

GREEN IT MATURITY MODEL – MODÈLE D'ÉVALUATION DU NIVEAU DE MATURITÉ EN INFORMATIQUE VERTE D'UN GROUPE TI

par

JULES ANTHONIOZ

RAPPORT DE PROJET PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAITRISE GÉNIE LOGICIEL

MONTRÉAL, LE 8 AVRIL 2021

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Jules Anthonioz, 2021



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE RAPPORT DE PROJET A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Alain April, directeur de projet
Département de Génie Logiciel et TI à l'École de technologie supérieure

François Coallier, jury
Département de Génie Logiciel et TI à l'École de technologie supérieure

AVANT-PROPOS

Le 21^e siècle est incontestablement une période charnière pour la protection des milieux terrestres et aquatiques. Les activités humaines engendrent une pollution inédite, les terres arables se désertifient, le plastique est désormais présent jusqu'au fond des océans. Il est temps que l'Humanité prenne conscience de son rôle majeur dans le changement climatique, il est temps que nous prenions conscience de nos responsabilités, mais surtout, il est temps d'agir.

Le 20^e et 21^e siècle, sont également des périodes de transitions, de changements dans notre manière de communiquer, de vivre-ensemble et de travailler. Avec l'avènement de l'internet et de ses outils, les entreprises possèdent désormais les moyens nécessaires pour s'étendre dans le monde entier. Aidées par des systèmes informatiques toujours plus puissants, elles peuvent maintenant conquérir des marchés inaccessibles auparavant.

Cependant, ces outils créent une pollution impressionnante, mais invisible aux yeux de l'utilisateur puisqu'elle est indirecte. Certaines solutions, simples à mettre en place, permettent de réduire cet impact et donc de réduire son bilan environnemental.

Ce projet vise donc à créer un support permettant d'accompagner et d'évaluer le système informatique d'une entreprise afin de réduire son impact environnemental.

REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier le professeur Alain April pour son soutien dès nos premiers échanges et tout au long de ce projet. Vos conseils, idées et remarques m'ont permis de pousser ma réflexion le plus possible.

Je souhaiterais remercier Hélène Hélias, une amie de longue date, qui m'a insufflé l'idée de ce projet. Elle m'a poussé à mêler mon intérêt pour la protection de l'environnement avec mes études dans l'informatique.

Je souhaiterais remercier mes parents, Florence et Denys, qui financent mes études et qui m'accompagnent quotidiennement. Ils sont des piliers et des exemples dans ma vie.

GREEN IT – MODÈLE D'ÉVALUATION DU NIVEAU D'INFORMATIQUE VERTE D'UN GROUPE TI

JULES ANTHONIOZ

RÉSUMÉ

Longtemps considérées comme virtuelles ou inexistantes, de nombreuses études mettent aujourd'hui en lumière la pollution créée par les outils informatiques modernes. Les entreprises et les particuliers prennent donc de plus en plus conscience des impacts qu'engendrent ces activités sur l'environnement et sur les écosystèmes. Certaines facettes restent cependant encore largement méconnues du grand public.

Chaque phase du cycle de vie de ses appareils possède une empreinte carbone considérable. La pollution émise lors de la fabrication est sûrement celle dont nous entendons le plus parler, elle est extrêmement gourmande en matière première (terres rares, eaux, etc.) et en énergie. La phase d'utilisation demande un apport en électricité importante, elle est donc particulièrement émettrice de gaz à effet de serre. Cette pollution est indirecte, c'est-à-dire invisible aux yeux de l'utilisateur qui ne réalise malheureusement donc pas son impact sur l'environnement. Puis vient la fin de vie des appareils, ultime étape qui représente un réel challenge pour nos sociétés.

Pourtant, des solutions existent et peuvent facilement être implémentées dans une entreprise. Elles visent généralement une réduction de la consommation énergétique (labels énergétiques, gestion des centres de données, écoconception), une meilleure utilisation (politique « au plus juste », virtualisation, infonuagique) ou encore une meilleure gestion de la fin de vie (réparabilité, recyclage, revalorisation).

Ce projet vise donc à créer un support permettant d'accompagner les entreprises qui souhaitent s'investir dans le Green IT en présentant les mesures clés liées à une informatique plus durable. Le modèle créé peut également être utilisé comme support d'évaluation de la maturité d'une entreprise. Il s'appuie sur les notions du Green IT et celles du Développement durable pour connaître l'investissement d'une structure dans cette démarche.

GREEN IT – MODÈLE D'ÉVALUATION DU NIVEAU D'INFORMATIQUE VERTE D'UN GROUPE TI

JULES ANTHONIOZ

ABSTRACT

Long considered virtual or non-existent, many studies today highlight the pollution created by modern computer tools. As a result, businesses and individuals are becoming increasingly aware of the impacts these activities have on the environment and ecosystems. However, some facets are still largely unknown to the general public.

Each phase of the life cycle of its devices has a considerable carbon footprint. The pollution emitted during manufacturing is probably the one we hear the most about, it is extremely greedy for raw materials (rare earths, water, etc.) and energy. The use phase requires a significant amount of electricity, so it is particularly emitting greenhouse gases. This pollution is indirect, that is, invisible to the user who unfortunately does not realize its impact on the environment. Then comes the end of the life of the devices, the final step that represents a real challenge for our societies.

However, solutions exist and can easily be implemented in a company. They generally aim at reducing energy consumption (energy labels, data centre management, ecodesign), better use (the "fairest" policy, virtualization, cloud computing) or even better management of the end of life (repairability, recycling, revaluation).

This project aims to create support to support companies wishing to invest in Green IT by presenting the key measures related to a more sustainable IT. The model created can also be used as a medium to assess a company's maturity. It uses the concepts of Green IT and sustainable development to know the investment of a structure in this approach.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 Revue de littérature	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Fabrication	4
1.3 Achat.....	5
1.4 Recyclage et réemploi.....	7
1.5 Gouvernance	9
1.6 Écoconception et les certifications écoresponsables.....	11
1.7 Centre de données (Datacenter)	13
1.8 Poste de travail.....	15
1.9 Virtualisation.....	16
1.10 Cloud.....	17
1.11 Impression.....	18
1.12 Modèle de maturité pour être plus écoresponsable.....	20
1.13 Conclusion	20
CHAPITRE 2 Le modèle de maturité.....	23
2.1 Les objectifs du projet.....	23
2.2 Les cas d'utilisation de ce modèle	24
2.3 Comprendre le modèle.....	25
2.3.1 Le choix du modèle.....	25
2.3.2 Les niveaux du modèle de maturité	26
2.3.3 Remplir le modèle de maturité.....	27
2.4 Les items du modèle de maturité	29
2.4.1 Les attributs : domaine, catégorie, identifiant.....	29
2.4.2 L'élaboration des items.....	31
2.4.2.1 L'élaboration des items de niveau 1	31
2.4.2.2 L'élaboration des items de niveau 2	32
2.4.2.3 L'élaboration des items de niveau 3	33
CHAPITRE 3 Application et critiques	35
3.1 Exemple fictif.....	35
3.1.1 Début de l'évaluation	35
3.1.2 Niveau 1	36
3.1.3 Niveau 2	37
3.1.4 Conclusion de l'exemple fictif.....	38
3.2 Retour critique sur le projet	39
3.2.1 Retour sur la revue de littérature.....	39
3.2.2 Retour sur le modèle de maturité	40
3.3 Futurs projets	42

CONCLUSION.....	45
ANNEXE I : Exemple fictif : Évaluation du niveau 1.....	47
ANNEXE II : Exemple fictif : Évaluation du niveau 2	48
BIBLIOGRAPHIE.....	49

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1: Récapitulatif des notions clés.....	22
Tableau 2: Moyenne par domaine du niveau 1	37
Tableau 3: Moyenne par domaine du niveau 2.....	38

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

BUA : BeforeUsageAfter

CID: Conseil des Industries durables

CPU: Central Process Unit

DEEE : déchet d'équipement électrique et électronique

EEE : équipement électrique et électronique

EPA : Environmental Protection Agency

EPEAT : Electronic Product Environmental Assessment Tool

GES : Gaz à Effet de Serre

KPI: Key Performance Indicator

PUE : Power Usage Effectiveness

OCDE: Organisation de Coopération et Développement économique

OLED : Organic Light Emitting Diodes

TI : technologie de l'information

INTRODUCTION

Selon WWF, le 22 juillet 2020 [1] l'humanité a consommé la totalité des ressources que la Terre régénère en une année. Ce triste jour, appelé « jour du dépassement », avance significativement d'année en année. Il est évident que nous faisons face à un problème de durabilité dans la gestion de nos ressources. De plus, nous utilisons de nombreuses technologies qui sont coûteuses en énergies et en matières premières. Toutes les entreprises dans tous types de secteurs possèdent aujourd'hui un système informatique. Il peut être composé simplement de quelques ordinateurs ou inclure des salles gigantesques de centres de données.

Les technologies de l'information et de la communication (TIC) sont responsables de 2% des émissions globales de CO₂ [2] et 8% de la consommation électrique de l'Union Européenne. Ainsi, l'idée que ces outils ont un impact important sur les environnements ne cesse de grandir dans la conscience de ceux qui les développent et qui les utilisent. Pour réduire cette influence au maximum, les concepts du développement durable peuvent être suivis dans toutes les étapes du processus de gestion d'un système informatique. L'objectif étant de respecter les facettes du développement durable et d'appliquer ces notions de manière holistique.

Cependant, le concept d'informatique verte, de Green IT, peine à s'inscrire dans le plan stratégique des entreprises, car ces composantes sont encore méconnues. Des études scientifiques ont pourtant été réalisées, elles s'intéressent à l'utilisation de ressources comme les terres rares dans les procédés de fabrication ou encore à l'optimisation de la consommation électrique des outils informatiques.

Ce projet a donc pour objectif d'établir un support qui regroupe toutes les bonnes pratiques du Green IT et d'établir un standard d'évaluation du système informatique d'une entreprise. Ainsi, dans un premier temps, ce rapport présentera une revue de littérature des études menées sur le sujet du Green IT. Elle permettra de comprendre quels sont les éléments du système informatique qui impactent le bilan environnemental d'une entreprise. Le second chapitre de

ce rapport présentera le modèle de maturité développé lors de ce projet. Il offre un support d'accompagnement aux entreprises qui souhaitent s'investir dans une démarche Green IT ainsi qu'une grille d'évaluation pour juger de la maturité d'une entreprise qui s'est investie dans le Green IT. Le dernier chapitre présentera un cas fictif afin de tester le modèle de maturité développé, il contiendra également une partie critique.

CHAPITRE 1

Revue de littérature

1.1 Introduction

C'est au début des années 90 que le terme de « Green IT » ou « green computing » fait son apparition dans le secteur de l'informatique. Suite à la création du « World Wide Web » en 1989 [3] puis à son essor dans les années suivantes, les outils informatiques se démocratisent et leur production industrielle explose. En 1992, l'Agence de Protection de l'Environnement américaine, consciente de l'enjeu écologique que représentent ces nouvelles technologies, décide de fonder le programme « Energy Star » qui a pour but de promouvoir et reconnaître les produits énergétiquement efficaces. Le programme introduit ainsi le concept de « green computing » [4]. Dans son article publié en janvier 2009 [5], A. Molla décrit le Green IT comme étant « la capacité d'une entreprise à appliquer systématiquement des critères de durabilité environnementale (c.-à-d. tels que la prévention de la pollution, la gestion des produits, l'utilisation de technologies propres) au design, à la production, à l'approvisionnement, à l'utilisation et à la fin de vie des infrastructures techniques informatiques ainsi qu'au sein des composantes humaines et managériales de l'infrastructure informatique ». C. Koo et Y. Wati précisent cette définition en affirmant que le Green IT est lié « à tous les outils informatiques (c.-à-d. le matériel, le logiciel et l'équipement), mécanismes, structures, directives et méthodologies comme les résultats d'une avancée environnementale à chaque étape du cycle de vie » [6]. Le Green IT vise par conséquent à intégrer des considérations écologiques, considérées comme « verte », dans toutes les étapes du cycle de vie d'un produit/projet informatique afin de réduire au maximum l'impact de ces derniers sur les écosystèmes.

En effet, selon C. Koo et Y. Wati [6], les technologies de l'information ont trois niveaux d'impacts sur l'écosystème. Les impacts dits « primaires » sont ceux créés par l'existence physique de ces technologies. Il s'agit donc des impacts liés à leur production (c.-à-d. avec l'extraction de minerais rares par exemple), à leur utilisation, à leur recyclage et leur

élimination. Ensuite, les impacts «secondaires» concernent les effets indirects sur l'environnement que crée l'utilisation de ces technologies, par exemple : la production d'électricité nécessaire à leur fonctionnement. Les auteurs donnent comme exemple le coût écologique que représente leur transport entre le lieu de production et celui d'utilisation puisque ces filières sont généralement délocalisées dans des pays à fort potentiel productiviste (Chine, Inde, Corée du Sud). Enfin, les impacts « tertiaires » représentent toutes les répercussions systémiques sur l'environnement lié au changement de comportements des utilisateurs ou des sociétés à moyen ou long terme. Ces répercussions ont longtemps été considérées comme faibles ou minimes, mais les usagers réalisent aujourd'hui le potentiel néfaste et global de ces dernières.

Pour réduire les effets sur l'environnement en entreprise, la philosophie du « green computing » se concentre sur quatre éléments principaux [7] : 1) l'achat; 2) la consommation d'électricité; 3) la réduction des déchets; et 4) le recyclage. Ces éléments principaux doivent faire l'objet d'analyse préprojet ce qui permettrait à une entreprise de prendre des décisions afin de réduire son impact environnemental. Afin de s'attaquer à ces éléments, il faut se familiariser avec toutes les sources de pollutions que génèrent les équipements électriques et électroniques (EEE).

1.2 Fabrication

La fabrication est sans aucun doute l'étape la plus énergivore (c.-à-d. entre 60% et 85% de l'énergie totale dépensée [8]) et aussi la plus polluante du cycle de vie des EEE. En effet, un ordinateur, par exemple, est constitué de plomb, de cadmium, de mercure, de fer, d'or et encore beaucoup d'autres métaux rares [9]. L'extraction de ces minerais est particulièrement polluante et très gourmande en eau (c.-à-d. nécessaire pour séparer les métaux précieux des roches/sables inutilisables). Une étude publiée par Nicolas Berman et coll. [10] a permis de démontrer que la présence de ces exploitations minières établissait et exacerbait des conflits locaux partout dans le monde. Ainsi, en plus d'être polluants, ces minerais créent une instabilité politique

dans les pays où ils sont extraits (c.-à-d. l'impact tertiaire). Des marques comme FairPhone [11] souhaitent produire des EEE en suivant les concepts du développement durable en s'approvisionnant uniquement de matières premières équitables et responsables, c'est-à-dire qui sont minés avec des techniques non destructives pour l'environnement. La Fairtrade Foundation a ainsi créé une certification [12] pour l'or afin de garantir sa provenance et ses conditions d'extraction.

Dans l'article [7], les auteurs expliquent que la fabrication d'une puce électronique « qui ne pèse presque rien » génère 40 kilogrammes de déchets, dont sept sont des métaux dangereux pour l'environnement, et de plus elle consomme 10 600 litres d'eau propre. Ces chiffres hallucinants démontrent à quel point les EEE sont gourmands en matière première lors de leurs fabrications. Selon [13], la phase de fabrication représente 70 % des besoins en matières premières du cycle de vie global d'un ordinateur. Les 30 % restants proviennent de son alimentation, sa réparation ou encore de son recyclage (c.-à-d. que certains processus de recyclage font intervenir des matières premières).

1.3 Achat

Les consommateurs ne peuvent pas agir directement sur les chaînes de productions des EEE puisque ces procédés sont des secrets bien gardés par les industriels. Cependant, grâce à différents engagements, ils peuvent favoriser des biens positifs pour le biotope par leurs pratiques/choix d'acquisition. Dans un article sur sa page internet [14], J. Gianoli propose de recourir à cinq critères de sélection afin d'acquérir des appareils respectueux de l'environnement : 1) la conception; 2) l'acheminement; 3) l'utilisation; 4) la fin de vie; ainsi que 5) la démarche du fabricant. Différentes normes et labels mettent au cœur de leur évaluations ces différents critères afin de garantir leur aspect « green ».

Le label EPEAT [15] est très répandu, il permet de classer les ordinateurs de bureau, les ordinateurs portables, les moniteurs ainsi que d'autres types d'EEE en fonction de leurs effets

sur l'environnement. Il comprend vingt-trois critères obligatoires et vingt-huit optionnels. Un classement (c.-à-d. Or, Argent, Bronze) permet de démontrer la satisfaction ou conformité de l'appareil face à ces critères. Ce label se concentre sur la réduction et l'élimination des substances dangereuses, un choix judicieux des matériaux, de bonnes pratiques de fin de vie, la prolongation de la longévité de l'appareil, sa consommation électrique ou encore la philosophie environnementale de l'entreprise. Ce label permet dès lors à l'utilisateur d'être conscient de l'impact qu'à un EEE sur l'environnement et donc de pouvoir effectuer des choix avisés. Cependant, ce label s'obtient par une autoévaluation. Il peut ensuite faire l'objet d'un audit par le Green Electronic Council pour des fins de certification. Conséquemment, il faut être vigilant quant à la prétention de la conformité EPEAT.

Le label « Energy Star » [16] est une autre référence pour atteindre les objectifs du « green IT ». Il vise à réduire les émissions de gaz à effets de serre en s'attaquant à la consommation électrique des EEE. Il atteste ainsi que s'ils sont efficaces énergétiquement, ils nécessiteront moins d'électricité lors de leur utilisation. Dans sa thèse, I.S Hernandez présente le label comme une source fiable et objective d'informations pour le consommateur. Ces dernières années, ce label a été étendu à presque tous les appareils électroniques. Selon le rapport annuel de l'Agence de Protection environnementale (EPA) [17], 283 millions de tonnes métriques d'émissions de GES n'ont pas été émises grâce aux appareils labélisés Energy Star, ce qui représente environ 11 milliards de dollars d'économies.

Le label « FSC » [18] permet d'identifier la composition de produits qui utilisent des fibres provenant du bois. Les emballages, le papier ou encore le carton utilisent ces fibres qui ont un impact important sur l'environnement. Ce label permet donc de certifier leur provenance et d'assurer que la chaîne logistique d'approvisionnement de ces produits respecte les bonnes pratiques écologiques. Trois logos sont utilisés afin de prévenir le consommateur de la composition du produit (c.-à-d. 100 % issus de fibres vierges, mixte, recyclé). Ce label a aussi pour vocation secondaire de protéger les droits des peuples autochtones, le droit des travailleurs et favorise également l'approvisionnement local.

L'« ÉcoLogo » a été créé en 1998 par le gouvernement canadien afin d'assurer aux clients, qu'ils soient consommateurs ou une entreprise, que ces services ou produits respectent des critères environnementaux bien définis. Ce logo est particulièrement utilisé en Amérique du Nord. Il est reconnu par le programme Global Ecolobelling Network (GEN) [19] ce qui signifie qu'il est certifié par rapport à des critères scientifiques. Il respecte également la norme ISO14026 sur l'écocertification.

Ces normes et labels permettent donc aux consommateurs d'obtenir des données concernant les EEE qu'ils souhaitent acquérir. Les fabricants utilisent ces labels pour répondre à une demande de la part des consommateurs. Les choix des consommateurs indiquent le souhait d'avoir des produits plus verts dans ce domaine. Selon le rapport publié par Alliance Green IT [20], sur les 367 entreprises interrogées durant de leur enquête, seulement 27 % des entreprises favorisent, au moment de leurs achats, des équipements éco labélisés. La WWF conclut également dans son rapport [21] que les 24 grandes entreprises contactées lors de leur étude ont une faible maturité concernant les achats responsables. Ainsi, pour ces entreprises, les considérations environnementales ne sont : soit pas mises en œuvre, soit elles ne sont pas considérées/maitrisées dans la phase d'achat de nouveaux équipements. Il semble que le prix reste encore un facteur décisif dans leur choix, car pour réduire leurs dépenses, 28% des entreprises interrogées dans l'enquête [20] ont recours à l'achat de matériels informatiques reconditionné ou d'occasion. Cette pratique semble être plus répandue pour le matériel de téléphonie mobile puisqu'elle concerne 34% des entreprises.

1.4 Recyclage et réemploi

Comme nous l'avons vu dans les sections précédentes, l'étape de la fabrication regroupe la majorité des impacts sur l'environnement. Ainsi, le premier geste à adopter dans une politique de développement durable est donc le réemploi du matériel. Ainsi, selon [20], 57% des entreprises favorisent la remise à niveau de leurs EEE plutôt que le remplacement et 63% insistent d'abord sur leurs réparations. De plus il est rapporté que 73% des entreprises qui

favorisent la réparation de leurs appareils le font afin d'allonger leur durée de vie. Ce geste est primordial et il permet de réduire l'empreinte environnementale puisqu'il s'attaque à réduire l'incidence de l'étape de fabrication.

Concernant la réparabilité des équipements, des labels, tels que EPEAT par exemple, intègrent dans leurs évaluations des critères de réparabilité et d'amélioration des EEE. Nous voyons dernièrement des nouvelles ou certaines entreprises sont régulièrement accusées de concevoir des produits difficilement réparables (c.-à-d. les batteries soudées à la coque, l'utilisation de vis au format inédit...) afin de réduire les possibilités de réparation et donc de forcer les consommateurs à acheter des appareils neufs. Nous avons aussi entendu récemment parler des problèmes d'obsolescence programmée dans les nouvelles. Ces conceptions ont donc un impact lourd sur l'environnement, car elle génère une quantité plus importante de déchets qui autrement auraient pu être évités, sinon retardés.

Ainsi, il est rapporté qu'en 2019, 53.6 millions de tonnes [22] de déchets électriques et électroniques ont été générées dans le monde contre 45 millions de tonnes en 2016 [23], soit une augmentation de 19,1% en seulement trois ans. Selon une directive du Parlement européen [24] relative aux DEEE, c'est au détenteur de s'assurer du traitement approprié de ces déchets. Par contre, seulement 32% des entreprises affirment connaître leurs responsabilités face au traitement des DEEE lors d'une l'enquête [20]. Cette situation force les pays à légiférer. En 2019 [22], 78 pays ont mis en place une législation relative à ces déchets, contre 61 en 2014. Nous pouvons donc observer une prise de conscience des États face à la nécessité de règlementer et de mettre en place des filières permettant de valoriser ou de traiter correctement ces composants sinon les entreprises feront la sourde oreille. En date de 2019, seulement 17,4% du flux mondial des DEEE a été documenté, ce qui indique que 82,6% des DEEE ne seraient pas disposés de manière légale puisque la Directive européenne demande que ces flux soient documentés. Ces déchets dangereux sont pour la plupart exportés vers des pays « en développement » comme la Chine ou l'Inde où ils sont souvent incinérés (processus à fort impact environnemental).

Enfin, le réemploi et le recyclage favorisent également la création d'emplois manuels, ce qui a donc un impact positif sur l'économie d'un pays. En favorisant la vente des EEE encore fonctionnels, les entreprises offrent la possibilité aux clients possédant un faible revenu d'acquies des produits qui seraient trop coûteux neufs. Selon un rapport de l'Institut National de la Statistique et des Études économiques français [25], l'illectronisme ou l'illettrisme numérique concerne 17% de la population française, et proviendrait soit d'un manque d'accès aux équipements électroniques ou d'un manque d'apprentissage. Le réemploi permet de réduire le premier facteur, car les produits d'occasion sont plus abordables, il réduit donc au passage la fracture numérique. Par la mise en place d'une politique de revente de ses équipements dépassés, une entreprise s'investit ainsi dans une démarche écologique et sociétale positive.

1.5 Gouvernance

La gouvernance est l'ensemble des règles et des processus collectifs, formalisés ou non, par lequel les acteurs concernés participent à la décision et à la mise en oeuvre des actions publiques. Pour que l'informatique verte soit un succès, elle doit être appuyée par les décideurs publics et d'entreprises afin de fédérer autour d'objectifs communs l'ensemble des collaborateurs. Dans leur enquête [20], *Ribault et coll.* révèlent que seulement 7% des entreprises possèdent une stratégie Green IT alors que 25% déclarent vouloir s'engager dans une démarche écologique dans la gestion de leurs équipements informatiques. Selon l'article [26], la durabilité des produits doit faire partie de la vision globale de l'entreprise, elle doit être incorporée dans tous les aspects de son fonctionnement. Cet engagement passe par l'allocation de ressources et la création de politiques internes diffusées à l'ensemble des parties prenantes qui vont permettre de guider ces derniers dans des comportements plus écoresponsables lors de l'acquisition, l'utilisation et la disposition de matériel informatique.

L'étude publiée en 2011 par Y. Wati et C. Koo [6] rappelle l'importance de mettre en place des outils permettant de mesurer des indicateurs afin de favoriser la mise en place du Green

IT. Ils présentent un tableau de bord stratégique équilibrée pour l'informatique verte (Green IT Strategic Balanced Scorecard) comme une façon d'aligner la stratégie Green IT avec la stratégie commerciale du point de vue du développement durable afin de créer des avantages concurrentiels à ceux qui la préconise. Cette stratégie a pour objectifs de mesurer la performance des technologies, de connaître les retours des investissements Green IT ainsi que de transformer cet investissement en avantages concurrentiels. Elle vise à piloter la performance des entreprises, d'un point de vue environnemental, pour ensuite transformer cette transition en valeur positive à long terme.

Ce pilotage passe par le suivi d'indicateurs tels que par exemple le Power Usage Effectiveness (PUE) pour les centres de données (section 1.7), le nombre de pages imprimées ou encore le poids des DEEE générés puisque ces déchets vont grandement influencer le bilan écologique de l'entreprise. Ils doivent être explicités dans des plans d'action et liés à la politique RSE. L'Alliance Green IT [20] propose également de nommer un responsable Green IT au sein de l'entreprise pour conduire le changement. Dans leur étude [13], A. Govindasamy et K. Suresh Joseph invitent les décideurs à mettre en place des critères d'achats pour les EEE tels que la longévité, la modularité et l'évolutivité des produits.

De plus, en tant que dirigeant d'une entreprise, cette conscience écologique peut être utilisée dans la stratégie de communication. Selon [27], 81% des Français interrogés seront plus fidèles à une marque qui prend des engagements forts pour lutter contre sa pollution digitale. Le Green IT devient donc un argument commercial qui peut permettre à une entreprise de se différencier par rapport à ses concurrents, mais également d'améliorer son image auprès des consommateurs. Par exemple, Google [28] prétend être la première compagnie à être neutre en carbone depuis 2007 grâce à des investissements massifs dans les énergies renouvelables et prévoit de ne plus émettre de carbone (c.-à-d. être « carbon-free ») à partir de 2030. Cette communication doit être réalisée à la suite de la mise en place d'actions concrètes qui ont un vrai impact positif et démontrable scientifiquement sur l'empreinte écologique de l'entreprise. Elle ne doit en aucun cas être seulement promotionnelle ou mensongère, ce qui serait du « green-washing ».

Ainsi, certains responsables d'entreprises ont débuté l'intégration des notions du développement durable grâce à la mise en place de politiques internes afin de qu'elle soit intégrée de manière holistique dans l'entreprise.

1.6 Écoconception et les certifications écoresponsables

À l'avenir, idéalement, chaque employé amené à participer à l'élaboration d'un nouveau produit informatique devrait avoir en tête les notions de DD. L'écoconception des équipements et logiciels informatiques est une notion clé du Green IT pour l'avenir. Dans leur livre [29] [6][30] Denis Guibard *et coll.* invitent les lecteurs à étudier le cycle de vie des produits et services avant de les concevoir afin d'optimiser au maximum leur conception. Selon eux, il faut limiter les fonctionnalités développées uniquement à celles réellement nécessaires pour les utilisateurs. Selon un rapport du Standish Group en 2009 [31], chaque projet de développement logiciel possède un membre qui est trop ambitieux et souhaite implémenter des fonctionnalités qui ne seront pas nécessairement utilisées par les clients. Les auteurs inscrivent cette sur ambition comme le premier péché de la loi des 5 péchés mortels d'un projet informatique.

Ainsi, l'entreprise économise du temps et de l'argent puisqu'elle se concentre seulement sur ce qui sera réellement utilisé par ses clients. De plus, l'étude [32] précise que l'utilisation de pratiques d'écoconception permettrait de réduire la consommation électrique ainsi que les déchets générés par un EEE. Cette étude s'intéresse aux matériaux utilisés lors de la fabrication, plus précisément à leurs impacts directs et indirects sur l'environnement. Un regard particulier est porté sur la fin de vie et la possibilité de traiter correctement les déchets. En effet, selon les choix de conceptions et d'assemblages, les EEE pourront être plus ou moins facilement démontables, réparés ou recyclables.

L'écoconception peut jouer un rôle important dans le développement des logiciels également. Alors que le matériel est responsable de la consommation électrique, c'est bien le logiciel qui va dicter la manière de faire: la consommation électrique est donc le fruit des instructions du logiciel. L'article [33] de Ardito et coll. présente différentes stratégies d'écoconception telles que le refactoring, le nettoyage du code source, l'utilisation des boucles, la réduction de la quantité de données échangées ou encore la chasse aux services immortels. Cette dernière stratégie porte son attention sur les services qui sont constamment actifs, ils consomment donc de l'énergie, alors qu'ils n'ont pas de nécessité immédiate pour l'utilisateur. Toutes ces stratégies permettent toutes de réduire l'impact d'un logiciel sur l'environnement grâce à une réduction de l'utilisation des ressources qui mènent à réduire la consommation d'énergie. Ils présentent également le principe d'autoadaptation qui propose de concevoir plusieurs configurations d'un même logiciel afin de s'adapter au mieux aux divers usages. Pour ce faire, il est nécessaire de réaliser une étude poussée des cas d'utilisation afin de s'assurer que le système futur aura les bonnes configurations pour fonctionner correctement et efficacement.

S. Naumann et coll. [34] proposent un nouveau modèle conceptuel qui a pour but d'accompagner les parties prenantes dans leurs prises de décisions. Le GreenSoft Model permet d'étudier le cycle de vie d'un produit d'un point de vue holistique, il s'appuie sur des critères de durabilités qui deviennent dès lors des attributs de qualité à part entière. L'efficacité énergétique n'est désormais plus vue comme une caractéristique optionnelle, mais bien comme une exigence. Ardito et coll. [33] proposent également de suivre la méthode de développement BeforeUsageAfter (BUA) qui repose sur des évaluations environnementales régulières lors de chaque sous-étape pour s'assurer du respect des concepts du Développement durable.

L'engagement de l'entreprise en termes d'écoconception peut être récompensé grâce à une certification reconnue. La certification écoresponsable [35] proposée par le Conseil des Industries durables (CID) propose ainsi quatre niveaux de progression qui débutent par un engagement de l'entreprise jusqu'à une reconnaissance de son excellente performance globale. Elle est souvent gage d'une meilleure conception globale, car l'écoconception demande une réflexion approfondie pour évaluer les impacts et les conséquences des décisions prises.

1.7 Centre de données (Datacenter)

Les centres de données sont régulièrement montrés du doigt à cause de leur consommation électrique. Aux États-Unis, elle représentait 2.4% de la consommation globale en 2013 ou 13 milliards de dollars [23], soit environ 47 millions de kilogrammes d'équivalent CO₂ par an. Il est facilement possible de juger de l'impact négatif de ces installations, car de nombreux indicateurs et mesures peuvent être effectués. Nous avons donc tendance à surestimer le rôle destructeur des centres de données par rapport aux autres outils des systèmes informatiques. Toutefois, les centres de données restent couteux pour l'environnement, particulièrement à cause de leur fonctionnement continu et du renouvellement régulier des infrastructures. Dans l'enquête [20], 76% des entreprises qui n'ont pas de stratégies Green IT déclarent que la durée de vie moyenne de leurs serveurs est de 3 ans. Les entreprises qui ont mis en place une politique « verte » annoncent, dans 79% des cas, une durée de vie moyenne de 5 ans pour leurs serveurs.

Dans leur livre blanc sur les KPI des centres de données, Vateau et coll. [36] présentent trois leviers qui vont permettre d'améliorer les performances environnementales de ces infrastructures énergivores. Le premier va être physique grâce au choix des serveurs installés (performance, gestion de la fin de vie) ou encore par l'écoconception du bâtiment. Ce premier pilier va mettre en avant des technologies comme la technique de « Free Cooling » pour refroidir les salles de serveurs (ouverture directe sur l'extérieur pour profiter de l'air froid). L'aménagement adéquat de ces salles permet également une meilleure gestion des masses d'air, ce qui permettra en outre de récupérer l'air chaud pour chauffer d'autres salles du bâtiment. Le deuxième levier, présenté dans le livre, repose sur la gouvernance du centre de données par la mise en place d'un système de management de l'infrastructure. Il est important de récolter des données qui seront ensuite traduites en indicateurs afin que les parties prenantes aient des informations concrètes pour appuyer leurs décisions. Par exemple, le PUE permet de mesurer l'efficacité énergétique d'un centre de données. Le suivi de l'humidité de la pièce est également nécessaire, car elle va influencer la durée de vie des équipements. Les responsables

peuvent également choisir des fournisseurs d'électricité qui exploitent les énergies renouvelables. Le dernier pilier est le pilier logique qui consiste à dimensionner au plus juste et à optimiser l'usage des centres de données. Le taux de charge va permettre de connaître le taux d'utilisation des serveurs, ce qui va ensuite aider les décideurs dans l'optimisation de l'infrastructure.

L'article de A. Hopper et A. Rice [37] développe en premier l'idée qu'il est plus facile de déplacer des données que de l'énergie, ils proposent donc de rapprocher les informations vers la source de production électrique. Dans cette optique, le projet GreenStar Network, présenté dans l'article [38], est le premier programme mondial visant à alimenter les centres de données avec 100% d'énergies renouvelables. Développer au Canada, ce projet vise à réduire au maximum les émissions de GES en utilisant plusieurs centres de données connectés entre eux, tous étant alimentés avec des énergies renouvelables qui restent, évidemment, intermittentes. Ainsi, les données vont migrer entre les divers nœuds du système dépendamment de la disponibilité des énergies renouvelables de chaque nœud. Selon l'article [39], ce projet s'appuie sur le paradigme « Follow the wind / Follow the sun » pour fonctionner, c'est-à-dire que les données suivent les emplacements géographiques où les énergies renouvelables produisent suffisamment d'électricité pour alimenter le nœud. Dans leur article, Nguyen et coll. [38] insistent sur le fait que cette technologie permet une migration des données sans interruption de service, elle ne produit donc pas d'effets indésirables sur l'expérience utilisateur. Selon les études disponibles sur le cycle de vie, une réduction de 14% des émissions de GES est possible en ajoutant des centres de données dans des emplacements géographiques où le vent permet une production d'électricité. Les économies réalisées dépendent également de l'énergie, le solaire par exemple nécessite de grandes infrastructures qui ont un impact fort lors de la fabrication et de l'installation, elle offrira donc moins d'avantages que l'éolien selon les auteurs.

L'institut UpTime [40] a également créé une norme qui permet de classer les centres de données entre 1 et 4 en fonction de la redondance de leur système électrique. Alors qu'un centre de données TIER 1 possède une seule chaîne d'alimentation électrique, un centre de

données TIER 4 possède deux chaînes d'alimentation en totales redondances, ce qui offre une indisponibilité beaucoup plus faible. Une infrastructure TIER 1 sera indisponible 28,8h/an alors qu'un centre TIER 4 sera indisponible 0.5h/an. Le baromètre des pratiques Green IT [20] insiste sur le fait qu'une forte disponibilité fera augmenter la valeur du PUE, c'est-à-dire que l'efficacité énergétique sera réduite.

Selon un article publié par le fondateur de l'Alliance Green IT [41], la consommation des centres de données a doublé entre 2000 et 2005, elle a ensuite augmenté de 56% entre 2005 et 2010. Elle aurait atteint un plateau depuis 2010, la consommation globale des centres de données n'aurait que peu évolué grâce à l'évolution de l'efficacité et l'efficience des serveurs et de toutes les infrastructures liées.

1.8 Poste de travail

Les centres de données ne sont pas les seuls qui, au sein des entreprises, ont un impact important sur le bilan environnemental. Le poste de travail peut également rejoindre le banc des accusés puisque l'étude [9] estime que 250 milliards de dollars sont dépensés chaque année à travers le monde pour alimenter les ordinateurs et seulement 15% de cette consommation est utilisée pour réaliser des activités informatiques. Le reste est perdu lorsque l'ordinateur est en mode repos ou lorsqu'il n'est pas utilisé. Le poste de travail d'un employé dans une entreprise a donc un impact important sur l'environnement et c'est précisément la gestion de ses EEE qui va avoir le plus d'influence. Dans l'enquête de l'Alliance Green IT [20], nous apprenons que 66% des entreprises ont mis en place des méthodes permettant de réduire les consommations électriques inutiles au sein des postes de travail de leurs collaborateurs.

La consommation énergétique va être au centre des considérations au niveau du poste de travail. Il est cependant difficile de créer des modèles pour juger de l'efficacité énergétique du matériel présent sur le poste, car, selon [42], tous les aspects d'un système informatique influencent sa consommation électrique et l'évolution des composants est trop rapide pour

permettre de créer des modèles justes. Gutta et Dupla [43] proposent en 2016 une nouvelle méthode de calcul qui permet, grâce à la fréquence et au voltage du CPU, de déterminer la consommation énergétique du système. Elle ne jouit malheureusement pas d'une bonne précision pour le moment. D'autres outils utilisent le courant et le voltage en temps réel comme mesures pour effectuer le calcul. Chaque item d'un poste de travail a donc un rôle à jouer dans la mise en place de la politique Green IT.

L'étude explique qu'un ordinateur portable consomme 80% d'énergies en moins qu'un ordinateur de bureau. Il demande également moins de matières premières lors de sa création donc son empreinte environnementale est réduite. Dans un rapport de l'OCDE [44], on peut voir que plusieurs recherches sont lancées afin de réduire la consommation des écrans. Le Japon a lancé un programme de Green IT afin de financer ses recherches. Ils ont observé des économies d'énergies de l'ordre de 50% en utilisant la technologie OLED (Organic Light Emitting Diodes) dans les écrans. Un autre article [13] explique qu'un écran de 14 pouces consomme 40% moins d'énergie qu'un écran de 17 pouces.

Il est de même important de rappeler que les éléments du matériel génèrent de la chaleur lorsqu'ils fonctionnent. La Green IT Factsheet de l'Université du Michigan [23] prévient donc que pour chaque kilow-Watt-heure utilisé par un équipement de bureau, il faut rajouter entre 0.2 et 0.5 kWh d'électricité au bilan énergétique pour effectuer une climatisation adéquate des locaux. Les ordinateurs sont les éléments les plus polluants présents sur un poste de travail, il existe cependant des solutions afin de réduire le nombre d'ordinateurs dans les locaux d'une entreprise.

1.9 Virtualisation

La virtualisation est une de ces solutions. En effet, elle permet de créer une ou plusieurs représentations virtuelles d'un ordinateur sur une même machine physique. Elle mutualise les ressources afin d'augmenter l'efficacité dans les traitements. La thèse d'I. M. Hernandez [4]

explique ainsi que la virtualisation permet d'avoir plusieurs machines sur le même serveur, le ratio pouvant monter jusqu'à 15 :1. Cela permet d'éliminer de nombreuses machines physiques, de réduire les impacts sur l'environnement et de centraliser les infrastructures offrant au passage une réduction des coûts de maintenances. Il précise également que chaque serveur virtualisé représente une économie de 5 tonnes d'équivalent CO₂ ou l'équivalent de 1,5 voiture retirée de la route.

La virtualisation induit une meilleure gestion des données puisqu'elles sont localisées sur un seul serveur ce qui permet d'éviter la redondance par exemple. Elle offre également une meilleure adaptation aux besoins réels de l'entreprise, car il est facilement possible d'augmenter les capacités des serveurs. L'article [38] insiste sur le fait que la virtualisation améliore les services offerts puisqu'elle introduit une plus grande disponibilité, une amélioration de la performance ou encore une meilleure sécurité tout en réduisant l'impact sur l'environnement. L'utilisation d'un client léger permet de réaliser toutes les tâches calculatoires sur un serveur plutôt que sur la machine physique. L'université du Michigan, dans son rapport [23], déclare qu'un client léger utilise 87,5% d'énergie en moins qu'un ordinateur de bureau. Une solution à émergée dans les années 2000 : le « cloud computing ».

1.10 Cloud

L'infonuagique joue également un rôle dans le processus de Green IT. Il est présenté par l'entreprise Gartner comme étant une des dix technologies stratégiques tendances pour 2020 [45]. Il permet de distribuer des services et des ressources simplement par Internet. L'infonuagique offre aussi une meilleure gestion de l'archivage des données en réduisant le nombre de copies, ce qui permet de libérer de l'espace dans les serveurs. Les utilisateurs ayant plus d'espaces de stockage à disposition vont cependant avoir tendance à enregistrer plus d'informations et donc à avoir besoin de plus d'espaces de stockage.

Dans un rapport sur l'infonuagique [46], les membres de l'Alliance Green IT valident l'hypothèse selon laquelle l'infonuagique est verte, car elle réduit les émissions de GES. Selon leurs recherches, un employé travaillant en télétravail une fois par semaine réduit ses émissions de GES de 220kg équivalents CO₂ par an. L'évolution des serveurs permet également de rendre l'infonuagique de plus en plus puissante et donc de moins en moins énergivore, cela permet de réduire son impact sur l'environnement.

L'infonuagique est fortement appréciée pour sa capacité à s'adapter lors de pics de charge. Elle évite donc aux entreprises d'investir trop de capacité pour un usage de pointe seulement. Elles peuvent donc s'équiper pour leurs opérations quotidiennes et s'appuyer ensuite sur le nuage lorsque des événements exceptionnels demandent plus de ressources.

1.11 Impression

Le dernier élément important pour une entreprise qui souhaite s'investir dans une démarche de Green IT est la bonne gestion de ses impressions. Cette facette est sûrement la mieux comprise et la mieux mise en place jusqu'ici dans les entreprises. En effet, l'enquête de l'Alliance Green IT [20] conclue que les sociétés de plus de cinquante employés ont mise en place des politiques internes concernant l'impression.

De nombreuses solutions existent pour réduire l'impact des imprimantes sur l'environnement. L'article [13] propose ainsi de favoriser les imprimantes à jets d'encre plutôt que les imprimantes laser, car la première catégorie consomme 80 et 90% moins d'énergies que la seconde. Les auteurs de l'article proposent également de réduire la consommation de pétrole inhérente à l'impression, puisque très souvent présentes dans les encres, en achetant des encres issues d'un mélange d'huiles et de résines toutes deux d'origines végétales. Elles sont biodégradables et possèdent de très bonnes caractéristiques (résistance aux frottements, stabilité de la couleur ...).

Différentes pratiques doivent être généralisées à tous les membres de l'entreprise afin de rendre plus « vert » le processus d'impression. L'article [7] propose ainsi de mettre en place un format d'impression par défaut avec de fines marges, un espace simple, une petite police ou encore le mode recto verso. Ces réglages diminuent l'impact de l'impression en optimisant au mieux l'utilisation de chaque feuille. Le mode brouillon devrait être utilisé avant chaque impression pour connaître le résultat de cette dernière avant de la lancer. Ce comportement permettra d'éviter d'imprimer plusieurs fois le même document à cause de détails déplaisants apparus lors de l'impression.

Selon l'enquête de l'Alliance Green IT [20], 57% des entreprises interrogées indiquent se servir de papier partiellement ou totalement recyclé pour les travaux d'impressions. Le papier certifié « Procédé sans Chlore » est également très utilisé. Cette certification, proposée par l'Association des Produits sans Chlore [47], s'intéresse à retirer tout le chlore ou les produits dérivés du chlore dans les procédés de fabrication du papier, car le chlore a un impact particulièrement nocif sur l'environnement. Dans les critères de certifications, les papiers fabriqués doivent contenir au minimum 30% de papiers recyclés. Cette certification est très répandue puisqu'elle peut être utilisée avec tous types de papiers, cartons ou encore emballages.

De plus, il est important de mettre en place des solutions pour collecter les déchets de l'impression tels que les cartouches d'encre vides ou les feuilles imprimées non utilisées afin de pouvoir les recycler, les réutiliser ou les détruire.

Afin de savoir où se place l'entreprise par rapport aux mesures écoresponsables, il existe diverses possibilités. Le modèle de maturité est une de ces solutions.

1.12 Modèle de maturité pour être plus écoresponsable

Un modèle de maturité est une bonne façon d'évaluer le comportement d'une entreprise quant à son engagement dans une dynamique écoresponsable. Dans l'article [26], les auteurs expliquent qu'il faut dans un premier temps faire des recherches afin d'être à jour sur l'état de l'art des études sur l'informatique verte. Il faut ensuite créer un document qui permet à une entreprise de se positionner face à une liste de comportements. Différentes façons existent, il est par exemple possible de pondérer les réponses en fonction de leurs importances ou encore de créer une échelle (entre 1 et 5) pour que l'entreprise puisse objectivement se placer sur son avancement. Ce type de modèle se base sur la bonne volonté et l'honnêteté des parties prenantes, il n'a pas de bases scientifiques, elle peut donc comporter des biais. Cependant, étant souvent issus d'un souhait d'autoévaluation de la part des responsables de l'entreprise et le résultat n'étant connu que par l'entreprise, nous pouvons nous attendre à ce qu'il soit relativement représentatif de la maturité de cette dernière.

L'article [48] démontre ainsi qu'un tel modèle offre la possibilité de mieux comprendre le niveau de maturité de l'entreprise, mais également d'éveiller la conscience des collaborateurs sur les problématiques environnementales. Les auteurs insistent également sur le fait que le modèle permet de formaliser et standardiser les principes clés qui permettront à l'entreprise de réduire son impact. Ils présentent ensuite un modèle de maturité qui va permettre de soutenir l'évolution de l'intégration de l'éco-innovation grâce à une approche holistique, c'est-à-dire que chaque partie prenante est incluse dans la démarche écoresponsable. Cet outil sert également à suivre l'évolution de l'entreprise sur plusieurs années grâce à des évaluations régulières.

1.13 Conclusion

Jusqu'ici considéré comme peu destructeur puisque virtuel, l'informatique se révèle finalement comment faisant partie intégrante des acteurs ayant un impact négatif sur l'environnement. Cette notion se développe dans les consciences collectives et incite les entreprises à faire

évoluer leurs pratiques. Le sujet est vaste, il concerne chaque équipement et chaque lien de communications entre eux.

Nous l'avons vu, l'achat d'équipements neufs n'a pas d'équivalent en termes d'impact puisque leurs fabrications reposent sur l'utilisation de minerais rares et de procédés polluants. Il est donc primordial que les entreprises réagissent et créent des politiques internes de renouvellement de leurs matériels défectueux pour favoriser leurs réparations, leurs réemplois ou leurs destructions afin de minimiser leurs potentiels néfastes. Ces politiques demandent un engagement fort de la part des dirigeants pour entraîner le personnel à intégrer les notions du DD dans toutes les étapes de conceptions d'un produit. Cet engagement peut être conforté par diverses solutions comme : les certifications écoresponsables d'organismes externes, le respect de labels indépendants ou encore l'intégration dans la méthodologie de développement. Dans la vision Green IT, il est important que chaque collaborateur considère la durabilité du produit comme une exigence de qualité à part entière.

D'autres facteurs comme les centres de données, les postes de travail ou encore l'impression vont avoir un rôle important à jouer dans la réduction de l'impact environnemental du système informatique d'une entreprise. Leur consommation électrique étant au centre des préoccupations lors de la phase d'utilisation. Rappelons que leurs fabrications restent l'étape la plus destructrice pour l'environnement, mais que de simples mesures peuvent réduire les effets néfastes liés à leur utilisation.

Certaines technologies comme l'infonuagique ou la virtualisation des machines physiques semblent de bonnes solutions pour réduire l'impact environnemental en facilitant la gestion du parc numérique. Elles permettent, en outre, de mutualiser le matériel pour utiliser au maximum chaque ressource mise à disposition.

Tableau 1: Récapitulatif des notions clés

Sujet	Mots-clés
Fabrication	Matière première, instabilité géopolitique, procédés énergivores et polluants
Achat	Choix d'acquisition, critères d'achats, labels
Recyclage et réemploi	Réparabilité, DEEE, réemploi, recyclage
Gouvernance	Politique internes, indicateurs, stratégies commerciales, plan d'action
Écoconception et certifications	Efficiences, cycle de vie, méthodologie de développement, certifications écoresponsables
Centre de données	Consommation électrique, aménagements structurels, normes
Poste de travail	Veille, taux de remplacement, consommation énergétique
Virtualisation	Centralisation, gestion des ressources,
Cloud	Distribution des services, adaptabilité
Impression	Qualité du papier, visualisation pré impression, format

Maintenant que nous avons posé les fondations du numérique écoresponsables, ses grands axes de combats et ses notions principales, nous allons formaliser les actions potentielles dans un modèle de maturité. Il aura pour but d'offrir aux entreprises un moyen de connaître leur investissement dans le paradigme du Green IT. Par cette autoévaluation, elles pourront connaître leurs points faibles et leurs points forts ainsi que les aspects dans lesquels elles doivent investir des efforts pour réduire leurs impacts environnementaux. Cet outil pourra être utilisé annuellement pour suivre l'évolution de leur maturité.

CHAPITRE 2

Le modèle de maturité

2.1 Les objectifs du projet

Comme nous l'avons vu dans les sections précédentes, un système informatique et ses composants pèsent lourd sur le bilan environnemental d'une entreprise. Peu d'entreprises ont pourtant conscience actuellement que leurs activités informatiques participent au réchauffement climatique. Les études scientifiques ne sont pas assez nombreuses dans le domaine, elles ne permettent pas de chiffrer précisément l'impact d'un EEE sur l'environnement.

Ce projet a pour but d'éveiller les consciences sur le sujet du Green IT. Il repose sur deux objectifs distincts :

1. Faire un état de l'art des connaissances sur l'informatique verte
2. Réaliser un modèle permettant d'accompagner les entreprises dans une démarche Green IT

Le premier Chapitre 1 permet au lecteur d'approfondir ses connaissances sur le sujet du Green IT grâce à la revue de littérature. Ces sections présentent ses principes fondateurs, elles offrent également une meilleure compréhension des impacts des différentes phases du cycle de vie d'un EEE. Nous pouvons observer que certaines actions simples à mettre en place, telle que l'achat de matériels d'occasion, impactent grandement le bilan environnemental d'une entreprise. Ces dernières ne sont pas conscientes du potentiel de telles actions, soit par manque d'intérêt des concepts du Green IT (choix délibéré de ne pas en tenir compte), soit parce qu'elles ne connaissent pas cette démarche.

Après avoir étudié les principes du Green IT, ce projet a pour objectif de créer un modèle qui accompagne les entreprises vers une gestion plus écoresponsable de leur système informatique. Ce modèle sera le support d'une analyse en profondeur des caractéristiques du système

informatique, des politiques internes influençant son administration, mais également des choix stratégiques réalisés par les collaborateurs. Ainsi, les entreprises non-initiées aux valeurs et notions du Green IT auront à disposition un modèle qui servira de guide pour les implémenter. Ce support se veut instructif et positif, plutôt que répréhensif et décourageant. Il doit permettre aux entreprises d'instaurer le Green IT simultanément dans les divers services, soit de manière holistique, globale et complète.

Le modèle pourra être utilisé pour réaliser un audit interne récurrent (semestriel, annuel, bisannuel) de la structure afin de suivre l'évolution de l'intégration du Green IT. Il est également possible d'utiliser ce support lors de partenariats avec une entreprise pour connaître son niveau d'implication dans les notions du Développement durable, il créera une vue d'ensemble sur la philosophie de cette dernière.

2.2 Les cas d'utilisation de ce modèle

Ce modèle de maturité présente les actions clés qu'une entreprise doit avoir mises en place pour satisfaire les notions du Green IT. Elles concernent toutes les facettes du système informatique, de sa gouvernance à son cycle de vie, en intégrant diverses méthodes techniques (infonuagique, virtualisation, etc.). Cette évaluation permet à une entreprise de connaître sa maturité par rapport à un ensemble de critères définis au préalable. Elle peut cependant être réalisée dans diverses circonstances.

Une première solution d'évaluation de son avancement face à ces critères serait d'utiliser ce modèle pour réaliser une enquête en interne. Après avoir nommé un responsable au sein de l'entreprise, le modèle est voué à être utilisé comme un support pour conduire l'évaluation. Les résultats créeront une vue holistique du système puisque le modèle possède des critères sur chaque facette du système informatique. Les résultats pourront être partagés avec les partenaires ou rester confidentiels. Les niveaux peuvent servir de ligne directrice pour accompagner les parties prenantes dans l'élaboration d'un plan Green IT.

Il est également envisageable d'utiliser ce modèle comme un support d'évaluation du système informatique d'un partenaire. Il pourra être rempli directement par ce dernier ou bien être utilisé comme un support lors d'entretiens, il est également envisageable de l'inclure comme document nécessaire pour répondre à un appel d'offres. Il offre ainsi une bonne vision de l'investissement des partenaires dans la démarche du Green IT. Il est important de noter que s'il est rempli par le client en autonomie, la véracité de l'évaluation est discutable.

2.3 Comprendre le modèle

2.3.1 Le choix du modèle

Pour réussir une évaluation complète et précise du système informatique d'une entreprise, il est nécessaire de choisir soigneusement le format du support qui va guider le processus d'analyse. Il est possible d'effectuer des entretiens individuels ou de groupes, de demander aux responsables l'accès à un ensemble d'informations nécessaires à l'évaluation, d'organiser une journée d'observation au sein de l'entreprise ou encore de fournir un questionnaire détaillé. Ces différentes solutions permettent de récupérer les données nécessaires à la compréhension des politiques associées à la gestion du système informatique de l'entreprise. Ces techniques d'analyse laissent malheureusement place à l'interprétation et au subjectif, elles peuvent donc seulement être utilisées dans certains cas spécifiques. Dans le cadre de ce projet, elles ne semblent pas correspondre aux attentes : elles sont trop subjectives (donc les résultats ne sont pas constants donc pas comparables d'une année à l'autre), elle nécessite un accès direct à des informations privées et n'offre pas de feuilles de route aux entreprises.

Ainsi, le premier critère pour le support développé au cours de ce projet est sa normalisation. Les résultats doivent être comparables d'une année à une autre afin de suivre l'évolution du Green IT au cours temps. Le deuxième critère est qu'il doit guider les entreprises pour qu'elles aient conscience des actions à mettre en place pour devenir plus écoresponsable. C'est donc un outil du changement, une feuille de route pour réduire son impact environnemental. Un

dernier critère est son adaptabilité à diverses utilisations : il peut être utilisé quotidiennement pour suivre l'évolution des mesures, il peut être utilisé annuellement ou bi annuellement ou encore servir de feuille d'évaluation d'un partenaire. Cette adaptabilité permet à divers acteurs d'utiliser ce support dans une variété de situations, ce qui participe à la diffusion des notions du Green IT.

Ainsi, nous avons décidé d'implémenter un modèle de maturité dans le cadre de ce projet. Ce type de modèle permet de référencer un ensemble de bonnes pratiques dans le cadre du Green IT, l'entreprise évaluée peut donc connaître son niveau de maturité par rapport à ces bonnes pratiques.

2.3.2 Les niveaux du modèle de maturité

Le modèle de maturité vise à évaluer l'avancement du développement et de l'implémentation des notions du Développement durable et du Green IT dans la gestion du système informatique de l'entreprise. Comme tout cycle de maturation, on peut observer plusieurs paliers, ou niveaux, lors de la progression. Chaque niveau contient un ensemble de caractéristiques qui déterminent l'appartenance du système à ce dernier. Une fois que toutes les caractéristiques du palier sont validées, nous pouvons considérer que le système appartient au niveau supérieur. Le modèle de maturité créé comporte 3 niveaux distincts : le niveau initial, le niveau localisé et le niveau géré, c.-à-d. managé).

Le modèle de maturité commence par le niveau dit « initial ». Il permet de savoir si l'entreprise est déjà sensibilisée aux notions du Green IT ou du Développement durable. Une entreprise qui s'est auparavant investie dans une démarche Green IT réussira rapidement à compléter ce niveau puisqu'il est constitué d'item simple et facilement réalisable. Au contraire, une entreprise qui n'a jamais pris des actions en faveur du Green IT devra, dès ce niveau, mettre en place des séances d'informations pour sensibiliser ses collaborateurs.

Une fois ce palier complété), le responsable de l'évaluation commencera à s'intéresser au niveau dit « localisé ». Il permet d'observer le comportement de certains employés ou groupe face au Green IT. En effet, il a pour objectif de mettre en évidence l'utilisation, par certains acteurs de l'entreprise, des notions du Green IT dans leur travail quotidien. Pour ce niveau, ces actions sont isolées et localisées, elles proviennent d'une personne ou d'un petit groupe de personnes qui agissent seules. Ce sont des initiatives personnelles, implémenter à petite échelle.

Le dernier niveau est dit « managé », car les items évaluent l'intégration du Green IT dans toutes les facettes managériales de l'entreprise. Il s'agit de s'assurer que les notions du Green IT sont systématiquement incluses dans les décisions stratégiques, logistiques ou encore managériales de l'entreprise. Pour valider ce niveau, les actions doivent être prises de manière holistique dans l'entreprise, elles doivent concerner chaque employé, chaque département.

2.3.3 Remplir le modèle de maturité

Pour réaliser l'évaluation du système informatique de l'entreprise grâce au modèle de maturité développé, il est important de comprendre comment le remplir correctement. Chaque niveau comporte un ensemble de domaines divisés en catégories. Chaque catégorie s'intéresse à une facette spécifique du domaine et elles possèdent plusieurs affirmations, qui devront être évaluées.

Un niveau est validé lorsqu'au moins 3 affirmations sur 4 sont à 100% soit une moyenne globale du niveau de 75%. Il est ensuite possible de passer au niveau supérieur. Cependant, pour passer au niveau $n+2$, il faut avoir validé au moins 90% du niveau n . Ainsi, une entreprise, qui valide 85% du niveau 1, pourra commencer l'évaluation du niveau 2, mais elle ne pourra valider le niveau 2, et passer au niveau 3, que lorsqu'elle aura validé 90% du niveau 1. Il est important de noter que les niveaux supérieurs peuvent être remplis en même temps que les

niveaux inférieurs, mais le système informatique appartiendra au niveau le plus faible qui n'est pas encore validé.

De plus, le niveau 1 est différent par sa forme comparée aux deux niveaux supérieurs. Il se base sur un constat hypothétique : les parties prenantes du système informatique n'ont pas conscience des notions du Green IT. Il est ainsi constitué de phrases négatives (utilisation de « ne ... pas ») ou de phrases comportant l'adjectif « aucune » permettant de marquer l'absence de la notion au sein de l'entreprise. L'entreprise validera ce niveau lorsque les parties prenantes auront conscience des notions de base. Ainsi, au début de l'évaluation, l'affirmation identifiée par le code G.1.1.1 « La direction n'a pas encore nommé de responsable Green IT au sein de l'entreprise » est considérée comme valide, car nous supposons que l'entreprise n'a pas encore nommé de responsable Green IT alors que c'est une notion importante. La colonne « Évaluation » contient donc un « Oui » puisque « Oui, l'affirmation identifiée est valide, l'entreprise n'a pas encore conscience de l'importance d'un responsable Green IT ». Dès lors que l'entreprise nommera un responsable Green IT, l'affirmation deviendra fausse. La colonne « Évaluation » sera modifiée en « Non », puisque « Non, l'affirmation identifiée n'est pas valide, l'entreprise a conscience de l'importance de nommer un responsable Green IT ».

Ainsi, l'objectif de ce niveau est d'avoir seulement des affirmations fausses. Nous avons choisi d'inclure seulement deux options d'évaluation pour ce niveau : oui (0%) ou non (100%). En effet, ce niveau étant plus à propos de la prise de conscience des parties prenantes, les réponses sont binaires : « Oui, je n'ai pas encore conscience » ou « Non, j'en ai conscience ».

Une fois le niveau 1 passé, le modèle propose deux autres niveaux similaires dans leur forme. En effet, la personne responsable de l'évaluation aura le choix entre quatre niveaux distincts d'avancement pour chaque phrase :

- N : Not Achieved (0%);
- P : Partially Achieved (33,3%);
- L : Largely Achieved (66,6%);
- F : Fully Achieved (100%).

Ces niveaux d'avancements sont recommandés par la norme ISO (ISO15504). Ils permettent une meilleure évaluation globale grâce à la prise en compte de l'avancement de l'implémentation de l'item dans l'entreprise. Le niveau 1 est évalué de manière binaire, un item est donc soit complètement réalisé soit l'inverse. Dans les niveaux 2 et 3, les items peuvent ne pas être commencés, partiellement commencés, largement avancés ou complètement finis. On peut donc suivre de manière plus précise les progrès de l'entreprise grâce à ces nuances.

Comme nous l'avons dit précédemment, une entreprise peut utiliser ce modèle de maturité pour mettre en place des actions afin que le système informatique devienne plus écoresponsable possible. Elle peut donc utiliser les différents items des niveaux supérieurs comme référence, comme guide, pour les accompagner dans ce processus complexe.

2.4 Les items du modèle de maturité

2.4.1 Les attributs : domaine, catégorie, identifiant

Intéressons-nous maintenant à la logique qui a donné lieu aux items présents dans chaque niveau de maturité du modèle développé dans le cadre de ce projet. Dans un premier temps, les niveaux de maturité du modèle sont divisés en dix domaines distincts : la fabrication, les achats, le recyclage et le réemploi, la gouvernance, l'écoconception et les certifications, le poste de travail, la virtualisation, l'infonuagique et pour finir les impressions. Ces domaines sont ceux qui ont été étudiés en profondeur dans la revue littéraire (Chapitre 1). Ils représentent les enjeux principaux du Green IT.

Ces domaines sont classés dans l'ordre de priorité, c'est-à-dire que le premier domaine, la fabrication, possède un impact plus important sur le bilan environnemental du système informatique que le second domaine, les achats. Ce classement provient des données récoltées lors de la revue de littérature, il permet aux lecteurs de savoir quels domaines jouent un rôle majeur et quels domaines impactent plus légèrement le bilan environnemental du système informatique de l'entreprise évaluée. Lorsque ce modèle est utilisé en tant que support de

conseils pour mettre en place une stratégie Green IT au sein de l'entreprise, il présente d'abord les actions à fort potentielles et donc prioritaire, puis les actions nécessaires, mais à plus faibles potentielles. Ce choix s'intègre dans l'idée que ce modèle doit pouvoir servir de support d'accompagnement pour une entreprise qui souhaite s'investir dans le Green IT.

Chaque domaine est ensuite divisé en plusieurs catégories qui créent un affinement du sujet de l'item présenté. En effet, les domaines proposent une classification relativement large, qui regroupe de nombreuses notions clés du Green IT. Il est donc intéressant d'avoir une sous-classification offrant un niveau de granularité plus important pour mieux cerner la portée des items intégrés dans cette catégorie. Ces dernières ne sont pas présentées dans un ordre particulier, car il est extrêmement difficile de comparer leurs impacts environnementaux et de réaliser un classement.

Chaque item possède également un identifiant alphanumérique unique qui permet de les référencer correctement. En effet, lors de l'écriture de rapports ou lors de réunions stratégiques, il est important que chaque item soit identifié de manière unique pour qu'il n'y ait pas de confusions. Pour chaque niveau, l'identifiant est ordonné comme suit :

- Une lettre, représentant le domaine de l'item (Fabrication → F; Achat → A);
- Un chiffre, représentant le numéro de la catégorie de l'item. Si l'item fait partie de la première catégorie du domaine « Fabrication », le chiffre sera 1, soit F.1; si l'item fait partie de la deuxième catégorie du domaine « Fabrication », le chiffre sera 2, soit F.1...;
- Un chiffre, représentant le niveau de maturité de l'item (niveau 1 → 1; niveau 2 → 2; niveau 3 → 3). Il permet de savoir rapidement à quel niveau de maturité l'item est associé;
- Un chiffre, représentant la place de l'item dans la catégorie. Si l'item est le premier item d'une catégorie, son dernier chiffre sera 1; si c'est le 2^e item d'une catégorie, le dernier chiffre sera 2, etc.

Pour comprendre l'identifiant, il doit être lu de droite vers la gauche. Ainsi, l'item identifié « G.3.1.1 » représente le premier item, de niveau 1, de la troisième catégorie du domaine

« Gouvernance ». L’item « C.1.3.5 » est donc le cinquième item, de niveau 3, de la première catégorie du domaine « Centre de données ». Ce système d’identification permet rapidement de retrouver un item dans le modèle de maturité.

Chaque item est donc caractérisé par son domaine, sa catégorie et particulièrement par son identifiant. Ils permettent de structurer logiquement le modèle de maturité, il est donc plus aisé pour un utilisateur de s’en servir.

2.4.2 L’élaboration des items

Une fois que les catégories et les domaines ont été définis, il a fallu créer les items qui constituent les éléments principaux du modèle de maturité. La logique n’a pas été la même pour chaque niveau, car les items n’ont pas exactement la même construction.

2.4.2.1 L’élaboration des items de niveau 1

Le niveau 1 est, comme nous l’avons vu dans la section « 2.3.3 Remplir le modèle de maturité », un niveau un particulier par sa forme. En effet, ce niveau permet d’évaluer si l’entreprise a conscience des grandes lignes directrices du Green IT. Il évalue la présence d’une conscience de groupe face aux notions clés du Green IT. Une entreprise de niveau 1 est donc une structure consciente des notions clés, mais qui n’a pas poussé plus loin les concepts.

Prenons cet item suivant:

« G1.1.1 L’entreprise n’a pas encore nommé de responsable Green IT »

Une entreprise qui connaît un minimum les notions du Green IT sait que nommer un responsable Green IT fait partie des premières actions à réaliser au début de la démarche. Si aucun responsable n’est nommé alors l’entreprise ne satisfait pas une idée fondatrice de la stratégie Green IT, elle ne peut donc pas valider le niveau 1. Pour le valider, elle doit donc

avoir nommé un responsable Green IT puisque c'est un élément clé et nécessaire pour toutes structures souhaitant s'investir dans le Green IT.

Ce premier niveau se focalise surtout sur « l'entreprise » au sens large, car la question de fond est : est-ce que l'entreprise (et ses employés) a conscience que ... ». Cette interrogation est le socle commun de tous les items de ce niveau.

2.4.2.2 L'élaboration des items de niveau 2

Une fois le niveau 1 validé, l'évaluation continue grâce aux items du niveau 2. Ils sont différents de par leur construction et leurs objectifs. Dans un premier temps, rappelons-nous que le niveau 2 est dit « localise » : il vise à évaluer la mise en place des notions du Green IT de manière localisée, individuelle et personnelle au sein de l'entreprise. Une entreprise de niveau 2 est donc une entreprise qui, grâce à des initiatives sporadiques de ses collaborateurs, a mis en place des idées du Green IT. Ces initiatives ne proviennent pas de la hiérarchie, mais seulement de l'envie personnelle des employés qui souhaitent réduire leur propre impact sur l'environnement.

Prenons l'item suivant:

« R.3.2.3 Des initiatives personnelles permettent de recycler des DEEE »

Pour valider cet item, certains employés doivent avoir conscience d'enjeux liés au recyclage des DEEE et prendre des actions significatives pour les recycler. L'initiative ne provient donc pas d'une demande de ses supérieurs hiérarchiques ou d'une politique interne sur la gestion des DEEE, elle émane de sa conscience écologique personnelle.

Une entreprise de niveau 2 commence également à intégrer les notions du Green IT dans ses objectifs de qualité, dans ses politiques internes et dans sa vision globale. Cette intégration n'est pas encore systématique, elle est sporadique.

Prenons l'item suivant:

« G.4.2.1 Le plan d'action inclut quelques notions du Green IT (durabilité, consommation énergétique, etc.) »

Le Green IT doit en effet faire partie du plan d'action de l'entreprise, il doit fixer des objectifs audacieux qui vont pousser l'entreprise vers un changement de paradigme en profondeur. Ces objectifs doivent forcer les parties prenantes à changer de comportements pour devenir plus écoresponsables. Ainsi, dans le niveau 2, le plan d'action contient des notions du Green IT qui ne sont pas définies en profondeur, aucun suivi n'est également effectué. Nous observons donc que le Green IT est présent dans les documents officiels sans vraiment être présenté comme un objectif spécifique.

2.4.2.3 L'élaboration des items de niveau 3

Le niveau 3 vise à évaluer la mise en place systématique des notions du Green IT dans toutes les facettes de la gestion du système informatique de l'entreprise, il est dit « managé ». En effet, pour réduire l'impact environnemental de son système informatique, une entreprise doit prendre des actions holistiques, c'est-à-dire s'adresser au problème dans sa globalité et donc traiter toutes ses facettes.

Prenons l'item suivant :

« A.1.3.3 : Une politique d'achat « au plus juste » des besoins réels des employés est mise en place ».

En effet, une solution pour réduire l'impact environnemental du système informatique est l'utilisation de matériels adaptés aux besoins de chacun. Il est par exemple inutile d'avoir une RAM de 64Go sur un ordinateur qui ne sert qu'à du traitement de texte, c'est du gâchis de ressources, de matières premières et d'énergies. Adapter le matériel aux besoins permet d'éviter ce gaspillage et donc de réduire son empreinte carbone. Cet item évalue la mise en

place d'une telle politique au sein de l'entreprise, il permet de savoir si l'entreprise prend des mesures qui affectent toutes les parties prenantes de l'entreprise.

Une entreprise est de niveau 3 lorsqu'elle réussit à sensibiliser tous ses employés aux notions du Green IT, que ce soit par des formations, par des présentations ou par l'intégration de politiques internes précises.

Prenons l'item suivant :

« E.1.3.1 : La notion d'écoconception est comprise par tous les employés »

L'écoconception des produits est une pratique importante dans le Green IT. En effet, les produits créés peuvent inclure des choix de conceptions qui faciliteront, par exemple, sa réparation ou son recyclage et donc son impact environnemental. Il est donc nécessaire que les employés comprennent le principe d'écoconception, afin qu'ils puissent l'appliquer au quotidien. Cette connaissance peut être diffusée au sein de l'entreprise grâce à des séances de formation, à des présentations ou encore par l'élaboration de charte de qualité incluant de nouveaux attributs tels que la réparabilité ou la recyclabilité.

Ainsi, une entreprise de niveau 3 intègre les notions du Green IT dans toutes les facettes de la gestion de son système informatique. Elle s'attaque au problème de manière holistique ce qui lui permet d'avoir des résultats très satisfaisants.

CHAPITRE 3

Application et critiques

3.1 Exemple fictif

Nous allons utiliser le modèle de maturité développé au cours de ce projet et l'appliquer à un exemple fictif. Cet exemple présente la logique suivie pour compléter le modèle, il offrira au lecteur la possibilité de mieux comprendre comment il peut l'utiliser.

Voici le cadre de notre exemple : une entreprise privée souhaite évaluer son investissement dans la démarche Green IT. Elle fait donc appel à notre équipe pour réaliser cette évaluation à l'aide du modèle de maturité développé.

3.1.1 Début de l'évaluation

Pour pouvoir réaliser cette évaluation correctement, il faut au préalable s'assurer d'avoir l'accord de la direction et des parties prenantes décisionnaires. En effet, l'évaluation nécessite de pouvoir accéder à certaines données sensibles de l'entreprise ainsi qu'à divers rapports stratégiques. Ces informations doivent être partagées pour pouvoir compléter correctement le modèle de maturité. Il est donc extrêmement important que le projet soit accepté par la direction pour qu'ils fournissent l'accès à toutes les informations nécessaires.

Une fois le projet accepté par les responsables et les accès fournis, il est nécessaire de nommer un responsable de l'évaluation au sein de l'entreprise. Cette personne sera chargée d'accompagner l'équipe mandatée afin qu'elle puisse réaliser sa mission dans les meilleures conditions possibles. La personne mandatée doit pouvoir fournir une connaissance de l'entreprise pertinente, c'est-à-dire qu'elle doit avoir un poste suffisamment important pour pouvoir orienter l'équipe chargée de l'évaluation. La direction peut en même temps suivre le processus grâce aux rapports d'activités fréquemment fournis par le responsable.

Il est également possible de créer un groupe de travail pour effectuer l'évaluation. Cependant, il est important de créer un groupe contenant des employés de rang hiérarchique homogène. Le modèle évalue, par certains items, le comportement et la philosophie des employés. Il faut donc créer une atmosphère où les participants se sentent libres de donner leur avis, sans peur de représailles de la part d'un supérieur hiérarchique. Ainsi, avec des employés de même niveau hiérarchique, le groupe se sentira plus libre de donner son avis sincèrement et l'évaluation sera plus exacte.

3.1.2 Niveau 1

Une fois le responsable nommé ou un groupe de travail mis en place, nous pouvons commencer l'évaluation. Il s'agit donc de prendre chaque item du modèle, un par un, et de vérifier le positionnement de l'entreprise par rapport à ce dernier. Si un groupe de travail a été nommé, chaque item doit être discuté par le groupe et une décision doit être prise ensemble. Il est possible de nommer un « chef de groupe » qui pourra départager les avis, dans le cas d'un débat interminable.

Voici les moyennes de chaque domaine dans le cadre de notre exemple :

Domaine	Moyenne (en %)
Fabrication	0
Achat	100
Recyclage et Réemploi	75
Gouvernance	71,4
Écoconception & Certification	66,7
Centre de données	100
Poste de travail	100
Virtualisation	100
Cloud	100

Impression	50
Moyenne Globale	76,3

Tableau 2: Moyenne par domaine du niveau 1

Nous observons, dans un premier temps, que l'entreprise évaluée dans le cadre de cet exemple fictif valide le niveau 1 puisque la moyenne globale dépasse 75% (76,3%). Cette entreprise a donc conscience des notions clé du Green IT. Nous pouvons ensuite observer que tous les domaines ne sont pas égaux face à l'investissement dans la démarche Green IT.

En effet, le premier domaine, celui de la fabrication, possède une moyenne de domaine nulle puisqu'elle n'a pas validé les deux items de cette catégorie. L'entreprise n'a donc pas mis en place une communication sur les procédés de fabrication ni sur l'utilisation de métaux rares. Comme nous l'avons vu dans la revue de littérature du Chapitre 1, la fabrication des EEE est la phase la plus polluante de son cycle de vie.

Une fois que ce niveau est validé, le groupe de travail peut continuer l'évaluation en passant au niveau 2. Il est important de noter qu'elle ne pourra valider le niveau 2 que lorsqu'elle aura validé le niveau 1 à plus de 90% (voir Chapitre 2).

3.1.3 Niveau 2

Lorsque le niveau 1 est validé, le groupe de travail peut continuer l'évaluation grâce aux items du niveau 2. Ce niveau permet d'évaluer si les notions du Green IT sont appliquées de manière sporadique dans l'entreprise sans qu'il n'y est une véritable normalisation de ces dernières dans l'entreprise. Elles sont donc appliquées de manière isolée et ponctuelle.

Voici les moyennes obtenues pour chaque domaine à la fin de l'évaluation :

Domaine	Moyenne (en %)
Fabrication	58
Achat	44,3
Recyclage et Réemploi	49,8
Gouvernance	58,6
Écoconception & Certification	52,14
Centre de données	100
Poste de travail	77,7
Virtualisation	83
Cloud	83
Impression	66,5
Moyenne Globale	67,3

Tableau 3: Moyenne par domaine du niveau 2

Nous pouvons voir que le niveau 2 n'est pas validé pour le moment. En effet, la moyenne globale est inférieure à 75% et le niveau 1 est inférieur à 90%. L'entreprise n'est pas suffisamment avancée dans les domaines de la fabrication, de l'achat, du recyclage et réemploi, de la gouvernance, de l'écoconception et certification ainsi que dans le domaine de l'impression. Elle ne peut donc pas valider le niveau 2.

3.1.4 Conclusion de l'exemple fictif

Ainsi, nous pouvons conclure que cette entreprise est de niveau 1 et bientôt de niveau 2. Elle doit réussir à valider plus d'items du niveau 1 pour passer la barre des 90%. Il est donc nécessaire qu'elle reprenne les items non validés du niveau 1 comme le I.2.1.1 qui concerne la mise en place d'un plan de gestion des ressources liées à l'impression ou encore l'item F.2.1.1 qui concerne les informations relatives aux matières premières présente dans les EEE. L'entreprise évaluée doit simultanément s'intéresser aux items du niveau 2 puisqu'elle doit dépasser les 75% pour le valider.

Cette entreprise est donc consciente des enjeux du Green IT et ses notions sont souvent appliquées lors d'initiatives personnelles d'employés. Elle doit donc maintenant mettre en place systématiquement les notions du Green IT dans tous ses processus pour pouvoir valider le niveau 3.

3.2 Retour critique sur le projet

3.2.1 Retour sur la revue de littérature

Pour comprendre les enjeux du Green IT et créer un support d'accompagnement dans cette démarche, il faut auparavant comprendre toutes ses facettes. Nous avons donc réalisé une recherche bibliographique approfondie afin de cerner toutes les notions de ce concept innovant.

Les études publiées à ce jour sont encore que peu nombreuses, elles peinent à présenter le Green IT d'un point de vue holistique, global. La problématique est extrêmement large puisqu'elle concerne tous les éléments d'un système informatique, il est ainsi difficile de travailler sur tous ses aspects dans une seule étude. La revue de littérature du chapitre 1 vise donc à regrouper les résultats de plusieurs recherches pour en faire une synthèse. Le processus de synthèse exige de réaliser une classification des informations présentées pour ne retenir que les plus pertinentes. De plus, les études sur le sujet sont écrites en anglais, langue standard dans les échanges scientifiques mondiaux. Le travail de sélection des informations peut donc être faussé par une mauvaise compréhension de la langue et par une mauvaise qualité de retranscriptions des idées. Pour pallier ce problème, une traduction systématique des éléments clé et du vocabulaire incompris a été réalisé.

De plus, la revue de littérature n'inclue que peu de données chiffrées sur la réduction de la consommation électrique lorsque certaines actions sont mises place. Cette absence de données provient du fait que les études menées sur le sujet ont, elles aussi, des difficultés à quantifier les économies réalisées. Prenons l'exemple de l'écoconception et plus particulièrement de

l'écoconception lors de l'implémentation du code source. Certaines techniques permettent de réduire la consommation électrique théorique (réduction de l'utilisation de la CPU, réduction du nombre d'itérations des boucles conditionnelles) de l'ordinateur. Théorique, car il est très délicat de réaliser des expériences dans un environnement parfaitement contrôlé. Il existe trop de paramètres différents qui peuvent, à un instant t , influencer la consommation électrique d'un ordinateur. Aucun protocole n'a été créé, pour le moment, pour contrôler correctement ces différents paramètres et obtenir un résultat exact. Ces bonnes pratiques s'appuient donc seulement sur un raisonnement logique. Dans un futur proche, des études devraient présenter des solutions pour répondre à ce problème.

Une autre critique qui pourrait être émise contre notre revue de littérature concerne l'ordre de présentation des sections qui est réalisé de manière décroissante, c'est-à-dire que la première section est celle ayant un potentiel néfaste le plus important, les sections suivantes étant de moins en moins significatives. Ce classement a été réalisé grâce aux résultats des études lues, mais un contestataire pourrait argumenter pour modifier ce classement. Ce choix réfléchi s'appuie sur les informations et les données recensées au cours de la revue de littérature.

3.2.2 Retour sur le modèle de maturité

Le modèle de maturité est l'élément innovant de ce projet. Il est né suite au travail de synthèse réalisé lors de la revue de littérature, il regroupe toutes les bonnes pratiques lues auparavant. Ainsi, ce modèle de maturité se base sur différents items qui représentent ces bonnes manières.

Dans un premier temps, le niveau 1 et sa sémantique peuvent être critiqués. En effet, l'évaluation repose sur deux choix : oui ou non. Les items sont écrits sous forme négative, avec l'utilisation de « ne ... pas », ou bien ils affirment que l'entreprise réalise quelque chose qui est négatif (R.1.1.1 « L'entreprise favorise l'achat de matériel neuf plus que la remise à niveau du matériel »). Ainsi, une évaluation avec un « Oui » est négative dans le modèle de maturité puisque cela signifie que l'entreprise ne fait pas quelque chose ou fait quelque chose de négatif.

Au contraire, un « Non » signifie que l'entreprise fait quelque chose de positif. Ce système ne semble pas être le plus facile à appréhender et à comprendre. Il sera intéressant de reprendre le modèle pour changer et simplifier la compréhension de ce niveau.

De plus, nous avons fixé à 75% la moyenne globale minimale pour valider un niveau de maturité. Cette moyenne globale représente la moyenne des moyennes des domaines. Ainsi, un item tel que V1.2.1 « Les dirigeants prennent lentement conscience de l'importance de la virtualisation dans une stratégie Green IT » va avoir un impact très important sur la moyenne globale puisqu'il fait partie d'un domaine contenant seulement deux items. Au contraire, l'évaluation d'un item tel que G.1.2.1 « Les salariés prennent lentement conscience de l'importance de nommer un responsable Green IT au sein de l'entreprise » aura beaucoup moins d'impact sur la moyenne globale puisqu'il est contenu dans un domaine possédant 13 items. Nous pouvons donc observer que l'évaluation d'un item aura une influence plus ou moins grande sur la moyenne globale, qu'importe son impact sur le bilan environnemental. C'est une faiblesse de notre modèle qui pourrait être corrigé par l'ajout de facteur, un item important verrait donc son évaluation avoir plus de poids par rapport aux autres, en fonction de son potentiel dans le bilan environnemental.

Le choix des niveaux et des bonnes pratiques associées peut de même être discuté. En effet, dans le niveau 1, un item peut sembler particulièrement difficile à valider. Prenons l'item F.1.1.1 « Aucune enquête sur les procédés de fabrication de ces Équipements Électriques et Électroniques (EEE) n'est réalisée et diffusée dans l'entreprise », comme exemple. Rappelons que le niveau 1 évalue si l'entreprise et les employés ont conscience des notions du Green IT. L'entreprise joue un rôle important dans cette prise de conscience puisqu'elle peut communiquer à tous ses employés des informations pertinentes. Ainsi, la diffusion d'articles ou d'études sur les enjeux liés aux procédés de fabrication des EEE permettrait aux employés de réaliser l'impact de cette phase. Cependant, pour une entreprise qui débute dans la démarche du Green IT, cet item peut paraître particulièrement complexe et financièrement difficile à réaliser. Il est donc possible de discuter l'appartenance au niveau 1 de cet item.

Le modèle de maturité développé peut être utilisé dans divers processus, comme nous l'avons expliqué dans le chapitre 2. Il a donc été construit de manière à s'adapter à ces situations. Cette adaptabilité rend le modèle peu spécialisé pour une situation précise. Ainsi, nous pouvons nous interroger s'il n'était pas préférable de créer plusieurs modèles sémantiquement identiques, mais qui serait chacun spécialisé dans un type précis d'utilisation. Ces modèles permettront de créer des supports spécialisés dans un type d'évaluation.

Certains items, tels que ceux du domaine « Centre de données », peuvent s'avérer impossibles à connaître pour une entreprise qui ne possède pas son propre centre de données. Elle pourrait contacter son fournisseur, mais elle risque d'avoir des difficultés à avoir accès à ces informations qui sont souvent d'ordre privé. Ainsi, des domaines du modèle de maturité ne sont pas pertinents dans certains cas d'utilisation. C'est une faiblesse du modèle qui peut impacter les résultats finaux.

3.3 Futurs projets

Ce projet pourrait être utilisé comme socle de départ dans le cadre de projets sur le Green IT. Nous avons abordé de nombreuses notions et présentons diverses bonnes pratiques récoltées au cours des lectures d'articles et d'études scientifiques. Ces informations peuvent être reprises et approfondies afin d'avancer dans la recherche sur le Green IT.

Ainsi, une notion comme l'écoconception des produits informatiques pourrait faire l'objet de recherches plus poussées. Le matériel va permettre de faire fonctionner le produit, mais c'est bien le logiciel qui va dicter la manière de le faire. Il sera donc intéressant d'étudier l'impact du logiciel et des choix d'implémentation sur la consommation électrique du matériel.

Ce projet pourra être repris pour être amélioré et approfondi. En effet, réaliser des études de cas poussés sera une bonne solution pour tester le modèle. Il sera également intéressant d'avoir des retours de professionnels du Green IT pour qu'ils valident les bonnes pratiques

sélectionnées. Leurs expertises permettront de mieux cibler les items pour ainsi créer une évaluation plus exacte.

Un futur projet pourra également s'intéresser à créer des modèles spécialisés pour chaque type d'utilisation. Il s'agirait d'adapter le modèle aux entreprises qui possèdent, ou ne possèdent pas, un centre de données par exemple. Nous pourrions imaginer d'avoir, en outre, un modèle spécialisé dans l'évaluation de fournisseurs, un autre pour l'autoévaluation d'une entreprise et un dernier pour réaliser des audits ponctuels. Ils seront idéals pour leur utilisation et créeraient donc une évaluation plus exacte.

CONCLUSION

Notre époque fait face à un défi qui concerne chaque être humain sur Terre : le réchauffement climatique. Causé par un ensemble de facteurs anthropologiques, ce phénomène menace l'équilibre des écosystèmes. Depuis le début du XXI^e siècle, chaque industrie prend la mesure de son impact et tente de modifier ses processus pour devenir plus écoresponsable. Les appareils électriques et électroniques, ou plus globalement le système informatique de ces industries impactent considérablement leur bilan environnemental.

Ce projet s'est donc intéressé, dans un premier temps, à comprendre comment le système informatique d'une entreprise peut avoir un impact sur l'environnement. Il s'est avéré que chaque phase du cycle de vie crée une pollution directe ou indirecte. La fabrication est sans aucun doute la source de pollution la plus importante, principalement à cause des procédés de fabrication et de l'utilisation de métaux rares, source d'instabilité géopolitique également. Les entreprises peuvent aisément mettre en place des politiques internes permettant de réduire l'achat de matériels neufs, de favoriser la revalorisation de matériels usagés ou encore de se fournir qu'auprès de partenaires écolabélisés et qui appliquent des normes environnementales certifiées. D'autres solutions telles que la virtualisation et l'écoconception des logiciels sont également importantes à mettre en place dans l'entreprise pour réussir à réduire l'impact environnemental du système informatique.

La démarche du Green IT est donc holistique, elle concerne l'ensemble du système informatique : de la gouvernance de son matériel au plan stratégique de l'entreprise. Le Green IT demande donc un changement de paradigme au sein de l'entreprise : la durabilité devient un critère indispensable et fait partie intégrante de la qualité du produit.

Ainsi, au cours de ce projet, nous avons recueilli un ensemble de bonnes pratiques qui permettent d'évaluer la maturité d'une entreprise par rapport à cette démarche Green IT. Ce modèle peut également servir de support d'accompagnement pour une entreprise qui souhaite s'investir et mettre en place les notions du Green IT. Ce modèle repose sur trois niveaux

distincts : le niveau initial, le niveau localisé et le niveau managé. Le premier niveau a pour objectif d'évaluer si les employés ont conscience des enjeux et des notions clés du Green IT. Ensuite, le second niveau vise à déterminer si certains employés, par envie ou choix personnel, implémentent déjà ces notions dans leur travail quotidien. Pour finir, le troisième niveau évalue si les bonnes pratiques du Green IT sont instaurées de manière systématique dans l'entreprise. Ces niveaux analysent donc l'évolution du Green IT dans une entreprise afin de déterminer quelle est sa maturité.

Le Green IT est encore une notion vague et peu connue pour la population et pour les entreprises. Il est extrêmement important que ce nouveau paradigme de gestion d'un système informatique se démocratise pour réduire la pollution émise par nos activités informatiques. De nombreuses études sont toujours en cours et vont permettre de mieux quantifier les économies réalisées lors de la mise en place de bonnes pratiques. En même temps, des entreprises créent des systèmes innovants qui vont permettre de réduire le bilan environnemental d'une entreprise. Par exemple, une entreprise française souhaite installer des serveurs chez des particuliers pour qu'ils puissent bénéficier de la chaleur produite comme source de chauffage.

ANNEXE I : Exemple fictif : Évaluation du niveau 1

Domaine	Catégories	Identification	Évaluation	%
Fabrication	Procédés de fabrication	F.1.1.1	Oui	0
	Matériaux premières	F.2.1.1	Oui	0
Achat	Politique d'achat	A.1.1.1	Non	100
		A.1.1.2	Non	100
	Labels	A.2.1.1	Non	100
Recyclage et Remploi	Remploi de matériel	R.1.1.1	Non	100
		R.1.1.1	Oui	0
	Recyclage	R.2.1.1	Non	100
		R.2.1.2	Non	100
	Moyenne			100,0
				75,0
Responsable Développement Durable (RDD)	Politiques internes	G.1.1.1	Non	100
	Indicateurs	G.3.1.1	Non	100
		G.3.1.2	Oui	0
	Plan d'action	G.4.1.1	Non	100
	Investissement	G.5.1.1	Oui	0
	Moyenne			71,4
Ecoconception & certifications	Ecoconception des produits	E.1.1.1	Non	100
		E.1.1.2	Oui	0
	Certification	E.2.1.1	Non	100
Centre de données	Consommation énergétique	C.1.1.1	Non	100
	Impact environnemental	P.1.1.1	Non	100
	Moyenne			66,7
Poste de travail	Consommation énergétique	V.1.1.1	Non	100
		V.1.1.2	Non	100
	Moyenne			100,0
Virtualisation	Consommation énergétique	Cl.1.1.1	Non	100
		Cl.1.1.2	Non	100
	Moyenne			100,0
Cloud	Consommation énergétique	Cl.1.1.1	Non	100
	Politiques internes	Cl.1.1.1	Non	100
	Consommation de ressources	Cl.2.1.1	Non	100
Impression				
	Moyenne			100,0
Moyenne Globale			81,30952	

ANNEXE II : Exemple fictif : Évaluation du niveau 2

Domaine	Catégories	Identification	Évaluation	%		
Fabrication	Produits de fabrication	F.1.2.1 F.1.2.2	F. Fully Achieved L. Largely Achieved	100,00 66		
	Matériau première	F.2.2.1 F.2.2.2	N. Not Achieved L. Largely Achieved	0 66		
	Moyenne	A.1.2.1	N. Not Achieved	58		
Achat	Politique d'achat	A.1.2.1	N. Not Achieved	0		
	Labels	A.1.2.2 A.2.2.1	F. Fully Achieved P. Partially Achieved	100,00 33		
	Moyenne	A.2.2.1	Moyenne	44,3333333		
Recyclage et Réemploi	Remboursement du matériel	R.1.2.1 R.1.2.2	P. Partially Achieved N. Not Achieved	33 0		
	Revente	R.2.2.1 R.2.2.2	L. Largely Achieved P. Partially Achieved	66 33		
	Recyclage	R.3.2.1 R.3.2.2	F. Fully Achieved F. Fully Achieved	100,00 100,00		
	Dons	R.4.2.1 R.4.2.2	F. Fully Achieved P. Partially Achieved	100,00 33		
	Moyenne	R.4.2.2	N. Not Achieved	0		
	Responsable Développement Durable (DD)	Politiques internes	G.1.2.1 G.1.2.2	F. Fully Achieved F. Fully Achieved	100,00 100,00	
		Indicateurs	G.2.2.1 G.2.2.2	L. Largely Achieved L. Largely Achieved	66 66	
		Plan d'action	G.3.2.1 G.3.2.2	N. Not Achieved P. Partially Achieved	0 33	
		Investissement	G.4.2.1 G.4.2.2	L. Largely Achieved F. Fully Achieved	66 100,00	
		Moyenne	G.5.2.1 G.5.2.2	N. Not Achieved P. Partially Achieved	0 33	
Écoconception & Certifications		Écoconception des produits	E.1.2.1 E.1.2.2	P. Partially Achieved P. Partially Achieved	33 33	
		Cycle de vie	E.2.2.1 E.2.2.2	N. Not Achieved L. Largely Achieved	0 66	
		Certification	E.3.2.1 E.3.2.2	L. Largely Achieved F. Fully Achieved	66 100,00	
		Moyenne	E.3.2.2	F. Fully Achieved	52,1428571	
		Centre de données	Consommation énergétique	C.1.2.1 C.1.2	F. Fully Achieved F. Fully Achieved	100,00 100,00
	Fournisseur de centre de données		C.2.2.1 C.3.2.1	F. Fully Achieved F. Fully Achieved	100,00 100,00	
	Moyenne		C.3.2.1	Moyenne	100	
	Poste de travail		Impact environnementale	P.1.2.1 P.2.2.1	F. Fully Achieved P. Partially Achieved	100,00 100,00
			Consommation énergétique	P.2.2.1 P.2.2.2	F. Fully Achieved F. Fully Achieved	100,00 100,00
			Moyenne	P.2.2.2	Moyenne	77,6666667
Cloud			Consommation énergétique	V.1.2.1 V.1.2.2	L. Largely Achieved F. Fully Achieved	66 100,00
			Consommation énergétique	CL.1.2.1 CL.1.2.1	F. Fully Achieved L. Largely Achieved	100,00 83
			Moyenne	CL.1.2.1	Moyenne	83
			Impression	Politiques internes	I.1.2.1 I.1.2.2	P. Partially Achieved P. Partially Achieved
		Comportement		I.3.2.1 I.3.2.1	F. Fully Achieved F. Fully Achieved	100,00 100,00
		Moyenne		I.3.2.1	Moyenne	66,5
		Moyenne Globale			67,3135165	

BIBLIOGRAPHIE

- [1] « Le Jour du dépassement », *WWF France*. <https://www.wwf.fr/jour-du-depassement> (consulté le mars 29, 2021).
- [2] S. Mingay, « Green IT: The New Industry Shock Wave », *Green IT*, p. 7.
- [3] « La naissance du web | CERN ». <https://home.cern/fr/science/computing/birth-web> (consulté le oct. 19, 2020).
- [4] I. M. Hernandez, « Contributions to a Green IT project: definitions of use cases and first steps towards a power model for routers », Universitat Politècnica de Catalunya, España, 2011.
- [5] A. Molla, *Organizational Motivations for Green IT: Exploring Green IT Matrix and Motivation Models*. 2009.
- [6] Y. Wati et C. Koo, « An Introduction to the Green IT Balanced Scorecard as a Strategic IT Management System », *Green Finance Sustain. Environ.-Aware Bus. Models Technol.*, p. 10, janv. 2011, doi: 10.1109/HICSS.2011.59.
- [7] R. Sheikh et D. Lanjewar, « Green Computing-Embrace a Secure Future », *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 10, n° 4, nov. 2010, doi: 10.5120/1469-1984.
- [8] J. Quariguasi-Frota-Neto et J. Bloemhof, « An Analysis of the Eco-Efficiency of Remanufactured Personal Computers and Mobile Phones », *Prod. Oper. Manag.*, vol. 21, n° 1, p. 101-114, 2012, doi: 10.1111/j.1937-5956.2011.01234.x.
- [9] P. Chakraborty, D. Bhattacharyya, Y. S. Nargiza, et S. Bedajna, « Green computing: Practice of Efficient and Eco-Friendly Computing Resources », *Int. J. Grid Distrib. Comput.*, vol. 2, n° 3, sept. 2009, Consulté le: oct. 14, 2020.
- [10] N. Berman, M. Couttenier, D. Rohner, et M. Thoenig, « This Mine is Mine! How Minerals Fuel Conflicts in Africa », *Am. Econ. Rev.*, vol. 107, n° 6, p. 1564-1610, juin 2017, doi: 10.1257/aer.20150774.
- [11] « Notre Mission », *Fairphone*. <https://www.fairphone.com/fr/story/> (consulté le oct. 05, 2020).

- [12] « Gold », *Fairtrade Foundation*. <https://www.fairtrade.org.uk/buying-fairtrade/gold/> (consulté le oct. 01, 2020).
- [13] A. Govindasamy et K. Suresh Joseph, « Optimization of Operating Systems towards Green Computing », *Int J Comb Optim Probl Inform.*, vol. 2, n° 3, p. 39-51, 2011.
- [14] J. Gianoli, « Les écolabels informatiques à connaître », *GinjFo*, janv. 21, 2011. <https://www.ginjfo.com/espace-environnement/green-geek-attitude/les-ecolabels-informatiques-a-connaître-20110121> (consulté le oct. 14, 2020).
- [15] « EPEAT Criteria », *Green Electronics Council*. <https://greenelectronicscouncil.org/epeat-criteria/> (consulté le oct. 01, 2020).
- [16] « ENERGY STAR ». <https://www.energystar.gov/> (consulté le oct. 02, 2020).
- [17] « Office of Atmospheric Programs Climate Protection Partnerships 2014 Annual Report », p. 49, 2014.
- [18] F. S. C.- Canada, *Forest Stewardship Council Canada*. <https://ca.fsc.org:443/fr-ca> (consulté le oct. 01, 2020).
- [19] « Green companies, organisations & government bodies | Global Ecolabelling Network ». <https://globalecolabelling.net/gen-members/gen-full-members-list/> (consulté le oct. 21, 2020).
- [20] R. Ribault *et al.*, « Baromètre des pratiques Green IT des entreprises en France ». sept. 2020, Consulté le: oct. 01, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://alliancegreenit.org/media/ressource-publication/agit-barometre-green-it-2020-1-3.pdf>
- [21] O. Trudu, A. Pontal, et F. Bordage, « Quelle démarche Green IT pour les grandes entreprises françaises? », Le club GreenIT, WWF France, oct. 2018. [En ligne]. Disponible sur: <https://greenelectronicscouncil.org/>.
- [22] V. Forti, C. P. Baldé, R. Kuehr, et G. Bel, « The Global E-waste Monitor 2020 ». 2020, Consulté le: oct. 01, 2020
- [23] Center for Sustainable Systems, University of Michigan, « Green IT Factsheet », Pub. No. CSS09-07, 2019.
- [24] *DIRECTIVE 2012/19/UE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 4 juillet 2012 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE)*. .

- [25] « Une personne sur six n'utilise pas Internet, plus d'un usager sur trois manque de compétences numériques de base », INSEE, 1780, oct. 2019. Consulté le: nov. 03, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/4241397>.
- [26] A. Xavier, T. Reyes, A. Aoussat, L. Luiz, et L. Souza, « Eco-Innovation Maturity Model: A Framework to Support the Evolution of Eco-Innovation Integration in Companies », *Sustainability*, vol. 12, n° 9, Art. n° 9, janv. 2020, doi: 10.3390/su12093773.
- [27] Occurrence.fr, « Les Français face à l'écologie digitale ». 2018, Consulté le: oct. 14, 2020. [En ligne]. Disponible sur: http://occurrence.fr/newsite/wp-content/uploads/2018/06/Ecologie_digitale_V2.pdf.
- [28] « Our Commitments », *Google Sustainability*. <https://sustainability.google/commitments/> (consulté le oct. 27, 2020).
- [29] D. Guibard *et al.*, *Éco-conception des logiciels et services numériques*. 2013.
- [30] « 4.3. Using an ISO Formatted Date for Document IDs — Apache CouchDB® 3.0 Documentation ». <https://docs.couchdb.org/en/stable/best-practices/iso-date.html> (consulté le avr. 24, 2020).
- [31] « 10 Laws of Chaos », Standish Group, 2009. Consulté le: oct. 28, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.classes.cs.uchicago.edu/archive/2014/fall/51210-1/required.reading/Standish.Group.Chaos.2009.pdf>.
- [32] D. Przybyla et M. Pegah, *Dealing with the veiled devil: Eco-responsible computing strategy*. 2007, p. 301.
- [33] L. Ardito, G. Procaccianti, M. Torchiano, et A. Vetro, « Understanding Green Software Development: A Conceptual Framework », *IT Prof.*, vol. 17, p. 44-50, janv. 2015, doi: 10.1109/MITP.2015.16.
- [34] S. Nauman, M. Dick, E. Kern, et Ti. Johann, « The GREENSOFT Model: A reference model for green and sustainable software and its engineering », vol. 1, p. 294-304, déc. 2011, doi: 10.1016/j.suscom.2011.06.004.
- [35] « La certification écoresponsable, 4 niveaux », *Écoresponsable*. <https://www.ecoresponsable.net/la-certification-ecoresponsable-4-niveaux/> (consulté le nov. 01, 2020).

- [36] C. Vateau *et al.*, « Les KPI du Data Center ». 2017, Consulté le: oct. 01, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://alliancegreenit.org/media/les-kpi-du-datacenter-agit-france-datacenter-gimelec-2017.pdf>.
- [37] A. Hopper et A. Rice, « Computing for the future of the planet », *Philos. Trans. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 366, n° 1881, p. 3685-3697, oct. 2008, doi: 10.1098/rsta.2008.0124.
- [38] K. K. Nguyen, M. Cheriet, M. Lemay, V. Reijs, A. Mackarel, et A. Pastrama, « Environmental-aware virtual data center network », *Comput. Netw.*, vol. 56, n° 10, p. 2538-2550, juill. 2012, doi: 10.1016/j.comnet.2012.03.008.
- [39] K.-K. Nguyen, M. Cheriet, M. Lemay, M. Savoie, et B. Ho, « Powering a Data Center Network via Renewable Energy: A Green Testbed », *IEEE Internet Comput.*, vol. 17, n° 1, p. 40-49, janv. 2013, doi: 10.1109/MIC.2012.125.
- [40] « UpTime Institute ». <https://uptimeinstitute.com/> (consulté le nov. 02, 2020).
- [41] F. Bordage, « Data center : seulement 6% de hausse en 8 ans », *Green IT*, mars 04, 2020. <https://www.greenit.fr/2020/03/04/data-center-seulement-6-de-hausse-en-8-ans/> (consulté le oct. 01, 2020).
- [42] Q. Li et M. Zhou, « The Survey and Future Evolution of Green Computing », in *2011 IEEE/ACM International Conference on Green Computing and Communications*, août 2011, p. 230-233, doi: 10.1109/GreenCom.2011.47.
- [43] S. Dutta et A. K. Gupta, « Green computing: A greener approach towards IT », in *2016 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*, mars 2016, p. 50-53.
- [44] C. Reimsbach, « Towards Green ICT Strategies: Assessing Policies and Programmes on ICT and the Environment », *OECD Dir. Sci. Technol. Ind. OECD Digit. Econ. Pap.*, n° 155, janv. 2009, doi: 10.1787/222431651031.
- [45] « Gartner Identifies the Top 10 Strategic Technology Trends for 2020 », *Gartner*. <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2019-10-21-gartner-identifies-the-top-10-strategic-technology-trends-for-2020> (consulté le oct. 02, 2020).
- [46] T. Labaume, C. Vateau, S. Y. Monod, V. Barro, S. Lacroix, et S. Othmania, « Le Cloud est-il green? ou la réponse de l'AGIT à 10 idées reçues... » Alliance Green IT, avr. 07,

2014, Consulté le: sept. 20, 2020.

- [47] « The Chlorine Free Products Association (CFPA) ». <http://www.chlorinefreeproducts.org/index.php> (consulté le nov. 09, 2020).
- [48] E. Curry et B. Donnellan, « Understanding the Maturity of Sustainable ICT », in *Green Business Process Management: Towards the Sustainable Enterprise*, 2012.