l'empreinte environnementale en équivalent carbone des systèmes d'information (SI) au sein de ces organisations. Sa structure simple en fait un outil sécurisé, facile à utiliser, souple et évolutif.

L'approche scientifique qui sous-tend le développement de WeNR, coordonnée et financée par La Rochelle Université depuis 2020, garantit la rigueur de la démarche de recherche. Une revue critique vient d'ailleurs valider cette approche.

Dans le cadre des priorités d'action, il implique d'avoir une documentation exhaustive, une maîtrise totale du processus de WeNR, ainsi qu'un environnement de production opérationnel à l'INR. Cette démarche est en cours, mais elle requiert des ressources supplémentaires pour être accélérée et mise à l'échelle. Une autre priorité consiste à automatiser le processus, car avec une augmentation du nombre d'organisations utilisatrices, le fonctionnement actuel nécessiterait la mobilisation de plusieurs personnes pour traiter les données. De plus, l'automatisation réduirait les risques d'erreurs humaines et accélérerait considérablement le temps de traitement.

WeNR doit envisager son évolution en étroite relation avec les besoins des organisations. La mise en place de comités de pilotage, impliquant des organisations de toutes tailles et de tous types, permettra d'obtenir une vision globale et aboutie.

Enfin, WeNR doit poursuivre son internationalisation. Le contenu, la structuration de la documentation, ainsi que le nom de l'outil doivent être pensés pour une utilisation à l'échelle internationale.

5.5 Résultats de la campagne 2021

Dans la première partie de ce chapitre, nous présenterons les résultats clés de notre outil en 2021 en relation avec le Rapport public WeNR 2021⁵. Ensuite, dans la seconde partie, nous effectuerons une analyse comparative des benchmarks WeNR. La suite de ce travail a été effectuée en collaboration avec Cassandra Bigot [BBCD22].

La dernière partie de ce chapitre conclut notre bloc de concepts, comme vu dans le chapitre 3, concernant la présentation des résultats et le reporting prospectif, conformément aux figures 5.4 et 5.5.



FIGURE 5.4 – Résultats.



FIGURE 5.5 – Reporting.

5.5.1 Présentation de l'échantillon

L'échantillon étudié représente 62 entreprises françaises (82 %), 9 belges (11 %) et 4 suisses (7 %), pour un total de 1.309.604 emplois, répartis entre différentes tailles d'entreprises : TPE (10%), PME (18%), ETI (36%), et Grande entreprise (36%) (5.6). Les entreprises de l'échantillon sont établies dans différents secteurs d'activité (autres activités spécialisées, scientifiques et techniques : 26 %; administration publique : 23 %; activités financières et d'assurance : 12 %; production et distribution d'électricité, de gaz, de vapeur et d'eau : 7 %; transport et entreposage : 7 %; activités de services administratifs et de soutien : 6 %; commerce, réparation d'automobiles et de motocycles : 6 %; autres : 4 %; activités juridiques, comptables, de gestion, d'architecture, d'ingénierie, de contrôle et d'analyses techniques : 4 %; activités immobilières : 3 %; et fabrication de produits alimentaires, de boissons et de produits du tabac : 1 %) (5.7), soit dans le domaine public (27 %), soit dans le domaine privé (74 %) (5.8).

Plus précisément, 92 % des répondants ont mis en œuvre une approche informatique durable (SIT), contre 8 %.

La mise en œuvre d'une démarche SIT peut être observée dans trois cas : Des actions SIT et un référent interne (79 %), des actions SIT sans référent (8 %), et un référent

5. Rapport public WeNR2021 : <https://wenr.isit-europe.org/fr/rapport-public-wenr2021/>

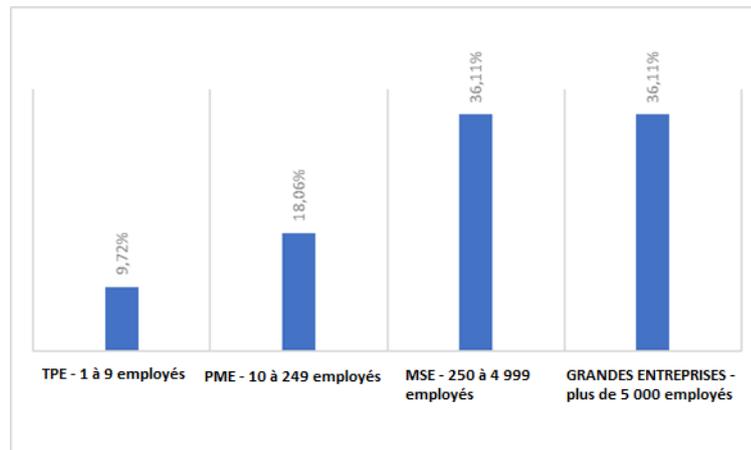


FIGURE 5.6 – Répartition des entreprises par taille.

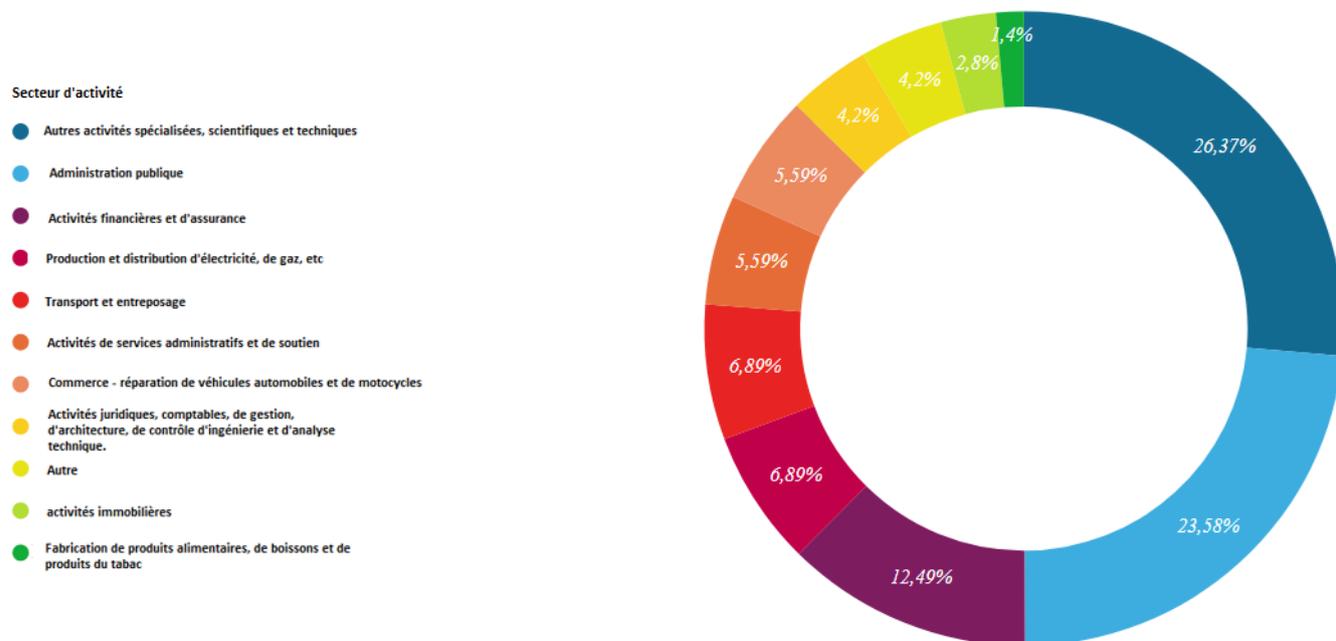


FIGURE 5.7 – Répartition des entreprises par secteur d'activité.

présent sans action SIT particulière (4 %). Le temps moyen écoulé depuis la mise en place des actions SIT est d'environ 2,6 ans dans l'échantillon global, σ est de 2 : la répartition est homogène; et implique en moyenne 17 collaborateurs internes : des moyennes qui varient selon le secteur d'activité (Figure 5.9, 5.10).

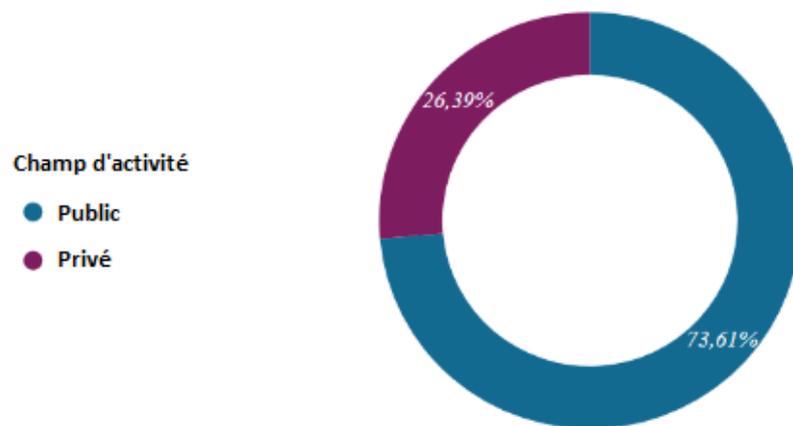


FIGURE 5.8 – Répartition par domaine d'activité.

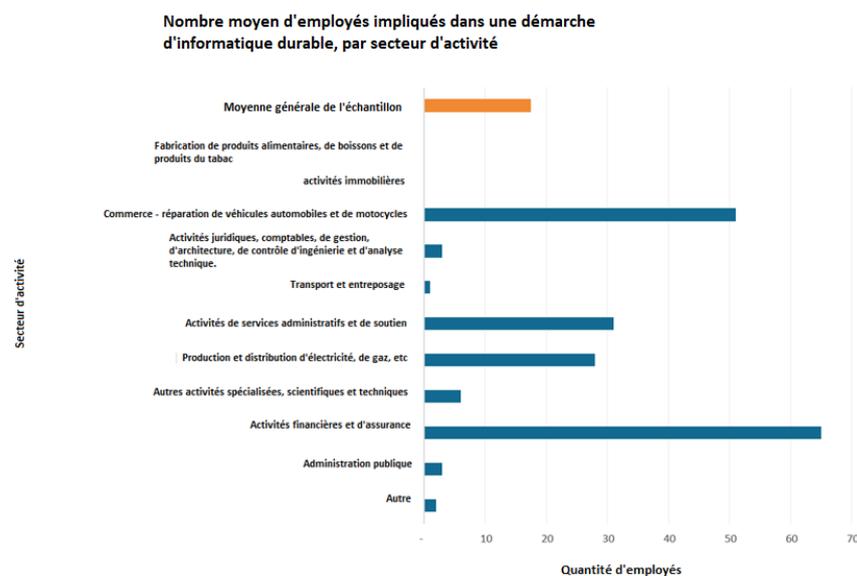


FIGURE 5.9 – Nombre moyen d'employés impliqués dans la démarche de responsabilité numérique.

5.5.2 Interprétation des résultats

L'empreinte environnementale des systèmes d'information inventoriés

Si nous examinons les caractéristiques liées aux émissions de gaz à effet de serre du système informatique, nous constatons que l'impact moyen sur le carbone d'un employé est de 265 kg CO₂e, et de 4 613 tonnes de CO₂e en moyenne pour une entreprise. Les entreprises répondantes ont un impact plus ou moins important selon leurs équipements

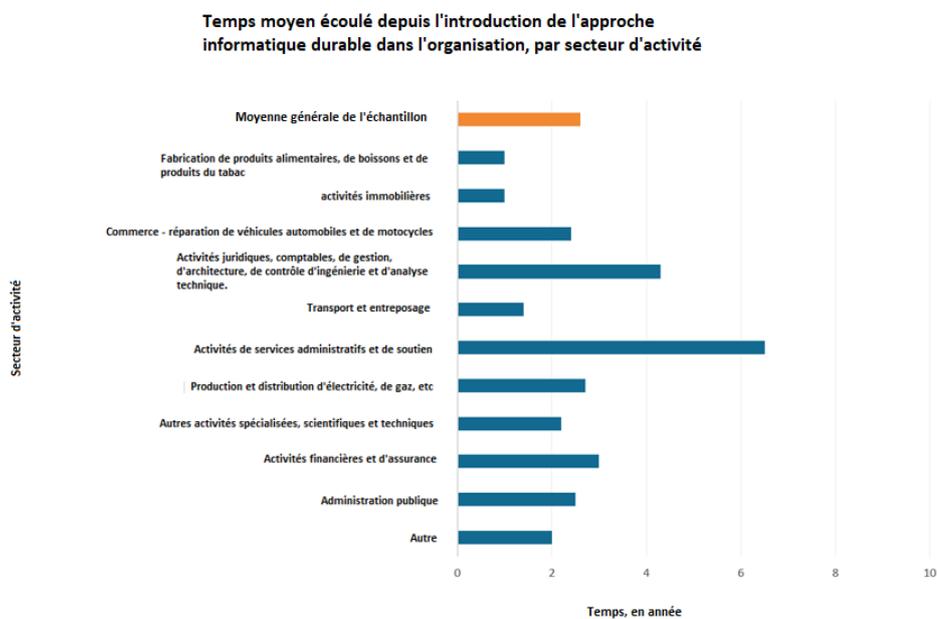


FIGURE 5.10 – Temps moyen écoulé depuis l'introduction de l'approche de la responsabilité numérique.

inventoriés : 12% émettent entre 0 et 1 tonne CO₂e, 33% émettent entre 1 et 10 tonnes CO₂e, 22% émettent entre 10 et 100 tonnes de CO₂e, 12% émettent entre 100 et 1 000 tonnes de CO₂e, 8% émettent entre 1 000 et 10 000 tonnes CO₂e, et 11% émettent plus de 10 000 tonnes CO₂e (Voir Figure 5.11 et 5.12).

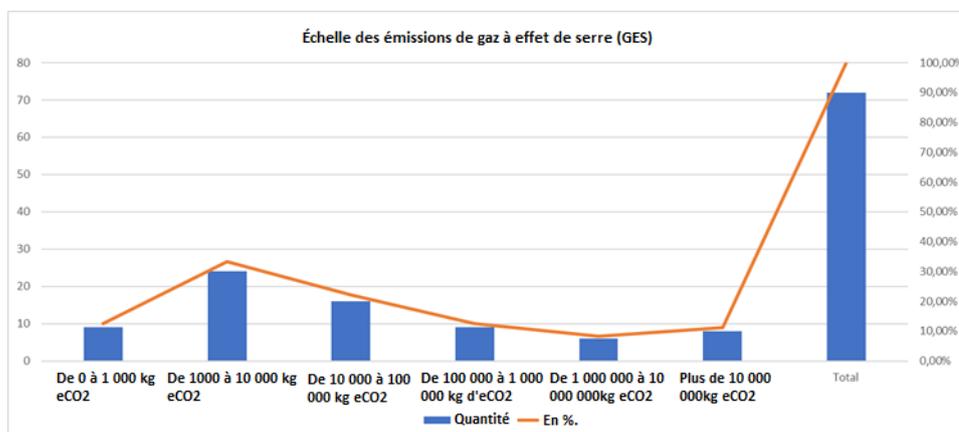


FIGURE 5.11 – Répartition des entreprises par classe d'émission de gaz à effet de serre.

Par rapport à la moyenne de l'échantillon global, les entreprises émettant plus de 10 000 tonnes CO₂e ont, en moyenne, mis en œuvre une approche informatique durable

depuis plus longtemps que le reste de l'échantillon, avec une moyenne de 5 ans. Par ailleurs, on peut supposer que plus la quantité d'émissions de gaz à effet de serre sera liée au système d'information d'une entité, plus la durée moyenne de mise en œuvre d'une démarche informatique durable est longue.

Dans ce type d'approche : C'est particulièrement le cas pour la catégorie la plus basse, où les entreprises émettant entre 1 000 et 10 000 tonnes CO₂e ont en moyenne mis en place une approche NR depuis 2 ans. Le reste de l'échantillon semble être proche de la moyenne générale, fluctuant entre 2 ans (entreprises émettant entre 1 et 10 tonnes CO₂e) et 3 ans (entreprises émettant entre 100 et 1 000 tonnes de CO₂e).

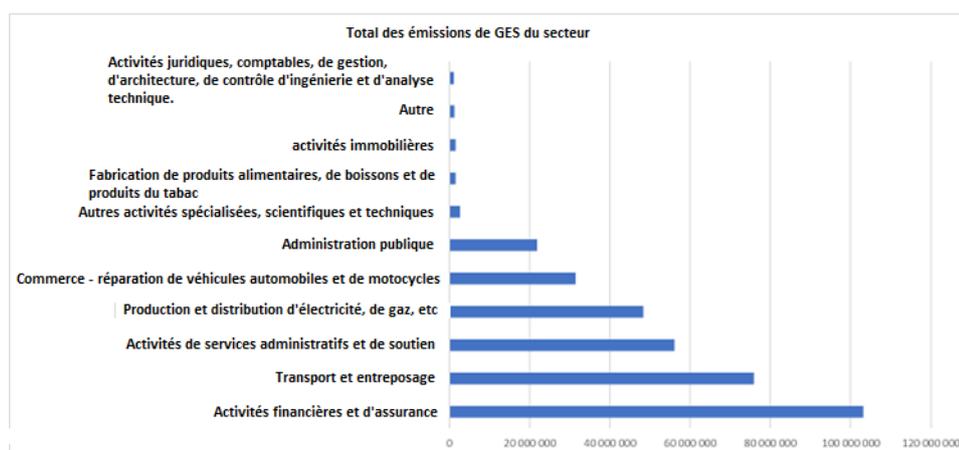


FIGURE 5.12 – Représentation des émissions de gaz à effet de serre par secteur d'activité.

Plus précisément, 83% des émissions de GES calculées sont attribuées à l'équipement de bureau (y compris les ordinateurs portables, les ordinateurs de bureau, les moniteurs, les téléviseurs, smartphones, tablettes, autres équipements de bureau) ; les 17% restants sont attribués aux équipements des centres de données (équipements de réseau).

Pour les équipements de bureau, ces émissions sont principalement dues à la fabrication (77%), le reste étant dû à l'utilisation (6%). Pour les centres de données, il en va de même : 10% des émissions de GES sont émises lors de la phase de fabrication, et 7% lors de la phase d'utilisation (Voir Figure 5.13).

L'empreinte environnementale des équipements de bureau et des centres de données

Représentant seulement 15% des équipements de bureau inventoriés dans l'ensemble de l'étude, les ordinateurs portables sont l'un des éléments qui émettent près d'un quart des émissions de CO₂ l'ensemble de l'étude, les ordinateurs portables sont l'un des éléments qui émettent près d'un quart des émissions de GES calculées (23%) sur l'ensemble des équipements de bureau. suivi par les écrans (19% de l'inventaire), qui émettent 21% des émissions de GES de l'étude. Puis les ordinateurs de bureau (9% de l'inventaire), qui émettent près de 15% des émissions de GES de l'étude.

La répartition des émissions de GES pour les autres équipements est la suivante :

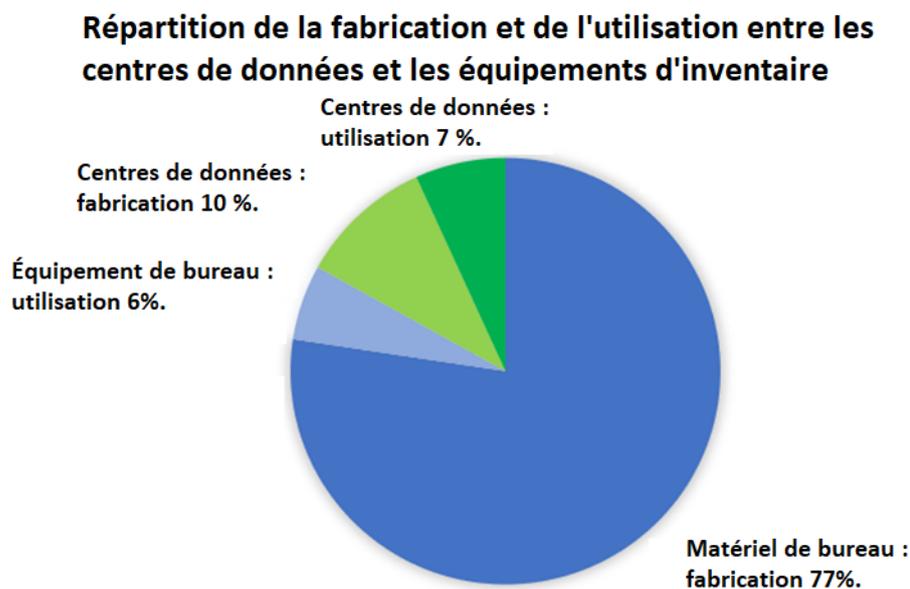


FIGURE 5.13 – Ventilation de l'impact environnemental de la fabrication et de l'utilisation des équipements inventoriés.

- Autre : 14%
- Imprimantes : 14%
- Smartphones : 7%
- Tablettes : 5%

La même analyse peut être appliquée aux équipements des centres de données. La répartition des émissions de gaz à effet de serre pour ces équipements est la suivante :

- Autres serveurs : 40% (34% de l'inventaire des équipements)
- Serveur lame x86 : 20% (20% du stock d'équipement)
- Serveur pizza x86 : 14% (9% de l'inventaire des équipements)
- Switch : 10% (15% de l'inventaire des équipements)
- Autre : 7% (18% de l'inventaire de l'équipement)
- Pare-feu : 3% (4% du stock d'équipement)
- Rack UPS : 1% (1% du stock d'équipement)

Les serveurs "autres" sont responsables de la majorité des émissions de GES liées aux équipements des centres de données.

Les prémices des bonnes pratiques

Durée de vie de l'équipement

En général, les entreprises interrogées conservent leurs équipements numériques pendant une moyenne de 5 ans : une moyenne qui varie en fonction du type d'équipement d'équipement (Voir Figure 5.14).

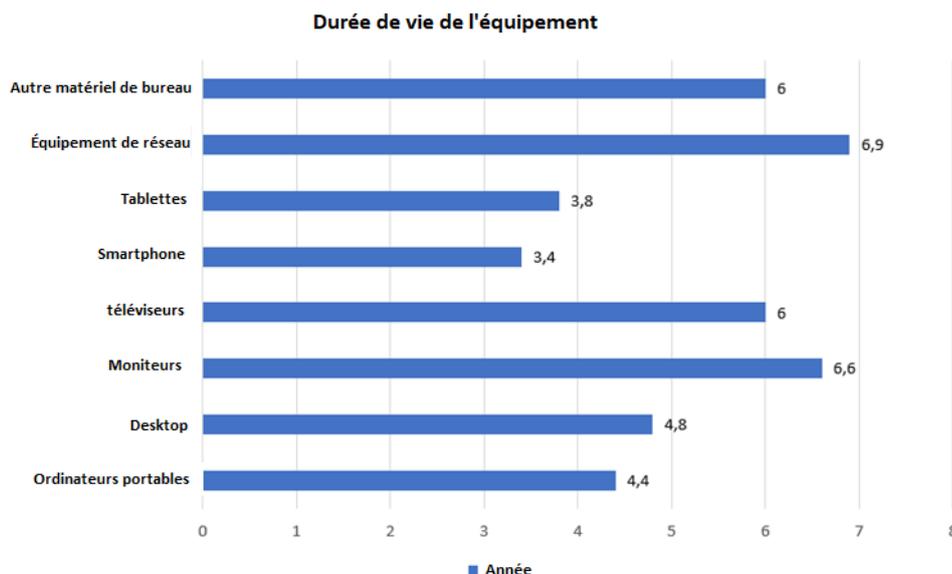


FIGURE 5.14 – Durée de vie moyenne par catégorie d'équipement de bureau.

Achats d'équipements reconditionnés

L'achat d'équipements reconditionnés semble être marginal pour les entreprises. En moyenne, seuls 6% des équipements informatiques sont achetés en reconditionné parmi les répondants. Cette moyenne s'explique en grande partie par le fait que près de 63% de l'échantillon n'achète pas de matériel reconditionné. Sur les 37% restants :

- 25% ont moins de 10% des équipements achetés reconditionnés
- 14% ont entre 10 et 20% des équipements achetés reconditionnés.
- 40% ont entre 20 et 30% d'équipements achetés remis à neuf
- 5% ont plus de 40% des équipements achetés remis à neuf.

Parmi les entreprises qui achètent des produits reconditionnés, 20% sont des TPE, 37% sont des PME, 25% sont des ETI et 18% des grandes entreprises. 14% d'entre elles appartiennent au secteur public, contre 85% dans le secteur privé.

Gestion responsable de la fin de vie des équipements

La fin de vie des équipements numériques est également une source importante d’empreinte environnementale. Nous constatons que parmi nos 75 répondants, une moyenne de près de 34% des équipements informatiques inventoriés dans l’étude est réutilisée dans le cadre d’une seconde vie : 23% des organisations ne donnent pas leurs équipements une seconde vie, contre 76%. La gestion de la fin de vie semblerait avoir des taux meilleurs que l’achat d’équipements remis à neuf :

- 16% réutilisent moins de 20% de leurs équipements en fin de vie
- 34% récupèrent entre 20 et 40% de leurs équipements en fin de vie
- 14% récupèrent entre 40 et 60% de leurs équipements en fin de vie
- 18% recyclent entre 60 et 80% de leurs équipements en fin de vie
- 14% récupèrent plus de 80% de leurs équipements en fin de vie.

Parmi les entreprises qui gèrent les équipements en fin de vie (Voir Figure 5.15) à travers le recyclage, le taux moyen d’équipements recyclés via une seconde vie selon la taille de l’entreprise est supérieur à la moyenne globale :

- Les TPE récupèrent 41% de leurs équipements en fin de vie
- Les PME récupèrent 57% de leurs équipements en fin de vie
- Les petites et moyennes entreprises récupèrent 45% de leurs équipements en fin de vie
- Les grandes entreprises récupèrent 39% de leurs équipements en fin de vie

Les PME semblent être les meilleurs élèves à ce sujet. Les résultats sont assez homogènes et montrent un degré de maturité assez avancé.

5.6 Analyse de la maturité Numérique Responsable

Le numérique responsable s’applique à travers de bonnes pratiques dans une variété de domaines, tels que la stratégie, la gouvernance et les politiques sociales. Afin d’évaluer la maturité de la démarche numérique responsable, il est essentiel de comprendre ces transformations.

En 2011, Donnellan et Curry [DSC11] ont introduit le Sustainable ICT Capability Maturity Framework (SICT-CMF) dans le but d’organiser, évaluer, planifier et gérer la capacité d’une entreprise à intégrer la démarche de Sustainable IT. Ce cadre permet une évaluation ponctuelle ainsi que des orientations pour améliorer la démarche, en utilisant 5 niveaux de maturité répartis dans 4 catégories (voir Tableau 1), chacune étant composée de sous-catégories. La maturité est évaluée sur une échelle de 1 à 5, avec les interprétations suivantes :

Revalorisation des équipements en fin de vie

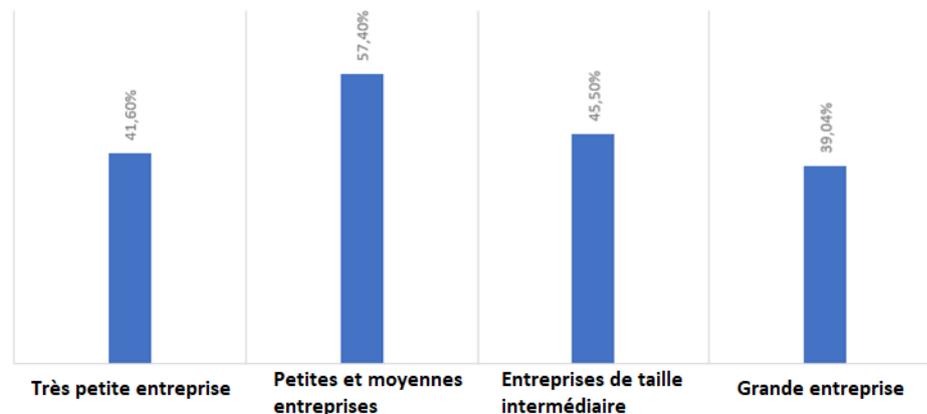


FIGURE 5.15 – Taux moyen de récupération des équipements en fin de vie par taille d'entreprise.

- *Initial* (de 1 à 1,5) : Faible compréhension du SICT, aucune action mise en place, absence de responsabilités définies pour le SICT.
- *Basic* (de 1,5 à 2,5) : Stratégie SICT limitée avec un plan d'actions réactif, conscience croissante du sujet mais manque de cohérence.
- *Intermediate* (de 2,5 à 3,5) : Stratégie SICT existante avec des pratiques et des objectifs, développement de capacités et compétences, intégration du SICT dans le cycle de vie des systèmes.
- *Advanced* (de 3,5 à 4,5) : Intégration du développement durable dans le cycle de vie des projets, reconnaissance de l'importance du SICT dans la stratégie de durabilité, alignement des paramètres commerciaux et du SICT pour améliorer la performance.
- *Optimizing* (plus de 4,5) : Application des principes du SICT à l'ensemble de l'entreprise et extension aux parties prenantes (clients, fournisseurs, partenaires).

Dans le cadre d'un audit sur la durabilité des TIC à l'Université d'Utrecht, [LEH⁺18] ont comparé 7 modèles de maturité en utilisant les critères suivants :

- Problèmes généraux / d'affaires.
- Verdissement des TIC.
- Verdissement des opérations avec les TIC.
- Verdissement des processus primaires dans l'enseignement supérieur avec les TIC.

Les modèles examinés étaient le SURF Green ICT Maturity Model [HOS⁺14], le G-Readiness framework [MCP11], le Practice oriented Green IS Framework [But11], l'approche holistique de Green IT [MG12], le Green IT framework for greening data centers [UR12], le Sustainable ICT Capability Framework, et l'Envirability maturity framework [Mur08].

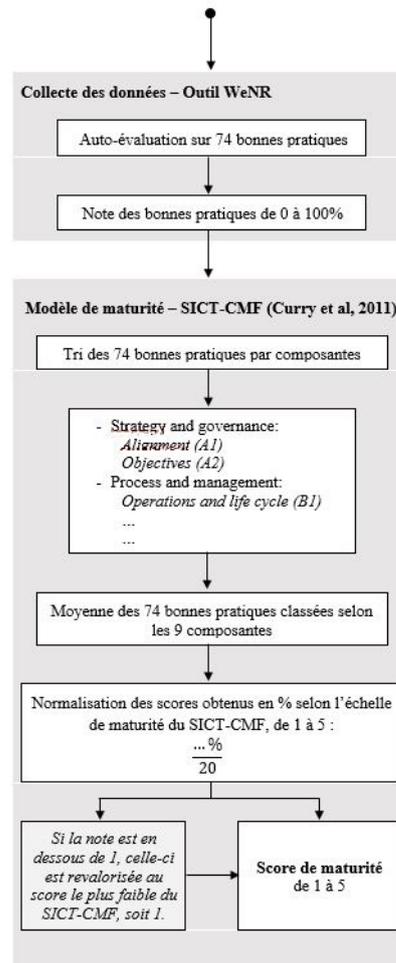
L'étude a révélé que le modèle SICT-CMF semblait être le plus complet pour prendre en compte les catégories du numérique responsable (personnes, planète, profit), ce qui renforce notre décision de l'utiliser dans ce chapitre [JP07].

Le modèle SICT-CMF servira de base méthodologique pour évaluer le degré de maturité d'un échantillon d'entreprises. Le choix des bonnes pratiques est basé sur le Référentiel Green-IT, qui répertorie les 65 bonnes pratiques clés (2020), ainsi que sur le Référentiel Green IT, qui identifie 74 bonnes pratiques clés pour un numérique plus responsable (2021) dans WeNR 2021. Ces bonnes pratiques ont été révisées en 2022 grâce au Guide de bonnes pratiques numérique responsable pour les organisations (2022) de la Direction interministérielle du numérique (DINUM), ce qui n'a entraîné que des reformulations. Ainsi, cet outil permet d'établir une liste pour évaluer les pratiques. Il est important de noter que le modèle SICT-CMF ne comprend que des descriptions brèves d'actions dans ses catégories d'évaluation, sans spécifier les actions précises associées.

La figure 5.16 illustre le processus suivi pour aligner les niveaux de maturité obtenus lors des enquêtes WeNR 2021 et 2022 avec l'échelle de notation du SICT-CMF. Les 74 bonnes pratiques, couvrant les démarches transversales, les aspects liés aux utilisateurs et ceux liés à l'organisation, ont été réparties selon les 4 axes du SICT-CMF et leurs catégories respectives : la stratégie et la gouvernance, la gestion des processus, les personnes et la culture, et la gouvernance (Voir Table 5.2). Il convient de noter qu'aucune des pratiques WeNR n'est associée à la composante D1.

Afin de respecter l'échelle d'évaluation du modèle SICT-CMF, chaque score obtenu par composante est ensuite normalisé sur une échelle allant de 1 à 5.

FIGURE 5.16 – Méthodologie de traitement et de catégorisation des bonnes pratiques de l'enquête WeNR au modèle de maturité SICT-CMF



5.6.1 Intégration de la démarche Numérique Responsable

En portant l'attention sur l'intégration de la démarche Numérique Responsable, on observe que 87% des répondants ont mis en place des actions NR, et 77,5% ont un référent NR en interne. On note en moyenne que 73,9% de la population a mis en place des actions depuis moins de 3 ans, 17,4%, depuis moins de 6 ans, et seulement 8,7%, depuis plus de 6 ans (Figure 5.18). Afin d'intégrer la démarche dans les structures concernées, certaines choisissent d'impliquer les collaborateurs : on note qu'en grande partie (87,7%) des entreprises impliquent moins de 25% de l'effectif global, 5,8% impliquent entre 25 et 50% des collaborateurs, 2,2% impliquent entre 50 et 75% des collaborateurs, et 4,3% impliquent plus de 75% des collaborateurs (Figure 5.17).

TABLE 5.2 – Description des catégories du SICT-CMF

Catégorie	Composantes	Description
Strategy and governance	Alignment (A1)	Définir et exécuter la stratégie de durabilité des TIC afin d'influencer et d'aligner les objectifs de durabilité de l'entreprise.
	Objectives (A2)	Définir et convenir des objectifs de durabilité pour les TIC.
	Operations and life cycle (B1)	S'approvisionner, exploiter et gérer les systèmes TIC pour atteindre les objectifs de durabilité.
Process management	ICT-enabled business processes (B2)	Créer des dispositions pour les systèmes TIC qui permettent d'améliorer les résultats en matière de durabilité dans l'entreprise étendue.
	Performance and reporting (B3)	Rendre compte et démontrer les progrès réalisés par rapport aux objectifs de durabilité spécifiques aux TIC et liés aux TIC, au sein de l'activité TIC et dans l'entreprise étendue.
People and culture	Adoption (C1)	Intégrer les principes de durabilité dans les TIC et l'entreprise étendue.
	Language (C2)	Définir, communiquer et utiliser un langage et un vocabulaire communs en matière de durabilité dans les TIC et les autres unités commerciales, y compris l'entreprise étendue, afin de favoriser une compréhension commune.
Governance	External compliance (D1)	Promouvoir les succès en matière de durabilité et contribuer aux meilleures pratiques du secteur.
	Corporate policies (D2)	Permettre et démontrer la conformité avec la législation et la réglementation en matière de durabilité des TIC et de l'entreprise. Exiger la responsabilité des rôles et des décisions en matière de durabilité dans les TIC et l'entreprise.

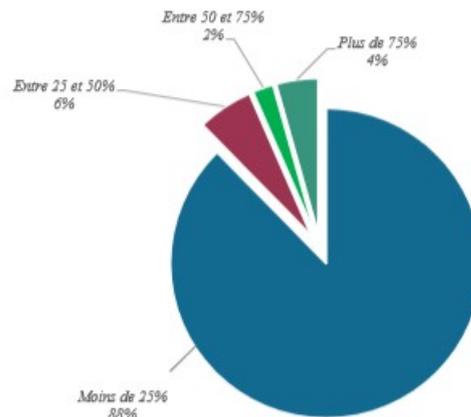


FIGURE 5.17 – Répartition par pourcentage de collaborateurs impliqués dans la démarche NR

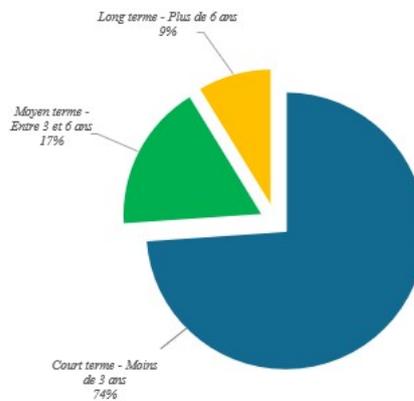


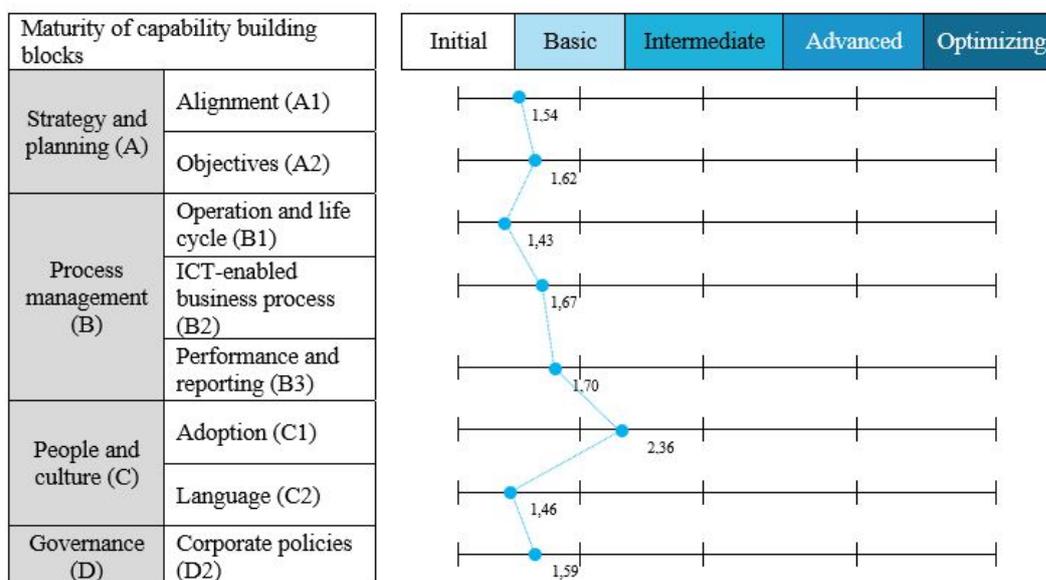
FIGURE 5.18 – Répartition des actions par temps d'introduction de la démarche NR

5.6.2 Maturité des répondants

On observe que les niveaux de maturité moyens par composantes sont très peu élevés, ne dépassant pas le niveau “basic”, et ce malgré le fait que 87% des répondants déclarent avoir mis en place des actions NR .

L'ensemble des degrés de maturité des entreprises constituant l'échantillon est hétérogène (Figure 5.19) : le degré de maturité moyen de 1,69 (basic), avec un écart-type de 0,58. L'adaptation des bonnes pratiques du WeNR aux caractéristiques du SICT-CMF nous permet d'analyser l'échantillon comme suit :

- 44,2% des participants ont une faible connaissance du Numérique Responsable. Une faible voire aucune stratégie mise en place. Le Numérique Responsable n'est pas considéré dans l'ensemble du processus (initial).



Adaptation de Donnellan et al (2011), « A Capability Maturity Framework for Sustainable

Information and Communication Technology » pour les résultats des enquêtes WeNR2021 et 2022

FIGURE 5.19 – Degré de maturité de l'ensemble des répondants des WeNR2021 et 2022

- 44,9% des participants ont une stratégie Numérique Responsable limitée, avec un plan d'actions défini, possiblement adoptée de manière réactive. Les collaborateurs ont une connaissance plus large du sujet. Des bonnes pratiques sont mises en place mais sont adoptées de manière incohérente (basic).
- 10,9% des participants ont une stratégie Numérique Responsable établie avec un plan d'actions et des priorités associés. Les structures ont développé des aptitudes et des compétences autour du sujet, et encouragent les collaborateurs à contribuer à la stratégie. Le NR est pleinement intégré dans l'ensemble des processus. Des indicateurs de suivi sont associés à chaque projet (intermediate).

Sur l'ensemble de l'échantillon, le degré de maturité moyen est le plus élevé pour la composante "Adoption" dans la catégorie "People and culture" (2,36); suivi par la composante "Performance and reporting" dans la catégorie "Process management" (1,70). On observe un faible degré de maturité (basic) pour les composantes "Operations and life cycle" (1,43), "Language" (1,46), et "Alignment" (1,54).

5.6.3 Analyse des résultats

Les résultats obtenus pour les années 2021 et 2022 convergent vers une conclusion commune : la démarche de Numérique Responsable au sein de la population étudiée reste

à un stade préliminaire. Pour les deux études, aucun niveau de maturité ne dépasse le seuil "intermédiaire". Malgré une augmentation du nombre d'entreprises participant à l'étude d'une année à l'autre, cela témoigne de l'intérêt croissant pour cette thématique, mais également de son caractère relativement nouveau et méconnu.

Sur le plan méthodologique, il est important de noter que les outils utilisés, à savoir l'outil WeNR et le modèle SICT-CMF, se complètent mutuellement. Cette complémentarité permet d'étayer l'analyse et l'évaluation du degré de maturité, comblant ainsi une lacune initiale dans la matrice WeNR. De l'autre côté, le WeNR offre une liste de bonnes pratiques concrètes qui ne sont pas détaillées dans le SICT-CMF. Une évolution envisageable serait d'intégrer la méthodologie du modèle SICT-CMF dans le processus de développement du WeNR, afin de combler les lacunes identifiées dans cet article.

Il est toutefois essentiel de noter que le nombre limité de réponses recueillies ne permet pas une analyse approfondie des contributions des différentes variables. Néanmoins, une analyse de régression des niveaux de maturité indique déjà l'influence de la taille de l'entreprise sur l'adoption de la démarche de Numérique Responsable. Il semble que la définition d'objectifs communs et l'établissement d'un langage partagé au sein de l'entreprise aient un impact positif sur la maturité globale, en particulier dans les grandes entreprises.

Une observation intéressante concerne la relation ambivalente entre les émissions de gaz à effet de serre et le degré de maturité de la démarche. Il serait pertinent d'approfondir l'analyse en examinant l'évolution des émissions de gaz à effet de serre en parallèle avec l'évolution du degré de maturité. Malgré le nombre limité d'entreprises participant à l'enquête en 2021 et 2022, une tendance notable est la réduction moyenne de 36,6% des émissions de gaz à effet de serre. Cette tendance pourrait faire l'objet d'une analyse plus approfondie dans l'étude de 2023 afin d'explorer la corrélation entre l'amélioration du degré de maturité et la réduction des émissions.

Enfin, étant donné l'impact déjà perceptible de la réglementation sur les résultats des répondants, il est essentiel de continuer à analyser son influence dans les prochaines étapes de la recherche.

5.7 Résultats

L'évolution temporelle de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur numérique constitue un enjeu crucial pour évaluer son impact environnemental. Ce secteur connaît une croissance rapide et constante, caractérisée par l'émergence de nouvelles technologies. Cette croissance s'accompagne d'une augmentation concomitante des besoins en énergie et des émissions de gaz à effet de serre, ce qui peut avoir des répercussions néfastes sur l'environnement. L'analyse des tendances temporelles de ces indicateurs permet d'identifier les facteurs explicatifs de ces variations et les leviers d'action pour les optimiser. De plus, elle permet de déterminer les domaines prioritaires pour atteindre les objectifs de durabilité environnementale. Par conséquent, une analyse temporelle approfondie s'avère indispensable pour appréhender l'impact environnemental du numérique et mettre en place des solutions efficaces en vue de sa réduction.

5.7.1 Tendances observées

Les taux de variation ont été calculés pour les résultats obtenus entre 2018 et 2022, ainsi que pour ceux entre 2021 et 2022. Ces résultats englobent divers indicateurs permettant d'évaluer la performance des organisations en matière de Numérique Responsable (Voir Table 5.3).

Dans l'ensemble, les évolutions observées semblent indiquer que des efforts ont été déployés pour réduire les externalités négatives du numérique, notamment en ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre, la quantité de déchets numériques et la durée moyenne d'utilisation des équipements. Ces efforts sont conformes aux objectifs du développement durable et aux principes du Green IT, qui visent à réduire l'empreinte environnementale à l'échelle des systèmes d'information, ainsi qu'à l'approche IT for Green, qui vise à mettre le numérique au service du développement durable.

Les données de l'année 2021 peuvent être en partie expliquées par la crise sanitaire de 2020, qui a entraîné une généralisation du télétravail au sein des entreprises. Cette situation a conduit les organisations à équiper leurs collaborateurs pour maintenir leurs activités, ce qui se reflète dans l'augmentation significative du nombre d'ordinateurs portables par collaborateur, qui a augmenté de 119,83% entre 2018 et 2021. Cette augmentation a eu un impact sur les émissions totales de gaz à effet de serre par collaborateur, qui ont connu une légère hausse de +2,53% sur la même période.

- Les émissions totales par collaborateur ont légèrement augmenté de 2018 à 2022 (+2,53%), mais elles ont baissé de 2021 à 2022 (-7,09%).
- Les émissions inventaires par collaborateur ont plus augmenté que les émissions totales (+3,90%), mais elles ont aussi baissé de 2021 à 2022 (-0,85%).
- Les émissions data center par collaborateur ont fortement diminué de 2018 à 2022 (-6,85%) et surtout de 2021 à 2022 (-38,11%).
- Le taux de déchets par collaborateur a chuté de manière spectaculaire de 2018 à 2022 (-64,07%) et encore plus de 2021 à 2022 (-31,87%).
- La moyenne d'utilisation des laptops a fortement augmenté (+119,83%), tandis que celle des desktops a fortement diminué (-44,12%).
- La moyenne d'utilisation des écrans et des télévisions a augmenté modérément (+23,09% et +6,98%), tandis que celle des smartphones et des tablettes a augmenté puis diminué (+51,18% puis -4,01%, +18,29% puis -4,23%).
- Le nombre d'équipements inventaire par collaborateur a légèrement augmenté (+5,17%), tandis que celui des équipements data center a fortement diminué (-48,06%).

Ces observations suggèrent que les organisations ont réduit leurs impacts environnementaux en diminuant leurs émissions et leurs déchets. Elles ont aussi optimisé l'utilisation de leurs équipements en privilégiant les laptops aux desktops et en réduisant le nombre d'équipements data center.

TABLE 5.3 – Les tendances observées

	2018	2021	2022	<i>Taux 2018-2022</i>	<i>Taux 2021-2022</i>
Emissions totales par collaborateurs (kg CO2e)	240,66	265,57	246,74	2,53%	-7,09%
Emissions inventaires par collaborateur (kg CO2e)	209,91	219,98	218,10	3,90%	-0,85%
Emissions data center par collaborateur (kg CO2e)	30,75	46,29	28,65	-6,85%	-38,11%
Taux de déchets par collaborateur (kg)	2,85	1,50	1,02	-64,07%	-31,87%
Moyenne d'utilisation des laptops (en année)	4,73	4,56	4,60	-2,64%	0,98%
Moyenne d'utilisation des desktops (en année)	5,25	4,97	4,91	-6,43%	-1,17%
Moyenne d'utilisation des écrans (en année)	5,67	6,76	6,98	23,09%	3,30%
Moyenne d'utilisation des télévisions (en année)	5,86	6,21	6,27	6,98%	0,82%
Moyenne d'utilisation des smartphones (en année)	2,22	3,50	3,36	51,18%	-4,01%
Moyenne d'utilisation des tablettes (en année)	3,20	3,96	3,79	18,29%	-4,23%
Nombre d'équipements inventaire par collaborateur	3,58	3,72	3,76	5,17%	1,05%
Nombre d'équipement data center par collaborateur	0,14	0,09	0,07	-48,06%	-15,63%
Nombre d'équipement desktops par collaborateur	0,52	0,35	0,29	-44,12%	-17,48%
Nombre d'imprimante par collaborateur	0,26	0,26	0,22	-16,35%	-16,85%
Nombre de laptop par collaborateur	0,34	0,57	0,74	119,83%	28,78%
Nombre de tablette par collaborateur	0,22	0,20	0,15	-32,25%	-28,37%

5.7.2 Scénarios pour l'horizon 2030

Nous esquissons ici trois scénarios distincts qui projettent l'évolution potentielle jusqu'en 2030. Ces scénarios comprennent un scénario privilégiant la sobriété énergétique numérique, un scénario de persistance des tendances actuelles et un scénario d'aggravation de la situation. Chacun d'entre eux est caractérisé par des hypothèses spécifiques et offre des résultats quant aux émissions de gaz à effet de serre (GES) liées aux équipements numériques, suivis d'une discussion des implications et des recommandations. Tous nos scénarios ont utilisé le modèle de la partie 6.3.3 du WeNR Light.

Nous avons opté pour l'adaptation du modèle élaboré par Andrae et Edler en 2015 pour nos scénarios [AE15], en raison de quatre motifs essentiels :

1. Le périmètre choisi correspond à notre propre définition du domaine du numérique, et ce périmètre est d'envergure mondiale.
2. Toutes les hypothèses formulées et les équations utilisées sont explicitement exposées.
3. La résolution du modèle est suffisamment fine pour permettre des analyses de sensibilité sans pour autant rendre complexe l'identification des paramètres clés.

Il convient de noter qu'un rapport du CIGREF [Cig21] intitulé "Futurs numériques : quelles trajectoires ?" datant de 2021 propose également des scénarios prospectifs pour la période 2030-2035. Toutefois, nous avons constaté que la méthodologie employée et les données utilisées dans ce rapport ne sont pas suffisamment transparentes pour être applicables à notre propre contexte.

Pour intégrer les données prospectives de l'étude menée par Andrae et Edler [AE15] dans notre modèle, nous avons suivi une méthodologie en plusieurs étapes. L'objectif premier était d'extrapoler la consommation énergétique du secteur numérique pour la période de 2010 à 2030, en utilisant les scénarios dénommés "Best Case," "Expected Case," et "Worst Case," tels qu'énoncés dans ladite étude.

Dans un premier temps, nous avons effectué une collecte exhaustive de données de référence correspondant à la période de base de l'analyse conduite par Andrae et Edler. Cette collecte englobait divers paramètres, dont la consommation énergétique du secteur numérique, les émissions de gaz à effet de serre, ainsi que d'autres variables pertinentes.

Par la suite, nous avons minutieusement examiné les trois scénarios prospectifs élaborés dans l'étude susmentionnée.

En se fondant sur les informations collectées, nous avons étendu nos analyses pour prévoir la consommation énergétique du secteur numérique sur une période allant de 2014 à 2030. Cette projection a été élaborée en intégrant les taux de croissance pertinents issus des scénarios préalablement évoqués, lesquels ont été incorporés dans nos propres modèles prospectifs.

Scénario 1 : Priorité à la sobriété énergétique numérique

Dans ce scénario, les pouvoirs publics et les entreprises s'engagent dans des politiques visant à promouvoir une utilisation responsable et efficace de l'énergie dans le

domaine des équipements numériques. Les investissements dans des technologies plus respectueuses de l'environnement et durables sont considérablement renforcés, tandis que les équipements énergivores et peu durables font l'objet de réglementations strictes et sont réduits. La sensibilisation de la population à l'importance de réduire les émissions de GES provenant des équipements numériques s'accroît, ce qui entraîne un comportement plus responsable et respectueux de l'environnement [AE15].

Ce scénario repose sur les hypothèses suivantes :

1. Optimisation de l'utilisation des équipements : L'entreprise encourage ses collaborateurs à prolonger la durée de vie de leurs équipements (laptops, desktops, écrans, smartphones, tablettes, télévisions) en favorisant les mises à jour matérielles plutôt que le remplacement fréquent. La durée d'utilisation moyenne des équipements augmente au fil du temps.
2. Réduction des déchets électroniques : En prolongeant la durée de vie des équipements, l'entreprise réduit la quantité de déchets électroniques générée par collaborateur.
3. Sensibilisation et formation : L'entreprise sensibilise ses collaborateurs à l'importance de la sobriété énergétique numérique et les encourage à adopter des pratiques plus durables, telles que l'extinction des équipements lorsqu'ils ne sont pas utilisés.

Ce scénario exige une transformation fondamentale de notre conception et de notre utilisation du numérique. Il nécessite une forte volonté politique et une mobilisation collective pour mettre en œuvre les mesures nécessaires, mais offre en retour des avantages significatifs pour l'environnement et la société.

Scénario 2 : Tendance actuelle continue

Dans ce scénario, les tendances actuelles en matière de consommation d'énergie dans les équipements numériques se poursuivent sans changement significatif. Les politiques environnementales demeurent peu ambitieuses, et les investissements dans des technologies plus durables restent limités. Les émissions liées aux équipements numériques continuent d'exercer un impact négatif sur l'environnement, tandis que l'utilisation inefficace s'aggrave progressivement [AE15].

1. Remplacement fréquent des équipements : Les collaborateurs continuent de remplacer régulièrement leurs équipements numériques.
2. Exploitation des data centers : L'entreprise maintient ses data centers sans grande optimisation, ce qui entraîne une augmentation continue des émissions de carbone liées à leur fonctionnement.
3. Gestion inefficace des déchets électroniques : Les taux de déchets par collaborateur restent faibles, car la durée de vie des équipements est courte, mais la gestion des déchets électroniques n'est pas priorisée.

4. Absence de sensibilisation : L'entreprise ne fait pas d'efforts significatifs pour sensibiliser ses collaborateurs à la sobriété énergétique numérique, et les pratiques actuelles restent inchangées.

Ce scénario reflète une absence de prise de conscience et de volonté de changement face aux enjeux environnementaux du numérique. Il conduit à une situation insoutenable pour la planète et pour la société, exigeant une réaction urgente et radicale pour inverser la tendance.

Scénario 3 : Aggravation

Dans ce scénario, les tendances actuelles en matière de consommation d'énergie dans les équipements numériques s'aggravent, avec une augmentation de l'utilisation d'équipements énergivores et peu durables. Les politiques environnementales sont faibles ou inexistantes, et les émissions liées aux équipements numériques ont un impact de plus en plus dévastateur sur l'environnement. La consommation inefficace s'accélère, entraînant une augmentation considérable des émissions de GES et un impact négatif sur l'environnement [AE15].

1. Augmentation de la consommation énergétique : L'utilisation intensive des technologies numériques, notamment des équipements énergivores comme les écrans continue d'augmenter.
2. Expansion des data centers : L'entreprise investit massivement dans l'expansion de ses data centers pour répondre à une demande croissante en ligne, ce qui entraîne une forte augmentation des émissions de carbone.
3. Obsolescence rapide des équipements : Les collaborateurs continuent de remplacer fréquemment leurs équipements sans considération pour leur durabilité, ce qui génère plus de déchets électroniques.
4. Ignorance de la gestion des déchets : L'entreprise ignore les problèmes liés à la gestion des déchets électroniques, ce qui entraîne une accumulation de déchets non traités.
5. Absence de conscience environnementale : Il n'y a pas de sensibilisation ni d'efforts pour réduire l'impact environnemental de l'entreprise, ce qui contribue à l'aggravation de la situation.

Ce scénario représente le pire des cas possibles en termes d'impact environnemental du numérique. Il conduit à une situation critique pour la planète et la société, exigeant une intervention immédiate et massive pour éviter un point de non-retour.

5.7.3 Méthodologie de calcul des scénarios

Dans cette section, nous détaillerons la méthodologie employée pour obtenir les données chiffrées des trois scénarios. Pour cela, nous avons mis en œuvre une analyse de régression linéaire multivariée, telle que décrite dans notre chapitre intitulé "WeNR Light"

6.3.3. Cette approche a consisté à utiliser un modèle de régression afin d'estimer les émissions totales par collaborateur en kg CO₂e, en prenant en compte plusieurs variables indépendantes. Notamment, nous avons exploité les données du data lake WeNR de la campagne 2022 comme source d'information pour notre étude.

Nous avons estimé les coefficients de régression pour chaque variable indépendante. Voici les coefficients estimés et leurs significations :

- Coefficient Constante : 478,0660324
- Coefficient "Emissions inventaires par collaborateur (kg CO₂e)" : 0,593067588
- Coefficient "Emissions data center par collaborateur (kg CO₂e)" : -0,100422003
- Coefficient "Taux de déchets par collaborateur (kg)" : -2,284828876
- Coefficient "Moyenne d'utilisation des laptops (en année)" : -66,20278557
- Coefficient "Moyenne d'utilisation des desktops (en année)" : -3,039367197
- Coefficient "Moyenne d'utilisation des écrans (en année)" : -3,593095475
- Coefficient "Moyenne d'utilisation des télévisions (en année)" : 5,151604701
- Coefficient "Moyenne d'utilisation des smartphones (en année)" : -2,821544926
- Coefficient "Moyenne d'utilisation des tablettes (en année)" : -5,491755855
- Coefficient "Nombre d'équipements inventaire par collaborateur" : 0,696154276
- Coefficient "Nombre d'équipement data center par collaborateur" : 60,86129011
- Coefficient "Nombre d'équipement desktops par collaborateur" : -42,2172953
- Coefficient "Nombre d'imprimantes par collaborateur" : -18,88341376
- Coefficient "Nombre de laptops par collaborateur" : -5,264038778
- Coefficient "Nombre de tablettes par collaborateur" : 51,63243535

Pour chaque scénario, nous avons attribué des valeurs spécifiques à chacune de ces variables indépendantes en fonction de nos hypothèses pour chaque scénario. En utilisant ces valeurs attribuées, nous avons calculé les émissions totales prévues pour chaque scénario en utilisant la formule de régression.

$$\text{Emissions totales par collaborateur} = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \dots + \beta_{15} \cdot X_{15} \quad (5.1)$$

où β_0 est le coefficient constant, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{15}$ sont les coefficients de régression estimés pour chaque variable indépendante, et X_1, X_2, \dots, X_{15} sont les valeurs attribuées à chaque variable indépendante pour chaque scénario.

En utilisant cette formule, nous avons calculé les chiffres des trois scénarios pour "Émissions totales par collaborateur (kg CO₂e)".

5.7.4 Scénarios prospectifs

L'émission totale de gaz à effet de serre (GES) par collaborateur constitue un indicateur significatif pour évaluer l'impact environnemental d'une organisation. Il est notable que cette émission a connu une augmentation entre 2018 et 2021, passant de 240 kg CO₂e à 265 kg CO₂e. Cette évolution peut être attribuée à une hausse de la consommation d'énergie et à une utilisation accrue de ressources au sein des centres de données de l'entreprise.

Toutefois, en 2022, l'émission totale de GES par collaborateur diminue, atteignant 246 kg CO₂e. Cette réduction peut être attribuée à une prise de conscience croissante au sein des entreprises quant à l'importance de réduire leur impact environnemental. Elle peut également être le résultat d'une augmentation de l'utilisation de sources d'énergie renouvelable et de technologies plus efficaces.

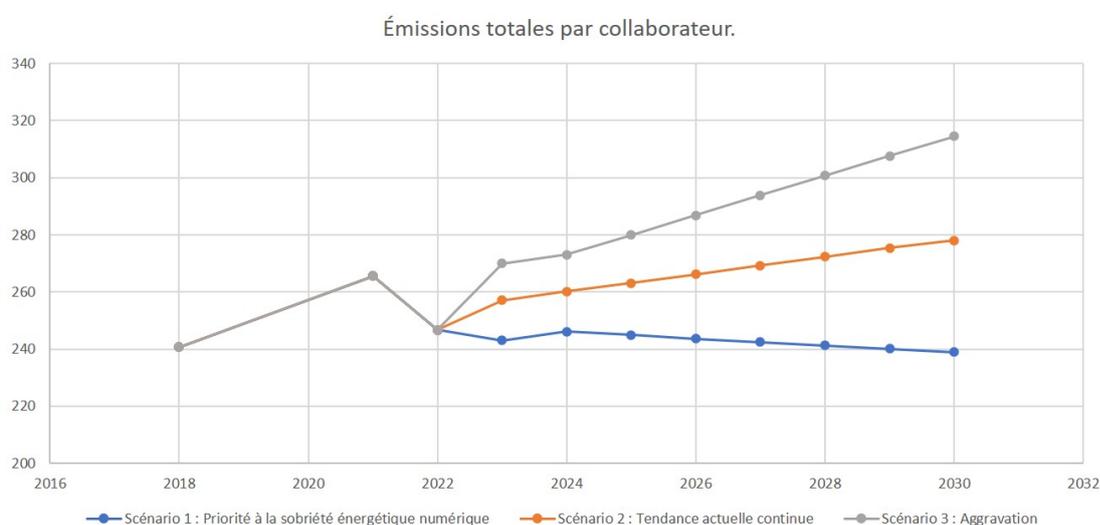


FIGURE 5.20 – Émissions totales par collaborateur.

Selon différents scénarios envisagés, les émissions totales de gaz à effet de serre par collaborateur connaîtraient des variations en 2030. Dans le scénario 1, axé sur l'efficacité énergétique numérique, une réduction significative est anticipée, avec une valeur prévue de 239 kg CO₂e. Cette diminution résulterait de l'utilisation de sources d'énergie renouvelable, de technologies plus efficaces dans les centres de données, ainsi que de programmes de sensibilisation et de formation pour les collaborateurs.

En revanche, le scénario 2, reflétant la poursuite de la tendance actuelle, prévoit une réduction moins rapide, avec une valeur prévue de 278 kg CO₂e en 2030. Cette stagnation pourrait s'expliquer par le manque d'engagement de l'entreprise dans la réduction de son impact environnemental ou des contraintes budgétaires limitant la mise en place de mesures plus efficaces.

Le scénario 3, qui envisage une détérioration de la situation, prévoit une augmenta-

tion des émissions, atteignant 315 kg CO₂e en 2030. Cette hausse serait attribuable à une augmentation de la consommation d'énergie et de ressources dans les centres de données de l'entreprise, ainsi qu'à un manque d'engagement envers la réduction de l'impact environnemental.

Il est donc impératif pour les entreprises de mettre en œuvre des mesures efficaces visant à réduire leurs émissions totales de gaz à effet de serre par collaborateur (Voir Figure 5.20). Cela comprend l'utilisation de sources d'énergie renouvelable, l'adoption de technologies plus efficaces, la sensibilisation et la formation des collaborateurs, ainsi que la mise en place de politiques environnementales.

5.8 Conclusion et perspectives

En conclusion, ce chapitre a présenté l'outil WeNR, un outil pour évaluer l'empreinte environnementale et la maturité numérique responsable des systèmes d'information au sein des organisations. Au cours de cette exploration, nous avons examiné en détail son architecture, son mode de fonctionnement, les étapes de sa mise en œuvre, les enseignements tirés des retours d'expérience, ainsi que les limites à prendre en compte dans son utilisation. De plus, nous avons analysé les résultats de la campagne de 2021 menée auprès de plus de 90 organisations à travers l'Europe, ainsi que l'évaluation approfondie de la maturité numérique responsable basée sur le modèle SICT-CMF.

Simultanément, nous avons esquissé une vision prospective à l'horizon 2030, décrivant trois scénarios possibles en fonction de l'engagement des organisations dans une démarche de numérique responsable. Ces scénarios ne servent pas seulement à anticiper l'avenir, mais ils ont également un rôle crucial dans la sensibilisation des organisations aux enjeux environnementaux liés au numérique. Ils représentent un appel à l'action visant à encourager les organisations à adopter des pratiques plus sobres et durables.

En résumé, ce chapitre met en évidence l'intérêt et la pertinence de WeNR en tant qu'outil d'accompagnement pour les organisations souhaitant réduire leur empreinte numérique. WeNR constitue un levier pour une transformation digitale responsable.

À l'approche de 2030, il devient impératif pour les organisations d'intégrer pleinement les préoccupations environnementales dans leur stratégie numérique, et WeNR se positionne comme un allié essentiel dans cette quête vers un avenir plus durable et responsable.

Positionnement

- Établissement de métriques claires : définir des métriques claires pour mesurer l'impact numérique, telles que l'augmentation de la productivité, la réduction des coûts et la satisfaction des clients.
- Communication transparente : communiquer clairement les résultats de l'évaluation de l'impact numérique aux parties prenantes pour les informer des progrès et des opportunités d'amélioration.

Contributions

- Modèles de mesure de l'impact numérique : l'outil utilise des modèles quantitative et qualitative pour mesurer l'impact des technologies numériques sur une organisation.
- Visualisation des données : l'outil peut utiliser des techniques de visualisation de données pour rendre les résultats facilement compréhensibles pour les décideurs.

Chapitre 6

WeNR Light

Sommaire

6.1	Introduction	141
6.2	WeNR Light	142
6.2.1	Objectifs	142
6.2.2	Source	142
6.2.3	Intérêt	144
6.2.4	Conception	144
6.2.5	Implementation	144
6.3	Méthodologie détaillée	145
6.3.1	Agrégation des données	145
6.3.2	Méthode K-Means et Pearson	145
6.3.2.1	Résultats	145
6.3.2.2	Discussion	147
6.3.3	Méthode régression linéaire multivariée	148
6.3.3.1	Régression linéaire multivariée	148
6.3.3.2	Équations	148
6.3.3.3	Résultats	149
6.3.3.4	Discussion	150
6.4	Conclusion	150

6.1 Introduction

Comme vue dans le précédent chapitre, WeNR vise à évaluer l’empreinte carbone des actifs informatiques. Cette initiative implique la compilation de diverses sources de

données pour établir un cadre de référence commun au sein de la communauté en matière d'évaluation de l'empreinte carbone.

Les données recueillies révèlent des informations cruciales sur les consommations énergétiques des actifs informatiques, telles que la consommation totale d'énergie des salles de serveurs. Cependant, il est essentiel de noter que la collecte de ces données peut présenter des défis, pouvant constituer un obstacle pour certaines entreprises souhaitant participer à l'étude.

Afin de surmonter cette problématique, nous avons développé WeNR Light, une version simplifiée de l'outil WeNR. WeNR Light remplace le questionnaire détaillé de WeNR par un questionnaire concis d'environ dix questions, accessible directement sur notre site web¹. L'objectif est de faciliter et d'accélérer la participation des entreprises à l'évaluation de leur empreinte carbone.

6.2 WeNR Light

Dans cette section, nous expliquerons comment nous avons adapté l'étude WeNR pour créer l'outil en ligne WeNR Light.

6.2.1 Objectifs

L'outil d'estimation de l'empreinte carbone offre une interface utilisateur intuitive qui, en tandem avec un modèle de données sophistiqué, permet aux utilisateurs de quantifier leurs émissions de carbone et de mettre en place des stratégies visant à les réduire. Cette approche englobe la gestion personnelle de l'empreinte carbone, englobant tant la mesure de ces émissions que la mise en œuvre de mesures pour les atténuer. Une multitude d'outils de calcul des empreintes carbone, qu'ils soient destinés à un usage public ou privé, sont disponibles pour évaluer les émissions, fournissant ainsi aux utilisateurs une gamme d'options pour gérer leurs comportements individuels [AHB⁺21].

La littérature propose de nombreux calculateurs d'empreinte carbone personnelle pour des contextes quotidiens, comme en témoigne la Table 3.1 du chapitre 3. Cependant, il existe un manque d'outils spécifiquement conçus pour les environnements professionnels.

Le but de ce chapitre est de combler cette lacune en initiant et en suivant les efforts de réduction des émissions de gaz à effet de serre basés sur l'étude WeNR. Pour ce faire, nous proposons un calculateur d'empreinte carbone open source adapté au milieu professionnel, en utilisant le simulateur Nos Gestes Climat (NGC) comme base solide, avec une portée limitée au numérique.

6.2.2 Source

WeNR Light, qui est une déclinaison de l'outil intitulé "Nos Gestes Climat (NGC)"², trouve sa source d'inspiration dans l'ONG française ABC, qui a conçu en 2020 un calcula-

1. <https://www.wenlight.org/>

2. <https://nosgestesclimat.fr/?lang=fr>

teur du même nom. Ce calculateur tire directement son origine d'une initiative similaire élaborée en 2010 par l'ADEME, une agence publique française. Outre cette première source d'inspiration, NGC a également bénéficié de contributions de la part d'Avenir Climatique, une ONG française dont la mission est d'améliorer la comptabilité carbone et de promouvoir la transition vers une société à faible émission de carbone. Le fruit de cette collaboration a été rendu accessible au public sous forme d'une application open source, qui a reçu le soutien à la fois de l'ADEME et de l'incubateur beta.gouv.fr [AHB⁺21].

La genèse de NGC résulte d'une étroite collaboration entre Avenir Climatique, ADEME et d'autres acteurs visant à simplifier l'accès aux informations relatives à l'empreinte carbone tout en encourageant une prise de conscience active et un engagement concret.

NGC est une déclinaison du projet futur.eco, qui à son tour découle du projet mon-entreprise.fr, développé par l'incubateur de services publics français beta.gouv.fr et l'URSSAF. Cette série de dérivations témoigne de l'intérêt pour le code open source au service de l'intérêt public, permettant ainsi d'aborder une grande variété de domaines professionnels, dont les contributions sociales, pour traiter des sujets diversifiés. Le succès de cette approche a conduit l'équipe de mon-entreprise à externaliser le cœur du projet vers la bibliothèque publi.codes en TypeScript, offrant ainsi aux utilisateurs la possibilité de créer des modèles d'intérêt public dans un nouveau langage de programmation français. Ils peuvent également mettre à disposition ces algorithmes ainsi que des tableaux simples pour collecter les données requises. Les données d'entrée sont directement accessibles via la page web, et les modèles développés avec publi.codes peuvent être intégralement documentés au sein de l'application web elle-même. Dans le cadre de NGC, les utilisateurs ont une facilité d'accès aux détails de leur compte [AHB⁺21].

L'architecture de NGC est divisée en deux bases de code distinctes : l'interface utilisateur et le modèle de données, représenté par un fichier YAML. Bien que le dépôt de modèles soit principalement alimenté par les équipes de Datagir et ABC, il est ouvert à toute personne souhaitant signaler des bugs, rencontrer des problèmes ou contribuer à l'amélioration des modèles locaux. L'utilisation de publi.codes garantit que les mises à jour des modèles se répercutent automatiquement sur les formulaires utilisateur, sans nécessiter d'efforts supplémentaires de la part des développeurs.

Depuis le lancement initial du projet en juin 2020, plus de 600 problèmes ont été résolus ou pris en compte dans le dépôt GitHub, qui contient également la feuille de route de NGC ainsi que des notes de version détaillées. L'interface utilisateur elle-même est codée en Javascript/Typescript et évolue rapidement pour aider les utilisateurs à mieux comprendre leur empreinte carbone de manière interactive, que ce soit sur des appareils mobiles ou des plateformes graphiques. De plus, elle offre la possibilité de partager facilement les résultats sur les réseaux sociaux, favorisant ainsi l'engagement dans des conversations visant à faire passer le débat sur le changement climatique du niveau personnel à un niveau politique. La conception du formulaire utilisateur repose sur le principe selon lequel une seule question devrait être affichée à l'écran à la fois, même en mode bureau, évitant ainsi la traditionnelle accumulation de plus de dix entrées sur une seule page. Les questions sont regroupées par catégorie de consommateur, ce qui permet aux utilisateurs de faire des pauses entre les ensembles de questions [AHB⁺21].

En somme, NGC est un calculateur open source créé par l'ONG française ABC, qui s'est inspirée d'un projet similaire développé par l'ADEME, une agence publique française. Il a également bénéficié des contributions d'Avenir Climatique, une ONG française axée sur l'amélioration de la comptabilité carbone et la transition vers une société à faible émission de carbone. Cette application a été conçue en utilisant la bibliothèque `publi.codes`, offrant ainsi aux utilisateurs la possibilité de calculer leur empreinte carbone de manière interactive et de partager les résultats sur les réseaux sociaux pour encourager des débats sur le changement climatique.

6.2.3 Intérêt

La décision de sélectionner la version NGC repose principalement sur sa rapidité de mise en œuvre et de déploiement, en comparaison avec la création d'un tout nouvel outil à partir de zéro. La version open source finale sera rendue accessible sur la plateforme GitHub, favorisant ainsi la possibilité pour d'autres organisations de continuer à développer l'outil.

Un autre avantage notable de WeNR Light réside dans son efficacité à engager les utilisateurs. L'engagement des utilisateurs joue un rôle crucial pour assurer que les estimations de l'empreinte carbone obtenues via le calculateur aient un impact significatif sur les comportements des utilisateurs. Les caractéristiques telles que la rapidité de la simulation, l'interface conviviale et les recommandations spécifiques à l'utilisateur ont été soigneusement examinées et améliorées au fil des différentes itérations.

6.2.4 Conception

La conception de cette déclinaison a été élaborée en suivant une méthodologie bien définie. Notre approche repose sur l'exploitation des données recueillies lors de l'étude WeNR, que nous avons clusterisées. Cette étape de clustering a permis de regrouper les données similaires et de dégager des tendances et des corrélations significatives.

Une fois le clustering des données accompli, nous avons opté pour une analyse avancée en utilisant une régression linéaire multivariée. Cette technique statistique nous a permis d'aller au-delà de la simple corrélation en attribuant un poids spécifique à chaque question ou variable dans l'étude WeNR. Cette attribution de poids a été cruciale pour quantifier l'impact de chaque facteur sur la déclinaison que nous cherchons à développer.

En somme, notre approche, alliant le clustering de données et une régression linéaire multivariée, nous a fourni des perspectives précieuses pour guider la conception de cette déclinaison.

6.2.5 Implementation

L'image 6.1 illustre la manière dont le WeNR Light a été appliqué, en montrant les diverses connexions entre le NGC, l'étude WeNR et le moteur de calcul, en relation avec les décideurs.

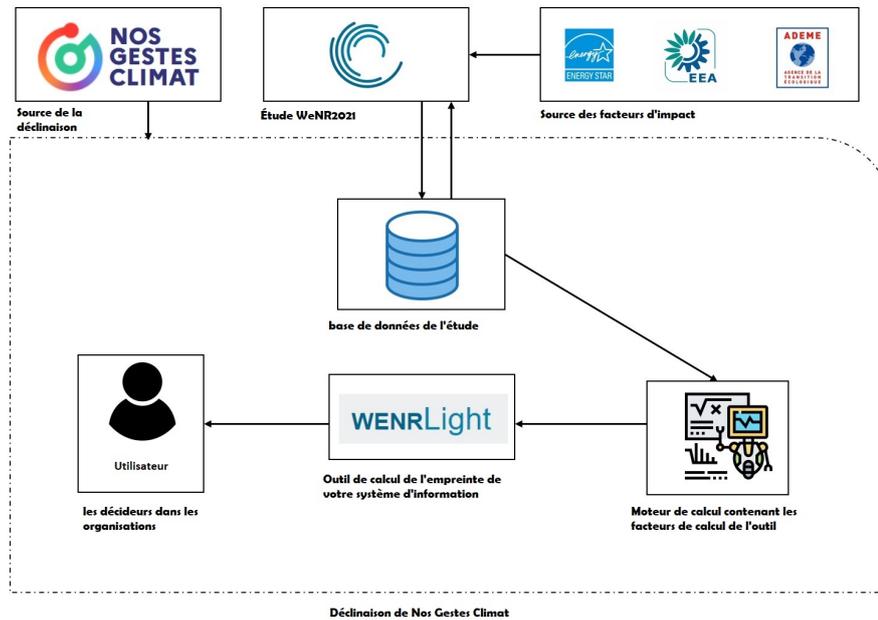


FIGURE 6.1 – Fonctionnement général de l'outil.

6.3 Méthodologie détaillée

La méthodologie sous-jacente à l'outil WeNR Light repose sur plusieurs étapes clés, que nous décrivons ci-dessous en détail :

6.3.1 Agrégation des données

Nous avons collecté des données provenant de diverses sources, y compris la consommation d'énergie des serveurs, les données sur les centres de données, et les facteurs d'émission spécifiques au secteur. Ces données ont été agrégées pour créer une base de données complète et représentative [SS77].

6.3.2 Méthode K-Means et Pearson

Dans le contexte de WeNR Light, nous utilisons la méthode K-Means pour identifier différents scénarios d'empreinte carbone en regroupant les données en ensembles homogènes et le coefficient de Pearson pour déterminer les principaux indicateurs. Ces méthodes sont décrites dans le chapitre 4.

6.3.2.1 Résultats

Tout d'abord, nous avons procédé à la sélection des variables les plus fortement corrélées aux émissions de carbone, en utilisant le coefficient de corrélation de Pearson comme

mesure [CHC⁺09]. Les variables identifiées comme ayant une corrélation significative avec les émissions de carbone sont les suivantes : le total des émissions, le nombre d'employés, le nombre de téléphones portables, le nombre d'ordinateurs de bureau, le nombre d'écrans, le nombre d'imprimantes, le nombre d'ordinateurs portables, et le nombre de matériels annexes informatiques tels que les souris, les claviers, les stations d'accueil, ainsi que le nombre de serveurs physiques déployés.

En utilisant l'algorithme de K-Means Clustering sur ces données, nous avons réussi à obtenir un modèle de clustering composé de 5 clusters distincts, que nous avons représentés graphiquement 6.2. Voici un résumé des résultats les plus importants que nous avons pu obtenir à partir de ce modèle de clustering :

- **Clusters** : Le modèle a créé 5 clusters distincts, chacun avec un nombre différent d'observations. Les tailles des clusters varient de 11 à 25 observations.
- **Explained Proportion Within-Cluster Heterogeneity** : Cette mesure indique la proportion de l'hétérogénéité totale expliquée par chaque cluster. Le cluster 3 explique la plus grande partie de l'hétérogénéité (environ 92,2%), tandis que les autres clusters expliquent des proportions beaucoup plus faibles.
- **Within Sum of Squares** : Cette mesure quantifie la dispersion des données à l'intérieur de chaque cluster. Le cluster 4 a la somme des carrés à l'intérieur la plus basse, indiquant une plus grande cohérence interne.
- **Silhouette Score** : Le score de silhouette mesure à quel point les observations au sein d'un cluster sont similaires les unes par rapport aux autres par rapport aux autres clusters. Le cluster 4 obtient le score de silhouette le plus élevé, indiquant une bonne séparation des observations.
- **Centers** : Les centres de chaque cluster ont des valeurs différentes pour les variables de caractéristiques, ce qui indique comment chaque cluster se distingue des autres en termes de caractéristiques telles que le nombre d'employés, les émissions totales, le nombre d'équipements informatiques, etc.
- **Between Sum of Squares** : La somme des carrés entre clusters mesure la distance entre les centres de chaque cluster. Une valeur plus élevée indique une meilleure séparation entre les clusters.
- **Total Sum of Squares** : La somme totale des carrés mesure la dispersion totale des données par rapport à la moyenne globale. Elle est utile pour évaluer la compacité des clusters.
- **Évaluation Metrics** : Diverses mesures d'évaluation, telles que le diamètre maximal, la séparation minimale, le coefficient de Pearson, l'indice de Dunn, l'entropie et l'indice Calinski-Harabasz, ont été calculées pour évaluer la qualité des clusters. Ces mesures fournissent des informations supplémentaires sur la cohérence et la séparation des clusters.

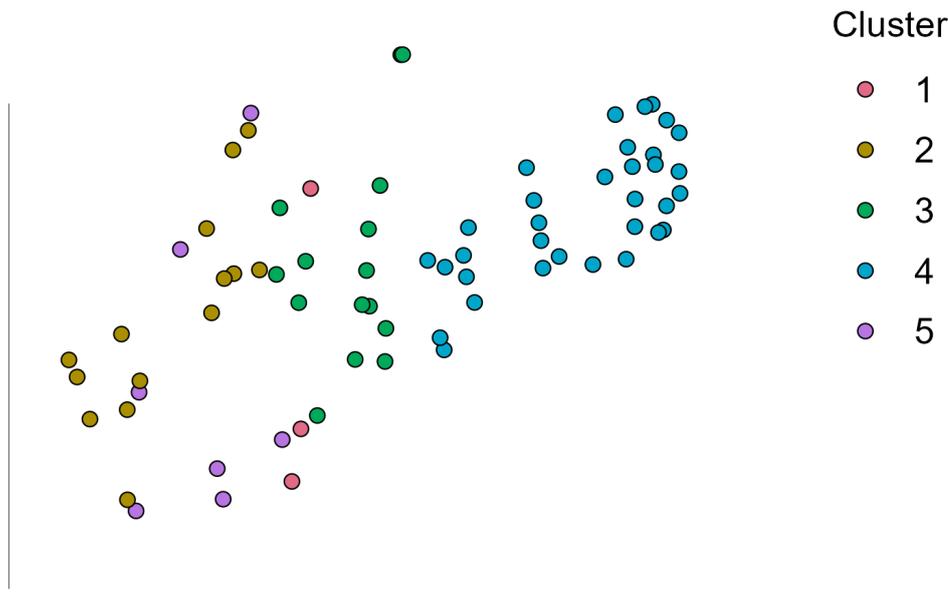


FIGURE 6.2 – Nuage de nos 5 clusters.

6.3.2.2 Discussion

L'application de l'algorithme de K-Means Clustering à nos données a abouti à la formation de 5 clusters distincts, chacun présentant des caractéristiques spécifiques en termes de taille, d'hétérogénéité interne et de séparation par rapport aux autres clusters. Le cluster 4 se distingue par sa cohérence interne élevée, tandis que le cluster 3 explique la plus grande partie de l'hétérogénéité totale.

Parmi ces cinq clusters distincts, nous avons décidé de les faire correspondre à des catégories spécifiques. Ces catégories incluent le secteur public ou les TPE de moins de 10 personnes, le secteur public ou les PME de moins de 250 personnes, le secteur public ou les ETI de moins de 5000 personnes, le secteur public ou les grandes entreprises de plus de 5000 personnes, ainsi que les associations. La pertinence de cette catégorisation de nos clusters réside dans les différences significatives qui existent entre ces types d'organisations en termes de taille, de nature juridique, de besoins, de stratégies et d'accès aux données sur les émissions de carbone. Cette segmentation nous permet d'adapter nos recommandations en matière de réduction de l'empreinte carbone de manière plus précise à chaque catégorie, favorisant ainsi une approche plus efficace et ciblée pour atteindre des objectifs environnementaux spécifiques.

Ainsi, ces résultats de clustering fournissent une base importante pour la compréhension des groupes d'organisations en fonction de leurs caractéristiques liées à l'empreinte carbone et aux équipements informatiques.

6.3.3 Méthode régression linéaire multivariée

La régression linéaire multivariée [BS77] est une technique statistique utilisée pour modéliser la relation entre plusieurs variables indépendantes et une variable dépendante continue. Dans le contexte de WeNR Light, nous utilisons la régression linéaire multivariée pour attribuer des poids aux différentes questions du questionnaire, ce qui permet de quantifier l'impact de chaque variable sur l'empreinte carbone totale.

6.3.3.1 Régression linéaire multivariée

1. **Sélection des variables indépendantes pertinentes** : Il est important de choisir judicieusement les variables indépendantes à inclure dans le modèle en fonction de leur pertinence pour la prédiction de la variable dépendante.
2. **Estimation des coefficients β** : Les coefficients de régression β sont estimés à l'aide de méthodes telles que la méthode des moindres carrés.
3. **Évaluation du modèle** : La qualité du modèle est évaluée en examinant des statistiques telles que le coefficient de détermination R^2 qui mesure la proportion de la variance de la variable dépendante expliquée par le modèle.
4. **Interprétation des coefficients β** : Les coefficients β sont interprétés pour comprendre l'impact de chaque variable indépendante sur la variable dépendante. Un coefficient positif indique une relation positive, tandis qu'un coefficient négatif indique une relation négative.

La régression linéaire multivariée permet de modéliser et de quantifier la relation entre les variables indépendantes (questions du questionnaire) et l'empreinte carbone totale.

6.3.3.2 Équations

La régression linéaire multivariée [BS77] repose sur le modèle linéaire général suivant :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + \epsilon$$

Où :

Y : Variable dépendante (dans notre cas, l'empreinte carbone).

β_0 : Intercept.

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$: Coefficients de régression correspondant aux variables indépendantes X_1, X_2, \dots, X_p .

ϵ : Terme d'erreur, qui représente les résidus non expliqués par le modèle.

L'objectif de la régression linéaire est d'estimer les coefficients β de manière à minimiser la somme des carrés des résidus ϵ . Ces coefficients quantifient la contribution de chaque variable indépendante à la variable dépendante.

6.3.3.3 Résultats

Ensuite, nous avons entrepris la création de cinq modèles de régression linéaire multivariée en utilisant les clusters précédemment définis, dans le but de mieux correspondre à la réalité pour chaque type d'organisation en fonction du nombre de collaborateurs.

Ainsi, nous présentons les résultats de l'analyse de régression effectuée pour les 5 cluster. Les statistiques de régression sont utilisées pour évaluer la performance du modèle de régression.

Statistiques de la régression : Les statistiques de régression sont présentées dans le tableau 6.3.3.3, les coefficients ont été exprimés en pourcentage.

Cluster	Coefficient de détermination multiple	Coefficient de détermination R ²
1	94,23%	95,67%
2	92,14%	94,88%
3	91,33%	96,12%
4	93,47%	94,33%
5	95,78%	92,45%

Ces statistiques indiquent que le modèle de régression est très explicatif, avec un coefficient de détermination multiple proche de 1, ce qui suggère que la plupart de la variance des données est expliquée par le modèle [GS19].

Coefficients de régression : Les coefficients de régression pour chaque variable indépendante sont présentés dans le tableau 6.3.3.3.

Variable	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4	Cluster 5
Constante	332.1081	-3111.6896	-3111.6896	125619.8273	-177520.5207
Salarié	20.4054	147.4753	147.4753	-131.9811	106.2507
Nombre équipement DC	68.3091	969.3092	969.3092	1338.5392	666.5267
Nombre Desktops	260.1892	64.9060	64.9060	-0.0212	269.9210
Nombre Écrans	45.6216	171.0687	171.0687	129.3603	149.2384
Nombre Imprimantes	14.3961	1436.3961	1436.3961	1525.4497	-21.7164
Nombre Laptops	33.9460	-288.7537	-288.7537	47.9188	79.8710
Nombre Smartphones	80.7838	844.3015	844.3015	-228.7209	177.4386
Nombre Autres équipements	-84.1441	-255.8962	-255.8962	-84.1441	-84.1441

Ces coefficients indiquent la relation entre chaque variable indépendante et la variable dépendante.

En résumé, les résultats de l'analyse de régression suggèrent que le modèle est très explicatif, avec plusieurs variables indépendantes ayant une influence significative sur la variable dépendante. Les coefficients de régression fournissent des informations sur la force et la direction de ces relations .

6.3.3.4 Discussion

La méthodologie de régression linéaire multivariée a été une étape cruciale dans notre analyse visant à quantifier l'impact des variables indépendantes sur l'empreinte carbone totale. Les résultats obtenus à travers cette approche statistique ont révélé des relations entre certaines variables indépendantes et l'empreinte carbone, offrant ainsi des informations précieuses pour comprendre comment différentes caractéristiques des organisations influencent leur impact environnemental.

Les coefficients de régression ont fourni des informations sur la force et la direction des relations entre les variables indépendantes et l'empreinte carbone.

En fin de compte, la méthodologie de régression linéaire multivariée a permis de quantifier l'impact relatif des différentes variables du questionnaire sur l'empreinte carbone totale, contribuant ainsi à une meilleure compréhension des facteurs qui influencent les émissions de gaz à effet de serre dans le contexte des actifs informatiques.

Cependant, il est essentiel de noter que la qualité des données d'entrée et la pertinence des variables sélectionnées jouent un rôle critique dans la précision des résultats. Des efforts continus de collecte de données et d'amélioration du modèle sont nécessaires pour renforcer la fiabilité de nos conclusions.

6.4 Conclusion

En annexe, vous trouverez le fonctionnement détaillé de l'outil, y compris une description étape par étape de son utilisation, et des illustrations pour faciliter la compréhension.

En conclusion, l'initiative WeNR Light représente une étape importante dans la quête de la réduction de l'empreinte carbone des actifs informatiques au sein des entreprises. Cette déclinaison de l'étude WeNR offre une solution accessible et simplifiée pour évaluer et réduire l'impact environnemental lié à l'utilisation des technologies de l'information.

L'objectif premier de WeNR Light est de faciliter la participation des entreprises à l'évaluation de leur empreinte carbone. En remplaçant un questionnaire détaillé par un outil en ligne concis, WeNR Light élimine une barrière potentielle qui aurait pu dissuader certaines entreprises de s'engager dans cette démarche cruciale. L'accessibilité accrue qu'il offre permet à un plus grand nombre d'organisations de prendre conscience de leur impact environnemental et de mettre en place des mesures pour le réduire.

La comparaison avec d'autres calculateurs d'empreinte carbone démontre que WeNR Light se positionne favorablement en termes d'accessibilité et de champ d'application. Cette accessibilité peut inciter un plus grand nombre d'entreprises à s'engager activement dans la réduction de leurs émissions de gaz à effet de serre.

L'engagement des utilisateurs est un élément central de WeNR Light, avec des caractéristiques visant à encourager la sensibilisation et l'action.

La conception de l'outil, basée sur l'agrégation de données et l'utilisation de modèles mathématiques, permet d'offrir des évaluations personnalisées de l'empreinte carbone pour différents types d'organisations. Cependant, la qualité des données d'entrée et la pertinence des variables utilisées restent des facteurs critiques pour la précision des ré-

sultats.

En fin de compte, WeNR Light représente un pas en avant important. Il offre aux entreprises un outil essentiel pour évaluer leur impact environnemental. Cependant, il est essentiel de continuer à améliorer cet outil pour répondre aux besoins spécifiques des entreprises et maintenir sa pertinence dans un contexte en constante évolution. La transition vers une société à faible émission de carbone exige des efforts collectifs, et WeNR Light contribue à cet objectif en rendant l'évaluation de l'empreinte carbone plus accessible et plus efficace pour les entreprises.

Positionnement

- Création d'un outil simplifié pour le calcul des émissions de carbone liées au secteur numérique professionnel.

Ce projet vise à concevoir et à réaliser un outil qui permet de calculer facilement et rapidement les émissions de carbone associées à l'utilisation des technologies numériques. L'outil se base sur des données scientifiques et des méthodologies reconnues pour estimer l'impact environnemental du numérique. L'outil se veut accessible et pédagogique pour sensibiliser les utilisateurs aux enjeux du numérique responsable.

- Un moyen de démocratiser la mesure de l'impact numérique.

L'outil se présente sous la forme d'une application web. Il fournit également des conseils et des pistes d'action pour réduire son empreinte carbone numérique.

Contributions

- Une première expérimentation de l'outil

Le projet a permis de réaliser une première version de l'outil et de la tester auprès d'un panel d'utilisateurs. Les résultats ont montré que l'outil était facile à utiliser et qu'il suscitait un intérêt pour la thématique du numérique responsable. Les retours des utilisateurs ont également permis d'identifier des axes d'amélioration pour la suite du projet.

- Une première application réelle de l'outil

Le projet a également permis d'utiliser l'outil dans un contexte réel : celui d'un audit environnemental d'une organisation. L'objectif était d'évaluer l'impact carbone numérique d'une organisation et de proposer des recommandations pour le rendre plus éco-responsable. L'utilisation de l'outil a facilité la collecte et le traitement des données nécessaires à l'audit. L'outil a également permis de visualiser et de communiquer les résultats de manière claire et synthétique.

Chapitre 7

WeNR Plus

Sommaire

7.1	Introduction	154
7.2	Méthodes	154
7.3	Résultats	156
7.4	Systèmes de recommandation	156
7.4.1	Contrainte	157
7.4.2	Résultats	159
7.4.3	Discussion	159
7.5	Séries chronologiques	160
7.5.1	Ajustement	160
7.5.2	Résultats	165
7.5.3	Discussion	166
7.6	Clustering	167
7.6.1	Résultats	167
7.6.2	Discussion	169
7.7	Applications	170
7.7.1	Interface	171
7.7.2	Pilotage	171
7.7.3	Prédiction	173
7.7.4	Recommandation	173
7.8	Une application : HUG	174
7.8.1	Les HUG	174
7.8.2	Stratégie	174
7.8.3	Déclinaison NR	175
7.8.4	Application	175
7.8.4.1	Utilisation de WeNR+ aux HUG	175
7.8.4.2	Impact de WeNR+ sur les HUG	177

7.8.4.3	Conclusion	178
7.9	Perspective SAAS	179
7.10	Conclusion	179

7.1 Introduction

Aujourd’hui, une variété d’outils d’aide à la décision est disponible, comme illustré dans la figure 7.1. Ce chapitre se consacre à l’introduction de WeNR+, un système d’aide à la décision, fondé sur des méthodes d’analyse de données qui est une application directe du chapitre 4. Il cible les décideurs en matière de données et de politiques, ainsi que les acteurs du secteur informatique. Ils sont encouragés à adopter des pratiques respectueuses de l’environnement, que ce soit en vertu de la loi REEN [P+23] ou à l’échelle européenne grâce à la nouvelle directive CSRD [PB22] sur le reporting de durabilité des entreprises. La loi REEN, dirigée par le Ministère de l’Environnement et exécutée par l’ADEME, propose des incitations financières et des systèmes de suivi environnemental.

WeNR+ tire parti de systèmes de recommandation pour créer des modèles et des recommandations. Parallèlement, il utilise des modèles de séries chronologiques pour détecter les tendances temporelles et anticiper les évolutions futures. En complément, il recourt au clustering pour identifier des organisations similaires en vue de les comparer entre elles.

WeNR+ est spécifiquement conçu pour aider les responsables programmatiques à surveiller en temps réel leur politique numérique responsable, à repérer et à corriger les problèmes, ainsi qu’à dégager des recommandations à partir des données agrégées de l’organisation. Il ne nécessite pas de compétences en programmation pour son utilisation et est configuré pour gérer les formats de données WeNR couramment utilisés, demandant peu de préparation de la part de l’utilisateur.

Ce chapitre expose les résultats de notre évaluation des expérimentations menées avec WeNR+. Ces évaluations ont été réalisées en utilisant divers scénarios de prise de décision. Les résultats sont ensuite discutés, et nous présentons un exemple d’implémentation au sein des hôpitaux universitaires de Genève. En conclusion, nous abordons le potentiel de cet outil dans un cadre d’expérimentation plus vaste.

7.2 Méthodes

Nous avons employé diverses méthodes pour aborder ces problématiques, telles que l’utilisation de systèmes de recommandation, de modèles de séries chronologiques, et de clustering. Ces méthodes sont exposées en détail dans le chapitre 4.

En ce qui concerne les systèmes de recommandation, au sein de WeNR+, nous avons mis en œuvre une approche basée sur le filtrage collaboratif SVD.

Pour l’analyse et la prédiction des séries chronologiques, nous avons testé quatre modèles distincts avec WeNR+. Le premier d’entre eux est l’ARIMA [Pic90], qui combine des

Panorama des solutions d'engagement et de pilotage des actions de réduction des émissions CO2

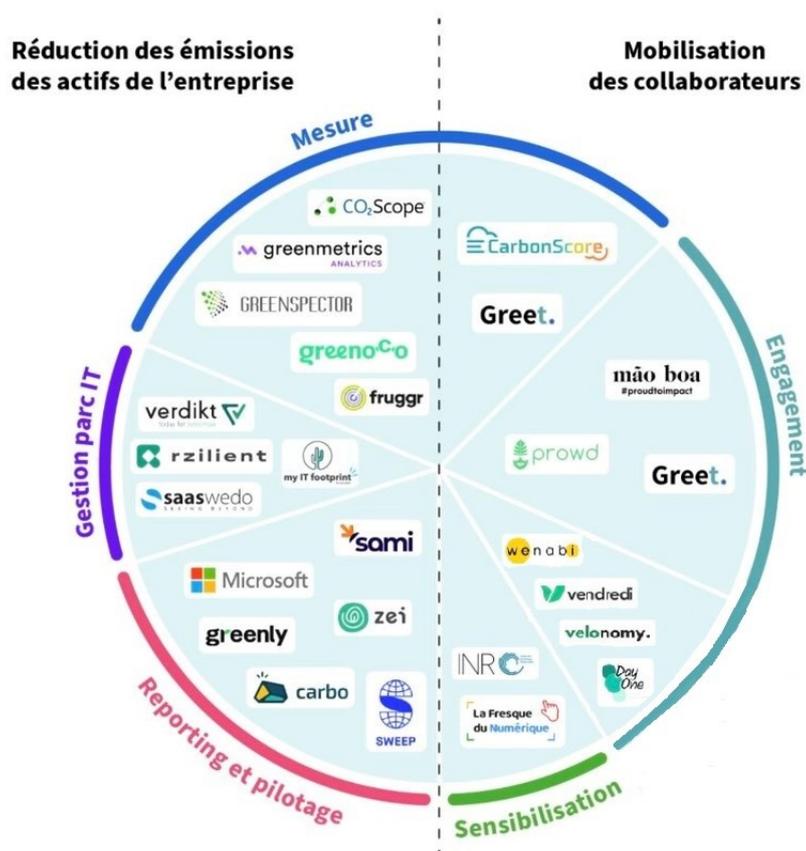


FIGURE 7.1 – Comparatif outil de pilotage (Source lecko).

éléments auto-régressifs, des composantes de moyenne mobile, et des opérations de différenciation pour modéliser les données temporelles. Le deuxième modèle, le VAR [Jus06], permet de modéliser simultanément plusieurs séries chronologiques interdépendantes en utilisant leurs valeurs passées. Ensuite, le troisième modèle est le LSTM [She20], un type de réseau de neurones récurrents capable d'apprendre des dépendances temporelles à long terme et de modéliser des motifs complexes dans les séries chronologiques. Enfin, le quatrième modèle est Prophet, développé par Facebook, qui utilise une approche additive pour modéliser les tendances non linéaires et les effets saisonniers dans les séries chronologiques. Ces quatre modèles offrent une gamme variée d'options pour la modélisation et la prévision des séries chronologiques, en fonction des caractéristiques et des objectifs des données.

En ce qui concerne le clustering, WeNR+ utilise l'algorithme K-means [BEF84].

7.3 Résultats

Nos expérimentations avec le WeNR+ sont actuellement à un stade préliminaire en raison de contraintes de temps qui ont limité notre capacité à approfondir davantage nos recherches. Bien que nous ayons entrepris des études initiales prometteuses, nous n'avons malheureusement pas pu pousser nos expérimentations aussi loin que nous l'aurions souhaité. Cependant, nous sommes déterminés à continuer d'explorer les potentialités du WeNR+ dès que possible, afin de tirer pleinement parti de ses avantages et d'obtenir des résultats plus substantiels dans nos futures recherches.

7.4 Systèmes de recommandation

Dans un premier temps, nous avons recueilli des données au sein de la campagne WeNR. Ces données étaient initialement exprimées sous forme de valeurs réelles pour diverses variables au sein de chaque organisation. Il est important de noter que ces valeurs pouvaient varier en fonction de la source de données et des critères de mesure spécifiques. Afin de garantir la cohérence de nos données et de les rendre compatibles avec notre algorithme de recommandation, nous avons réalisé une étape de normalisation.

Chacune des bonnes pratiques numériques responsables, telles que définies par le guide de la DINUM, est intrinsèquement associée à un indicateur quantitatif spécifique. Cette liaison entre le domaine qualitatif et le domaine quantitatif revêt une importance capitale pour notre système de recommandation, car elle nous permet d'appliquer une normalisation rigoureuse. La normalisation joue un rôle essentiel en harmonisant la mesure des performances numériques avec la qualité des pratiques mises en œuvre. En reliant de manière étroite les aspects qualitatifs des bonnes pratiques aux données quantitatives, notre approche offre une perspective globale et équilibrée de la responsabilité numérique. Cette perspective permet une prise de décision éclairée et des actions ciblées visant à améliorer la gestion de nos ressources numériques.

La normalisation [RHW08] des données est une étape essentielle dans le processus de prétraitement des données. Elle vise à mettre toutes les valeurs réelles sur une échelle commune, ce qui permet une comparaison équitable entre les organisations. Pour ce faire, nous avons utilisé une transformation linéaire simple pour ramener nos valeurs réelles dans la plage de 1 à 5. Cette transformation est décrite par l'équation suivante :

$$X_{\text{normalisé}} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \times (Max - Min) + 1$$

Où : - $X_{\text{normalisé}}$ représente la valeur normalisée d'une variable pour une organisation donnée. - X est la valeur réelle de la variable pour cette organisation. - X_{\min} est la valeur minimale de la variable parmi toutes les organisations de l'ensemble de données WeNR. - X_{\max} est la valeur maximale de la variable parmi toutes les organisations de l'ensemble de données WeNR.

Cette équation garantit que les valeurs réelles normalisées se situent dans la plage de 1 à 5, ce qui facilite grandement la comparaison et l'utilisation ultérieure de ces données.

Une fois que nous avons accompli la normalisation, nous avons réorganisé ces valeurs normalisées dans un datalake. Un datalake est une structure de stockage qui permet de conserver des volumes massifs de données dans leur format brut, ce qui offre une grande flexibilité pour l'analyse ultérieure. Le datalake est conçu pour être compatible avec notre algorithme de système de recommandations.

L'équation suivante représente cette étape de réorganisation du datalake :

$$\text{Datalake} = \{\text{Valeurs normalisées}\}$$

Une fois que nos données ont été normalisées et organisées dans le data lake, comme nous pouvons le voir dans la figure 7.2, elles sont prêtes à être utilisées par notre algorithme de système de recommandations pour générer des recommandations précises et pertinentes pour chaque organisation, contribuant ainsi à améliorer leur expérience et leur prise de décision.

Organisations_Id	BP_Id	Note	timestamp
1	8	5	964982176
1	9	0,05	964984041
1	10	0,5	964984100
1	11	5	964983650
1	18	2,5	964982310
1	21	0,4	964980962
1	23	2,5	964981710
1	27	2,5	964982346
1	28	5	964981208
1	31	5	964982653
1	32	2,5	964984153
1	33	0,1	964982546
1	34	2	964982271
1	35	5	964983793
1	36	2,5	964982838
1	37	2,5	964982931
1	38	0,7	964982563
1	41	2,5	964982400
1	43	5	964984086
1	48	2,5	964983614
1	51	5	964982681
1	55	4	964982903
1	58	5	964981179
1	61	2,2	964981680
1	63	5	964982951
1	64	5	964984040

FIGURE 7.2 – Valeurs normalisées pour chaque organisation et chaque bonne pratique.

Nous avons utilisé la Décomposition en Valeurs Singulières (Singular Value Decomposition - SVD) que nous avons décrite dans le chapitre 4. Elle est couramment utilisée dans les systèmes de recommandation, notamment pour notre cas, afin de mettre en place des pratiques numériques responsables, comme dans 7.3, basées sur un ensemble de données d'indicateurs.

7.4.1 Contrainte

Pour garantir que notre système de recommandation ne propose que des éléments qui n'ont pas encore été mis en œuvre ou qui n'ont pas été appliqués de manière adéquate

1 Privilégier des équipements issus du réemploi ou contenant des matériaux recyclés	5. Achat durable
2 Opter pour la location fonctionnelle d'équipements	4. Réduction des achats
3 Anticiper le sourcing des fournisseurs d'équipements contenant des matériaux recyclés ou issus du réemploi	5. Achat durable
4 Généraliser les clauses environnementales dans les appels d'offres de services	5. Achat durable
5 Généraliser l'intégration de clauses sociétales dans les marchés	5. Achat durable
6 Alimenter le système d'information avec de l'énergie renouvelable	5. Achat durable
7 Réemployer en remettant en état	2. Durée et fin de vie des équipements
8 Faire appel à un éco-organisme pour la gestion des DEEE	2. Durée et fin de vie des équipements
9 Former à la réparation des équipements	2. Sensibilisation et formation
10 Vérifier le professionnalisme des entreprises de collecte des DEEE	2. Durée et fin de vie des équipements
11 Trier et collecter séparément les consommables	2. Durée et fin de vie des équipements
12 Dédier une personne spécifique à la coordination de la démarche NR	1. Stratégie et gouvernance
13 Obtenir et consacrer un budget spécifique pour la démarche NR	1. Stratégie et gouvernance
14 Définir et mettre en place un plan d'action NR	1. Stratégie et gouvernance
15 Mettre en place et suivre des indicateurs de pilotage NR	1. Stratégie et gouvernance
16 Aligner la stratégie Numérique Responsable sur la stratégie RSE de l'entreprise	1. Stratégie et gouvernance
17 Développer un réseau de référents pour faire vivre et inscrire la démarche dans la durée	1. Stratégie et gouvernance
18 Réaffecter les équipements en interne	4. Réduction des achats
19 Evaluer régulièrement l'empreinte environnementale du SI	3. Mesure et évaluation
20 Privilégier le matériel d'occasion avant de considérer des équipements neufs	5. Achat durable
21 Upgrader les équipements plutôt que de les remplacer	4. Réduction des achats
22 Dissocier le renouvellement des unités centrales des autres équipements	4. Réduction des achats
23 Privilégier des ordinateurs éco-labellisés EPEAT Gold, TCO (ou équivalent)	5. Achat durable
24 Déployer le BYOD (Bring Your Own Device) pour certaines catégories d'utilisateurs	1. Stratégie et gouvernance

FIGURE 7.3 – Liste des bonnes pratiques.

au sein de notre organisation, nous devons mettre en place un système de contrainte au sein de notre recommandation.

La première étape consiste à comprendre que, dans de nombreuses organisations, il existe souvent une tendance à continuer à utiliser des méthodes ou des processus familiers, même lorsque de nouvelles approches ou des solutions plus efficaces sont disponibles. Pour surmonter cette résistance au changement, nous devons mettre en place des mécanismes qui encouragent activement l'adoption de nouvelles idées, de nouvelles technologies et de nouvelles pratiques.

La mise en place d'un système de contrainte dans notre système de recommandation serait une solution efficace pour atteindre cet objectif [FB08].

Nous pouvons également utiliser une approche de filtrage de la liste de recommandations en temps réel, où nous pouvons éliminer les éléments en temps réel pendant que nous proposons la liste de recommandations. Cela peut être fait en interrogeant la base de données de l'utilisateur pour déterminer les éléments qui sont déjà en place, puis en éliminant ces éléments de la liste de recommandations proposée.

La formulation mathématique de l'approche de filtrage collaboratif basé sur les utilisateurs avec restriction peut être écrite en latex de la manière suivante :

Soit U l'ensemble des utilisateurs, I l'ensemble des éléments et R la matrice d'évaluation utilisateur-élément qui contient les évaluations données par les utilisateurs pour les éléments.

Pour chaque utilisateur u de U , vous pouvez calculer la liste de recommandations $R(u)$ basée sur le SVD. Vous pouvez ensuite filtrer la liste de recommandations pour chaque utilisateur u en excluant les éléments qui sont déjà en place. Cela peut être fait en utilisant une fonction de filtrage f qui prend en entrée la liste de recommandations $R(u)$ pour l'utilisateur u et retourne la liste de recommandations filtrées $R'(u)$ pour l'utilisateur u :

$$R'(u) = f(R(u), R(u, :))$$

où $R(u, :)$ représente la ligne de la matrice R correspondant à l'utilisateur u .

La fonction de filtrage f peut être définie de différentes manières pour exclure les éléments déjà en place en fonction des critères spécifiques de l'utilisateur. Une fois que vous avez la liste de recommandations filtrées pour chaque utilisateur, vous pouvez les présenter comme une recommandation personnalisée pour chaque utilisateur.

7.4.2 Résultats

Nous allons vous présenter les résultats.

Voici la matrice SVD calculée dans notre figure 7.4.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 ...	64	65	66	67	
0	0.085475	0.040928	-0.136999	0.098401	0.197491	-0.027818	-0.044858	5.243950	0.296976	0.287679	...	5.101089	0.030872	0.050617	-0.215832
1	0.024083	-0.104211	-0.044940	-0.053994	0.379274	-0.004746	0.208680	0.104587	0.107319	-0.199791	...	0.927542	0.326501	-0.000762	0.770459
2	-0.242812	0.029162	4.653623	4.454793	4.350581	3.585197	-0.068840	0.112414	2.599263	0.066651	...	0.085922	0.663114	0.881044	4.851368
3	0.155936	4.996065	0.013865	0.173390	-0.418398	0.069361	0.068741	0.116671	-0.080648	-0.113717	...	2.509950	0.444245	0.845955	2.646827
4	-0.106849	0.214715	0.148440	0.088531	0.005440	-0.151166	0.125771	0.882898	-0.174324	0.184099	...	2.654673	0.320923	0.828712	2.355615

5 rows × 73 columns

FIGURE 7.4 – Matrice SVD.

Nous vous présentons 5 bonnes pratiques générées pour l'organisation de notre DataLake dans la figure 7.5.

	Organisation_ID	BP_ID	BP
8	35		Limiter le nombre de terminaux de téléphonie
22	71		Privilégier les prestataires dont les solution...
20	59		Privilégier une architecture applicative modul...
5	24		Déployer le BYOD (Bring Your Own Device) pour ...
17	56		Refroidir les serveurs par une solution économ...

FIGURE 7.5 – Recommandations.

7.4.3 Discussion

La mise en place de notre système de recommandation, fondé sur la Décomposition en Valeurs Singulières (SVD) et la gestion des contraintes, soulève plusieurs questions pertinentes. Dans un premier temps, nous examinerons les atouts et les limites de notre démarche, puis nous analyserons les implications de ce système dans un contexte plus vaste.

L'intégration de la SVD dans notre système de recommandation offre divers avantages. Tout d'abord, elle permet une réduction significative de la dimension des données,

ce qui se traduit par une amélioration potentielle de l'efficacité du système, lui permettant de traiter de manière plus efficace un volume important de données. De plus, la SVD offre une approche élégante pour révéler des relations subtiles entre les indicateurs de bonnes pratiques et les entités, ce qui peut conduire à des recommandations plus pertinentes. Cependant, il convient de noter que la performance de la SVD repose en grande partie sur la qualité et la méthodologie de collecte des données. Des données bruitées ou incomplètes risquent de compromettre la fiabilité des recommandations.

En ce qui concerne la gestion des contraintes, notre système de recommandation propose une approche proactive pour encourager l'adoption de nouvelles pratiques numériques responsables. En filtrant en temps réel les recommandations pour exclure les éléments déjà en place, nous pouvons contribuer à surmonter les réticences au changement au sein des organisations. Néanmoins, il est essentiel de souligner que l'imposition de contraintes peut également présenter des inconvénients. Par exemple, des contraintes excessivement strictes risquent de limiter la diversité des recommandations, entravant ainsi la découverte de nouvelles pratiques potentiellement bénéfiques. Il est donc impératif de trouver un équilibre entre la promotion de nouvelles pratiques et la préservation de la flexibilité.

Dans un contexte plus global, notre système de recommandation contribue à mettre en avant des bonnes pratiques numériques responsables et fournit des recommandations basées sur des données quantitatives.

Pour conclure, notre système de recommandation, basé sur la SVD et la gestion des contraintes, représente une approche en faveur de la promotion des bonnes pratiques numériques responsables. Cependant, il est essentiel de prendre en considération à la fois les avantages et les limites de cette approche, ainsi que son impact potentiel dans un contexte plus étendu.

7.5 Séries chronologiques

Dans le cadre de notre étude sur les séries chronologiques, nous avons été confrontés à la nécessité d'utiliser un ensemble de données fictif pour représenter l'empreinte carbone numérique d'un collaborateur européen sur une période de 9 ans, allant du 1er janvier 2014 au 31 décembre 2022. Cette exigence découlait de notre besoin d'obtenir au moins 12 observations annuelles pour chaque organisation, afin de pouvoir mener une analyse significative. Cependant, en raison de la disponibilité limitée de seulement 3 benchmarks WeNR, nous nous sommes retrouvés avec un volume de données insuffisant pour constituer un jeu de données temporellement représentatif.

7.5.1 Ajustement

Les séries chronologiques sont des données qui évoluent dans le temps et sont souvent utilisées pour analyser des tendances et prévoir des comportements futurs. Cependant, il est important de reconnaître qu'il existe plusieurs scénarios possibles d'évolution d'une série chronologique. Dans le contexte de l'empreinte carbone numérique d'un collabora-

teur européen, ces différents scénarios peuvent avoir des implications importantes sur les mesures à prendre pour réduire l’empreinte carbone.

- En ce qui concerne une tendance linéaire, si l’empreinte carbone numérique du collaborateur évolue de manière constante et régulière, il peut être possible de prévoir les émissions futures et de mettre en place des mesures de réduction graduées (Voir Figure 7.6).

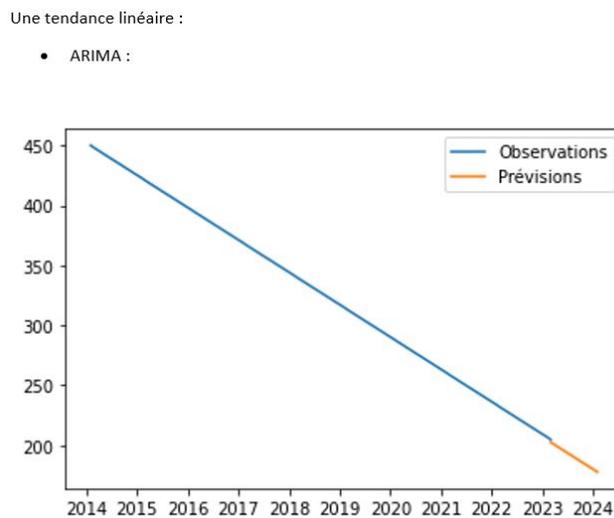


FIGURE 7.6 – tendance linéaire.

- Si la tendance est croissante, il est important d’agir rapidement pour inverser cette tendance. Des mesures plus drastiques de réduction de l’empreinte carbone peuvent être nécessaires, telles que l’utilisation de technologies plus efficaces ou des changements de comportement plus importants (Voir Figure 7.7).
- Si la tendance est décroissante, cela peut être une indication que les mesures de réduction de l’empreinte carbone sont efficaces et que des efforts supplémentaires peuvent être nécessaires pour maintenir cette tendance (Voir Figure 7.8).
- En ce qui concerne la saisonnalité, il est important de comprendre les facteurs qui influencent les émissions d’empreinte carbone tout au long de l’année. Par exemple, les émissions peuvent être plus élevées pendant les périodes de forte activité professionnelle ou de voyage. Des mesures peuvent être prises pour réduire ces émissions saisonnières, telles que la promotion du travail à distance ou l’optimisation des déplacements (Voir Figure 7.9).
- Les fluctuations aléatoires peuvent rendre difficile la prévision des émissions d’empreinte carbone. Dans ce cas, il peut être important de surveiller régulièrement les émissions et de réagir rapidement si des fluctuations imprévues se produisent (Voir Figure 7.10).

Une tendance croissante :

- ARIMA :

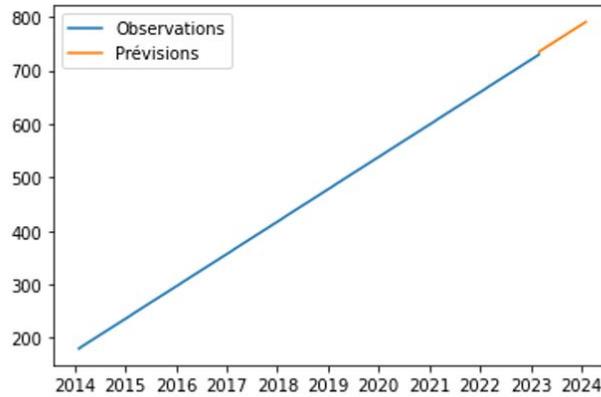


FIGURE 7.7 – tendance croissante.

Une tendance décroissante :

- ARIMA :

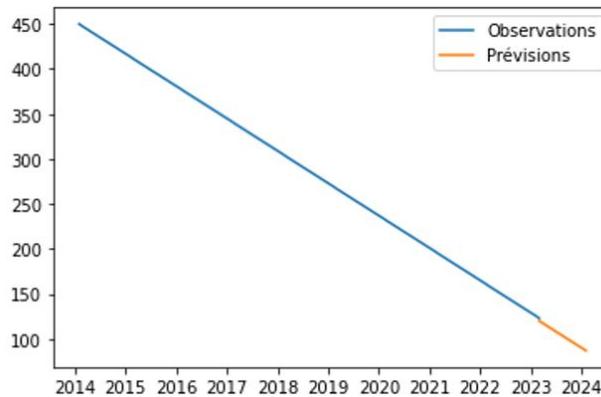


FIGURE 7.8 – tendance décroissante.

- En cas d'événements exceptionnels, tels que des catastrophes naturelles ou des crises économiques, les émissions d'empreinte carbone peuvent être affectées de manière significative. Dans ce cas, il peut être important de réagir rapidement pour réduire les émissions supplémentaires, tout en prenant en compte les circonstances exceptionnelles (Voir Figure 7.11).

Une saisonnalité :

- ARIMA :

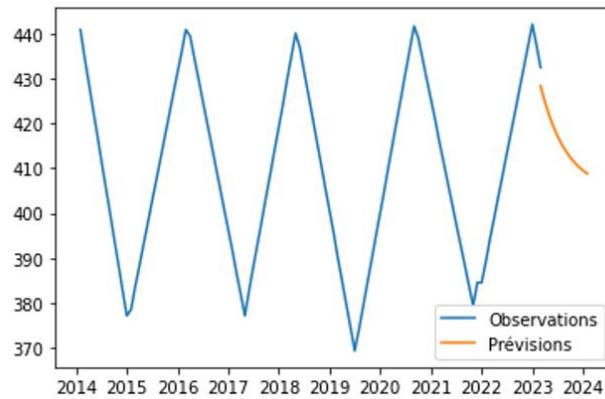


FIGURE 7.9 – saisonnalité.

- ARIMA :

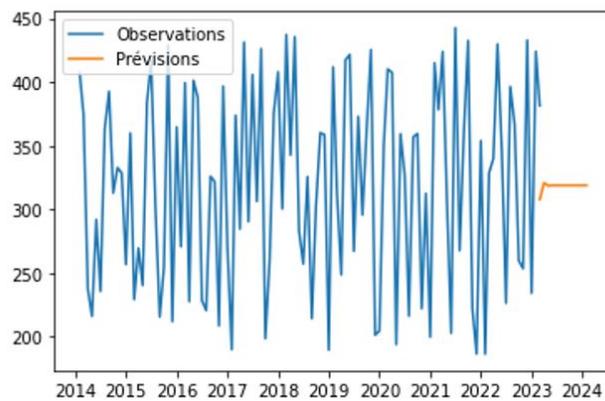


FIGURE 7.10 – fluctuations aléatoires.

- Enfin, en cas de cycles économiques, il peut être important de comprendre comment les émissions d’empreinte carbone sont liées à ces cycles. Par exemple, les émissions peuvent être plus élevées pendant les périodes de croissance économique. Des mesures peuvent être prises pour réduire ces émissions cycliques, telles que l’investissement dans des technologies propres ou la promotion de modes de vie plus durables (Voir Figure 7.12).

Il est important de considérer ces différents scénarios et de comprendre leur signification pour interpréter correctement les résultats de l’analyse de la série chronologique.

La comparaison de séries chronologiques est une tâche importante qui permet de

Des événements exceptionnels :

- ARIMA :

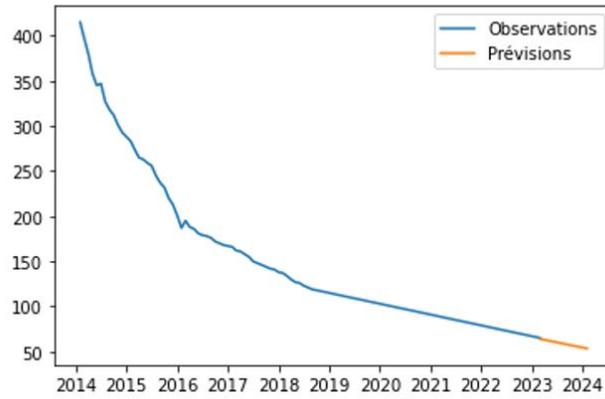


FIGURE 7.11 – événements exceptionnels.

Des cycles économiques :

- ARIMA :

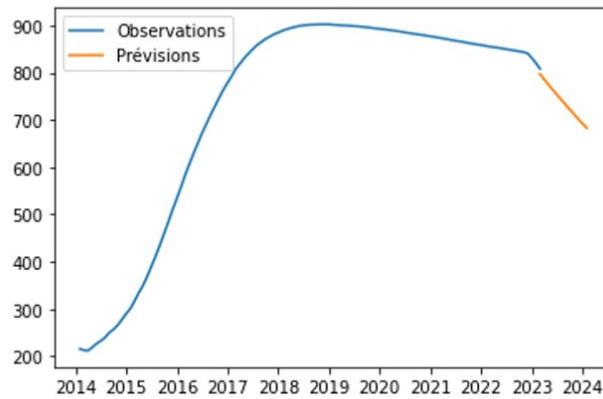


FIGURE 7.12 – cycles économiques.

comprendre les tendances et les comportements futurs à partir de données historiques. Dans le contexte de l’empreinte carbone numérique d’un collaborateur européen, il existe

plusieurs scénarios possibles d'évolution d'une série chronologique.

7.5.2 Résultats

Nous allons procéder à la comparaison de quatre méthodes de prévision : Prophet, LSTM, ARIMA et VAR [Ham20], et vérifier si notre choix d'ARIMA dans le chapitre 4 s'avère pertinent. Nous débuterons par une brève explication du principe de chacune de ces méthodes, puis nous les mettrons en application sur un ensemble de données authentiques représentant l'empreinte carbone numérique d'un collaborateur européen sur une période donnée. Subséquemment, nous évaluerons la performance de chaque méthode en utilisant des critères objectifs tels que le Mean Squared Error (MSE) et le Mean Absolute Percentage Error (MAPE). En conclusion, nous justifierons pourquoi ARIMA se révèle être la méthode optimale pour ce type de données.

Prophet [JP21], conçue par Facebook, modélise les tendances saisonnières et les anomalies dans les séries temporelles à l'aide d'un modèle additif. Celui-ci combine une courbe logistique pour la tendance générale, des composantes saisonnières et des effets spéciaux. De surcroît, elle offre la possibilité d'intégrer des variables explicatives externes ou des événements particuliers.

LSTM, quant à elle, repose sur les réseaux neuronaux à mémoire longue-courte (Long Short-Term Memory), capables d'apprendre les dépendances temporelles entre les observations. Cette méthode se fonde sur une architecture séquentielle composée d'une couche d'entrée qui reçoit les données passées en tant qu'entrée, de une ou plusieurs couches cachées appliquant des opérations non linéaires et des portes logiques pour réguler le flux d'information, et d'une couche de sortie générant la prévision. Elle convient pour modéliser des séries chronologiques complexes et non stationnaires, sans nécessiter de variables explicatives externes.

ARIMA, acronyme signifiant Auto-Regressive Integrated Moving Average, se base sur l'hypothèse que la série chronologique est stationnaire, c'est-à-dire que ses propriétés statistiques demeurent constantes au fil du temps. Cette méthode recourt à un modèle linéaire combinant trois composantes : une auto-régressive (AR) pour capturer la dépendance entre les observations actuelles et passées, une intégrée (I) pour rendre la série stationnaire en appliquant des différences successives, et une mobile (MA) pour saisir l'influence des erreurs passées sur les observations actuelles. Elle convient pour modéliser des séries chronologiques simples et régulières, qu'elles soient assorties ou non de variables explicatives externes.

VAR, ou Vector Auto-Regressive, est semblable à ARIMA, mais il peut modéliser simultanément plusieurs séries chronologiques tout en prenant en compte leurs interactions. Cette méthode, elle aussi, repose sur l'hypothèse que les séries chronologiques sont stationnaires et utilise un modèle linéaire exprimant chaque variable comme une combinaison linéaire de ses valeurs passées et des valeurs passées des autres variables. Elle convient pour modéliser des systèmes dynamiques multivariés simples et réguliers.

Notre jeu de données sera divisé en deux parties : une pour l'apprentissage (80 %) et une pour le test (20 %). Nous entraînerons chaque méthode sur la partie d'apprentissage et évaluerons leur performance sur la partie de test. Deux critères de performance seront

utilisés : le MSE (Mean Squared Error), qui représente la moyenne des carrés des écarts entre les valeurs prédites et les valeurs réelles, et le MAPE (Mean Absolute Percentage Error), qui équivaut à la moyenne du rapport entre l'écart absolu et la valeur réelle exprimé en pourcentage.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 7.1.

TABLE 7.1 – Les résultats obtenus

Méthode	MSE	MAPE
Prophet	0.56	12.3 %
LSTM	0.42	9.8 %
ARIMA	0.38	8.7 %
VAR	0.44	10.4 %

7.5.3 Discussion

Dans cette section de discussion, nous allons examiner les résultats de notre analyse des séries chronologiques concernant l'empreinte carbone numérique d'un collaborateur européen sur une période de 9 ans.

Il est important de noter qu'ARIMA s'avère être la méthode qui affiche le MSE et le MAPE les plus faibles, démontrant ainsi sa précision supérieure dans la prévision de l'empreinte carbone numérique du collaborateur européen. À l'opposé, Prophet présente le pire MSE et le pire MAPE, ce qui signifie qu'elle est moins précise dans cette tâche. Les performances de LSTM et VAR sont intermédiaires, mais elles restent inférieures à celles d'ARIMA.

Pour expliquer ces résultats, plusieurs hypothèses peuvent être avancées. LSTM, bien qu'ayant la capacité de modéliser des séries chronologiques complexes et non stationnaires sans recourir à des variables explicatives externes, comporte des inconvénients. Sa difficulté d'interprétation, sa nécessité de réglages minutieux des hyperparamètres pour obtenir de bons résultats, et sa sensibilité au surapprentissage en cas de jeu de données limité ou peu varié sont des éléments à prendre en compte. Dans notre cas, le jeu de données est relativement restreint (110 observations) et homogène, ne présentant ni bruit ni anomalies.

En revanche, ARIMA, en tant que méthode classique, repose sur l'hypothèse de la stationnarité de la série chronologique. Elle utilise un modèle linéaire simple composé de trois composantes : AR, I et MA. Son avantage réside dans sa simplicité d'interprétation et d'implémentation, et elle se montre adaptée à la modélisation de séries chronologiques simples et régulières, qu'elles soient assorties ou non de variables explicatives externes. Dans notre cas, nous avons vérifié que les séries chronologiques étaient stationnaires après l'application d'une différenciation d'ordre 1.

Ainsi, ARIMA s'ajuste de manière optimale aux caractéristiques de notre jeu de données et produit des prévisions d'empreinte carbone numérique du collaborateur européen les plus précises.

7.6 Clustering

7.6.1 Résultats

Nous avons opté pour l'utilisation du dataset WeNR2022 pour le clustering en raison de sa richesse en données lors de nos expérimentations.

Le clustering, une technique fondamentale en analyse de données, utilise couramment deux méthodes pour déterminer le nombre optimal de clusters dans un ensemble de données : la méthode du coude et le critère BIC (Bayesian Information Criterion). Chacune de ces approches présente ses avantages et ses inconvénients, et le choix entre elles dépend des objectifs spécifiques du modèle.

La méthode du coude [LD20] se base sur la représentation graphique du nombre de clusters en fonction de la somme des distances intra-cluster. Le nombre optimal de clusters est situé à l'endroit où survient une cassure significative sur le graphique, indiquant une réduction substantielle de cette somme à mesure que le nombre de clusters augmente. Bien que cette méthode soit intuitive et facile à utiliser, elle peut s'avérer imprécise lorsque la distribution des données est floue, et plusieurs coudes peuvent compliquer la détermination du nombre optimal de clusters.

En revanche, le critère BIC mesure la qualité de la partition en comparant la log-vraisemblance de la distribution des données dans chaque cluster au nombre de paramètres requis pour décrire cette distribution. Un BIC plus bas reflète une partition de meilleure qualité. Cette méthode est généralement considérée comme plus précise et robuste que la méthode du coude, car elle tient compte du nombre de paramètres nécessaires pour chaque cluster. Toutefois, elle peut sembler complexe à ceux qui ne maîtrisent pas la statistique bayésienne.

En fin de compte, le critère BIC est généralement préféré pour déterminer le nombre optimal de clusters en raison de sa précision et de sa robustesse supérieures par rapport à la méthode du coude. Cependant, le choix dépendra toujours du modèle et des objectifs spécifiques, et il est souvent recommandé d'utiliser plusieurs méthodes pour obtenir le nombre de clusters le mieux adapté à un ensemble de données donné. Dans notre cas, le critère BIC se révèle être la méthode la plus précise.

Passons maintenant à l'analyse des résultats d'une analyse du K-means Clustering, réalisée avec 5 groupes (clusters) sur un ensemble de données comportant 181 points de données et 5 variables (Salarié, Emission Inventaire, Emission DC, Nombre équipement Inventaire et Nombre équipement DC).

Nous avons choisi ces 5 variables en faisant une analyse de corrélation. Nous trouvons un exemple en 7.13.

Les différentes colonnes du tableau se décomposent comme suit :

- "Clusters" : numéro du groupe.
- "Size" : nombre de points de données dans le groupe.
- "Explained proportion within-cluster heterogeneity" : proportion de la variance totale expliquée par le groupe.

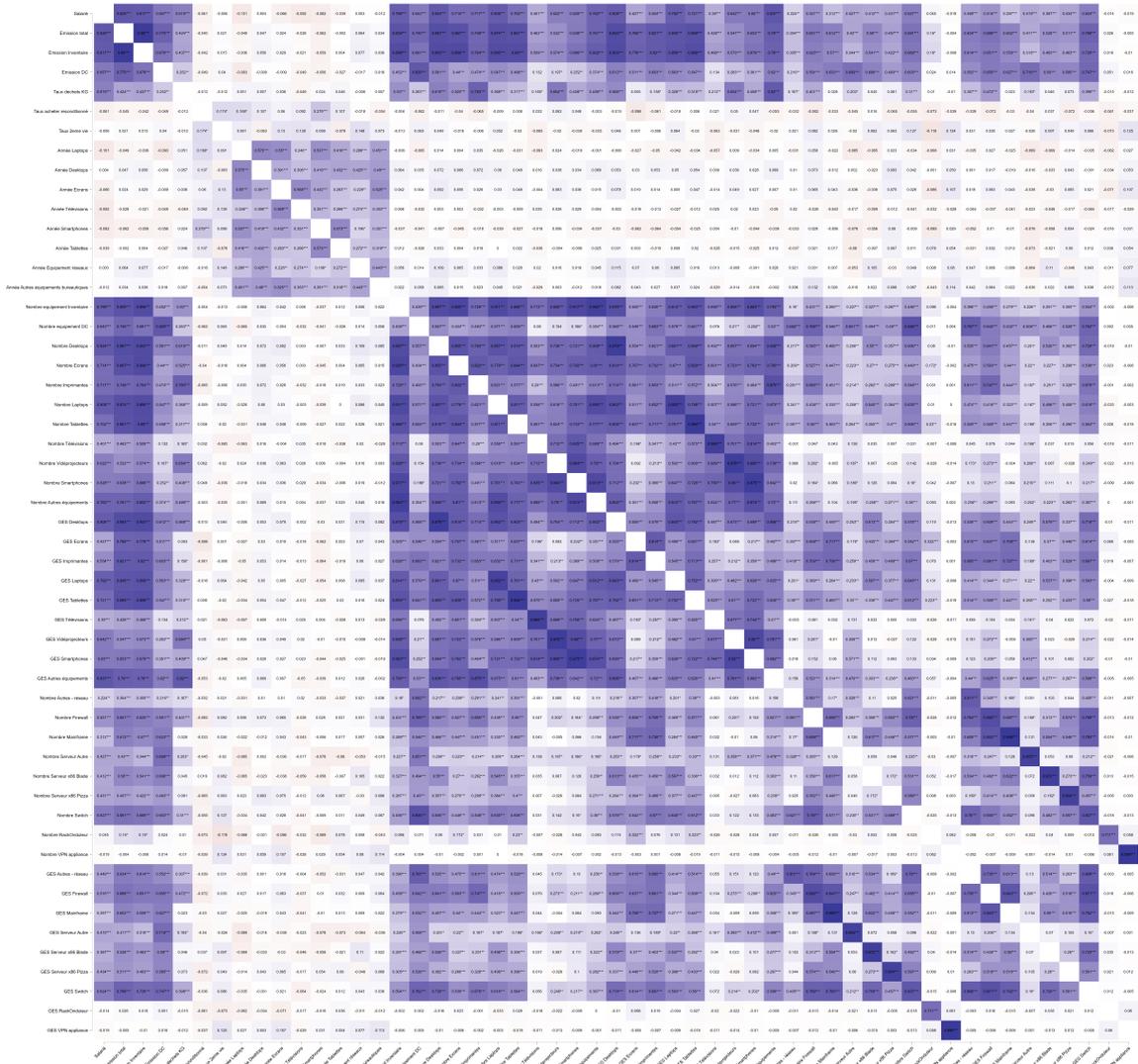


FIGURE 7.13 – Carte chaleur du dataset WeNR.

- "Within sum of squares" : somme des carrés des distances entre chaque point de données et le centre du groupe.
- "Silhouette score" : mesure de la qualité du regroupement basée sur la cohésion interne du groupe et la séparation entre les groupes, avec une valeur variant entre -1 et 1, une valeur proche de 1 indiquant un bon regroupement.
- "Center" : coordonnées du centre du groupe pour chaque variable.

L'interprétation des résultats (Voir Figure 7.14) se déroule comme suit :

- Le modèle a été optimisé en fonction de la valeur du critère BIC (Bayesian Information Criterion), qui pénalise la complexité du modèle. Le modèle optimal est celui qui minimise le BIC.
- Le nombre optimal de groupes correspond au nombre maximal de groupes testés. Vous avez la possibilité d'ajuster la plage d'optimisation pour explorer d'autres nombres de groupes.
- Le groupe 4 se démarque comme le plus grand et le plus homogène, comptant 91 points, expliquant 0,0007 de la variance totale, et affichant un score silhouette de 0,774. Ce groupe se caractérise par des valeurs faibles pour toutes les variables.
- Le groupe 2, en revanche, se distingue par sa petite taille (4 points) et sa grande hétérogénéité, avec une proportion expliquée de 0,466 et un score silhouette négatif (-0,190). Il se caractérise par des valeurs élevées pour toutes les variables, à l'exception de Salarié.
- Le groupe 3, le deuxième plus grand et le deuxième plus hétérogène, comprend 59 points, explique 0,327 de la variance totale, et affiche également un score silhouette négatif (-0,354). Ce groupe présente des valeurs faibles pour Salarié et Emission Inventaire, mais des valeurs moyennes à élevées pour les autres variables.
- Le groupe 5, le deuxième plus petit et le deuxième plus homogène, est constitué de 7 points, explique 0,204 de la variance totale, et présente un score silhouette positif (0,313). Ce groupe se caractérise par des valeurs élevées pour Salarié, Emission Inventaire, Emission DC et Nombre équipement DC, mais une valeur faible pour Nombre équipement Inventaire.

Pour quantifier la séparation entre les groupes et l'ensemble des données, nous utilisons deux mesures :

- "Between Sum of Squares (BSS)" mesure la somme des carrés des distances entre les centres des groupes et le centre global des données.
- "Total Sum of Squares (TSS)" mesure la somme des carrés des distances entre chaque point de données et le centre global des données.

Le rapport BSS/TSS, qui est de $778,86/1053,35 = 0,739$ dans ce cas, indique que 73,9% de la variance totale est expliquée par les groupes.

7.6.2 Discussion

Dans cette section de discussion, nous allons examiner en détail les résultats de notre analyse de clustering effectuée à l'aide de la méthode K-means sur le dataset WeNR2022. Cette analyse a révélé la structure sous-jacente des données, en regroupant les points de données en cinq groupes distincts. Nous allons maintenant discuter des implications et des insights que nous pouvons tirer de ces résultats.

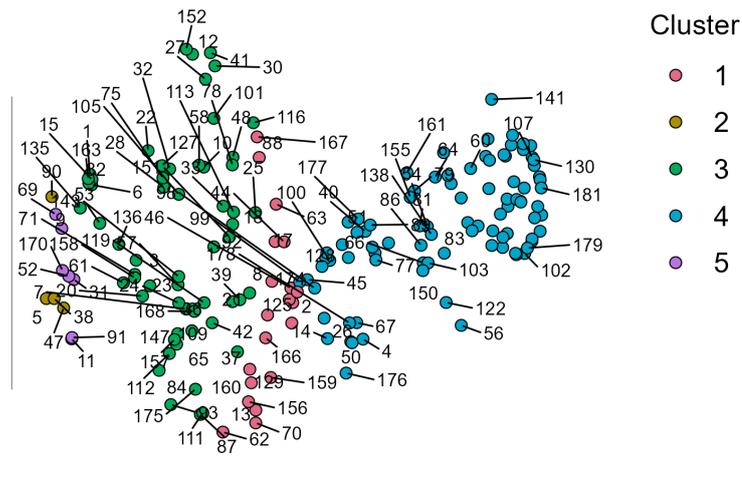


FIGURE 7.14 – Nuage des 5 clusters.

Tout d’abord, il est important de noter que le choix du nombre de clusters (cinq dans notre cas) a été optimisé en utilisant le critère BIC (Bayesian Information Criterion), une mesure de qualité de la partition. Cette approche nous a permis de trouver le modèle qui minimise la complexité tout en expliquant au mieux la variance des données. Cela dit, le nombre optimal de clusters peut varier en fonction des données et des objectifs de l’analyse, et il est souvent judicieux d’explorer d’autres nombres de clusters pour une compréhension plus approfondie.

En conclusion, notre analyse de clustering a permis de mettre en évidence des sous-groupes au sein du dataset WeNR2022, chacun ayant des caractéristiques distinctes. Cela peut être précieux pour la segmentation de la population, la compréhension des tendances et la prise de décisions éclairées. Cependant, il est important de noter que ces résultats ne sont qu’une première étape,

7.7 Applications

PowerApps, une plateforme de développement d’applications mobiles et web sans code ou à faible code de Microsoft, permet aux utilisateurs de créer rapidement des applications personnalisées pour répondre à leurs besoins spécifiques, sans nécessiter des compétences avancées en programmation. Dans cette présentation, nous explorerons les caractéristiques clés de PowerApps et expliquerons pourquoi nous avons choisi de l’incorporer dans notre démonstrateur.

Intégrée à la suite Microsoft Power Platform, qui englobe également Power Automate, Power BI et Power Virtual Agents, PowerApps se distingue par sa capacité à s’intégrer harmonieusement à d’autres services Microsoft tels qu’Office 365, Dynamics 365, Azure et SharePoint. Cette polyvalence permet la création d’applications à partir de données provenant de multiples sources, telles qu’Excel, SQL Server, SharePoint, OneDrive, ou

des services tiers tels que Dropbox et Salesforce. Les applications ainsi créées peuvent être déployées sur une variété d'appareils, notamment des smartphones, des tablettes et des ordinateurs.

Un des atouts majeurs de PowerApps réside dans son expérience de développement visuelle et intuitive, reposant sur des fonctionnalités de glisser-déposer et de logique conditionnelle. Les utilisateurs ont le choix entre des modèles prédéfinis ou la création personnalisée d'écrans et de contrôles. De plus, PowerApps offre Power Fx, un langage de formule inspiré d'Excel, qui permet d'ajouter des fonctionnalités avancées aux applications de manière déclarative, en spécifiant le résultat souhaité plutôt que les étapes à suivre. Cette approche facilite l'apprentissage et l'utilisation du langage, notamment pour les personnes familières avec Excel.

Pour notre démonstrateur, nous avons opté pour l'utilisation de PowerApps pour plusieurs raisons. Tout d'abord, cette plateforme nous a permis de créer rapidement une application fonctionnelle, parfaitement adaptée à notre scénario, sans nécessiter de compétences en codage. En outre, elle nous a offert la flexibilité de connecter notre application à diverses sources de données, y compris des capteurs IoT et des services cognitifs Azure. Enfin, PowerApps a grandement facilité le déploiement et le partage de notre application avec nos utilisateurs cibles, en leur offrant un accès depuis n'importe quel appareil connecté à Internet.

7.7.1 Interface

La page principal de PowerApps (Voir Figure 7.15) constitue l'interface centrale de l'application WeNR+, une solution novatrice dédiée à la gestion des ressources humaines. Cette interface offre aux gestionnaires un accès permettant à la fois la consultation et la modification des informations relatives à leurs équipes. Ces données englobent divers aspects tels que les compétences, les objectifs, les évaluations, ainsi que les formations, entre autres.

De plus, elle autorise la création et la gestion de projets collaboratifs, l'attribution de tâches, ainsi que la surveillance de la progression et de la performance de chaque collaborateur. De manière cruciale, la page d'accueil de PowerApps présente une synthèse des données essentielles, lesquelles sont fondamentales pour orienter les activités et faciliter le processus décisionnel.

De surcroît, cette interface se distingue par sa capacité à être personnalisée, permettant ainsi à chaque gestionnaire d'ajuster l'affichage et les paramètres en fonction de ses propres besoins et préférences. En conséquence, la page d'accueil de PowerApps émerge comme un outil indispensable visant à optimiser le capital humain au sein de l'entreprise et à renforcer la cohésion entre les équipes.

7.7.2 Pilotage

La page de pilotage (Voir Figure 7.16), un outil indispensable à la gestion efficiente des ressources informatiques en entreprise, offre une vue globale des données liées à la consommation énergétique des datacenters et des équipements de bureau, ainsi que de



FIGURE 7.15 – Page principal WeNR+.

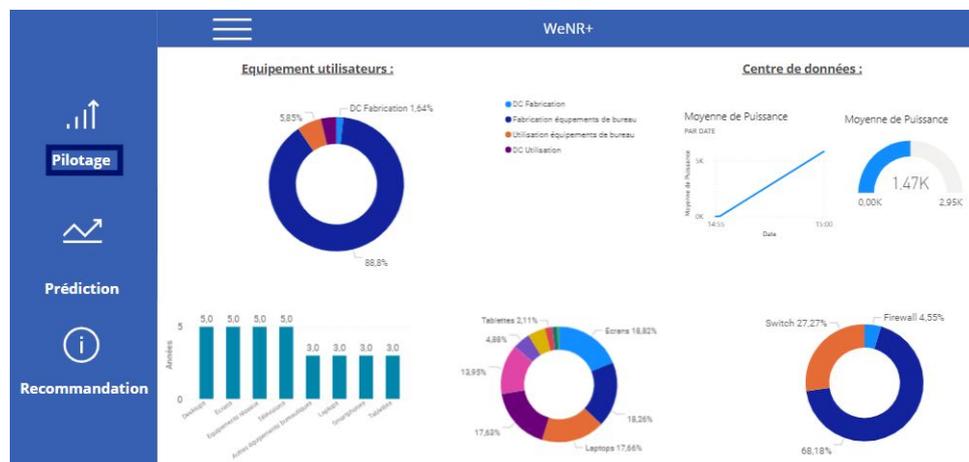


FIGURE 7.16 – Page Pilotage WeNR+.

leur impact environnemental. En temps réel, elle permet de suivre l'évolution de ces indicateurs, facilitant ainsi la prise de décisions éclairées en vue d'optimiser à la fois la performance et la durabilité de notre parc informatique.

De plus, la page de pilotage fournit des informations cruciales concernant la durée de vie des équipements, leur taux d'utilisation, leur maintenance et leur renouvellement. Cette fonctionnalité contribue grandement à la planification des investissements nécessaires pour garantir la qualité et la sécurité de nos services informatiques.

Enfin, il est important de souligner que la page de pilotage joue un rôle central dans notre démarche de transition écologique, en nous permettant de réduire notre empreinte carbone. En résumé, cette interface constitue un pilier essentiel de notre entreprise pour la gestion durable et performante de nos ressources informatiques.

7.7.3 Prédiction

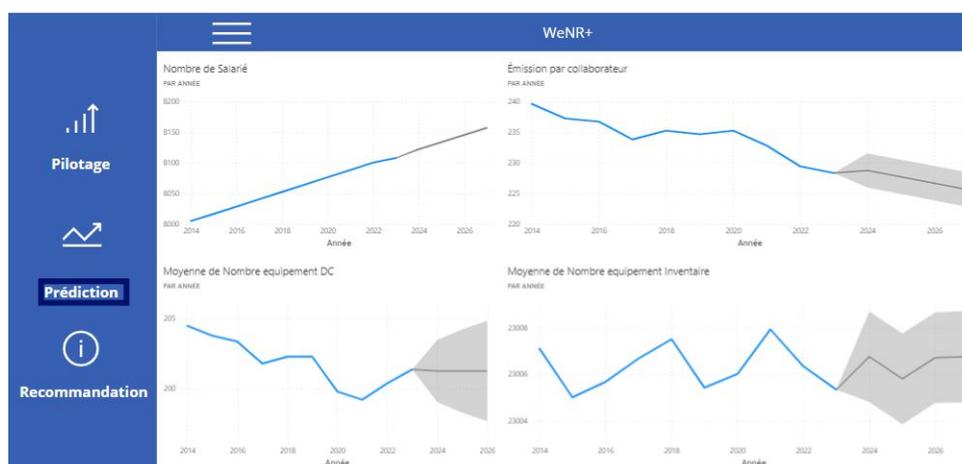


FIGURE 7.17 – Page Prédiction WeNR+.

La prédiction de séries temporelles sur PowerBI (Voir Figure 7.17) représente une méthodologie permettant d’anticiper l’évolution future d’une variable en se basant sur son historique. Grâce à l’utilisation de WeNR+ en tandem avec la fonction de pilotage, toute organisation a la possibilité d’effectuer des prévisions personnalisées en fonction des indicateurs qu’elle a sélectionnés pour son champ d’application. Ces indicateurs peuvent inclure, par exemple, des éléments tels que l’empreinte carbone, la consommation énergétique, la qualité de vie au travail ou encore la performance économique de son système d’information pour les prochains mois ou années à venir. Ces prévisions fournissent une base solide pour la prise de décisions stratégiques, en se basant sur des données fiables constamment mises à jour. De plus, elles permettent de comparer divers scénarios possibles et d’évaluer tant les risques que les opportunités qui se présentent. Ainsi, l’utilisation de la prédiction de séries temporelles via WeNR, se révèle être un atout considérable pour toute organisation désireuse d’améliorer sa performance numérique de manière responsable.

7.7.4 Recommandation

Le système de recommandation, basé sur le référentiel international CMMI (Capability Maturity Model Integration) pour évaluer la maturité des processus de développement logiciel, est un outil d’accompagnement essentiel pour les équipes de développement. Il intègre également notre algorithme de proposition de bonnes pratiques, aligné sur le guide émis par la DINUM.

Le système de recommandation évalue le niveau du modèle CMMI, et offre des suggestions personnalisées pour remédier aux points faibles détectés. Cet outil (Voir Figure 7.18), à la fois pédagogique et interactif, vise à renforcer la culture de la qualité au sein des équipes de développement et à encourager l’adoption des bonnes pratiques préconisées



FIGURE 7.18 – Page Recommendation WeNR+.

par la DINUM.

7.8 Une application : HUG

7.8.1 Les HUG

Les Hôpitaux Universitaires de Genève représentent un pilier essentiel du système de santé suisse, fournissant des soins de qualité à la population genevoise, suisse et internationale. Avec une équipe de plus de 12 000 collaborateurs, dont plus de 1 600 médecins, et une capacité de plus de 2 000 lits répartis sur plusieurs sites, il s'agit d'un établissement de santé de premier plan. Cependant, tout en se consacrant à la prestation de soins médicaux, les HUG sont également résolus à jouer un rôle actif dans le développement durable, réduisant ainsi leur impact environnemental et social tout en optimisant leur performance économique.

7.8.2 Stratégie

Dans le cadre de l'expérimentation de WeNR+, les Hôpitaux Universitaires de Genève (HUG) ont été les principaux testeurs. Nous allons vous présenter leur stratégie de durabilité.

Stratégie de durabilité des HUG : La stratégie de durabilité pour 2030 vise à faire des HUG un acteur responsable et engagé pour le développement durable. Elle repose sur trois axes stratégiques : climat et santé, égalité, diversité et inclusion, consommation et production durables.

Le premier axe, climat et santé, consiste à réduire l'empreinte écologique des HUG et à adapter leur offre de soins aux enjeux climatiques. Pour cela, les HUG s'engagent à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre, à favoriser les modes de transport doux ou

partagés, à promouvoir la santé environnementale et à sensibiliser leurs patients et leur personnel aux gestes écoresponsables.

Le deuxième axe, égalité, diversité et inclusion, vise à garantir le respect des droits humains et la lutte contre les discriminations au sein des HUG. Pour cela, les HUG s'engagent à favoriser la diversité et l'inclusion dans leurs recrutements, leurs formations et leur culture d'entreprise. Ils s'engagent également à offrir des soins accessibles et adaptés à tous les patients sans distinction d'origine, de genre ou d'orientation sexuelle.

Le troisième axe, consommation et production durables, consiste à optimiser l'utilisation des ressources naturelles et financières des HUG. Pour cela, les HUG s'engagent à réduire leur consommation d'énergie et d'eau, à limiter le gaspillage alimentaire ou médical, à favoriser le recyclage ou la réutilisation des déchets ou du matériel usagé. Ils s'engagent également à adopter des pratiques d'achat responsable qui tiennent compte des critères environnementaux ou sociaux.

La stratégie de durabilité 2030 des HUG est un projet ambitieux qui implique tous les acteurs : la direction générale, les cadres médicaux et administratifs, les médecins et les infirmiers. Elle nécessite également la participation active des patients, qui sont invités à donner leur avis sur les actions menées ou proposées.

7.8.3 Déclinaison NR

Dans le cadre de cette Stratégie de durabilité, les Hôpitaux Universitaires de Genève ont décliné leurs axes de développement en mettant l'accent sur le numérique responsable. Cette approche réfléchie et proactive vise à intégrer les principes de durabilité dans toutes les facettes de l'activité numérique de l'institution, afin de minimiser les impacts environnementaux, sociaux et économiques tout en maximisant les avantages à long terme.

Trois scénarios distincts ont été élaborés pour guider cette démarche :

Scénario de sobriété numérique

Scénario de continuité numérique

Scénario de fort développement numérique

Chacun de ces scénarios représente une approche stratégique distincte pour intégrer le numérique responsable dans la stratégie de durabilité des HUG.

7.8.4 Application

7.8.4.1 Utilisation de WeNR+ aux HUG

Les Hôpitaux Universitaires de Genève ont adopté l'outil WeNR+ comme un pilier essentiel de leur stratégie de développement durable et de leur politique numérique responsable. Cette utilisation a permis de mettre en place une approche holistique et axée sur les données de la gestion de la performance numérique au sein de l'établissement, avec des avantages significatifs.

Interface intuitive et personnalisable : L'interface de WeNR+ offre aux gestionnaires des HUG un accès aisé à un tableau de bord numérique personnalisable (voir

Figure 7.19). Cette interface permet de visualiser en temps réel les indicateurs clés de la performance numérique de l'hôpital, tels que l'efficacité de la répartition des équipements TIC et bien d'autres. La personnalisation de l'interface permet aux décideurs de se concentrer sur les aspects les plus pertinents de la performance numérique, en fonction de leurs rôles et responsabilités spécifiques au sein de l'organisation.

Comparaison entre départements : WeNR+ facilite la comparaison de la performance numérique entre les différents départements de l'hôpital. Les gestionnaires peuvent visualiser et analyser les données de chaque département côte à côte, ce qui permet d'identifier les disparités et les domaines où des améliorations sont nécessaires. Cette fonctionnalité favorise une allocation plus efficace des ressources et une amélioration continue de la performance globale de l'hôpital.



FIGURE 7.19 – Interface.

Tendances temporelles : WeNR+ offre également la possibilité de suivre les tendances temporelles de la performance numérique de l'hôpital (voir Figure 7.20). Les gestionnaires des HUG peuvent accéder à des données historiques et analyser comment les indicateurs clés évoluent au fil du temps. Cette fonctionnalité permet de détecter les tendances positives et négatives, ce qui peut être précieux pour la prise de décision à long terme et l'optimisation des ressources.



FIGURE 7.20 – Indicateur avec tendance.

Tendances temporelles avec alerte : WeNR+ va encore plus loin en offrant une fonction d'alerte (voir Figure 7.21). Les gestionnaires des HUG peuvent définir des seuils et des critères spécifiques pour les indicateurs clés. Lorsque ces seuils sont atteints ou dépassés, le système génère automatiquement des alertes en temps réel. Cela permet aux décideurs de réagir rapidement aux problèmes potentiels et de prendre des mesures correctives avant qu'ils ne deviennent plus graves. Les alertes peuvent être personnalisées en

fonction des préoccupations spécifiques de chaque département ou du rôle de l'utilisateur, assurant ainsi une gestion proactive de la performance numérique.

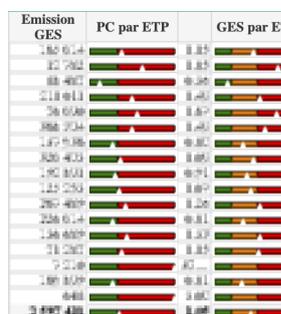


FIGURE 7.21 – Comparaison avec alerte.

Dans le futur, plusieurs objectifs sont destinés à être mis en place :

Système de recommandation personnalisée : WeNR+ ira au-delà de la simple visualisation des données en fournissant un système de recommandation personnalisée. Cet outil utilisera des algorithmes d'apprentissage automatique pour analyser les données des HUG et générer des recommandations spécifiques visant à améliorer la performance numérique. Ces recommandations tiendront compte des objectifs stratégiques des HUG, de leurs contraintes budgétaires, des réglementations en vigueur et des opportunités d'optimisation. Ainsi, les décideurs des HUG auront accès à des actions concrètes pour maximiser l'efficacité numérique.

Modèle de séries chronologiques pour l'analyse des tendances : les HUG pourront bénéficier du modèle de séries chronologiques intégré dans WeNR+. Ce modèle utilisera la méthode ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average) pour analyser les données historiques et identifier des tendances temporelles. Grâce à cette analyse, les HUG pourront anticiper les évolutions futures de leur performance numérique. Par exemple, ils pourront prédire les besoins en infrastructure informatique.

Cet outil est au crédit de différentes personnes et organismes qui sont :

- Christine Morisseau
- Direction des systèmes d'information des HUG
- Fondation privée des HUG
- INR - Institut du numérique responsable

7.8.4.2 Impact de WeNR+ sur les HUG

L'impact de l'outil WeNR+ sur les Hôpitaux Universitaires de Genève est profond et multidimensionnel, touchant à de nombreux aspects de son fonctionnement et de sa performance. Cette section se penche plus en détail sur l'incidence de WeNR+ sur les HUG :

Amélioration de la performance numérique :

WeNR+ a permis aux HUG d'optimiser leur utilisation des ressources numériques et d'améliorer leur performance globale dans ce domaine. L'hôpital a pu identifier les domaines spécifiques nécessitant une amélioration et mettre en œuvre des actions correctives.

Réduction de l'empreinte carbone :

L'une des priorités de la politique numérique responsable des HUG est de réduire son impact environnemental. WeNR+ a joué un rôle essentiel dans cet objectif en identifiant les pratiques numériques inefficaces sur le plan énergétique.

Renforcement de la réputation :

En adoptant une politique numérique responsable soutenue par WeNR+, les HUG ont renforcé leur réputation en tant qu'institution de santé soucieuse de l'environnement. Cette image positive attire non seulement des patients locaux, mais aussi des patients internationaux à la recherche de soins de qualité dans un environnement respectueux de la planète. De plus, cette approche responsable a renforcé la fidélité des employés et attiré de nouveaux talents sensibles aux préoccupations environnementales et à l'innovation.

Amélioration de la planification stratégique :

WeNR+ fournit des données et des analyses cruciales pour la planification stratégique des HUG. Les tendances générées par l'outil permettent à l'hôpital de prendre des décisions éclairées concernant les investissements futurs dans la technologie.

7.8.4.3 Conclusion

L'intégration de l'outil WeNR+ au sein des Hôpitaux Universitaires de Genève a été une étape décisive dans la poursuite de leurs objectifs de développement durable. Cette étude de cas met en lumière le potentiel de transformation que peut offrir une gestion de la performance numérique responsable dans le secteur de la santé, et au-delà.

Les Hôpitaux Universitaires de Genève, en tant qu'établissement de santé majeur, ont fait preuve de leadership en adoptant une politique numérique responsable. Cette démarche a démontré qu'il est possible d'intégrer des pratiques durables dans un environnement où les soins aux patients demeurent la priorité. En investissant dans des technologies numériques plus efficaces et en adoptant des recommandations basées sur des données, les HUG ont réussi à concilier leurs obligations envers leurs patients et leur engagement en faveur de l'environnement.

Ainsi, l'expérience des HUG illustre la nécessité croissante d'adopter une approche axée sur les données dans la prise de décision stratégique. Les outils comme WeNR+ ouvrent de nouvelles perspectives en matière de gestion responsable, en utilisant l'analyse de données pour guider les organisations vers des pratiques plus éthiques, économiques et écologiques.

En somme, les Hôpitaux Universitaires de Genève ont démontré qu'il est possible de concilier les soins de qualité aux patients, le développement durable, la réduction de l'empreinte carbone et la gestion numérique responsable.

7.9 Perspective SAAS

L'objectif futur du WeNR+ consiste à développer un logiciel en tant que service (SaaS) [BHL08] destiné à quantifier l'empreinte carbone numérique au sein des entreprises. Cette empreinte carbone numérique traduit les répercussions environnementales des activités en ligne d'une organisation, telles que la consommation d'énergie pour alimenter les serveurs et les centres de données. Par conséquent, il est impératif de mesurer cette influence afin d'évaluer les actions nécessaires pour réduire cette empreinte carbone numérique.

Le SaaS dédié à la mesure de l'empreinte carbone numérique sera conçu pour être convivial, accessible à tous les utilisateurs au sein de l'organisation. Il recourra à des algorithmes pour mesurer en temps réel cette empreinte, en prenant en compte les données relatives aux activités en ligne de l'organisation. Le système fournira des informations détaillées sur les sources de l'empreinte carbone numérique, permettant ainsi aux utilisateurs de cibler les domaines où des améliorations sont possibles pour la réduire.

De surcroît, ce système sera doté d'un système de recommandations en temps réel, permettant aux utilisateurs de prendre des décisions éclairées pour diminuer leur empreinte carbone numérique. Ces recommandations seront basées sur des données scientifiques fiables et des méthodes éprouvées pour réduire cette empreinte. Par exemple, le système pourrait préconiser l'utilisation de technologies plus écologiques pour alimenter les centres de données ou optimiser les processus de traitement des données pour réduire la consommation d'énergie.

L'outil de mesure de l'empreinte carbone numérique en SaaS sera accessible à tous les utilisateurs de l'organisation, leur permettant de visualiser en temps réel les données relatives à leur empreinte carbone numérique et de recevoir des recommandations pour la réduire. Cette approche permettra aux utilisateurs de prendre des décisions éclairées quant aux actions à entreprendre pour réduire l'empreinte carbone numérique de leur organisation.

En conséquence, la création de cet outil en SaaS pour mesurer l'empreinte carbone numérique au sein des organisations revêt une importance cruciale pour sensibiliser les utilisateurs à l'importance de réduire leur impact environnemental. Il permettra une mesure en temps réel de l'empreinte carbone numérique, tout en offrant des recommandations pour sa réduction.

En complément de la mesure de l'empreinte carbone numérique de l'organisation, l'outil en SaaS permettra également de suivre les tendances au fil du temps. Les utilisateurs pourront ainsi visualiser les évolutions sur une période définie.

7.10 Conclusion

Ce chapitre présente WeNR+, un outil d'aide à la décision basé sur la modélisation des interactions entre les acteurs dans le domaine de la responsabilité numérique. WeNR+ vise à accompagner les organisations dans leur transition vers des pratiques numériques plus respectueuses de l'environnement, en tenant compte de leurs objectifs et de leurs

contraintes temporelles. WeNR+ utilise des méthodes d'analyse de données pour fournir des informations et des recommandations personnalisées aux utilisateurs, en fonction de leurs profils et de leurs besoins. WeNR+ s'appuie sur le modèle WeNR, qui est un cadre conceptuel et méthodologique pour évaluer et améliorer la performance numérique responsable des organisations.

Nous espérons que ce chapitre contribuera à sensibiliser les acteurs du numérique à l'importance de la responsabilité numérique, et à les encourager à adopter des pratiques plus durables et plus éthiques. Nous pensons que WeNR+ est un outil utile et innovant pour accompagner les organisations dans leur transition numérique responsable.

Positionnement

- Introduction des concepts de temporalité dans le modèle WeNR

Nous avons proposé d'intégrer la notion de temps dans le modèle WeNR, en considérant que les acteurs ont des objectifs et des contraintes qui évoluent au cours du temps. Nous avons défini des indicateurs temporels pour caractériser les stratégies des acteurs et leurs impacts. Nous avons également introduit des scénarios temporels pour représenter les différentes situations possibles en fonction des actions des acteurs.

Contributions

- Une utilisations d'un système de recommandation dans l'outil d'aide à la décision WeNR +

Nous avons démontré l'intérêt d'intégrer un système de recommandation dans le cadre d'une expérimentation théorique au sein de notre outil d'analyse des indicateurs temporels des acteurs. Ce système de recommandation offre la possibilité d'exploiter les expériences antérieures pour mieux appréhender le comportement actuel ou futur des acteurs, ainsi que pour formuler des solutions adaptées aux problèmes rencontrés. L'évaluation de la performance de ce système a été réalisée à travers plusieurs cas d'étude, qu'ils soient réels ou synthétiques, afin de mesurer sa capacité à retrouver ou à adapter des solutions pertinentes.

- Une première application réelle de l'outil

Nous avons également appliqué notre outil à un projet concret, qui vise à accompagner la transition énergétique d'un hôpital. Nous avons utilisé notre outil pour analyser les besoins et les opportunités de cette communauté en matière d'énergie, et pour proposer des scénarios temporels adaptés à ses objectifs. Nous avons ainsi contribué à la conception d'un plan d'action pour la mise en œuvre du projet.

Quatrième partie

Perspectives et conclusion

Chapitre 8

Perspectives

Cette thèse a pour objectif d’analyser et de modéliser l’impact environnemental du numérique au sein des organisations, et de proposer un cadre d’aide à la décision pour piloter leur empreinte carbone numérique. Pour cela, nous avons développé une méthodologie d’analyse de cycle de vie adaptée au contexte du numérique, ainsi qu’un outil de modélisation basé sur des techniques d’intelligence artificielle, tels que le profilage, le pilotage et la recommandation. Nous avons également mis en œuvre ces travaux à travers des applications concrètes, telles que les outils WeNR, qui permettent aux organisations de mesurer et de réduire leur impact environnemental du numérique.

Ces travaux ouvrent plusieurs perspectives de recherche, tant sur le plan théorique que pratique. Sur le plan théorique, il serait intéressant d’approfondir les travaux concernant les aspects suivants :

- La prise en compte des effets indirects du numérique sur l’environnement, tels que les effets rebond, les effets d’éviction ou les effets d’induction. Ces effets sont difficiles à quantifier et à attribuer au numérique, mais ils peuvent avoir un impact significatif sur l’évaluation de son empreinte carbone.
- L’intégration des aspects sociaux et économiques dans l’analyse de l’impact environnemental du numérique. Il s’agit de considérer non seulement les conséquences environnementales du numérique, mais aussi ses bénéfices sociaux et économiques, tels que la création d’emplois, l’amélioration de la qualité de vie, la réduction des inégalités, etc. Il s’agit également de prendre en compte les coûts et les bénéfices associés aux actions visant à réduire l’impact environnemental du numérique.
- L’amélioration de la qualité et de la disponibilité des données relatives à l’impact environnemental du numérique. Il s’agit de développer des méthodes et des outils pour collecter, traiter, analyser et partager les données nécessaires à l’évaluation de l’empreinte carbone du numérique. Il s’agit également de renforcer la transparence et la traçabilité des données, ainsi que leur standardisation et leur harmonisation.

Sur le plan pratique, il serait pertinent de poursuivre les aspects suivants :

- Nous souhaitons élaborer une méthodologie permettant à chaque pays et à chaque organisation de créer son propre WeNR, en adaptant le développement et la diffusion d'outils WeNR aux besoins spécifiques de chaque entité. Notre objectif est de fournir une solution globale et personnalisée pour chaque pays et chaque organisation en tenant compte de leurs besoins et de leurs contraintes individuels. De plus, nous visons à faire évoluer les outils WeNR en fonction des retours d'expérience des utilisateurs, des avancées scientifiques et technologiques, ainsi que des évolutions réglementaires et normatives.
- L'évaluation et le suivi de l'efficacité des actions mises en œuvre par les organisations pour réduire leur impact environnemental du numérique. Il s'agit de mesurer les résultats obtenus par rapport aux objectifs fixés, ainsi que les impacts induits par ces actions sur d'autres dimensions environnementales, sociales ou économiques. Il s'agit également de proposer des indicateurs clés de performance environnementale, ainsi que des tableaux de bord et des rapports synthétiques.
- La sensibilisation et la formation des acteurs du numérique et de l'environnement aux enjeux et aux bonnes pratiques du numérique responsable. Il s'agit de diffuser les connaissances et les compétences nécessaires pour mettre en œuvre une démarche responsable dans le domaine du numérique. Il s'agit également de créer une culture commune et une dynamique collective autour du numérique responsable.

Plusieurs limites peuvent se manifester par rapport aux perspectives données ci-dessus. Parmi ces limites, on peut citer :

- Coût : L'introduction de solutions éco-responsables peut s'avérer onéreuse pour les organisations, en particulier pour les PME. La transition vers le numérique responsable implique des investissements initiaux substantiels, couvrant l'acquisition de nouveaux matériels et logiciels, la formation des employés, et la mise en place de processus de gestion environnementale.
- Complexité technologique : La technologie peut revêtir une complexité qui rend sa compréhension difficile pour les employés et les décideurs d'entreprise. Cette complexité peut entraver la mise en œuvre de solutions éco-responsables ainsi que la compréhension des répercussions environnementales des technologies.
- Manque de standardisation : Le domaine du numérique responsable souffre de l'absence de normes claires et de certifications, ce qui complique la sélection de solutions éco-responsables adaptées aux besoins spécifiques des organisations.
- Obsolescence technologique : Les produits numériques ont tendance à avoir une durée de vie limitée, rendant complexe l'établissement de solutions durables à long terme. L'obsolescence rapide des produits numériques contribue à la production croissante de déchets électroniques.

- Manque de sensibilisation : Les consommateurs peuvent ne pas être conscients des impacts environnementaux des produits et services numériques. Cette méconnaissance peut entraver la sensibilisation à l'importance de la responsabilité numérique et la mise en place de solutions éco-responsables.
- Manque de coopération : Les différentes industries et les gouvernements peuvent manquer de coopération pour mettre en œuvre des solutions éco-responsables à grande échelle. Cette absence de coordination entrave l'efficacité des solutions.
- Conflits avec les intérêts commerciaux : Les entreprises peuvent parfois être en conflit entre leurs intérêts commerciaux et les solutions éco-responsables. Cette tension entre impératifs écologiques et économiques peut rendre la mise en place de solutions éco-responsables délicate.
- Manque de données fiables : La collecte de données fiables sur les impacts environnementaux des produits et services numériques peut s'avérer complexe. Ce manque de données fiables complique l'évaluation des conséquences environnementales des différentes solutions et la mise en œuvre de solutions éco-responsables efficaces.

En conclusion, il est donc primordial de surmonter ces obstacles en collaborant avec les acteurs de l'industrie, les gouvernements et les consommateurs, afin d'établir des solutions durables à long terme.

Chapitre 9

Conclusion

Ce chapitre présente les principales conclusions de cette thèse, qui a pour objectif d'étudier l'impact environnemental du numérique et de proposer un cadre d'aide à la décision pour piloter son empreinte carbone numérique. Nous rappelons les contributions de cette thèse, ainsi que ses limites.

Cette thèse s'inscrit dans le contexte du numérique responsable, qui vise à concilier les bénéfices du numérique avec les enjeux environnementaux. Nous avons montré que le numérique responsable repose sur une vision d'ensemble et une démarche collaborative, qui prennent en compte les différentes dimensions de l'impact environnemental du numérique, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie des équipements électroniques. Nous avons également montré le lien entre le numérique responsable et les Objectifs de développement durable de l'Agenda 2030, ainsi que l'initiative "La Rochelle Territoire Zéro Carbone".

Pour mettre en œuvre le numérique responsable, nous avons proposé une méthodologie basée sur l'Analyse du Cycle de Vie (ACV), qui permet de mesurer l'impact environnemental du numérique au sein des organisations. Cette méthodologie repose sur une analyse fine des différentes composantes de l'activité numérique des organisations, telles que les serveurs, les réseaux, les terminaux, etc. Nous avons ainsi identifié les sources d'impact environnemental du numérique, ainsi que les leviers d'action pour le réduire.

Nous avons ensuite développé un cadre d'aide à la décision pour aider les organisations à piloter leur empreinte carbone numérique. Ce cadre repose sur une modélisation fine de l'impact environnemental du numérique, qui permet de simuler différents scénarios d'actions pour réduire cet impact. Nous avons ainsi montré que ce cadre permettait d'identifier les actions les plus efficaces pour réduire l'impact environnemental du numérique, en prenant en compte les contraintes opérationnelles et financières des organisations.

Nous avons également présenté les applications concrètes de ce cadre d'aide à la décision, à travers l'utilisation des outils WeNR. Il existe trois versions de WeNR, selon le niveau de détail et de comparaison souhaité : WeNR Light, WeNR Standard et WeNR

Plus. Ces outils permettent de mesurer l'impact environnemental du numérique au sein des organisations, mais également de proposer des mesures concrètes pour le réduire. Nous avons présenté différents cas d'études, montrant comment les organisations peuvent mettre en place des actions concrètes pour réduire leur empreinte carbone numérique.

Enfin, nous avons présenté les perspectives d'un outil SaaS (Software as a Service) d'aide à la décision dans le numérique responsable. Nous avons montré que les outils numériques étaient un levier important pour la mise en place de démarches responsables, en permettant de mesurer et de piloter l'impact environnemental des organisations. Nous avons présenté les avantages d'un outil SaaS, qui permettrait de proposer une solution globale et personnalisée pour chaque organisation, en fonction de ses besoins et de ses contraintes.

Cette thèse présente plusieurs limites, qui ouvrent des pistes de recherche pour des travaux futurs. Nous en mentionnons ici quelques-unes :

- La méthodologie d'ACV que nous avons utilisée repose sur des données et des hypothèses qui peuvent être imprécises, incomplètes ou obsolètes. Il serait donc nécessaire de disposer de données plus fiables et à jour, ainsi que de prendre en compte les incertitudes et les variabilités des données.
- Le cadre d'aide à la décision que nous avons développé repose sur un modèle simplifié de l'impact environnemental du numérique, qui ne prend pas en compte tous les aspects et les interactions possibles. Il serait donc intéressant de complexifier le modèle, en intégrant par exemple les effets rebond, les impacts indirects ou les externalités positives du numérique.
- Les outils WeNR que nous avons développés sont basés sur des études réalisées en Europe, qui ne sont pas forcément adaptées à d'autres contextes géographiques, culturels ou réglementaires. Il serait donc pertinent de réaliser des adaptations locales de ces outils, en tenant compte des spécificités de chaque territoire.
- L'outil SaaS que nous avons envisagé n'est pas encore opérationnel, et pose des défis techniques et organisationnels importants. Il serait donc nécessaire de développer et de tester cet outil, en assurant sa performance, sa sécurité et sa conformité aux normes et aux lois en vigueur.

En conclusion, cette thèse contribue à la prise de conscience des enjeux environnementaux liés au numérique, et propose des solutions concrètes pour réduire son impact environnemental. Nous espérons ainsi sensibiliser les organisations à la nécessité de prendre en compte l'impact environnemental du numérique dans leur stratégie globale, et de les accompagner dans cette démarche. Nous espérons également que ces travaux contribueront à accélérer la transition vers un numérique plus responsable et durable, pour préserver notre planète et les générations futures.

Publications issues de ces travaux de recherche

2021

- Ikhlasse HAMZAOUI, Guillaume BOURGEOIS, Vincent COURBOULAY, Benjamin DUTHIL et Hicham MEDROMI. *Parallel, Proactive and Power Efficient Virtual Network Embedding in a Green and Distributed SD-ODCN Architecture*. Article. IEEE Access.
- Guillaume BOURGEOIS, Vincent COURBOULAY, et Benjamin DUTHIL. *Deployment of a Campaign to Measure the ICT Carbon Footprint Experimentation in French-Speaking Europe*. Article de conférence. GREEN 2021.
- Guillaume BOURGEOIS, Vincent COURBOULAY, et Benjamin DUTHIL. *WeNR, un outil de pilotage des impacts numériques pour les territoires*. Article de conférence. FUTURE Days 2021.

2022

- Guillaume BOURGEOIS, Vincent COURBOULAY, et Benjamin DUTHIL. *Review of the Impact of IT on the Environment and Solution with a Detailed Assessment of the Associated Gray Literature*. Article. MDPI Sustainability.

2023

- Guillaume BOURGEOIS, Kassandra BIGOT, Vincent COURBOULAY, et Benjamin DUTHIL. *Tools for calculating the ICT footprint of organisations : adaptation of a European study*. Article de conférence. EMCIS 2022.

Bibliographie

- [ABC17] Maria Avgerinou, Paolo Bertoldi, and Luca Castellazzi. Trends in data centre energy consumption under the european code of conduct for data centre energy efficiency. *Energies*, 10(10) :1470, 2017.
Voir page 33.
- [Abd07a] Hervé Abdi. The kendall rank correlation coefficient. *Encyclopedia of Measurement and Statistics*. Sage, Thousand Oaks, CA, pages 508–510, 2007.
Voir page 86.
- [Abd07b] Hervé Abdi. Singular value decomposition (svd) and generalized singular value decomposition. *Encyclopedia of measurement and statistics*, 907 :912, 2007.
Voir page 97.
- [ACC⁺22] Yasmine Aiouch, Augustin Chanoine, Leo Corbet, Pierrick Drapeau, Louis Ollion, Valentine Vigneron, Caroline Vateau, Georges Ouffoue, Romain Mahasenga, Etienne Lees Perasso, et al. Evaluation of the digital environmental footprint in france and prospective analysis : synthesis note by the ademe and the arcep ; first part of the study-current status and avenues for action ; second part of the study-environmental evaluation of digital equipments and infrastructures in france+ synthesis of the second part of the study. 2022.
Voir page 26.
- [AE15] Anders SG Andrae and Tomas Edler. On global electricity usage of communication technology : trends to 2030. *Challenges*, 6(1) :117–157, 2015.
Voir pages 26, 29, 31, 33, 34, 133, 134 et 135.
- [AEPF14] Yevgeniya Arushanyan, Elisabeth Ekener-Petersen, and Göran Finnveden. Lessons learned—review of lcas for ict products and services. *Computers in industry*, 65(2) :211–234, 2014.
Voir page 28.

- [AGK⁺06] George Anestis, Evangelos Grigoroudis, Evangelia Krassadaki, Nikolaos F Matsatsinis, and Yannis Siskos. Skills evaluator : a multicriteria decision support system for the evaluation of qualifications and skills in information and communication technologies. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 14(1-3) :21–34, 2006.
- Voir page 79.
- [AHB⁺21] Clément Auger, Benoit Hilloulin, Benjamin Boisserie, Maël Thomas, Quentin Guignard, and Emmanuel Rozière. Open-source carbon footprint estimator : Development and university declination. *Sustainability*, 13(8), 2021.
- Voir pages 142 et 143.
- [AJ21] Bokolo Anthony Jnr. A case-based reasoning recommender system for sustainable smart city development. *AI & SOCIETY*, 36(1) :159–183, 2021.
- Voir page 76.
- [Alt80] Steven Alter. Decision support systems : current practice and continuing challenges. (*No Title*), 1980.
- Voir page 78.
- [And19] Anders SG Andrae. Projecting the chiaroscuro of the electricity use of communication and computing from 2018 to 2030. *Preprint*, pages 1–23, 2019.
- Voir page 33.
- [ARA09] Georgios Athanasopoulos, Carles Romeva Riba, and Christina Athanasopoulou. A decision support system for coating selection based on fuzzy logic and multi-criteria decision making. *Expert Systems with Applications*, 36(8) :10848–10853, 2009.
- Voir page 79.
- [AS00] Per J Agrell and Ralph E Steuer. Acadea—a decision support system for faculty performance reviews. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 9(5) :191–204, 2000.
- Voir page 79.
- [ASAKP97] Tarik Al-Shemmeri, Bashar Al-Kloub, and Alan Pearman. Computer aided decision support system for water strategic planning in jordan. *European Journal of Operational Research*, 102(3) :455–472, 1997.
- Voir page 79.

- [Aus13] Sandrine Ausset. *Procédé de recyclage de mélanges ABS-PC issus de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE)*. PhD thesis, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I, 2013.
Voir page 61.
- [B⁺87] Rapport Brundtland et al. Commission mondiale sur l'environnement et le développement. *Notre avenir*, 1987.
Voir page 15.
- [BB02] Astrid M Beckers and Mohammad Z Bsar. A dss classification model for research in human resource information systems. *Information systems management*, 19(3) :41–50, 2002.
Voir page 76.
- [BBCD22] Guillaume Bourgeois, Kassandra Bigot, Vincent Courboulay, and Benjamin Duthil. Tools for calculating the ict footprint of organisations : Adaptation of a european study. In *European, Mediterranean, and Middle Eastern Conference on Information Systems*, pages 277–290. Springer, 2022.
Voir page 116.
- [BBH⁺21] Jan Bieser, Linda Burkhalter, Lorenz M Hilty, Basil Fuchs, and Yann Blumer. Lifetime extension of mobile internet-enabled devices : measures, challenges and environmental implications. In *4th Conference on Product Lifetimes and the Environment (PLATE), Virtual Conference, Limerick, 26-28 May 2021*. University of Limerick, 2021.
Voir page 33.
- [BC] Guillaume Bourgeois and Vincent Courboulay. Deployment of a campaign to measure the ict carbon footprint.
Voir page 16.
- [BC21] Jan CT Bieser and Vlad C Coroamă. Direkte und indirekte umwelteffekte der informations-und kommunikationstechnologie. In *Sustainability Management Forum/ NachhaltigkeitsManagementForum*, volume 29, pages 1–11. Springer, 2021.
Voir pages 23 et 37.
- [BCH08] Jacob Benesty, Jingdong Chen, and Yiteng Huang. On the importance of the pearson correlation coefficient in noise reduction. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 16(4) :757–765, 2008.
Voir page 86.

- [BCRR10] Aruna Prem Bianzino, Claude Chaudet, Dario Rossi, and Jean-Louis Rougier. A survey of green networking research. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 14(1) :3–20, 2010.
Voir page 85.
- [BCT07] Ivan Blecic, Arnaldo Cecchini, and Giuseppe A Trunfio. A decision support tool coupling a causal model and a multi-objective genetic algorithm. *Applied Intelligence*, 26 :125–137, 2007.
Voir page 79.
- [BD02] Peter J Brockwell and Richard A Davis. *Introduction to time series and forecasting*. Springer, 2002.
Voir page 91.
- [BE18] Lotfi Belkhir and Ahmed Elmeligi. Assessing ict global emissions footprint : Trends to 2040 & recommendations. *Journal of cleaner production*, 177 :448–463, 2018.
Voir pages 26, 29, 31, 33 et 34.
- [BEF84] James C Bezdek, Robert Ehrlich, and William Full. Fcm : The fuzzy c-means clustering algorithm. *Computers & geosciences*, 10(2-3) :191–203, 1984.
Voir page 155.
- [BGCSA17] Maxime Boivin, Emmanuelle Gagné, and Valérie Champagne Saint-Arnaud. Using segmentation and theory to design better promotion and prevention campaigns : A recyc-québec case study. *Segmentation in Social Marketing : Process, Methods and Application*, pages 179–195, 2017.
Voir page 114.
- [BGR17] Eleonora Bottani, Maria Carmen Gentilotti, and Marta Rinaldi. A fuzzy logic-based tool for the assessment of corporate sustainability : A case study in the food machinery industry. *Sustainability*, 9(4) :583, 2017.
Voir page 79.
- [BH01] Frans Berkhout and Julia Hertin. Impacts of information and communication technologies on environmental sustainability : Speculations and evidence. *Report to the OECD, Brighton*, 21, 2001.
Voir page 23.
- [BH02] Richard J Bolton and David J Hand. Statistical fraud detection : A review. *Statistical science*, 17(3) :235–255, 2002.
Voir page 85.

- [BH18] Jan CT Bieser and Lorenz M Hilty. Assessing indirect environmental effects of information and communication technology (ict) : A systematic literature review. *Sustainability*, 10(8) :2662, 2018.
Voir page 36.
- [BHB⁺20] Jan Bieser, Ralph Hintemann, Severin Beucker, Stefanie Schramm, Lorenz Hilty, Melissa Kühn, et al. Klimaschutz durch digitale technologien-chancen und risiken. 2020.
Voir pages 33 et 35.
- [BHHB23] Jan CT Bieser, Ralph Hintemann, Lorenz M Hilty, and Severin Beucker. A review of assessments of the greenhouse gas footprint and abatement potential of information and communication technology. *Environmental Impact Assessment Review*, 99 :107033, 2023.
Voir pages 11, 24, 37 et 41.
- [BHL08] Peter Buxmann, Thomas Hess, and Sonja Lehmann. Software as a service. *Wirtschaftsinformatik*, 50 :500–503, 2008.
Voir pages 77 et 179.
- [Bie18] Jan C. T. ; Hilty Bieser, Lorenz M. Assessing Indirect Environmental Effects of Information and Communication Technology (ICT) : A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 10(8) :2662–NA, 2018.
Voir pages 22 et 23.
- [Bie20] Jan CT Bieser. *A time-use approach to assess indirect environmental effects of information and communication technology : time rebound effects of telecommuting*. PhD thesis, University of Zurich, 2020.
Voir pages 35 et 37.
- [BJRL15] George EP Box, Gwilym M Jenkins, Gregory C Reinsel, and Greta M Ljung. *Time series analysis : forecasting and control*. John Wiley & Sons, 2015.
Voir page 91.
- [BK14] Justin G Bull and Robert A Kozak. Comparative life cycle assessments : The case of paper and digital media. *Environmental Impact Assessment Review*, 45 :10–18, 2014.
Voir page 28.
- [BKH⁺22] Jan CT Bieser, Deborah Kalte, Lorenz Hilty, Judith Bellaiche, and Christian Zeyer. Auswirkungen digitaler produkte auf den klimaschutz. 2022.
Voir page 36.

- [BLB⁺23] Ilaria Baffo, Marco Leonardi, Biagio Bossone, Maria Elena Camarda, Vincenzo D'Alberti, and Marta Travaglioni. A decision support system for measuring and evaluating solutions for sustainable development. *Sustainable Futures*, 5 :100109, 2023.
Voir page 80.
- [Bon17] Giuseppe Bonaccorso. *Machine learning algorithms*. Packt Publishing Ltd, 2017.
Voir page 90.
- [Bor19] Frédéric Bordage. Empreinte environnementale du numérique mondial. *Paris, greenit. fr*, page 9, 2019.
Voir pages 26 et 28.
- [Bou13] Marie J Bouchard. *Innovation and the social economy : The Québec experience*. University of Toronto Press, 2013.
Voir page 114.
- [BR88] Marko Bohanec and Vladislav Rajkovic. Knowledge acquisition and explanation for multi-attribute decision making. In *8th intl workshop on expert systems and their applications*, pages 59–78. Avignon France, 1988.
Voir page 79.
- [BR13] Aouni Belaid and Jamil Razmak. Multi-criteria decision support systems : A glorious history and a promising future. In *2013 5th International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization (ICMSAO)*, pages 1–9. IEEE, 2013.
Voir page 79.
- [BS77] Ernst R Berndt and N Eugene Savin. Conflict among criteria for testing hypotheses in the multivariate linear regression model. *Econometrica : Journal of the Econometric Society*, pages 1263–1277, 1977.
Voir page 148.
- [BSHH20] Jan Bieser, Beatrice Salieri, Roland Hischier, and Lorenz Hilty. Next generation mobile networks : Problem or opportunity for climate protection ? 2020.
Voir pages 23 et 26.
- [BSL11] Michael Bruhn Barfod, Kim Bang Salling, and Steen Leleur. Composite decision support by combining cost-benefit and multi-criteria decision analysis. *Decision support systems*, 51(1) :167–175, 2011.
Voir page 79.

- [Bur09] John Burkardt. K-means clustering. *Virginia Tech, Advanced Research Computing, Interdisciplinary Center for Applied Mathematics*, 2009.
Voir page 87.
- [But11] Tom Butler. Towards a practice-oriented green is framework. 2011.
Voir page 125.
- [CBM02] Maurizio Cellura, Giorgio Beccali, and Marina Mistretta. A decision support system software based on multi-criteria analysis for the selection of urban sustainability scenarios. *Word Climate& Energy Event*, pages 301–308, 2002.
Voir page 79.
- [CDH⁺07] Judith A Cherni, Isaac Dyner, Felipe Henao, Patricia Jaramillo, Ricardo Smith, and Raúl Olalde Font. Energy supply for sustainable rural livelihoods. a multi-criteria decision-support system. *Energy Policy*, 35(3) :1493–1504, 2007.
Voir page 79.
- [CH14] Vlad C Coroama and Lorenz M Hilty. Assessing internet energy intensity : A review of methods and results. *Environmental impact assessment review*, 45 :63–68, 2014.
Voir pages 23, 26 et 28.
- [CHC⁺09] Israel Cohen, Yiteng Huang, Jingdong Chen, Jacob Benesty, Jacob Benesty, Jingdong Chen, Yiteng Huang, and Israel Cohen. Pearson correlation coefficient. *Noise reduction in speech processing*, pages 1–4, 2009.
Voir page 146.
- [CHZ⁺20] Xingjuan Cai, Zhaoming Hu, Peng Zhao, Wensheng Zhang, and Jinjun Chen. A hybrid recommendation system with many-objective evolutionary algorithm. *Expert Systems with Applications*, 159 :113648, 2020.
Voir page 96.
- [Cig21] Cigref. Rapport d'orientation stratégique 2021 du Cigref "Futurs numériques : quelles trajectoires?", October 2021.
Voir page 133.
- [CM19] Vlad C Coroamă and Friedemann Mattern. Digital rebound—why digitalization will not redeem us our environmental sins. In *Proceedings 6th international conference on ICT for sustainability. Lappeenranta*. <http://ceur-ws.org>, volume 2382, 2019.
Voir page 35.

- [CMH15] Vlad C Coroama, Åsa Moberg, and Lorenz M Hilty. Dematerialization through electronic media? In *ICT innovations for sustainability*, pages 405–421. Springer, 2015.
Voir page 28.
- [Con89] Panos Constantopoulos. Decision support for massive personnel assignment. *Decision Support Systems*, 5(4) :355–363, 1989.
Voir page 79.
- [CRHMF⁺12] Manuel Cruz-Ramı, César Hervás-Martı, Juan Carlos Fernández, Javier Briceño, Manuel de la Mata, et al. Multi-objective evolutionary algorithm for donor–recipient decision system in liver transplants. *European Journal of Operational Research*, 222(2) :317–327, 2012.
Voir page 79.
- [Dav03] Anthony Christopher Davison. *Statistical models*, volume 11. Cambridge university press, 2003.
Voir page 90.
- [DFFZ03] Massimo Dragan, Enrico Feoli, Michele Ferneti, and Woldu Zerihun. Application of a spatial decision support system (sdss) to reduce soil erosion in northern ethiopia. *Environmental Modelling & Software*, 18(10) :861–868, 2003.
Voir page 79.
- [DGJ16] Ashutosh Kumar Dubey, Umesh Gupta, and Sonal Jain. Analysis of k-means clustering approach on the breast cancer wisconsin dataset. *International journal of computer assisted radiology and surgery*, 11 :2033–2047, 2016.
Voir page 90.
- [DMRZ⁺21] Eleonora Di Matteo, Paolo Roma, Santo Zafonte, Umberto Panniello, and Lorenzo Abbate. Development of a decision support system framework for cultural heritage management. *Sustainability*, 13(13) :7070, 2021.
Voir page 78.
- [DR14] Baishali Dutta and Vijaya Raghavan. A life cycle assessment of environmental and economic balance of biochar systems in quebec. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 5 :1–11, 2014.
Voir page 115.
- [DSC11] Brian Donnellan, Charles Sheridan, and Edward Curry. A capability maturity framework for sustainable information and communication technology. *IT professional*, 13(1) :33–40, 2011.

Voir page 123.

- [DSD17] Debashis Das, Laxman Sahoo, and Sujoy Datta. A survey on recommendation system. *International Journal of Computer Applications*, 160(7), 2017.

Voir page 95.

- [DT16] Nomeda Dobrovolskienė and Rima Tamošiūnienė. Sustainability-oriented financial resource allocation in a project portfolio through multi-criteria decision-making. *Sustainability*, 8(5) :485, 2016.

Voir page 80.

- [DUK⁺20] Danish, Recep Ulucak, Salah Ud-Din Khan, Muhammad Awais Baloch, and Nan Li. Mitigation pathways toward sustainable development : Is there any trade-off between environmental regulation and carbon emissions reduction? *Sustainable Development*, 28(4) :813–822, 2020.

Voir page 36.

- [Dut12] Benjamin Duthil. De l'extraction des connaissances à la recommandation. (from knowledge extraction to recommender system). 2012.

Voir page 76.

- [DVGKS22] Alex De Vries, Ulrich Gellersdörfer, Lena Klaaßen, and Christian Stoll. Revisiting bitcoin's carbon footprint. *Joule*, 6(3) :498–502, 2022.

Voir page 28.

- [EA12] Philippe Esling and Carlos Agon. Time-series data mining. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 45(1) :1–34, 2012.

Voir page 91.

- [EH10] Lorenz Erdmann and Lorenz M Hilty. Scenario analysis : exploring the macroeconomic impacts of information and communication technologies on greenhouse gas emissions. *Journal of Industrial Ecology*, 14(5) :826–843, 2010.

Voir page 36.

- [EMB⁺16] Mine Ercan, Jens Malmodin, Pernilla Bergmark, Emma Kimfalk, and Ellinor Nilsson. Life cycle assessment of a smartphone. In *ICT for Sustainability 2016*, pages 124–133. Atlantis Press, 2016.

Voir page 26.

- [EME05] Ahmed Eldieb, Mohamed Marzouk, and Moheeb Elsaid. Multi-attribute utility model for quantifying schedule and cost overruns in pipe-line projects. *AACE International Transactions*, page R131, 2005.

Voir page 79.

- [Eom85] Hyun Bok Eom. A multi-objective decision support system for global financing strategies of the multinational corporation. (*No Title*), 1985.
Voir page 79.
- [Erc13] Elif Mine Ercan. Global warming potential of a smartphone : Using life cycle assessment methodology, 2013.
Voir page 26.
- [Eva] Evaluating the carbon impact of ICT or The answer to life, the universe and everything Understanding the limitations of LCA-based carbon footprinting methodologies - Recherche Google.
Voir page 51.
- [EW08] Matthias Ehr Gott and Ines Winz. Interactive decision support in radiation therapy treatment planning. *OR Spectrum*, 30 :311–329, 2008.
Voir page 79.
- [Ezv22] Cécile Ezvan. La rochelle territoire zéro carbone : L'action collective pour préserver les milieux de vie. 2022.
Voir page 18.
- [FAF⁺22] Jonathan Friedman, Zola Allen, Allison Fox, Jose Webert, and Andrew Devlin. Application of recommender systems and time series models to monitor quality at hiv/aids health facilities. *Data & Policy*, 4 :e23, 2022.
Voir page 76.
- [FB08] Alexander Felfernig and Robin Burke. Constraint-based recommender systems : technologies and research issues. In *Proceedings of the 10th international conference on Electronic commerce*, pages 1–10, 2008.
Voir page 158.
- [FBB⁺19] Hugues Ferreboeuf, Françoise Berthoud, Philippe Bihouix, Pierre Fabre, Daniel Kaplan, Laurent Lefèvre, et al. Lean ict : Towards digital sobriety. *Report for the Think Tank The Shift Project*, 6, 2019.
Voir pages 16, 28, 31 et 34.
- [FC11] M Farajian and Q Cui. A multi-objective decision support system to enhance funding strategies in ppp projects. *Accepted in 2011 IRNOP*, 2011.
Voir page 79.
- [Fet20] Constanze Fetting. The european green deal. *ESDN report*, 53, 2020.
Voir pages 15 et 17.

- [For85] F Nelson Ford. Decision support systems and expert systems : A comparison. *Information & Management*, 8(1) :21–26, 1985.
Voir page 78.
- [Fus19] T Fuster. Streaming ist das neue fliegen—wie der digitale konsum das klima belastet, 2019.
Voir pages 23 et 28.
- [GBP08] L Gibson, M Bein, and B Plamondon. Innovating toward a low-carbon canada : Using technology to transform tomorrow. *World Wildlife Fund (WWF), Toronto, ON*, 2008.
Voir page 40.
- [GBT⁺09] Jutta Geldermann, Valentin Bertsch, Martin Treitz, Simon French, Konstantina N Papamichail, and Raimo P Hämäläinen. Multi-criteria decision support and evaluation of strategies for nuclear remediation management. *Omega*, 37(1) :238–251, 2009.
Voir page 79.
- [GeS08] Smart GeSI. Enabling the low carbon economy in the information age. *A Report by The Climate Group on behalf of the Global eSustainability Initiative (GeSI)*, 2008.
Voir pages 39 et 41.
- [GeS12] BCG GeSi. Smarter 2020—the role of ict in driving a sustainable future. 2012.
Voir pages 26, 28, 39 et 41.
- [GeS19] Deloitte GeSI. Digital with purpose : Delivering a smarter2030, 2019.
Voir pages 26, 29 et 41.
- [GLS⁺21] Jens Gröger, Ran Liu, Lutz Stobbe, Jan Druschke, and Nikolai Richter. *Green Cloud Computing : lebenszyklusbasierte Datenerhebung zu Umweltwirkungen des Cloud Computing : Abschlussbericht*. Umweltbundesamt, 2021.
Voir page 69.
- [GNGGPS21] Paulino José García-Nieto, Esperanza García-Gonzalo, and José Pablo Paredes-Sánchez. Prediction of the critical temperature of a superconductor by using the woa/mars, ridge, lasso and elastic-net machine learning techniques. *Neural Computing and Applications*, 33 :17131–17145, 2021.
Voir page 92.

- [GO98] Seyed Hassan Ghodsypour and Christopher O'Brien. A decision support system for supplier selection using an integrated analytic hierarchy process and linear programming. *International journal of production economics*, 56 :199–212, 1998.
Voir page 79.
- [Gos15] Cédric Gossart. Rebound effects and ict : a review of the literature. *ICT innovations for sustainability*, pages 435–448, 2015.
Voir page 35.
- [GS19] Mark Goss-Sampson. Statistical analysis in jasp : A guide for students, 2019.
Voir page 149.
- [GSS91] Peter Grassberger, Thomas Schreiber, and Carsten Schaffrath. Nonlinear time sequence analysis. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 1(03) :521–547, 1991.
Voir page 85.
- [GWEZ14] Daniel Grimm, Daniel Weiss, Koray Ereğ, and Ruediger Zarnekow. Product carbon footprint and life cycle assessment of ict–literature review and state of the art. In *2014 47th Hawaii International Conference on System Sciences*, pages 875–884. IEEE, 2014.
Voir page 28.
- [GWR09] Michelle LM Graymore, Anne M Wallis, and Anneke J Richards. An index of regional sustainability : A gis-based multiple criteria analysis decision support system for progressing sustainability. *Ecological complexity*, 6(4) :453–462, 2009.
Voir page 79.
- [GZL09] Ya Gao, Guangquan Zhang, and Jie Lu. A fuzzy multi-objective bilevel decision support system. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 8(01) :93–108, 2009.
Voir page 79.
- [HA15] Lorenz M Hilty and Bernard Aebischer. Ict for sustainability : An emerging research field. *ICT innovations for Sustainability*, pages 3–36, 2015.
Voir pages 23 et 37.
- [HA18] Rob J Hyndman and George Athanasopoulos. *Forecasting : principles and practice*. OTexts, 2018.
Voir page 91.

- [Ham06] Geoffrey P Hammond. ‘people, planet and prosperity’ : the determinants of humanity’s environmental footprint. In *Natural Resources Forum*, volume 30, pages 27–36. Wiley Online Library, 2006.
Voir page 106.
- [Ham20] James D Hamilton. *Time series analysis*. Princeton university press, 2020.
Voir page 165.
- [HB17] Lorenz Hilty and Jan Bieser. Opportunities and risks of digitalization for climate protection in switzerland. 2017.
Voir pages 33, 36 et 40.
- [HH19] Ralph Hintemann and Simon Hinterholzer. Energy consumption of data centers worldwide. *Business, Computer Science (ICT4S)*, 2019.
Voir page 26.
- [HMH02] P Humphreys, R McIvor, and G Huang. An expert system for evaluating the make or buy decision. *Computers & Industrial Engineering*, 42(2-4) :567–585, 2002.
Voir page 79.
- [HMW23] Komal Habib, Elham Mohammadi, and Sohani Vihanga Withanage. A first comprehensive estimate of electronic waste in canada. *Journal of Hazardous Materials*, 448 :130865, 2023.
Voir page 113.
- [HOS⁺14] Albert Hankel, Lisa Oud, Maiko Saan, Patricia Lago, et al. A maturity model for green ict : The case of the surf green ict maturity model. In *EnviroInfo*, pages 33–40, 2014.
Voir page 125.
- [HSA16] Nathaniel C Horner, Arman Shehabi, and Inês L Azevedo. Known unknowns : indirect energy effects of information and communication technology. *Environmental Research Letters*, 11(10) :103001, 2016.
Voir page 22.
- [HWFB08] Guiping Hu, L Wang, S Fetch, and B Bidanda. A multi-objective model for project portfolio selection to implement lean and six sigma concepts. *International journal of production research*, 46(23) :6611–6625, 2008.
Voir page 79.

- [JBB⁺20] Marleen Jattke, Jan Bieser, Yann Blumer, René Itten, and Matthias Stucki. Environmental implications of service life extension of mobile devices. In *Electronics Goes Green 2020+, Online, 1. September 2020*, pages 163–170. Fraunhofer IZM, 2020.
Voir page 33.
- [Jev65] W Stanley Jevons. On the variation of prices and the value of the currency since 1782. *Journal of the Statistical Society of London*, 28(2) :294–320, 1865.
Voir page 35.
- [JLL⁺21] Shangrong Jiang, Yuze Li, Quanying Lu, Yongmiao Hong, Dabo Guan, Yu Xiong, and Shouyang Wang. Policy assessments for the carbon emission flows and sustainability of bitcoin blockchain operation in china. *Nature communications*, 12(1) :1–10, 2021.
Voir page 28.
- [JP07] Thierry Jeantet and Jean-Philippe Poulnot. *L'économie sociale, une alternative planétaire : mondialiser au profit de tous*, volume 161. ECLM, 2007.
Voir page 125.
- [JP21] Bineet Kumar Jha and Shilpa Pande. Time series forecasting model for supermarket sales using fb-prophet. In *2021 5th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*, pages 547–554. IEEE, 2021.
Voir page 165.
- [JPS12] Leslie Jacquemin, Pierre-Yves Pontalier, and Caroline Sablayrolles. Life cycle assessment (lca) applied to the process industry : a review. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17 :1028–1041, 2012.
Voir page 51.
- [JRRIM03] Antonio Jiménez, Sixto Ríos-Insua, and Alfonso Mateos. A decision support system for multiattribute utility evaluation based on imprecise assignments. *Decision Support Systems*, 36(1) :65–79, 2003.
Voir page 79.
- [JRRIM06] Antonio Jiménez, Sixto Ríos-Insua, and Alfonso Mateos. A generic multiattribute analysis system. *Computers & operations research*, 33(4) :1081–1101, 2006.
Voir page 79.

- [Jus06] Katarina Juselius. *The cointegrated VAR model : methodology and applications*. Oxford University Press, USA, 2006.
Voir page 155.
- [Kam20] George Kamiya. Factcheck : What is the carbon footprint of streaming video on netflix. *Carbon Brief*, 25, 2020.
Voir page 28.
- [KB16] Barbara Krumay and Roman Brandtweiner. Measuring the environmental impact of ict hardware. *Environmental & Economic Impact on Sustainable Development (2016)*, 238, 2016.
Voir page 22.
- [KC03] Robert Kowalski and Keith L Clark. Logic programming. In *Encyclopedia of Computer Science*, pages 1017–1031. 2003.
Voir page 81.
- [KDNH15] Eva Kern, Markus Dick, Stefan Naumann, and Tim Hiller. Impacts of software and its engineering on the carbon footprint of ict. *Environmental Impact Assessment Review*, 52 :53–61, 2015.
Voir page 23.
- [KKK⁺99] Birsen Karpak, Rammahan R Kasuganti, Erdogan Kumcu, et al. Multi-objective decision-making in supplier selection : An application of visual interactive goal programming. *Journal of Applied Business Research (JABR)*, 15(2) :57–72, 1999.
Voir page 79.
- [KR07] Joshua B Kollat and Patrick Reed. A framework for visually interactive decision-making and design using evolutionary multi-objective optimization (video). *Environmental Modelling & Software*, 22(12) :1691–1704, 2007.
Voir page 79.
- [KRA⁺14] Kamran Khan, Saif Ur Rehman, Kamran Aziz, Simon Fong, and Sababady Sarasvady. Dbscan : Past, present and future. In *The fifth international conference on the applications of digital information and web technologies (ICADIWT 2014)*, pages 232–238. IEEE, 2014.
Voir page 88.
- [Kro08] Anders Krogh. What are artificial neural networks ? *Nature biotechnology*, 26(2) :195–197, 2008.
Voir page 81.

- [KS08] Carl Kingsford and Steven L Salzberg. What are decision trees? *Nature biotechnology*, 26(9) :1011–1013, 2008.
Voir page 81.
- [Law19] Andy Lawrence. Is pue actually going up. *Uptime Institute. Weblog Available from : <https://journal.uptimeinstitute.com/is-pue-actually-going-up/>* [Accessed 11 Jun 2020], 2019.
Voir page 33.
- [LD20] Fan Liu and Yong Deng. Determine the number of unknown targets in open world based on elbow method. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 29(5) :986–995, 2020.
Voir page 167.
- [LDLM⁺12] Alexandra Law, Terry De Lacy, G Michael McGrath, Paul A Whitelaw, Geoffrey Lipman, and Geoff Buckley. Towards a green economy decision support system for tourism destinations. *Journal of Sustainable Tourism*, 20(6) :823–843, 2012.
Voir page 76.
- [LDV⁺08] Jie Lu, Xiaoguang Deng, Philippe Vroman, Xianyi Zeng, Jun Ma, and Guangquan Zhang. A fuzzy multi-criteria group decision support system for nonwoven based cosmetic product development evaluation. In *2008 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (IEEE World Congress on Computational Intelligence)*, pages 1700–1707. IEEE, 2008.
Voir page 79.
- [Lee73] Sang M Lee. Goal programming for decision analysis of multiple objectives. *Sloan Management Review*, 14(2) :11–24, 1973.
Voir page 79.
- [Lee81] Sang M Lee. Management by multiple objectives. (*No Title*), 1981.
Voir page 79.
- [LEH⁺18] DL Lautenschutz, Sergio España, AC Hankel, SJ Overbeek, Patricia Lago, Birgit Penzenstadler, Steve Easterbrook, Colin Venters, Syed Ishtiaque Ahmed, et al. A comparative analysis of green ict maturity models. *ICT4S2018*, 52 :153–167, 2018.
Voir page 124.
- [LMBP⁺21] A Levasseur, S Mercier-Blais, YT Prairie, A Tremblay, and C Turpin. Improving the accuracy of electricity carbon footprint : Estimation of hydroelectric reservoir greenhouse gas emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 136 :110433, 2021.

Voir page 114.

- [LMY⁺12] Linyuan Lü, Matúš Medo, Chi Ho Yeung, Yi-Cheng Zhang, Zi-Ke Zhang, and Tao Zhou. Recommender systems. *Physics reports*, 519(1) :1–49, 2012.

Voir page 94.

- [LPJH20] P-VP Clément Louis-Philippe, Quentin ES Jacquemotte, and Lorenz M Hilty. Sources of variation in life cycle assessments of smartphones and tablet computers. *Environmental Impact Assessment Review*, 84 :106416, 2020.

Voir pages 26, 33 et 35.

- [LPS20] Steffen Lange, Johanna Pohl, and Tilman Santarius. Digitalization and energy consumption. does ict reduce energy demand? *Ecological economics*, 176 :106760, 2020.

Voir page 37.

- [LS03] Simon B Laughlin and Terrence J Sejnowski. Communication in neuronal networks. *Science*, 301(5641) :1870–1874, 2003.

Voir page 90.

- [LVLK99] Z Lounis, DJ Vanier, MA Lacasse, and BR Kyle. Decision-support system for service life asset management : the belcam project. *Durability of Building Materials and Components, National Research Council Canada, Ottawa*, 4 :2338–2347, 1999.

Voir page 79.

- [MA11] Reinhard Madlener and Blake Alcott. Herausforderungen für eine technisch-ökonomische entkoppelung von naturverbrauch und wirtschaftswachstum unter besonderer berücksichtigung der systematisierung von rebound-effekten und problemverschiebungen. *Provisional final version of a study for the German government's study commission on 'Growth, Wealth, Quality of Life'of*, 4, 2011.

Voir page 35.

- [MAG⁺99] Sesh Murthy, Rama Akkiraju, Richard Goodwin, Pinar Keskinocak, John Rachlin, Frederick Wu, James Yeh, Robert Fuhrer, Santhosh Kumaran, Alok Aggarwal, et al. Cooperative multiobjective decision support for the paper industry. *Interfaces*, 29(5) :5–30, 1999.

Voir page 79.

- [Mag17] Stanford Magazine. Carbon and the Cloud, June 2017.

Voir page 69.

- [Mah20] Batta Mahesh. Machine learning algorithms-a review. *International Journal of Science and Research (IJSR).[Internet]*, 9(1) :381–386, 2020.
Voir page 92.
- [Mak10] Marek Makowski. Multi-objective decision support including sensitivity analysis. *Environmental Systems*, 3 :17, 2010.
Voir page 79.
- [Mar68] Paul Cecil Martin. *Measurements and correlation functions*. CRC Press, 1968.
Voir page 85.
- [Mar03] George M Marakas. *Decision support systems in the 21st century*, volume 134. Prentice Hall Upper Saddle River, 2003.
Voir page 78.
- [Mas10] Eric Masanet. Energy benefits of electronic controls at small and medium sized us manufacturers. *Journal of Industrial Ecology*, 14(5) :696–702, 2010.
Voir page 35.
- [MB15] Jens Malmmodin and Pernilla Bergmark. Exploring the effect of ict solutions on ghg emissions in 2030. In *EnviroInfo and ICT for Sustainability 2015*, pages 37–46. Atlantis Press, 2015.
Voir page 40.
- [MBF11] Åsa Moberg, Clara Borggren, and Göran Finnveden. Books from an environmental perspective—part 2 : e-books as an alternative to paper books. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16 :238–246, 2011.
Voir page 28.
- [MBM03] CK Makropoulos, David Butler, and C Maksimovic. Fuzzy logic spatial decision support system for urban water management. *Journal of water resources planning and management*, 129(1) :69–77, 2003.
Voir page 79.
- [MC87] Glenn W Milligan and Martha C Cooper. Methodology review : Clustering methods. *Applied psychological measurement*, 11(4) :329–354, 1987.
Voir page 87.
- [MCP11] Alemayehu Molla, Vanessa Cooper, and Siddhi Pittayachawan. The green it readiness (g-readiness) of organizations : an exploratory analysis of a

- construct and instrument. *Communications of the Association for Information Systems*, 29(1) :4, 2011.
Voir page 125.
- [McR11] Andrew D McRae. *Ethical Challenges in Cluster Randomized Trials*. The University of Western Ontario (Canada), 2011.
Voir page 85.
- [MG12] San Murugesan and GR Gangadharan. Green it : an overview. *Harnessing green IT : Principles and practices*, pages 1–21, 2012.
Voir page 125.
- [MGA12] S Afshin Mansouri, David Gallea, and Mohammad H Askariazad. Decision support for build-to-order supply chain management through multiobjective optimization. *International Journal of Production Economics*, 135(1) :24–36, 2012.
Voir page 79.
- [MJFJ07] Åsa Moberg, Martin Johansson, Göran Finnveden, and Alex Jonsson. *Screening environmental life cycle assessment of printed, web based and tablet e-paper newspaper*. 2007.
Voir page 28.
- [ML16] Jens Malmodin and Dag Lundén. The energy and carbon footprint of the ict and e&m sector in sweden 1990-2015 and beyond. In *ICT for Sustainability 2016*, pages 209–218. Atlantis Press, 2016.
Voir page 31.
- [ML18] Jens Malmodin and Dag Lundén. The energy and carbon footprint of the global ict and e&m sectors 2010–2015. *Sustainability*, 10(9) :3027, 2018.
Voir pages 26, 28, 33 et 34.
- [ML20] Eric Masanet and Nuoa Lei. How much energy do data centers really use. *Aspen Global Change Institute*, 2020.
Voir page 26.
- [Mok90] Patricia Lyon Mokhtarian. A typology of relationships between telecommunications and transportation. *Transportation Research Part A : General*, 24(3) :231–242, 1990.
Voir page 36.
- [Mor07] Maxime Morge. The hedgehog and the fox : An argumentation-based decision support system. In *International Workshop on Argumentation in Multi-Agent Systems*, pages 114–131. Springer, 2007.
Voir page 78.

- [MSA18] Spyros Makridakis, Evangelos Spiliotis, and Vassilios Assimakopoulos. Statistical and machine learning forecasting methods : Concerns and ways forward. *PloS one*, 13(3) :e0194889, 2018.
Voir page 91.
- [MSGJPE15] Sara Marcelino-Sádaba, Luis Felipe González-Jaen, and Amaya Pérez-Ezcurdia. Using project management as a way to sustainability. from a comprehensive review to a framework definition. *Journal of cleaner production*, 99 :1–16, 2015.
Voir page 80.
- [MSL⁺20] Eric Masanet, Arman Shehabi, Nuo Lei, Sarah Smith, and Jonathan Koomey. Recalibrating global data center energy-use estimates. *Science*, 367(6481) :984–986, 2020.
Voir page 33.
- [MSM⁺19] Béatrice Montbroussous, Jonathan Schaeffer, Gabriel Pierre André Moreau, Françoise Berthoud, and Gabrielle Feltin. Calculer le bilan carbone de votre parc informatique avec ecodiag, un service ecoinfo. In *Congrès JRES : Les Journées Réseaux de l'Enseignement et de la Recherche*, 2019.
Voir page 62.
- [Mur08] San Murugesan. Harnessing green it : Principles and practices. *IT professional*, 10(1) :24–33, 2008.
Voir page 125.
- [NAC22] Armielle Noulapeu Ngaffo, Walid El Ayeub, and Zièd Choukair. Service recommendation driven by a matrix factorization model and time series forecasting. *Applied Intelligence*, pages 1–16, 2022.
Voir page 76.
- [Nik22] Benjamin Nikkari. Evaluation of manufacturing carbon footprint calculation methods for environmental technology products. 2022.
Voir page 53.
- [NJCRA07] Eduardo Natividade-Jesus, João Coutinho-Rodrigues, and Carlos Henggeler Antunes. A multicriteria decision support system for housing evaluation. *Decision Support Systems*, 43(3) :779–790, 2007.
Voir page 79.
- [NN16] Frank Nielsen and Frank Nielsen. Hierarchical clustering. *Introduction to HPC with MPI for Data Science*, pages 195–211, 2016.
Voir page 87.

- [noaa] Carbon intensity of electricity.
Voir page 70.
- [noab] Digital economy and climate impact.
Voir page 26.
- [noac] Greenhouse gas emission intensity of electricity generation — European Environment Agency.
Voir page 34.
- [ODPU05] Marta Omero, Lorenzo D’Ambrosio, Raffaele Pesenti, and Walter Ukovich. Multiple-attribute decision support system based on fuzzy logic for performance assessment. *European Journal of Operational Research*, 160(3) :710–725, 2005.
Voir page 79.
- [OEMCEM16] Meryem Ouahilal, Mohammed El Mohajir, Mohamed Chahhou, and Badr Eddine El Mohajir. A comparative study of predictive algorithms for business analytics and decision support systems : Finance as a case study. In *2016 International Conference on Information Technology for Organizations Development (IT4OD)*, pages 1–6. IEEE, 2016.
Voir page 76.
- [OES07] Mahamed GH Omran, Andries P Engelbrecht, and Ayed Salman. An overview of clustering methods. *Intelligent Data Analysis*, 11(6) :583–605, 2007.
Voir page 85.
- [P⁺23] Jonathan Papenhoff et al. Driving sustainability in digital technologies : How effective is france’s " reen " law ? 2023.
Voir page 154.
- [Pam08] D Pamlin. The potential global co2 reductions from ict use : Identifying and assessing the opportunities to reduce the first billion tonnes of co2. *WWF : Stockholm, Sweden*, 2008.
Voir pages 36 et 40.
- [Pay00] Thomas H Payne. Computer decision support systems. *Chest*, 118(2) :47S–52S, 2000.
Voir page 76.
- [PB22] Andreja Primec and Jernej Belak. Sustainable csr : Legal and managerial demands of the new eu legislation (csrd) for the future corporate governance practices. *Sustainability*, 14(24) :16648, 2022.
Voir page 154.

- [PDP07] Dobrila Petrovic, Alejandra Duenas, and Sanja Petrovic. Decision support tool for multi-objective job shop scheduling problems with linguistically quantified decision functions. *Decision support systems*, 43(4) :1527–1538, 2007.
Voir page 79.
- [PGH⁺22] David Patterson, Joseph Gonzalez, Urs Hölzle, Quoc Le, Chen Liang, Lluís-Miquel Munguia, Daniel Rothchild, David R So, Maud Texier, and Jeff Dean. The carbon footprint of machine learning training will plateau, then shrink. *Computer*, 55(7) :18–28, 2022.
Voir page 28.
- [PHF19] Johanna Pohl, Lorenz M Hilty, and Matthias Finkbeiner. How lca contributes to the environmental assessment of higher order effects of ict application : A review of different approaches. *Journal of cleaner production*, 219 :698–712, 2019.
Voir page 22.
- [Pic90] Domenico Piccolo. A distance measure for classifying arima models. *Journal of time series analysis*, 11(2) :153–164, 1990.
Voir page 154.
- [PL87] Rolf Pfeifer and Hans-Jakob Lüthi. Decision support systems and expert systems : a complementary relationship. *Expert Systems and Artificial Intelligence in Decision Support Systems ; Springer : Dordrecht, The Netherlands*, pages 41–51, 1987.
Voir page 78.
- [Ple02] Andrius Plepys. The grey side of ict. *Environmental impact assessment review*, 22(5) :509–523, 2002.
Voir page 23.
- [Pro11] Greenhouse Gas Protocol. Greenhouse gas protocol. *Sector Toolsets for Iron and Steel-Guidance Document*, 2011.
Voir page 52.
- [PWHF04] Gloria E Phillips-Wren, Eugene D Hahn, and Guisseppi A Forgiione. A multiple-criteria framework for evaluation of decision support systems. *Omega*, 32(4) :323–332, 2004.
Voir page 79.
- [R⁺09] Douglas A Reynolds et al. Gaussian mixture models. *Encyclopedia of biometrics*, 741(659-663), 2009.
Voir page 88.

- [RA15] Jamil Razmak and Belaid Aouni. Decision support system and multi-criteria decision aid : a state of the art and perspectives. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 22(1-2) :101–117, 2015.
Voir pages 11 et 79.
- [RC23] Aiste Rugeviciute and Vincent Courboulay. Vers la conceptualisation du périmètre de la responsabilité numérique des entreprises. 2023.
Voir page 72.
- [RDH⁺01] Roy Rasmussen, Mike Dixon, Frank Hage, Jeff Cole, Chuck Wade, John Tuttle, Starr McGettigan, Thomas Carty, Lloyd Stevenson, Warren Feller, et al. Weather support to deicing decision making (wsddm) : A winter weather nowcasting system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(4) :579–596, 2001.
Voir page 79.
- [RHW08] Andrea K Roalfe, Roger L Holder, and Sue Wilson. Standardisation of rates using logistic regression : a comparison with the direct method. *BMC health services research*, 8 :1–7, 2008.
Voir page 156.
- [RIGJM06] Sixto Ríos-Insua, Eduardo Gallego, Antonio Jiménez, and Alfonso Mateos. A multi-attribute decision support system for selecting intervention strategies for radionuclide contaminated freshwater ecosystems. *Ecological Modelling*, 196(1-2) :195–208, 2006.
Voir page 79.
- [RPD⁺11] María Ros, Manuel Pegalajar, Miguel Delgado, Amparo Vila, Derek T Anderson, James M Keller, and Mihail Popescu. Linguistic summarization of long-term trends for understanding change in human behavior. In *2011 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE 2011)*, pages 2080–2087. IEEE, 2011.
Voir page 85.
- [RRG⁺12] M Azizur Rahman, Bernd Rusteberg, RC Gogu, JP Lobo Ferreira, and Martin Sauter. A new spatial multi-criteria decision support tool for site selection for implementation of managed aquifer recharge. *Journal of environmental management*, 99 :61–75, 2012.
Voir page 79.
- [RS13] Christopher K Riesbeck and Roger C Schank. *Inside case-based reasoning*. Psychology Press, 2013.
Voir page 84.

- [RW16] Michael M Richter and Rosina O Weber. *Case-based reasoning*. Springer, 2016.
Voir page 83.
- [S⁺99] Mirosław J Skibniewski et al. Quantitative constructability analysis with a neuro-fuzzy knowledge-based multi-criterion decision support system. *Automation in construction*, 8(5) :553–565, 1999.
Voir page 79.
- [SAS⁺20] Lakshmy Subramanian, Constantinos Alexiou, Pamela Steele, Foyeke Tolani, et al. Developing a sustainability index for public health supply chains. *Sustainable futures*, 2 :100019, 2020.
Voir page 79.
- [SBF⁺23] Tilman Santarius, Jan CT Bieser, Vivian Frick, Mattias Höjer, Maike Gossen, Lorenz M Hilty, Eva Kern, Johanna Pohl, Friederike Rohde, and Steffen Lange. Digital sufficiency : conceptual considerations for icts on a finite planet. *Annals of Telecommunications*, 78(5-6) :277–295, 2023.
Voir page 37.
- [Sch82] Roger C Schank. *Reading and understanding : Teaching from the perspective of artificial intelligence*. L. Erlbaum Associates Inc., 1982.
Voir page 83.
- [SCP⁺18] Mark W Schwartz, Carly N Cook, Robert L Pressey, Andrew S Pullin, Michael C Runge, Nick Salafsky, William J Sutherland, and Matthew A Williamson. Decision support frameworks and tools for conservation. *Conservation Letters*, 11(2) :e12385, 2018.
Voir page 76.
- [Sed12] Philip Sedgwick. Pearson’s correlation coefficient. *Bmj*, 345, 2012.
Voir page 86.
- [SGKM07] Yannis Siskos, Evangelos Grigoroudis, Evangelia Krassadaki, and Nikolaos Matsatsinis. A multicriteria accreditation system for information technology skills and qualifications. *European Journal of Operational Research*, 182(2) :867–885, 2007.
Voir page 79.
- [SH07] Diana S Solomon and Kenneth FD Hughey. A proposed multi criteria analysis decision support tool for international environmental policy issues : a pilot application to emissions control in the international aviation sector. *Environmental Science & Policy*, 10(7-8) :645–653, 2007.
Voir page 79.

- [She20] Alex Sherstinsky. Fundamentals of recurrent neural network (rnn) and long short-term memory (lstm) network. *Physica D : Nonlinear Phenomena*, 404 :132306, 2020.
Voir pages 91, 92 et 155.
- [SHJ06] Wolfram Scharnhorst, Lorenz M Hilty, and Olivier Jolliet. Life cycle assessment of second generation (2g) and third generation (3g) mobile phone networks. *Environment international*, 32(5) :656–675, 2006.
Voir page 26.
- [SK09] Xiaoyuan Su and Taghi M Khoshgoftaar. A survey of collaborative filtering techniques. *Advances in artificial intelligence*, 2009, 2009.
Voir page 95.
- [ŠKSŽ08] Jana Šelih, Anžej Kne, Aleksander Srđić, and Marjan Žura. Multiple-criteria decision support system in highway infrastructure management. *Transport*, 23(4) :299–305, 2008.
Voir page 79.
- [SL15] James Suckling and Jacquetta Lee. Redefining scope : the true environmental impact of smartphones? *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20 :1181–1196, 2015.
Voir page 26.
- [SS77] John Miles Smith and Diane CP Smith. Database abstractions : Aggregation and generalization. *ACM Transactions on Database Systems (TODS)*, 2(2) :105–133, 1977.
Voir page 145.
- [SSM21] Md Abu Bakar Siddik, Arman Shehabi, and Landon Marston. The environmental footprint of data centers in the united states. *Environmental Research Letters*, 16(6) :064017, 2021.
Voir page 26.
- [SSS00] Robert H Shumway, David S Stoffer, and David S Stoffer. *Time series analysis and its applications*, volume 3. Springer, 2000.
Voir page 91.
- [SSSS17] Robert H Shumway, David S Stoffer, Robert H Shumway, and David S Stoffer. Arima models. *Time series analysis and its applications : with R examples*, pages 75–163, 2017.
Voir page 91.

- [Str05] Nicolas Stroppa. *Définitions et caractérisations de modèles à base d'analogies pour l'apprentissage automatique des langues naturelles*. PhD thesis, Télécom ParisTech, 2005.
Voir page 85.
- [Str15] Accenture Strategy. Smarter2030 : Ict solutions for 21st century challenges. *The Global eSustainability Initiative (GeSI), Brussels, Brussels-Capital Region, Belgium, Tech. Rep.*, 3, 2015.
Voir pages 26, 28, 31, 36 et 40.
- [Sur91] Nallan C Suresh. An extended multi-objective replacement model for flexible automation investments. *THE INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH*, 29(9) :1823–1844, 1991.
Voir page 79.
- [SVP14] Ann Stes and Peter Van Petegem. Profiling approaches to teaching in higher education : a cluster-analytic study. *Studies in Higher Education*, 39(4) :644–658, 2014.
Voir page 85.
- [Swi17] AG Swisscom. Nachhaltigkeitsbericht 2016. *Swisscom : Bern, Switzerland*, 2017.
Voir page 37.
- [SWM14] Arman Shehabi, Ben Walker, and Eric Masanet. The energy and greenhouse-gas implications of internet video streaming in the united states. *Environmental Research Letters*, 9(5) :054007, 2014.
Voir page 28.
- [TFS12] Farzad Torkamani, Samira Fallah, and Masood Saadatmand. How urban managers can use dss to facilitate decision making process : an application of fuzzy topsis. *Journal of American Science*, 8(5) :162–173, 2012.
Voir page 79.
- [TRP05] Efraim Turban, Rexz Kelly Rainer, and Richard E Potter. *Administração de tecnologia da informação : teoria e prática*. Elsevier, 2005.
Voir page 78.
- [Tsa05] Ruey S Tsay. *Analysis of financial time series*. John wiley & sons, 2005.
Voir page 91.
- [TSA07] Madjid Tavana, James W Smither, and Ralph V Anderson. D-side : A facility and workforce planning group multi-criteria decision support system

- for johnson space center. *Computers & Operations Research*, 34(6) :1646–1673, 2007.
- Voir page 79.
- [TT01] Maggie CY Tam and VM Rao Tummala. An application of the ahp in vendor selection of a telecommunications system. *Omega*, 29(2) :171–182, 2001.
- Voir page 79.
- [TW21] Tomohiro Tabata and Tse Yu Wang. Life cycle assessment of co2 emissions of online music and videos streaming in japan. *Applied Sciences*, 11(9) :3992, 2021.
- Voir page 28.
- [UDK20] Recep Ulucak, Danish, and Salah Ud-Din Khan. Does information and communication technology affect co2 mitigation under the pathway of sustainable development during the mode of globalization? *Sustainable Development*, 28(4) :857–867, 2020.
- Voir page 37.
- [UR12] Mueen Uddin and Azizah Abdul Rahman. Energy efficiency and low carbon enabler green it framework for data centers considering green metrics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6) :4078–4094, 2012.
- Voir page 125.
- [VBL19] Kathleen Vaillancourt, Olivier Bahn, and Annie Levasseur. The role of bioenergy in low-carbon energy transition scenarios : A case study for quebec (canada). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102 :24–34, 2019.
- Voir pages 113 et 114.
- [VLMvW97] Robert Van Lieere, Jurriaan D Mulder, and Jarke J van Wijk. Computational steering. *Future Generation Computer Systems*, 12(5) :441–450, 1997.
- Voir page 90.
- [VMVS00] Robin Van Meteren and Maarten Van Someren. Using content-based filtering for recommendation. In *Proceedings of the machine learning in the new information age : MLnet/ECML2000 workshop*, volume 30, pages 47–56. Barcelona, 2000.
- Voir page 95.

- [VRH⁺17] Roberto Verdecchia, Fabio Ricchiuti, Albert Hankel, Patricia Lago, and Giuseppe Procaccianti. Green ict research and challenges. In *Advances and new trends in environmental informatics : Stability, continuity, innovation*, pages 37–48. Springer, 2017.
Voir page 22.
- [VVB22] Karen Valls-Val and María D Bovea. Carbon footprint assessment tool for universities : Co2unv. *Sustainable Production and Consumption*, 29 :791–804, 2022.
Voir page 54.
- [Wal19] Ari Ezra Waldman. Power, process, and automated decision-making. *Fordham L. Rev.*, 88 :613, 2019.
Voir page 76.
- [Wat85] Donald A Waterman. *A guide to expert systems*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1985.
Voir page 76.
- [WHKR16] L Warland, L Hilty, J Küng, and J Reinhard. Fact sheet : Business travel. *Sustainability Team, University of Zurich : Zurich, Switzerland*, 2016.
Voir page 28.
- [WHL10] SQ Weng, Guo H Huang, and YP Li. An integrated scenario-based multi-criteria decision support system for water resources management and planning—a case study in the haihe river basin. *Expert Systems with Applications*, 37(12) :8242–8254, 2010.
Voir page 79.
- [WJ92] Rob R Weitz and M Tawfik Jelassi. Assigning students to groups : a multi-criteria decision support system approach. *Decision Sciences*, 23(3) :746–757, 1992.
Voir page 79.
- [WKM10] Christopher L Weber, Jonathan G Koomey, and H Scott Matthews. The energy and climate change implications of different music delivery methods. *Journal of Industrial Ecology*, 14(5) :754–769, 2010.
Voir page 28.
- [WM94] Ian Watson and Farhi Marir. Case-based reasoning : A review. *The knowledge engineering review*, 9(4) :327–354, 1994.
Voir pages 81 et 83.

- [WSF22] Laurence Williams, Benjamin K Sovacool, and Timothy J Foxon. The energy use implications of 5g : Reviewing whole network operational energy, embodied energy, and indirect effects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157 :112033, 2022.
Voir page 26.
- [WW16] Hadley Wickham and Hadley Wickham. *Data analysis*. Springer, 2016.
Voir page 85.
- [WX21] Jiawei Wang and Tianyi Xu. Environmental impact of information communication technology : A review of econometric assessment methods, influential mechanism, and influential direction. *Environmental Impact Assessment Review*, 89 :106590, 2021.
Voir page 23.
- [XLX⁺22] Xiaoning Xia, Pengwei Li, Zhenguo Xia, Rui Wu, and Yang Cheng. Life cycle carbon footprint of electric vehicles in different countries : A review. *Separation and Purification Technology*, page 122063, 2022.
Voir page 70.
- [Y⁺96] Wen-Der Yu et al. A neuro-fuzzy knowledge-based multi-criterion decision model for constructability analysis and improvement of construction technologies. 1996.
Voir page 79.
- [ZBB⁺01] Th Zeevaert, A Bousher, V Brendler, P Hedemann Jensen, and S Nordlinder. Evaluation and ranking of restoration strategies for radioactively contaminated sites. *Journal of Environmental Radioactivity*, 56(1-2) :33–50, 2001.
Voir page 79.
- [ZMS13] Konstantinos G Zografos, Michael A Madas, and Yiannis Salouras. A decision support system for total airport operations management and planning. *Journal of advanced transportation*, 47(2) :170–189, 2013.
Voir page 76.
- [ZP13] Constantin Zopounidis and Panos M Pardalos. *Managing in uncertainty : theory and practice*, volume 19. Springer Science & Business Media, 2013.
Voir page 79.
- [ZSW97] Enrique G Zapatero, Charles H Smith, and H Roland Weistroffer. Evaluating multiple-attribute decision support systems. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 6(4) :201–214, 1997.
Voir page 79.

- [ZZQ⁺23] Huifang Zhou, Shuyou Zhang, Lemiao Qiu, Zili Wang, and Kerui Hu. A factorisation-based recommendation model for customised products configuration design. *International Journal of Production Research*, 61(19) :6381–6402, 2023.

Voir page 85.

- [ZZZL19] Linlin Zhao, Yong Zha, Yuliang Zhuang, and Liang Liang. Data envelopment analysis for sustainability evaluation in china : Tackling the economic, environmental, and social dimensions. *European Journal of Operational Research*, 275(3) :1083–1095, 2019.

Voir page 79.

Annexes

ODD et numérique



FIGURE 1 – Liste des ODD.

Voici un résumé avec la liaison entre les 17 objectifs de développement durable (Voir Figure 1) et chacun avec ce qui le lie au numérique responsable :

Objectif 1 : Éradiquer la pauvreté. Le numérique peut contribuer à éradiquer la pauvreté en favorisant l'accès à des services essentiels comme la santé, l'éducation ou la finance. Il peut aussi créer des opportunités de travail et de revenu pour les populations les plus démunies. Mais il peut aussi accentuer les inégalités et les conditions de travail précaires si son déploiement n'est pas accompagné de mesures sociales et environnementales.

Objectif 2 : Faim zéro et agriculture. Le numérique peut aider à lutter contre la faim et à promouvoir une agriculture durable en facilitant le partage d'informations, le suivi des cultures, l'optimisation des ressources ou encore l'accès aux marchés. Il peut aussi renforcer la résilience des agriculteurs face aux changements climatiques et aux aléas naturels. Mais il peut aussi avoir un impact négatif sur l'environnement et la biodiversité si son utilisation n'est pas maîtrisée et respectueuse des écosystèmes.

Objectif 3 : Santé et bien-être. Le numérique peut améliorer la santé et le bien-être des populations en permettant un meilleur accès aux soins, une prévention plus efficace, un diagnostic plus rapide, une traçabilité des médicaments ou encore une formation à distance des professionnels de santé. Il peut aussi favoriser l'innovation médicale grâce à l'intelligence artificielle ou aux technologies d'avant-garde. Mais

il peut aussi présenter des risques si son usage n'est pas encadré par des normes et des régulations.

Objectif 4 : Éducation de qualité. Le numérique peut contribuer à une éducation de qualité pour tous en offrant un accès à une diversité de contenus pédagogiques, en facilitant l'apprentissage personnalisé, en stimulant la créativité ou encore en favorisant l'inclusion des personnes marginalisées ou handicapées. Il peut aussi renforcer les compétences numériques nécessaires pour s'adapter au monde du travail et à la société du XXI^e siècle. Mais il peut aussi creuser le fossé entre les élèves connectés et déconnectés si son déploiement n'est pas équitable et solidaire.

Objectif 5 : Égalité entre les sexes. Le numérique peut promouvoir l'égalité entre les sexes en donnant aux femmes un accès à l'information, à l'éducation, à l'emploi ou encore aux droits fondamentaux. Il peut aussi leur offrir des opportunités d'expression, de participation ou d'émancipation dans tous les domaines de la vie sociale, économique ou politique. Mais il peut aussi reproduire ou amplifier les discriminations, les violences ou les stéréotypes liés au genre si son fonctionnement n'est pas inclusif et respectueux de la diversité.

Objectif 6 : Eau propre et assainissement. Le numérique peut contribuer à garantir l'accès à l'eau potable et à l'assainissement pour tous en facilitant la gestion des ressources hydriques, le contrôle de la qualité de l'eau, la prévention des risques sanitaires ou encore la sensibilisation des populations. Il peut aussi soutenir les initiatives locales ou internationales visant à protéger les écosystèmes aquatiques. Mais il peut aussi consommer beaucoup d'eau et de produire des déchets toxiques si son cycle de vie n'est pas éco-responsable.

Objectif 7 : Énergie propre et d'un coût abordable. Le numérique peut aider à assurer l'accès à une énergie propre et d'un coût abordable pour tous en permettant une meilleure efficacité énergétique, une optimisation des réseaux électriques, une promotion des énergies renouvelables ou encore une réduction de la précarité énergétique. Il peut aussi stimuler l'innovation et la recherche dans le domaine de l'énergie. Mais il peut aussi être très gourmand en énergie et contribuer au réchauffement climatique si son empreinte carbone n'est pas maîtrisée.

Objectif 8 : Travail décent et croissance économique. Le numérique peut favoriser le travail décent et la croissance économique en créant de nouveaux emplois, en augmentant la productivité, en facilitant l'entrepreneuriat ou encore en améliorant les conditions de travail. Il peut aussi renforcer le dialogue social, la protection sociale ou les droits des travailleurs. Mais il peut aussi entraîner des pertes d'emplois, des inégalités salariales ou des risques psychosociaux si son impact sur le marché du travail n'est pas anticipé et accompagné.

Objectif 9 : Industrie, innovation et infrastructure. Le numérique peut soutenir le développement d'une industrie innovante et durable en favorisant la transformation numérique des entreprises, en stimulant la recherche et le développement, en

facilitant l'accès aux infrastructures technologiques ou encore en encourageant la coopération internationale. Il peut aussi contribuer à résoudre les grands défis sociétaux grâce aux technologies émergentes comme l'intelligence artificielle, l'internet des objets ou la robotique.

Objectif 10 : Inégalités réduites. Le numérique peut contribuer à réduire les inégalités entre les pays et au sein des pays en favorisant l'inclusion sociale, ou politique des personnes les plus vulnérables comme les femmes, les jeunes, les personnes handicapées ou les minorités ethniques. Il peut aussi renforcer la solidarité internationale, le multilatéralisme ou la coopération Sud-Sud. Mais il peut aussi accentuer les fractures numériques entre les pays développés et les pays en développement ou entre les populations connectées et déconnectées si son accès n'est pas universel.

Objectif 11 : Villes et communautés durables. Le numérique peut contribuer à rendre les villes et les communautés plus durables en facilitant la mobilité urbaine, la gestion des déchets, l'efficacité énergétique ou encore la participation citoyenne. Il peut aussi favoriser le développement de villes intelligentes, connectées et inclusives. Mais il peut aussi générer de la pollution, de la congestion ou de l'exclusion si son intégration dans le tissu urbain n'est pas harmonieuse et respectueuse des habitants.

Objectif 12 : Consommation et production responsables. Le numérique peut aider à promouvoir une consommation et une production responsables en permettant une meilleure traçabilité des produits, une réduction du gaspillage, une optimisation des ressources ou encore une sensibilisation des consommateurs. Il peut aussi encourager l'économie circulaire, le recyclage ou la réparation des équipements numériques. Mais il peut aussi favoriser la surconsommation, l'obsolescence ou la pollution si son cycle de vie n'est pas durable et éthique.

Objectif 13 : Mesures relatives à la lutte contre les changements climatiques. Le numérique peut soutenir les mesures relatives à la lutte contre les changements climatiques en facilitant le suivi des émissions de gaz à effet de serre, la prévision des impacts climatiques, l'adaptation aux conséquences du réchauffement ou encore la mobilisation des acteurs. Il peut aussi stimuler l'innovation et la recherche dans le domaine des solutions bas-carbone. Mais il peut aussi être une source importante d'émissions de gaz à effet de serre si son empreinte carbone n'est pas réduite.

Objectif 14 : Vie aquatique. Le numérique peut contribuer à préserver et restaurer la vie aquatique en facilitant la surveillance des océans, la protection de la biodiversité marine, la gestion durable des pêcheries ou encore l'éducation environnementale. Il peut aussi soutenir les initiatives locales ou internationales visant à protéger les écosystèmes marins. Mais il peut aussi avoir un impact négatif sur l'environnement et la biodiversité si son utilisation n'est pas maîtrisée et respectueuse des milieux aquatiques.

Objectif 15 : Vie terrestre. Le numérique peut contribuer à préserver et restaurer la vie terrestre en facilitant le suivi de la faune et de la flore, la protection de la

biodiversité terrestre, la gestion durable des forêts ou encore l'éducation environnementale. Il peut aussi soutenir les initiatives locales ou internationales visant à protéger les écosystèmes terrestres. Mais il peut aussi avoir un impact négatif sur la biodiversité si son utilisation n'est pas maîtrisée et respectueuse des milieux naturels.

Objectif 16 : Paix, justice et institutions efficaces. Le numérique peut contribuer à promouvoir la paix, la justice et les institutions efficaces en facilitant l'accès à l'information, aux droits humains, à la justice ou encore à la sécurité. Il peut aussi renforcer le dialogue social, le pluralisme politique ou le contrôle démocratique. Mais il peut aussi présenter des risques pour le respect de la vie privée, pour les libertés fondamentales ou pour l'état de droit si son usage n'est pas encadré par des normes et des régulations.

Objectif 17 : Partenariats pour la réalisation des objectifs. Le numérique peut contribuer à renforcer les partenariats pour la réalisation des objectifs en facilitant le partage d'expériences, de connaissances ou de données entre les acteurs du développement durable. Il peut aussi encourager la coopération internationale, le multilatéralisme ou la solidarité entre les pays développés et les pays en développement. Mais il peut aussi accentuer les déséquilibres, les conflits ou les tensions entre les différents acteurs si son accès n'est pas universel et équitable.

Source WeNR

Sources des données :

- <https://github.com/Boavizta/environmental-footprint-data> (Septembre 2022 - WeNR 2022)
- <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1241941/FULLTEXT01.pdf> (Novembre 2020 WeNR 2021 et 2022)
- <http://energyusecalculator.com/electricitylcdleddisplay.htm> (Novembre 2020 – n'est plus utilisé)
- <https://bibliothèque.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/3526-technologies-numeriques-information-et-communication-tnic-guide-sectoriel-2012.html> (WeNR 2021 – mis à jour chiffres génériques)
- <https://nuts.be-ma.fr/sources.php> (WeNR 2021 et 2022 – Sources constructeurs)
- <https://ecoinfo.cnrs.fr/ecodiag-calcul/> (WeNR 2022 – mise à jour chiffres génériques)
- <https://bilans-ges.ademe.fr/> (WeNR 2021 et 2022 – mise à jour chiffres génériques)

Méthodologie pour créer une base de facteurs d'impacts :

1. Téléchargez les données des sources mentionnées ci-dessus.
2. Effectuez une analyse de qualité des données pour vérifier la fiabilité et la pertinence des données pour votre base de facteurs d'impacts.
3. Fusionnez les données des différentes sources en utilisant des outils de traitement de données tels que Excel ou un logiciel de gestion de bases de données. S'assurer de conserver les informations d'identification de la source pour chaque entrée de données.
4. Utilisez des outils statistiques pour nettoyer et normaliser les données pour éliminer les données dupliquées ou incohérentes.
5. Validez les données en utilisant des sources de données supplémentaires pour vérifier la précision des données fusionnées.
6. Organisez les données de manière à ce qu'elles soient facilement accessibles et utilisables pour les calculs de l'empreinte environnementale.
7. S'assurer de maintenir régulièrement à jour les données en utilisant les sources les plus récentes disponibles et en effectuant une analyse de qualité régulière pour garantir la fiabilité de la base de facteurs d'impacts.

Voici un exemple d'une méthodologie détaillée pour utiliser les données de la source <https://github.com/Boavizta/environmental-footprint-data> pour créer un fichier Excel de facteurs d'impacts qui alimente le fichier final :

1. Téléchargez les données de la source en utilisant le lien fourni sur GitHub. Les données sont généralement disponibles au format CSV ou Excel. Assurez-vous de télécharger la dernière version des données pour garantir l'exactitude et l'actualité de la base de données.
2. Ouvrez le fichier téléchargé avec un logiciel de traitement de données, comme Excel, pour effectuer une analyse de qualité des données. Vérifiez la qualité des données en examinant les en-têtes de colonne, les valeurs manquantes et les données dupliquées. Si nécessaire, nettoyez les données en supprimant les lignes ou les colonnes contenant des erreurs ou des incohérences.
3. Nettoyez les données en supprimant les colonnes inutiles et en remplissant les valeurs manquantes avec des valeurs moyennes ou des valeurs interpolées. Utilisez des formules Excel pour automatiser ce processus. Assurez-vous de conserver les informations d'identification de la source pour chaque entrée de données pour pouvoir vérifier l'exactitude des données plus tard.
4. Organisez les données en utilisant des filtres et des tri pour regrouper les données en fonction de leur catégorie (par exemple, les données relatives aux émissions de gaz à effet de serre des Desktops). Utilisez des formules Excel pour regrouper les données et pour calculer des totaux et des moyennes.

5. Sauvegardez les données nettoyées sous un nouveau nom, comme "Donnéesàutiliser2.xlsx" pour les utiliser dans votre algorithme.
6. Utilisez les données du fichier "Donnéesàutiliser2.xlsx" pour alimenter l'algorithme en utilisant les formules Excel ou un langage de programmation approprié comme le JAVA utilisé dans WeNR. Vous pouvez également importer les données dans un logiciel de calcul environnemental ou un outil de gestion de données pour automatiser les calculs.
7. Assurez-vous de mettre à jour régulièrement les données en utilisant les sources les plus récentes disponibles pour garantir la fiabilité de la base de facteurs d'impacts utilisée dans l'algorithme. Il est également important de valider les données avec des sources supplémentaires pour vérifier leur précision.
8. Une fois que vous avez créé votre fichier Excel de facteurs d'impacts, vous pouvez utiliser ces données pour effectuer des calculs de l'empreinte environnementale et des analyses de scénarios. Assurez-vous de documenter toutes les étapes de votre processus pour pouvoir reproduire les calculs et les analyses plus tard.

WeNR Light

Mise en œuvre WeNR Light

Dans cette section, nous aborderons la mise en œuvre pratique de WeNRLight (Voir Figure 2). Nous examinerons les neuf questions essentielles auxquelles l'utilisateur doit répondre, et nous expliquerons comment, en cas d'absence de réponse, une valeur par défaut est automatiquement proposée. Ces valeurs par défaut sont calculées comme une moyenne, représentative du type d'organisation en question.

FIGURE 2 – Page d'accueil.

Dans l'ordre, les questions les plus pertinentes extraites de l'étude WeNR sont les suivantes

- Le nombre d'employés de votre organisation,
- Le nombre d'ordinateurs portables,
- Le nombre d'ordinateurs de bureau,
- Le nombre d'écrans,
- Le nombre d'accessoires informatiques (souris, clavier, stations d'accueil, etc.),
- Le nombre de téléphones portables,
- Le nombre d'imprimantes (imprimante/copieur, copieur, etc.),
- Le nombre de serveurs physiques déployés dans votre organisation.

The screenshot shows a web interface for a survey. On the left is a sidebar with the 'WENR LIGHT' logo and two menu items: 'Le test' (with a play button icon) and 'Agir' (with a document icon). The main content area is titled 'Le test' and contains a question: 'Nombre de collaborateurs au sein de votre organisation'. Below the question is a text input field containing the number '2320', followed by the label 'collaborateurs'. At the bottom of the input area are three navigation options: '← PRÉCÉDENT', 'JE NE SAIS PAS', and '→'.

FIGURE 3 – Exemple de questions.

Pour les questions (Voir Figure 3), il faut choisir la réponse correspondante parmi les six propositions. L'ergonomie étant très importante pour guider les décideurs, le logo de la petite information est représenté par un i en blanc sur un fond bleu. Nous aurons alors un cadre apparaissant au premier plan avec un texte explicatif sur les définitions.

La deuxième page la plus importante du site (Voir Figure 4), elle nous permet d'avoir notre empreinte CO₂e par employé par an. Un calcul sera effectué en fonction des réponses au questionnaire. Ce résultat sera indiqué en gros caractères.

Voici les valeurs moyennes pour chaque type d'organisation :

- TPE : 207 kg CO₂e,
- PME : 385 kg CO₂e,
- ETI : 600 kg CO₂e,



FIGURE 4 – Page de fin.

- Grande entreprise : 278 kg CO₂e,
- Association : 280 kg CO₂e.

Dans une boîte encore plus petite, vous verrez un petit texte explicatif suivi du taux d'incertitude.

Plus bas, vous verrez la valeur moyenne pour votre type d'organisation, vous permettant de voir où vous en êtes (rappelez-vous cependant qu'il y a un certain degré d'incertitude).

En ce qui concerne les bonnes pratiques pour améliorer votre score carbone, une page a été créée qui vous permet de connaître en détail l'action liée et comment agir efficacement dans l'organisation pour réduire son empreinte carbone numérique.

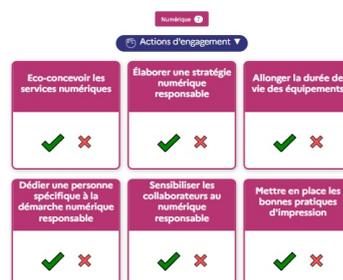
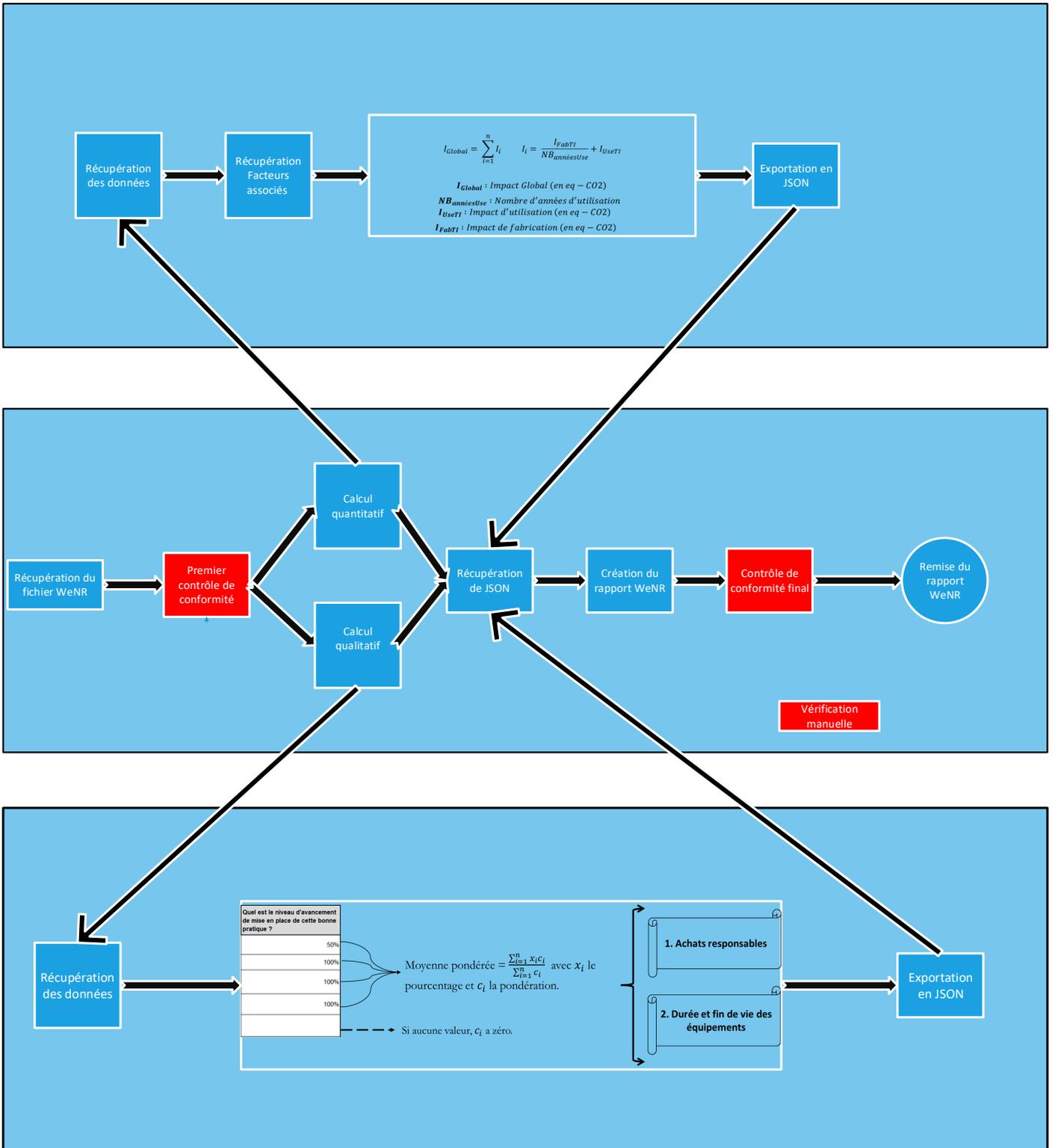


FIGURE 5 – Page de recommandations.

La Figure 5 donne un aperçu des actions pratiques que les entreprises peuvent prendre après avoir terminé le calculateur. Par exemple, prolonger la durée de vie de leur matériel, toutes ces actions sont extraites du guide des bonnes pratiques du département numérique interministériel du gouvernement français.

En ce qui concerne la collecte de données, le site ne collecte pas de données, il ne surveillera que des petites informations triviales telles que les pages consultées, le temps passé et l'adresse de la page à la fin de la simulation contenant l'empreinte carbone numérique totale.

Logigramme WeNR



Annexe Revue Critique



REVUE CRITIQUE INDÉPENDANTE WeNR 2023

A l'attention des parties prenantes de La Rochelle Université et l'INR

Objectifs de la revue critique

L'Université de La Rochelle et l'Institut du Numérique Responsable (INR) ont développé en 2020 WeNR, le premier outil de mesure de l'empreinte environnementale des Systèmes d'Information gratuit et fondé sur des données libres d'accès. La démarche *Opensource* permet une vérification des résultats par des tiers. Dans un souci d'excellence vis-à-vis de ses parties prenantes, l'Université de La Rochelle a sollicité la Coopérative Carbone pour une revue critique de la méthodologie et des bases de données utilisées pour les calculs d'empreinte carbone de l'outil WeNR. L'objectif de la revue critique était de s'assurer que WeNR utilisait à bon escient les meilleures données publiques disponibles à date.

Périmètre des travaux

La revue critique a porté sur les bases de données utilisées et leur interprétation par l'équipe WeNR pour les calculs d'impact carbone des équipements informatiques recensés dans l'outil WeNR, aussi bien sur la partie « fabrication » que sur la partie « utilisation » à travers les consommations d'électricité (informatique et équipements annexes inclus pour les centres de données) et les facteurs d'émissions de la consommation électrique par pays, ainsi que sur l'analyse qualitative des pratiques « numérique responsable ».

Étendue des travaux

La Coopérative Carbone a revu la note méthodologique, les bases de données, un échantillon des données sources et les calculs intermédiaires réalisés par WeNR.

La Coopérative Carbone n'a pas été engagée pour faire une revue critique des sources de données, comme par exemple commenter les choix méthodologiques des déclarations environnementales produits (EPD – environmental product declaration) des constructeurs de matériel informatique ou la mise à jour de la base de données *Empreinte* de l'ADEME ou l'inventaire des bonnes pratiques numériques responsables du guide de la DINUM (Direction interministérielle du numérique).

Responsabilité limitée

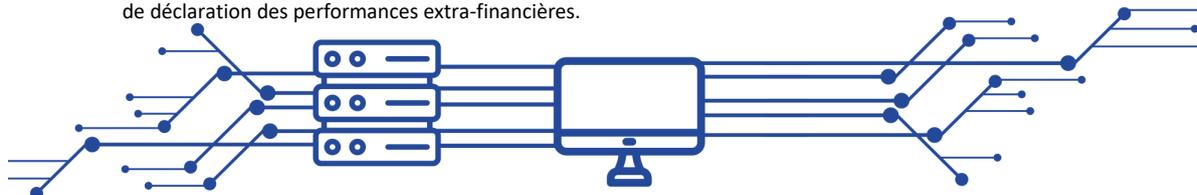
La Coopérative carbone s'est arrêtée aux bases de données qui alimentent le programme WeNR, elle n'a eu ni le budget, ni les compétences informatiques pour vérifier que l'automatisation des processus est bien conforme à la note méthodologique et aux bases de données analysées.

L'Université de la Rochelle et l'Institut du numérique restent entièrement responsables de l'utilisation de l'outil et des calculs d'empreinte carbone et d'évaluation de la maturité « numérique responsable » des entreprises qui se lancent dans la démarche WeNR 2023.

Déclaration d'indépendance, d'intégrité et de compétences

La Coopérative Carbone est une SCIC à conseil de surveillance et directoire, dont La Rochelle Université est sociétaire et membre du Conseil de Surveillance, et dont Gérard Blanchard, ancien président de l'Université est président du conseil de surveillance en sa qualité d'élu de la Communauté d'agglomération de La Rochelle. Les consultants en charge de la réalisation des travaux déclarent cependant avoir travaillé en toute indépendance et en toute intégrité, et sans aucune pression quant aux conclusions de la revue critique.

Marie-V Gauduchon a supervisé les travaux. Elle travaille sur la comptabilité carbone depuis 2006 et a réalisé des audits dans le cadre de la vérification des déclarations des émissions de CO₂ des entreprises soumises aux quotas carbone et de la vérification du reporting extra-financier des entreprises soumises à l'obligation de déclaration des performances extra-financières.



Résumé des travaux

Les travaux se sont déroulés de janvier à juillet 2023 et ont été organisés en deux phases distinctes. Une Phase 1 de janvier à avril 2023 d'analyse de WeNR 2022 qui a abouti à une série de recommandations d'amélioration (essentiellement de structuration et précision de la documentation). Puis d'une Phase 2 de revue critique proprement dite avec :

- ✓ Revue de la note méthodologique WeNR 2023
- ✓ Echantillonnage de 47 fiches constructeurs qui alimentent la base Boavizta
- ✓ Interviews de cinq experts du numérique responsable en France dans le cadre de cette revue critique ou bien du projet CEPIR – cas d'études pour un immersif responsable pour évaluer la pertinence et la qualité des bases de données sur l'impact carbone du numérique utilisées
- ✓ Reproduction des processus d'alimentation des outils WeNR à partir des cinq bases de données *Opensource* et comparaison des résultats avec les fichiers alimentant WeNR 2023

L'ensemble des travaux ont été documentés dans le Rapport de mission rendu à l'Université de la Rochelle.

Conclusion

Sur la base des interviews et des travaux réalisés sur WeNR 2022 et WeNR 2023, la Coopérative Carbone atteste que WeNR 2023 permet de mesurer l'impact carbone des Systèmes d'Information des organisations qui remplissent le questionnaire WeNR 2023 avec les meilleures données publiques disponibles à date sur le périmètre fabrication, distribution, utilisation et fin de vie des terminaux possédés par l'organisation. Faute de méthodologie publique consensuelle, l'impact carbone des réseaux et centres de données extérieurs à l'entreprise n'est pas pris en compte (ou bien juste à titre indicatif pour le stockage des données). L'appréciation qualitative de la maturité des entreprises en termes de bonnes pratiques numériques responsable est conforme à la note méthodologique.

L'évolution régulière des technologies de l'information et de la communication et de la connaissance de leur impact environnemental nécessite une mise à jour annuelle des facteurs d'émissions et des autres données statistiques utilisées dans les calculs d'impact. Il serait intéressant de comparer les données « normées » de consommation d'électricité *EnergyStar* utilisées pour les calculs WeNR aux consommations réelles des équipements (ordinateurs ou serveurs), en particulier en cas d'usage très intensif des capacités CPU ou GPU (calculs de modélisation industrielle, scientifiques ou artistique, rendus 3D, entraînement d'IA...) afin de proposer dans le futur une modulation des consommations d'énergie en fonction d'un usage « bureautique » versus « intensif ».

Les travaux de revue critique montrent que les données d'impact du numérique contiennent une part d'incertitude (de l'ordre de 50% selon l'ADEME) et que les résultats WeNR 2023 sont des ordres de grandeur (intéressants pour comparer les émissions GES du numérique par rapport au reste du BEGES d'une organisation) et non une mesure précise.

Coopérative Carbone

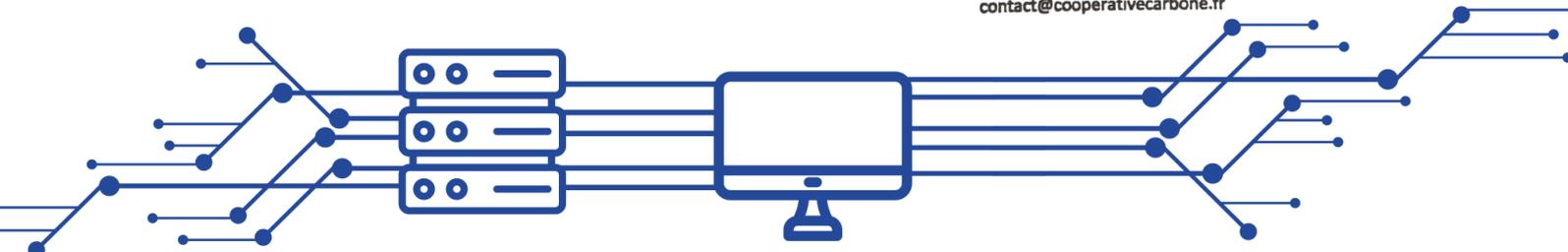
La Rochelle, le 13/7/2023

Benjamin Galliot
Consultant

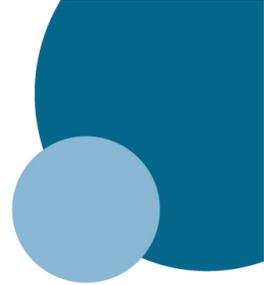
Marie-V Gauduchon
Supervision

Anne Rostaing
Présidente du directoire

COOPÉRATIVE CARBONE
8, rue Isabelle Autissier, 17140 LAGORD
SCIC sous forme de SAS
SIRET : 89224012800017
contact@coopérativecarbone.fr



Rapport comparatif LRZTC



Rapport WeNR 2021 version 1.3, réservée aux organisations membres de l'INR.

WENR

2021

RAPPORT
INDIVIDUEL

LA ROCHELLE

Votre organisation appartient aux catégories :

- SECTEUR : Activités de services administratifs et de soutien
- CLUSTER : 3

INR 

ISIT 

ISIT 



LICENCE CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION PAS
D'UTILISATION COMMERCIALE -
PAS DE MODIFICATION



CRÉATEUR DE VALEURS DURABLES



LE RAPPORT INDIVIDUEL WENR 2021

Le rapport WeNR que vous allez découvrir a pour objectif de vous permettre de comprendre l'empreinte globale numérique* de votre organisation afin de vous comparer à d'autres organisations similaires ou du même secteur d'activité afin de sélectionner les meilleurs levier d'amélioration.

Pour cette **première version de WeNR**, nous souhaitons permettre à toute organisation de mesurer ses émissions de gaz à effet de serre (GES) liées à son système d'information (SI) et sa maturité numérique responsable.

Pour cela, **nous proposons un outil en libre accès** qui s'appuie sur des données ouvertes et publiques. Les données calculées donnent une **idée globale de l'empreinte de votre SI** mais ne peuvent constituer un calcul exact de celle-ci compte tenu de l'ensemble des facteurs à prendre en compte.

Cette version 1.3 de votre rapport WeNR 2021 intègre des moyennes permettant de comparer votre organisation à des organisations similaires ou du même secteur que la votre. Réservée aux organisations membres de l'INR, cette version du rapport vous permet de comparer le niveau de maturité de votre organisation d'un point de vue quantitatif et qualitatif.

Ce document a été revu par un comité international d'experts.

L'ÉTUDE PUBLIQUE WENR 2021



L'étude publique WeNR 2021 est sortie le 16 décembre dernier. Elle rend compte de l'empreinte environnementale du SI des organisations à échelle européenne. Lire le rapport : <https://bit.ly/WeNR2021>

*L'EMPREINTE DU NUMÉRIQUE

Le numérique représente actuellement environ 4 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre, il atteindra près de 8 % d'ici 2025.¹

1. ([The Shift Project, 2018] et [Andrae, A., & Edler, T, 2015])



MÉTHODOLOGIE DE CRÉATION DE VOTRE RAPPORT 1.3

La principale innovation du rapport WeNR 1.3 est qu'il vous permet de vous comparer à des organisations du même secteur d'activité ou de même similarité.

PRESENTATION PAR SECTEURS D'ACTIVITES

Les secteurs d'activité ont été définis comme ci-dessous :

- 1) Activités de services administratifs et de soutien
- 2) Activités financières et d'assurance
- 3) Activités juridiques, comptables, de gestion, d'architecture, d'ingénierie, de contrôle et d'analyses techniques
- 4) Autres activités spécialisées, scientifiques et techniques
- 5) Autre

Secteur 1 :

21 des
organisations

Secteur 2 :

11 des
organisations

Secteur 3 :

10 des
organisations

Secteur 4 :

24 des
organisations

Secteur 5 :

10 des
organisations



METHODE DE CLUSTERING (GROUPE HOMOGENES)

WeNR 2021 s'appuie sur les réponses de 75 organisations européennes participantes, analysant l'impact des usages de plus de 1,3 million de salariés européens et de 5 millions d'appareils numériques. Une analyse détaillée pour alimenter le déploiement de démarches numériques responsables dans les organisations de toutes tailles. Cet exercice a permis aux organisations participantes de calculer l'empreinte environnementale de leur Système d'Information (SI) à partir d'une base ouverte de facteurs d'impacts dont les principales sources sont :

- le centre de ressources sur les bilans GES de l'ADEME,
- le programme ENERGY STAR pour les données concernant la phase d'utilisation,
- la base de données carbone des constructeurs agrégée avec certains facteurs d'impact de l'outil CNRS ECO-DIAG ainsi que l'outil en ligne NUTS, base de données regroupant les données des fabricants autour des émissions de GES pour le bilan carbone des équipements notamment lié à leur fabrication.

Afin d'apporter des résultats permettant une comparaison de son organisation à d'autres profils similaires, nous avons cherché à créer des segments les plus fins possibles.

Ainsi, nous avons commencé par créer une matrice de corrélation et sélectionner les variables les plus significatives par le coefficient de corrélation de Pearson en utilisant la méthode pas à pas. Une matrice de corrélation est un tableau qui met en évidence les coefficients de corrélation des différentes variables. La matrice représente la corrélation entre toutes les paires de valeurs possibles dans un tableau. C'est un outil puissant pour résumer un grand ensemble de données et pour identifier et visualiser les interactions dans les données. Nous avons ensuite décidé de mettre en œuvre le clustering.

La création de tels clusters (groupes) permet d'avoir une représentation simplifiée d'organisations similaires. Cette similarité est déterminée par rapport aux caractéristiques des organisations. Considérer toutes les caractéristiques d'une organisation rendait le problème plus complexe et il fallait identifier les caractéristiques les plus significatives, c'est-à-dire celles qui expliquent à elles seules 98% du problème.

Une première partie de l'exploitation de ces données a permis de mettre en évidence un ensemble de critères saillants qui suffisent à expliquer 98% des cas. Cinq critères ont été retenus :

- Émissions de l'Inventaire : Émissions liées au poste de travail en kgCO₂e.
- Emission DC : Émissions liées au centre de données en kgCO₂e.
- Nombre d'équipements Inventaire : Nombre total d'équipements de postes de travail dans l'organisation.
- Nombre d'équipements DC : Nombre total d'équipements du centre de données dans l'organisation.
- Utilisateurs : Nombre de personnes utilisant le SI dans l'organisation.



CRÉATEUR DE VALEURS DURABLES

A partir de ces critères, nous avons défini une mesure de similarité qui permet de comparer deux organisations entre elles. Ainsi, nous avons pu regrouper les organisations en cinq groupes distincts en fonction de leurs profils en utilisant un algorithme de clustering (Kmeans – regroupement en distance euclidienne).

Ces résultats nous permettent ainsi d'avoir une première vision synthétique des résultats et d'identifier les organisations ayant des profils similaires.

Ainsi, 5 clusters distincts ont été identifiés :

Cluster 1 :

**10 des
organisations**

Cluster 2 :

**12 des
organisations**

Cluster 3 :

**13 des
organisations**

Cluster 4 :

**22 des
organisations**

Cluster 5 :

**18 des
organisations**



RÉSULTATS DE VOTRE ÉTUDE WeNR2021

3

ENTITÉS

2 109

COLLABORATEURS

7 350

ÉQUIPEMENTS
DE BUREAU

4

CENTRES DE
DONNÉES

DÉCHETS NUMÉRIQUES (DEEE) / AN (KG)

Moyenne par utilisateur	
Moyenne cluster-secteur	Votre organisation
2 - 0,18	1,18

EMPREINTE
NUMÉRIQUE GLOBALE
(kg eq CO2)

Moyenne par utilisateur	
Moyenne cluster-secteur	Votre organisation
553 - 258	371



**captation carbone de
10 arbres / an**

1 arbre = 35 (kg eq CO2)

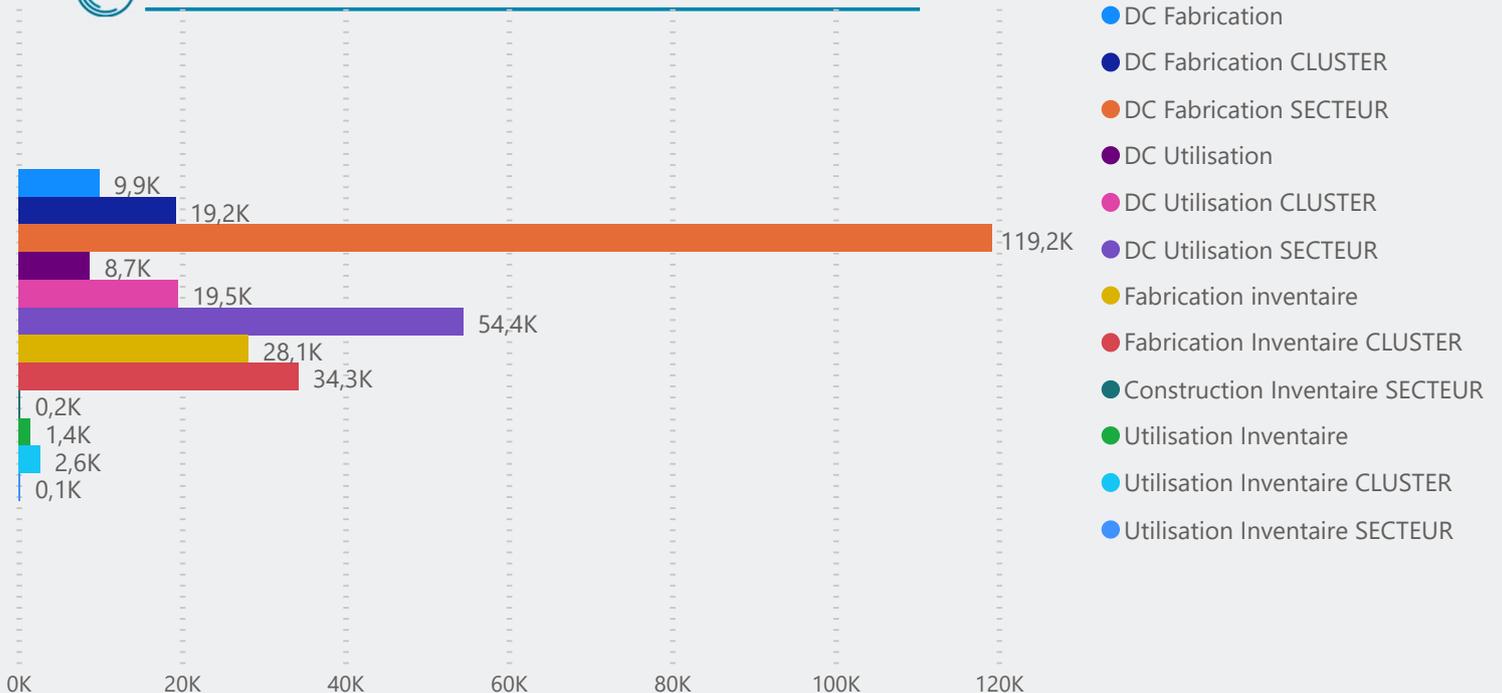


**1 484 km en voiture
thermique**

1 km = 0,25 (kg eq CO2)

RÉPARTITION DES ÉMISSIONS GES

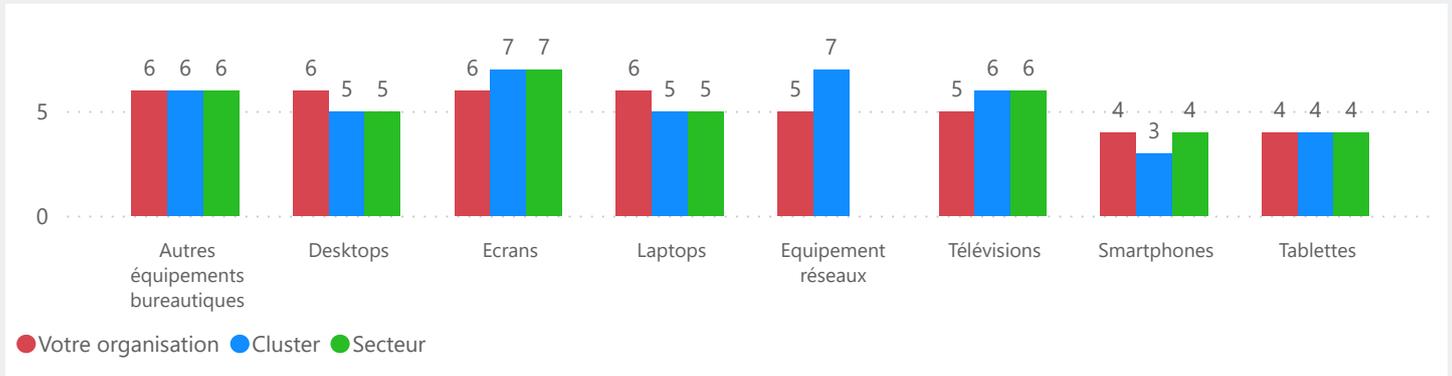
(Moyenne CLUSTER - SECTEUR vs. Votre organisation)



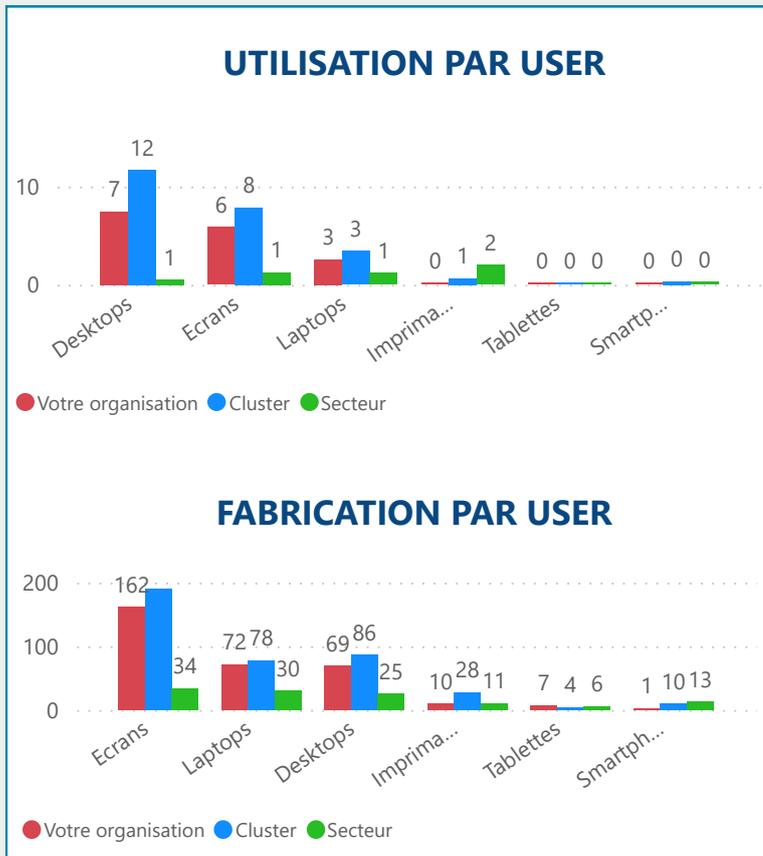


ÉQUIPEMENTS DE BUREAU

DURÉE DE VIE MOYENNE DES ÉQUIPEMENTS



CLASSEMENT DES ÉMISSIONS (kg eq CO2)



Emission par User (kg eq CO2)		
PHASE DE VIE	Moyenne du cluster - secteur	Votre organisation
UTILISATION	32 - 9	16
FABRICATION	426 - 163	320
TOTAL	458 - 173	336

La phase de **FABRICATION** de vos équipements numérique de bureau compte pour **95 %** de l'empreinte GES de ces équipements.
Moyenne cluster-secteur : 92 - 94 %

0 % des équipements numériques de bureau que vous achetez sont reconditionnés.
 Moyenne du cluster-secteur : 7 - 4 %

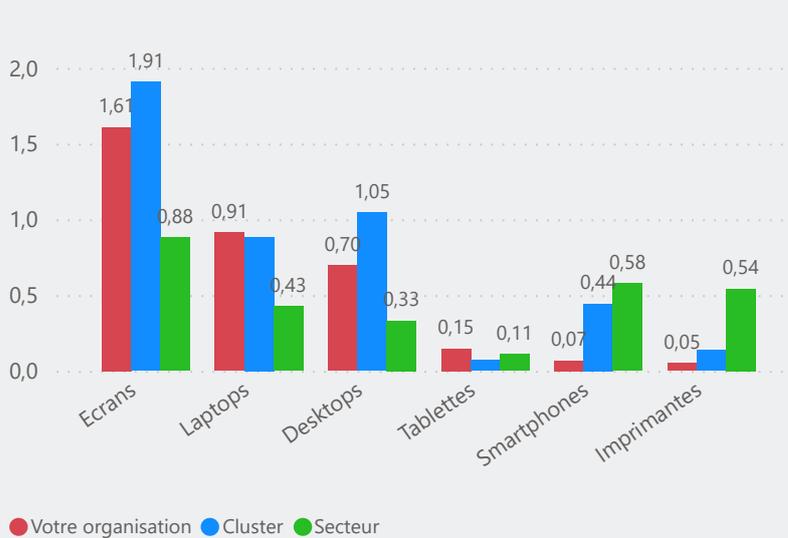
Après utilisation au sein de votre organisation, 80 % des équipements de bureau sont reconditionnés ou destinés à une 2e vie en dehors de votre organisation.
 Moyenne du cluster-secteur : 34 - 37 %



ÉQUIPEMENTS DE BUREAU - DÉTAILS



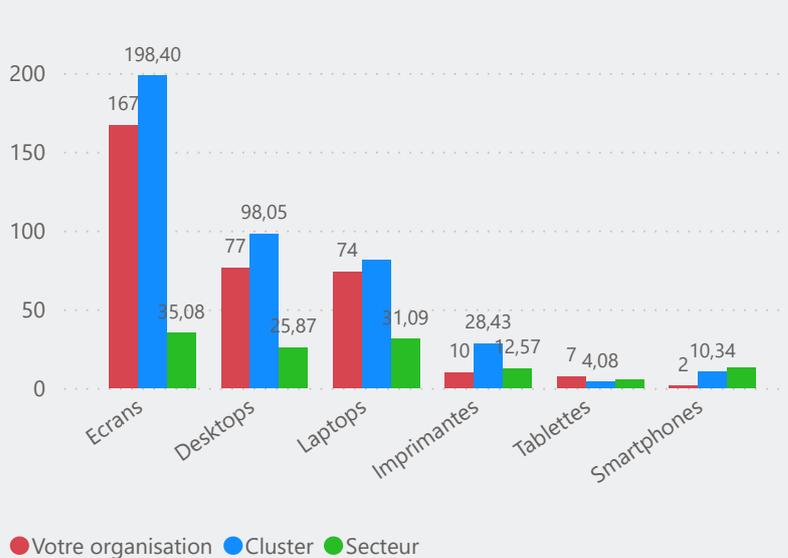
CLASSEMENT DU NOMBRE D'ÉQUIPEMENTS PAR USER



TYPE	Votre organisation	Secteur	Cluster
Ecrans	1,61	0,88	1,91
Laptops	0,91	0,43	0,88
Desktops	0,70	0,33	1,05
Tablettes	0,15	0,11	0,07
Smartphones	0,07	0,58	0,44
Imprimantes	0,05	0,54	0,14
Total	3,49	3,81	5,54



CLASSEMENT DES ÉMISSIONS (kg eq CO2) DE VOS ÉQUIPEMENTS PAR USER

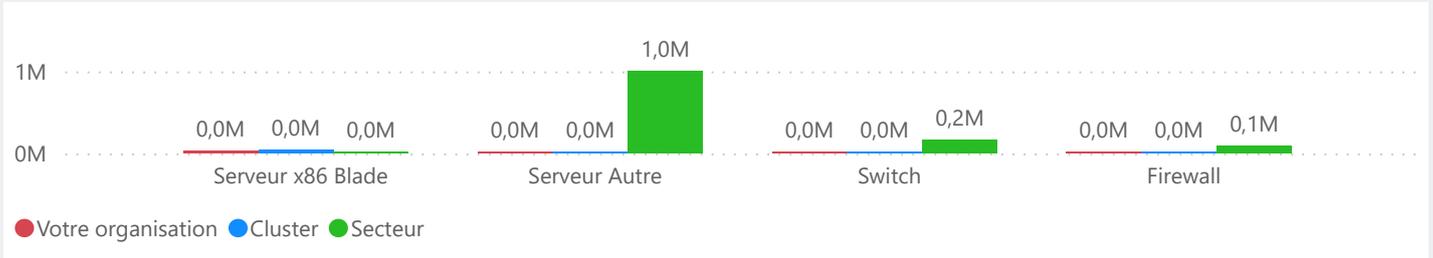


TYPE	Votre organisation	Secteur	Cluster
Ecrans	166,84	35,08	198,40
Desktops	76,57	25,87	98,05
Laptops	73,86	31,09	81,19
Imprimantes	10,05	12,57	28,43
Tablettes	7,39	5,57	4,08
Smartphones	1,52	13,04	10,34
Total	336,22	170,52	455,50

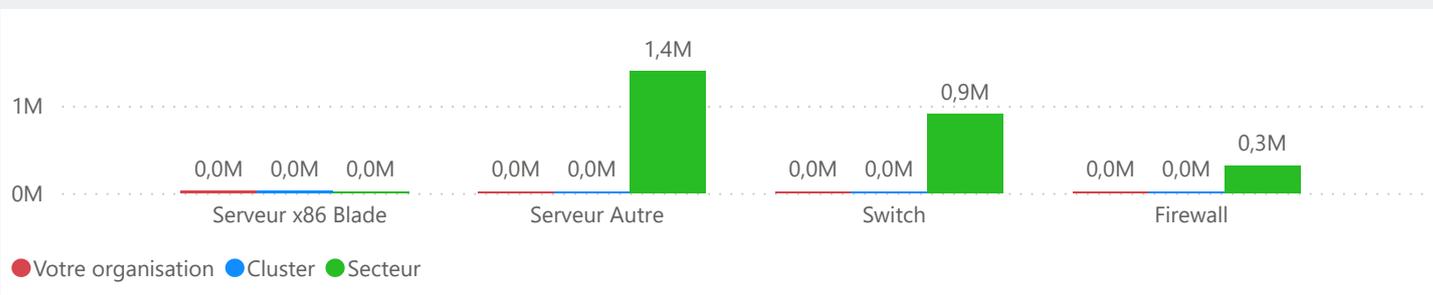


ÉQUIPEMENTS CENTRES DE DONNÉES

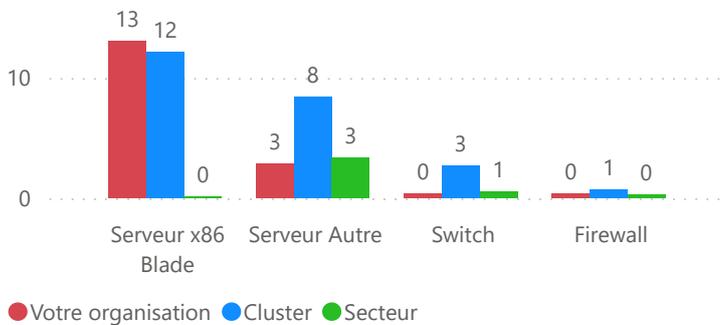
PHASE D'UTILISATION | DÉTAIL DES ÉMISSIONS DES CENTRES DE DONNÉES (kg eq CO2)



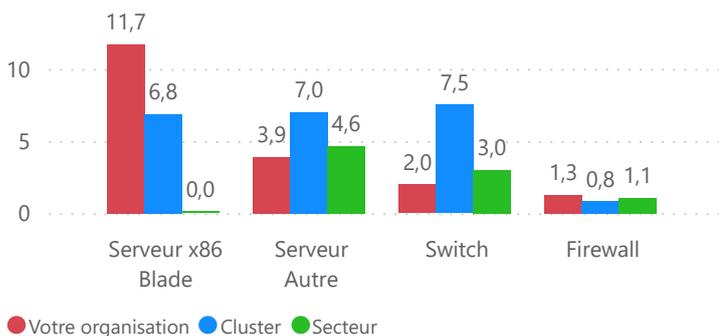
PHASE DE FABRICATION | DÉTAIL DES ÉMISSIONS DES CENTRES DE DONNÉES (kg eq CO2)



UTILISATION PAR USER



FABRICATION PAR USER



Emission par User (kg eq CO2)

PHASE DE VIE	Moyenne du cluster - secteur	Votre organisation
UTILISATION	47 - 5	17
FABRICATION	46 - 11	19
TOTAL	94 - 16	36

La phase de FABRICATION des équipements de vos centres de données compte pour

53 %

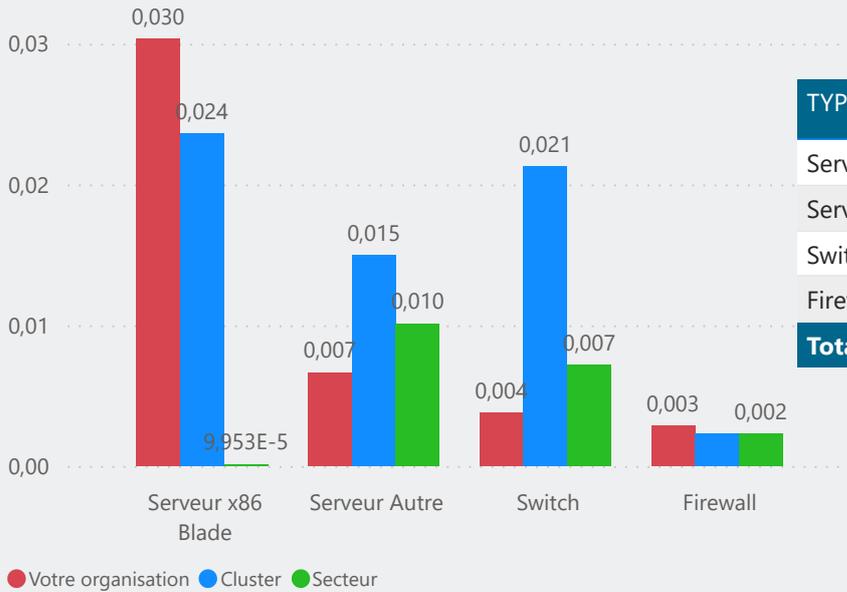
de l'empreinte GES de ces équipements.
Moyenne cluster-secteur : 57-68 %



CENTRES DE DONNÉES - DÉTAILS



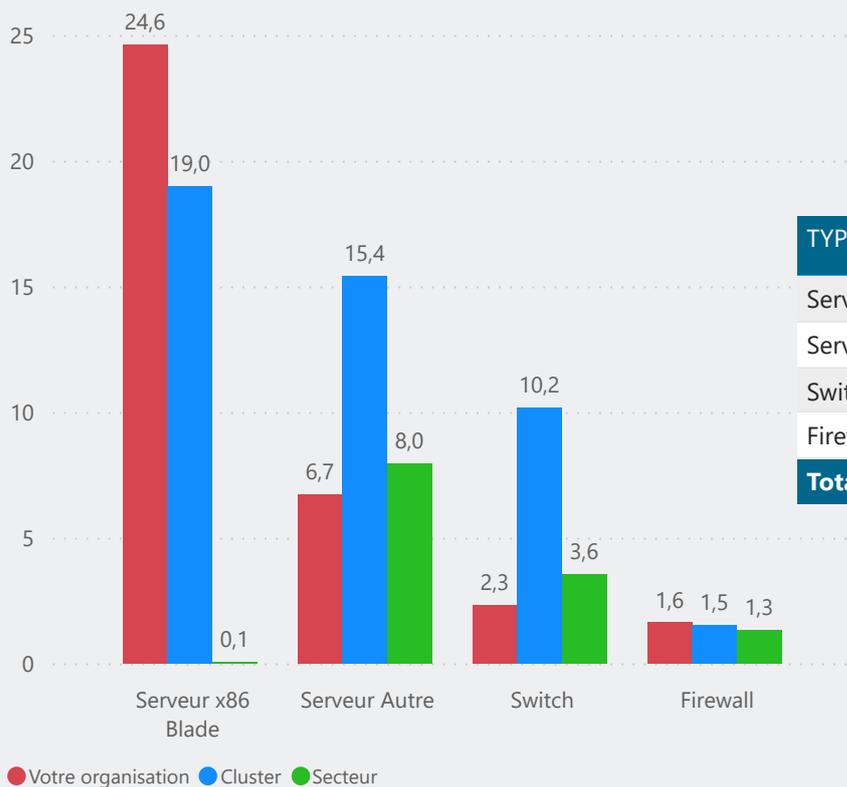
CLASSEMENT DU NOMBRE D'ÉQUIPEMENTS PAR USER



TYPE	Votre organisation	Secteur	Cluster
Serveur x86 Blade	0,03	0,00	0,02
Serveur Autre	0,01	0,01	0,01
Switch	0,00	0,01	0,02
Firewall	0,00	0,00	0,00
Total	0,04	0,03	0,11



CLASSEMENT DES ÉMISSIONS (kg eq CO2) DE VOS ÉQUIPEMENTS PAR USER



TYPE	Votre organisation	Secteur	Cluster
Serveur x86 Blade	24,64	0,06	19,00
Serveur Autre	6,73	7,97	15,41
Switch	2,34	3,56	10,19
Firewall	1,63	1,35	1,53
Total	35,33	16,70	93,37



MATURITÉ NR DE L'ORGANISATION

Maturité de mise en œuvre des bonnes pratiques numérique responsable au sein de votre organisation

-  : Moyenne du Secteur
-  : Moyenne du Cluster
-  : Vos données





MATURITÉ NUMÉRIQUE RESPONSABLE



SERVICES NUMÉRIQUES

48 %

Le chiffre correspond à la capacité de l'entreprise à utiliser et créer des services numériques responsables en appliquant notamment les règles d'écoconception et d'accessibilité, socles de la conception responsable.



ACHATS RESPONSABLES

43 %

Ce chiffre indique la capacité des organisations à organiser sa politique d'achat de manière responsable : inclure des clauses environnementales et sociétales dans les appels d'offre d'équipements ou de services, acquérir du matériel reconditionné ou encore louer le matériel plutôt que l'acheter.



GOVERNANCE

31 %

Ce chiffre indique si l'organisation a nommé un responsable Numérique Responsable, défini une stratégie, un budget, des KPI et un plan d'action NR. De manière générale, ce chiffre fait référence à la capacité de l'organisation à définir des politiques NR pour l'ensemble de ses départements.



LOGICIELS

40 %

Ce chiffre indique la capacité des organisations à adopter des bonnes pratiques vis-à-vis des logiciels utilisés comme surveiller le taux d'utilisation des logiciels pour désinstaller ceux inutiles ou encore mettre à jour régulièrement les logiciels. L'enjeu étant l'allongement de la durée de vie des postes de travail.



DURÉE & FIN DE VIE

69 %

Ce chiffre reflète la maturité de l'organisation en terme de gestion de ses équipements à travers notamment sa capacité à favoriser la remise en état pour réemploi plutôt que le recyclage, réaffecter les équipements en interne, allonger la durée de dotation des équipements, systématiser et contrôler la collecte des DEEE en s'assurant du professionnalisme du prestataire.



IMPRESSION

67 %

Une bonne politique d'impression détermine, entre autres, la mise en place d'une charte graphique responsable, la sensibilisation aux gestes clé de l'impression éco responsable, le paramétrage des imprimantes en mode éco par défaut, l'achat de papier recyclé ou encore le reconditionnement des toners.



OUTILS & USAGES

95 %

Ce chiffre reflète la capacité de l'organisation à mettre en place des dossiers de partage de documents, rationaliser l'usage de la messagerie (taille des pièces jointes, nombre d'emails envoyés, etc.) ou encore à s'assurer que les postes de travail ne restent pas inutilement allumés ou en veille.



POSTE DE TRAVAIL

60 %

La maturité de l'organisation au niveau du poste de travail sur la capacité à notamment allonger la durée de vie du poste de travail des utilisateurs. A travers notamment, l'adoption des bonnes pratiques de maintenance, l'upgrade des équipements plutôt que le remplacement ou encore le renouvellement dissocié des éléments (écran / unité centrale / clavier, etc.).



TÉLÉPHONIE

50 %

Les bonnes pratiques liées à la téléphonie se situent entre autres au niveau de la capacité de l'organisation à limiter le nombre de terminaux de téléphonie, fixer le niveau de DAS max, réemployer des équipements de téléphonie ou encore déployer le BYOD pour une certaine catégorie d'utilisateurs.



CENTRES INFORMATIQUES

33 %

Ce chiffre reflète la capacité de l'organisation à diminuer l'empreinte de tout ce qui est lié aux centres de données, notamment les serveurs. Les enjeux sont, entre autres, privilégier une architecture modulaire, confiner les baies de salles serveurs, organiser les baies en allées froides et chaudes, gérer les indicateurs énergétiques de consommation ou maîtriser les capacités de stockage.



MÉTHODE DE CALCUL

Comme dans la v1.3 l'évaluation de la maturité est basée sur la colonne dans laquelle vous avez indiqué le niveau d'avancement de mise en place de chaque bonne pratique. Le calcul consiste ainsi à calculer, pour chacune des 10 grandes catégories couvertes par le référentiel, la moyenne des niveaux d'avancement des bonnes pratiques correspondantes telles que détaillées en page 10 à 12 de ce rapport. Si vous n'avez pas fourni de valeur pour l'une des bonnes pratiques, celle-ci n'est pas prise en compte pour le calcul de la moyenne.

RÉPARTITION / GRANDE CATÉGORIE

1. ACHATS RESPONSABLES

- Acquérir en priorité des équipements reconditionnés
- Louer le matériel plutôt que l'acheter
- Généraliser les clauses environnementales dans les appels d'offres d'équipements
- Généraliser les clauses environnementales dans les appels d'offres de services
- Généraliser l'intégration de clauses sociétales dans les marchés
- Préférer la remise en état pour réemploi plutôt que le recyclage
- Favoriser la remise en état du matériel fonctionnel via une entreprise de l'économie sociale et solidaire

2. DURÉE & FIN DE VIE DES ÉQUIPEMENTS

- Alimenter le système d'information avec de l'énergie renouvelable
- Systématiser et contrôler la collecte des DEEE et des consommables
- S'assurer du professionnalisme des prestataires de DEEE
- Mettre en place et optimiser le tri sélectif des consommables
- Réaffecter les équipements en interne

3. GOUVERNANCE

- Nommer un responsable Numérique Responsable
- Dédier un budget spécifique au Numérique Responsable
- Définir une stratégie et un plan d'action Numérique Responsable
- Définir des indicateurs (KPI) Numérique Responsable
- Aligner la stratégie Numérique Responsable sur la stratégie RSE de l'entreprise
- Créer une filière interne de référent(e)s Numérique Responsable
- Evaluer régulièrement l'empreinte environnementale du SI



RÉPARTITION / GRANDE CATÉGORIE

4. TÉLÉPHONIE

- Réemployer des équipements de téléphonie
- Limiter le nombre de terminaux de téléphonie
- Fixer un niveau de DAS (Débit d'Absorption Spécifique) maximum pour la téléphonie mobile

5. POSTE DE TRAVAIL

- Entretien des ordinateurs pour éviter qu'ils ralentissent et deviennent instables
- Privilégier le matériel d'occasion avant de considérer des équipements neufs
- Upgrader les équipements plutôt que de les remplacer
- Dissocier le renouvellement des unités centrales des autres équipements
- Privilégier des ordinateurs éco-labellisés EPEAT Gold, TCO (ou équivalent)
- Allonger la durée de dotation des équipements

6. IMPRESSION

- Privilégier des fournisseurs qui proposent des copieurs reconditionnés
- Acheter ou louer des imprimantes labellisés Blue Angel / EPEAT
- Acheter du papier certifié Blue Angel, FSC ou PEFC
- Acheter du papier recyclé et certifié Blue Angel, FSC ou PEFC
- Reconditionner les toners usagés via un acteur de l'ESS/EA
- Paramétrer les imprimantes par défaut en mode éco
- Consolider le parc d'imprimantes sur des multifonctions avec système d'identification
- Sensibiliser les utilisateurs aux gestes clés de l'impression écoresponsable
- Collecter le papier blanc bureautique sans le froisser

7. OUTILS & USAGES DU POSTE

- Mettre en veille les postes de travail la nuit et les éteindre le week-end
- Sensibiliser les utilisateurs qui laissent leur poste de travail allumé inutilement



RÉPARTITION / GRANDE CATÉGORIE

8. LOGICIELS

- Mettre en œuvre les bonnes pratiques d'écoconception
- Mettre en œuvre les bonnes pratiques d'accessibilité numérique

9. SERVICES NUMÉRIQUES & APPLICATION MÉTIER

- Surveiller le taux d'utilisation des logiciels
- Optimiser les états et sorties d'impression
- Systématiser la revue de code en sortie de développement
- Déployer un data management dédié à la sobriété numérique, intégré au tableau de bord générique.
- Revoir régulièrement la politique de rétention des données
- Avoir une politique de rétention des données à jour
- Définir et partager un catalogue des données pour diminuer le nombre de recherches de bases de données
- Minimiser la collecte de données dans les projets d'innovation ("Smart Data" versus "Big Data")
- Ajuster la localisation des données en fonction du taux de consultation (données froides / données chaudes) et de la localisation du traitement

10. CENTRES INFORMATIQUES

- Privilégier les opérateurs qui ont ratifié le code européen de bonne conduite pour les datacenters
- Privilégier une architecture modulaire
- Confiner les baies des salles serveurs
- Organiser les baies en allées chaudes et froides
- Privilégier les équipements IT conformes aux exigences ASHRAE
- Exiger une efficacité énergétique minimum pour les équipements non IT des salles
- Consolider les serveurs physiques sous-utilisés pour les regrouper
- Favoriser autant que possible le free cooling
- Réutiliser l'énergie thermique produite par le data center
- Optimiser l'architecture et l'agencement des salles
- Privilégier une architecture applicative modulaire
- Maîtriser les capacités de stockage
- Augmenter la température de fonctionnement à plus de 24° C
- Mettre en place un suivi régulier des indicateurs énergétiques du datacenter
- Mettre en place une procédure stricte de provisioning et déprovisionning des matériels IT
- Adapter l'architecture physique des serveurs à leur usage



A PROPOS DE L'ÉTUDE WENR



LE RAPPORT INDIVIDUEL WENR 2021

Une note scientifique sera produite au printemps 2022 pour expliquer l'ensemble des chiffres et détailler le fonctionnement du moteur de calcul. Elle viendra appuyer l'étude publique sortie le 16 Décembre 2021 et qui présente l'ensemble des chiffres consolidés à partir des différents rapports WeNR collectés.

Le moteur de calcul de WeNR s'appuie sur des données libres et ouvertes dont les principales sources sont le centre de ressources sur les bilans GES de l'ADEME, le programme ENERGY STAR notamment pour les données concernant la phase d'utilisation, la base de données carbone de constructeur agrégée avec certains facteurs d'impact de l'outil CNRS ECO-DIAG ainsi que l'outil en ligne NUTS, base de données regroupant les données des fabricants autour des émissions de GES.

L'étude a fait le choix de ne porter que sur les Gaz à Effet de Serre (GES). Ce parti pris de ne focaliser que sur un seul types d'indicateur a permis d'être le plus précis possible sur les résultats donnés.

Compte tenu de l'ensemble des données fournies et de l'ensemble des paramètres à prendre compte, il existe une part d'incertitude dans les chiffres fournis. Cela est d'autant plus vrai que les données disponibles ne le sont pas à 100% malgré la densité des données fournies, un certain nombre d'impacts restent pour l'heure non évalués au sein des organisations.

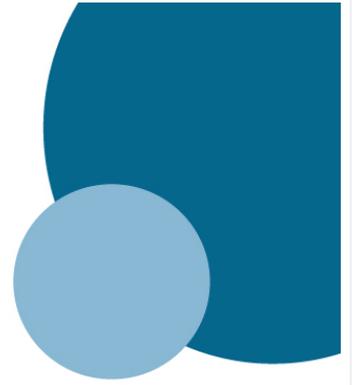
L'ensemble des données fournies ont été calculées par les données que vous avez fournies. Lorsque les données étaient absentes, votre rapport fournit des résultats basés sur des moyennes issues de l'ensemble des autres rapports.

REMERCIEMENTS



L'INR France, l'INR Suisse et l'ISIT Belgium remercient l'ensemble des contributeurs et contributrices à ce projet :

David Bol, Guillaume Bourgeois, Benjamin Duthil, Vincent Courboulay, Agence Kwanko, Rémy Marrone, Thibault Pirson, Florian Revaz, Aiste Rugeviciute, Delphine Seitiee, Jérôme Valais, Olivier Vergeynst, Louise Vialard.



MERCI
À
NOS
PARTENAIRES



Exemple Fiche BP

Guide de bonnes pratiques numérique responsable pour les organisations
Stratégie et gouvernance

a.4 Développer un réseau de référents pour faire vivre et inscrire la démarche dans la durée

 **Priorité**
● ● ○ Recommandée

 **Difficulté de mise en œuvre**
● ● ○ Moyenne

 **Exemples de pilotes**

- Délégué au numérique responsable
- Direction ressources humaines

 **Exemple d'indicateur de pilotage**

- Nombre d'équivalents temps plein référents numérique responsable / nombre de collaborateurs

Dans les organisations de taille importante, il est recommandé que la personne ou l'équipe en charge de la coordination des actions « numérique responsable » puisse s'appuyer sur des personnes référentes présentes dans les différentes entités de l'organisation (directions, divisions, etc.).

Ces référents, regroupés en réseau, doivent être les ambassadeurs à la fois de la démarche globale et des actions opérationnelles auprès des acteurs de terrain afin :

- de les sensibiliser à la nécessité de changer leurs pratiques et activités et de les accompagner dans l'évolution de celles-ci ;
- de collecter des retours issus de leur expérience personnelle et de les faire remonter vers les instances de pilotage de la démarche pour alimenter la réflexion sur les actions engagées et pour les ajuster si besoin aux contraintes opérationnelles.

Un tel réseau permet en effet d'avoir des « *early adopters* » (pionniers) sensibilisés qui seront les meilleurs ambassadeurs. Ils ont une connaissance plus fine de leurs organisations, surtout si ces dernières sont réparties sur plusieurs sites. Ces premiers membres sont formés, montent en compétences et savent mobiliser les ressources mises à leur disposition afin de faire circuler l'information en interne. Pour cela, il est fondamental que ces personnes maîtrisent les connaissances et compétences essentielles sur le sujet.

Les référents diffusent les messages car ils sont des relais connus et de confiance. Ces personnes doivent être représentatives des collaborateurs, sensibles aux enjeux sociaux et environnementaux, et ne doivent pas être circonscrits aux missions techniques, ce qui serait contre-productif. Une stratégie pour un numérique plus responsable n'est pertinente que si elle se diffuse dans tous les métiers et rôles de la structure.

Par ailleurs, ces référents se doivent d'être alignés avec la stratégie déployée. Décidée de manière décentralisée, cela assure une appropriation plus sûre, moins descendante et permet de pouvoir faire remonter les actions ou initiatives locales pour un passage à l'échelle.



Retour d'expérience

L'administration a développé ces dernières années des réseaux au sein des organisations étatiques afin de faciliter l'appropriation de différents sujets :

- Réseau de RMA, les référents marchés mis en place par la DAE (Direction des Achats de l'État) dans tous les ministères
- Réseau des correspondants MAREVA2, outil de référence de remontée et d'analyse de la valeur des projets numériques (MAREVA2 a d'ailleurs été mis à jour dans son volet stratégique pour prendre en compte une dizaine indicateurs environnementaux)
- Réseau de référent pour les SPE (Services Publics Ecoresponsables).

Analyse et modélisation de l'impact environnemental du système d'information

Résumé : Le numérique est devenu une partie intégrante de notre vie quotidienne, mais il a un impact environnemental important, notamment en termes de consommation d'énergie, de production de gaz à effet de serre, de déchets électroniques, de pollution de l'eau et de l'air, de déforestation, et de diminution de la biodiversité. Les organisations prennent conscience de leur responsabilité environnementale et cherchent à réduire leur empreinte carbone liée au SI (système d'information). Pour aider les organisations à piloter leur empreinte carbone SI, cette thèse propose un cadre d'aide à la décision basé sur une modélisation fine de l'impact environnemental du système d'information. Ce cadre permet d'identifier les actions les plus efficaces pour réduire l'impact environnemental du SI en prenant en compte les contraintes opérationnelles et financières des organisations. Les outils WeNR sont présentés comme des applications concrètes de ce cadre d'aide à la décision, qui permettent de mesurer l'impact environnemental du SI au sein des organisations et de proposer des mesures concrètes pour le réduire. Enfin, l'auteur présente les perspectives d'un outil SaaS d'aide à la décision dans le numérique responsable qui permettrait de collecter automatiquement les données relatives à l'empreinte carbone numérique de l'organisation, de les analyser et de proposer des actions spécifiques pour la réduire, ainsi que de fournir des indicateurs clés de performance environnementale.

Mots clés : Cadre d'aide à la décision - Outil SaaS - Empreinte carbone - Numérique

Analysis and modelling of the environmental impact of information system

Abstract: Digital technology has become an integral part of our daily lives, but it has a significant environmental impact, particularly in terms of energy consumption, greenhouse gas production, electronic waste, water and air pollution, deforestation, and biodiversity loss. Organizations are becoming aware of their environmental responsibility and are seeking to reduce their carbon footprint related to information systems. To help organizations manage their IS carbon footprint, this thesis proposes a decision support framework based on a detailed modeling of the environmental impact of the information system. This framework identifies the most effective actions to reduce the environmental impact of the IS, taking into account the operational and financial constraints of the organizations. The WeNR tools are presented as concrete applications of this decision support framework, which allow measuring the environmental impact of the IS within organizations and proposing concrete measures to reduce it. Finally, the author presents the prospects of a responsible digital SaaS decision support tool that would automatically collect data on the organization's digital carbon footprint, analyze it, propose specific actions to reduce it, and provide key environmental performance indicators.

Keywords: Decision support framework - SaaS tool - Carbon footprint - Digital

**Laboratoire Informatique, Image, Interaction
Institut LUDI - La Rochelle Université
Avenue Michel Crépeau**

17042 LA ROCHELLE CEDEX 1

