



HAL
open science

La sobriété numérique dans les projets data : réalisation d'un projet écoresponsable

Lucas Boscherie

► To cite this version:

Lucas Boscherie. La sobriété numérique dans les projets data : réalisation d'un projet écoresponsable. domain_shs.info.docu. 2021. mem_03710056

HAL Id: mem_03710056

https://memsic.ccsd.cnrs.fr/mem_03710056v1

Submitted on 30 Jun 2022

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



le cnam
intd

Mémoire pour l'obtention du
**Master Sciences humaines et sociales mention humanités
numériques - Parcours Mégadonnées et analyse sociale
(MEDAS)**

**La sobriété numérique dans les projets data :
Réalisation d'un projet écoresponsable**

Lucas BOSCHERIE

Date et lieu de la soutenance

- 06/09/2021
- Visio-conférence : Zoom

Membres du jury

- Josselin Noirel, président jury
- Evelyne Broudoux, directrice, tutrice pédagogique
- Rémi Le Mauff, tuteur entreprise

Promotion (2019-2021)



Paternité Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification

BOSCHERIE Lucas. La sobriété numérique dans les projets data : Réalisation d'un projet écoresponsable. Mémoire professionnel MEDAS, Titre I, Ingénieur en data management. Conservatoire national des arts et métiers des Pays de la Loire - Promotion 2.

Le dérèglement climatique est une problématique actuelle et de plus en plus urgente. Afin de respecter les Accords de Paris et une limitation du réchauffement climatique à 2°C, il convient à la population mondiale de réfléchir à son rapport au monde et à son environnement. Le numérique, qui peut paraître immatériel aux yeux de certains, ne l'est pas. Depuis ses débuts, sa croissance n'a été qu'exponentielle et son empreinte carbone n'a fait qu'augmenter. La sobriété numérique apparaît comme la seule solution pour faire face aux enjeux climatiques du numérique. L'objectif de ce mémoire est de présenter les clés et les pistes de réflexion pour mettre en œuvre la sobriété numérique dans les projets informatiques, et plus précisément, data. Nous analysons également un cas concret de projet.

Descripteurs

Sobriété numérique
Ecoconception
Données
Informatique décisionnelle
Réchauffement climatique
Impact environnemental
Gouvernance
Usages
Infrastructure
Consommation d'énergie
Mesure

The climate deregulation is now an increasingly pressing matter. In order to respect the Paris Agreements and a limitation of global warming up to 2°C, we need to reflect on our relationship to the world and its environment. Digital may seem intangible, but it is not. Since its beginning, its growth has been exponential and its carbon footprint has only increased. Green IT and sobriety appears to be the only solution to face digital climate challenges. The objective of this master thesis is to present keys and lines of thought to enforce Green IT methodologies in IT projects, and more precisely, datas. We will analyze a concrete study case.

Keywords

Green IT
Sobriety
Digital technologies
Datas
Business intelligence
Global warming
Governance
Usages
Infrastructure
Energy consumption
Measure

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Evelyne Broudoux pour son accompagnement et nos échanges tout au long de la rédaction de ce mémoire.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance à Rémi Le Mauff, tuteur entreprise, pour sa confiance tout au long de ces deux années d'alternance et son aide précieuse autour de ces sujets de sobriété numérique.

Je désire aussi remercier toute l'équipe du groupe « Ethique et Data » de l'association ADN Ouest, avec qui nous avons pu organiser des webinaires et retours d'expérience autour de ce sujet : Christian Bonnin, Arnauld Castex, Simon Chiarisoli et Rémi Le Mauff. Nos échanges et réflexions ont grandement contribué à l'aboutissement de ce mémoire.

Enfin, merci à tout mon entourage pour ses relectures et corrections.

TABLE DES MATIERES

Remerciements	4
Table des matières	5
Introduction.....	7
1. Le Dérèglement Climatique	8
1.1. Les scopes d'émissions GES	9
1.2. Les énergies.....	10
1.3. Les ressources	10
2. Qu'est-ce que la sobriété numérique ?	12
2.1. Les apports du numérique pour la société	13
2.2. La sobriété numérique : une vision philosophique de recherche du bonheur	13
2.3. La sobriété numérique : une réflexion sur nos usages.....	15
2.4. Pourquoi la sobriété numérique ? Les impacts du numérique sur l'environnement	17
3. Problématique	21
4. Etat de l'Art	23
4.1. Les 4 leviers de la sobriété dans un projet data.....	23
4.2. Gouvernance d'un système de sobriété numérique.....	23
4.3. Infrastructure et Consommation d'Energie	28
4.3.1. Management environnemental des serveurs.....	28
4.3.2. Le choix de l'infrastructure : cloud ou on-premise ?	30
4.4. Ecoconception	33
4.4.1. Les réflexions d'écoconception	35
4.4.2. L'écodéveloppement.....	36
4.4.3. Maintenance et intégration continue	39
4.4.4. L'obsolescence	39
4.5. Mesures	39
Aparté : La métrologie	39
4.5.1. Analyse de cycles de vie	40
4.5.2. Autres outils de mesure	42
4.5.3. De la complexité de la mesure	43

5. Analyse environnementale d'un projet data de business intelligence	45
5.1. Treez Data Management	45
5.2. Un projet BI.....	45
5.2.1. Qu'est-ce que c'est ? Présentation du projet	46
5.2.2. L'enjeu de sobriété.....	52
5.2.3. La recherche de sobriété : une proposition du prestataire, en symbiose avec les valeurs du décideur client.....	54
5.3. Les mesures prises.....	54
5.3.1. Tentative de mesure	54
5.3.2. Le choix d'une infrastructure cloud	54
5.3.3. L'éco développement.....	57
5.3.4. Regard critique	65
Conclusion & Perspectives	67
Table des figures	70
Bibliographie	71
Annexes	73
Webinaires ADN Ouest	73

INTRODUCTION

Depuis ses débuts au milieu du XX^{ème} siècle avec la troisième révolution industrielle, le numérique n'a cessé de croître, pour aujourd'hui devenir central dans nos vies. Nos ordinateurs, smartphones, objets connectés nous accompagnent au quotidien, que ce soit pour consulter nos relevés bancaires, faire nos courses, se connecter et échanger avec nos amis, suivre notre rythme cardiaque...ou même dans notre travail où peu nombreux sont les métiers n'utilisant aucun outil informatique. Bien sûr, des dérives d'usage sont apparues : addictions, harcèlement, piratage, surveillance... Mais fondamentalement, le numérique n'est ni bon ni mauvais. « C'est une technologie inventée par l'humanité, au même titre que la roue, l'agriculture ou le moteur à explosion ». « Il sera ce que les hommes en feront » (Autissier, préface de Bordage, 2019). Pour l'Homo Numericus (l'homme de Cro-Magnon du numérique), le numérique est le feu que l'on tente d'appivoiser. « Comment le guider pour qu'il fertilise le champ de l'humanité plutôt qu'il consume la biodiversité des forêts primaires ? »

La crise sanitaire, en généralisant le télétravail, a encore augmenté et développé les usages et la dépendance au numérique des populations. Dans des moments où la 5G fait débat et où la crise climatique actuelle devient une fatalité, nous nous demandons quelle est la place du numérique dans ce nouveau monde ?

Les acteurs du numérique peuvent se percevoir immatériels (avec le *cloud*) et efficaces, les amenant à se considérer intrinsèquement écologiques. Tout comme une partie de la population. Leur constante dynamique d'innovation leur fait d'abord voir les opportunités. Et bien plus tard les risques.

Pour faire face au dérèglement climatique et à la croissance quasiment infinie du numérique, émergent de nouvelles disciplines comme le Green IT ou la sobriété numérique. Est-il possible de rendre sobre des pratiques aux croissances exponentielles ?

Nous verrons quels sont les enjeux de la sobriété numérique et comment la mettre en place dans une entreprise ou organisation. Nous terminerons par la présentation de la mise en place concrète d'un projet sobre, et les enjeux et problématiques rencontrés.

1. LE DEREGLEMENT CLIMATIQUE

Le dérèglement climatique (ou changement climatique), causé par le réchauffement global, entraîne une augmentation d'évènements météorologiques aux conséquences graves pour les populations et infrastructures touchées : ouragans, canicules, sécheresses... Depuis l'origine, le changement climatique est présent, dû « à des processus intrinsèques à la Terre, à des influences extérieures » (orbite terrestre, soleil...) (Wikipédia). Cependant, le dérèglement climatique actuel est dû, en partie, aux activités humaines, fortes émettrices de gaz à effet de serre (GES). C'est l'augmentation de ces GES qui est à l'origine du réchauffement global. Plus il y a de GES dans l'atmosphère, plus la Terre emprisonne de l'énergie solaire (chaleur). Leur augmentation « exponentielle est en grande partie liée aux conséquences de la révolution industrielle, puis de la mondialisation » (Bordage, 2019 p. 143). Ce *stockage* de chaleur mène à ce que l'on appelle le réchauffement global. La température moyenne à la surface de la Terre a augmenté de 0,9 °C entre 1901 et 2012, l'objectif aujourd'hui est de rester « en deçà d'une élévation de 2°C » (Accords de Paris). Le réchauffement global, a également des impacts sur la biodiversité de nos environnements. Actuellement, elle « s'écroule à un rythme 100 à 1000 fois supérieur à son rythme naturel » (Bordage, 2019 p. 38). La biodiversité a un réel impact bénéfique sur les activités humaines : insectes pollinisateurs... « La valeur des services rendus aux êtres humains par l'écosystème planétaire est estimée à environ deux fois le produit intérieur brut mondial ».

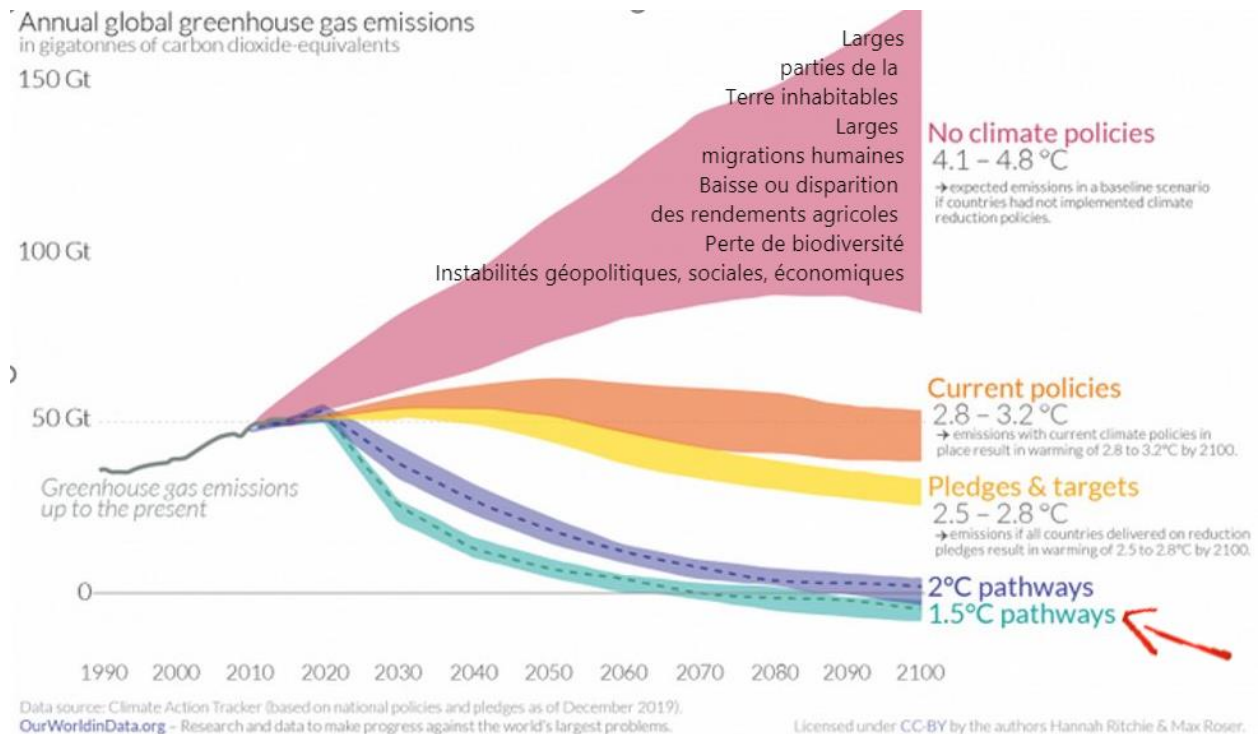


Figure 1 : Projections d'émissions de GES annuelles selon différentes politiques - Climate Action Tracker

Alors que les Accords de Paris de 2016 ont un objectif de limiter le réchauffement global à 1,5 °C par rapport au niveau préindustriel, le consortium Climate Action Tracker constate que les

politiques internationales actuelles (en décembre 2019) ne limiterait le réchauffement qu'à 3,2 °C, ce qui ne respecterait même pas les objectifs de la conférence de Copenhague en 2009 !

L'un des gaz à effet de serre le plus connu (et le plus médiatisé) est le dioxyde de carbone (ou CO₂, et pas seulement le carbone). C'est le principal GES que les activités humaines émettent. En plus du dioxyde de carbone, les autres GES « naturels majeurs sont la vapeur d'eau (H₂O) et le méthane (CH₄) » (Bordage, 2019 pp. 41-42). Pour les émissions anthropiques, le méthane provient de l'élevage tandis que la vapeur d'eau est issue de la fabrication d'électricité dans les centrales nucléaires. Le CO₂ intéresse beaucoup plus le monde médiatique car il provient de plus de sources : moteurs des véhicules, chauffage, cuisson, eau chaude, et combustion d'énergies fossiles. La mesure des GES s'effectue en kilo équivalent CO₂. Elle « permet d'additionner des quantités de GES de différentes natures » et « s'effectue en fonction du potentiel de réchauffement global de la molécule à 100 ans ».

1.1. Les scopes d'émissions GES

Les normes et méthodes internationales définissent et classifient les émissions de GES en 3 catégories :

- Le scope 1 (ou émissions directes). Ce sont les émissions de GES « provenant des installations fixes ou mobiles situées à l'intérieur du périmètre » (ADEME) de l'entreprise ou de l'organisation. Ceci représente tout ce qui est directement lié à l'activité de l'organisation.
- Le scope 2 (ou émissions à énergies indirectes). « Emissions indirectes associées à la production d'électricité, de chaleur ou de vapeur importée pour les activités de l'organisation ». C'est-à-dire toutes les émissions correspondant à la consommation d'électricité de l'organisation.
- Le scope 3 (ou autres émissions indirectes). Ce sont toutes les autres émissions non comptabilisées dans le scope 2 mais qui découlent de la « chaîne de valeur complète comme par exemple : l'achat de matière première, de services ou autres produits, déplacement des salariés, transport amont et aval des marchandises, gestion des déchets générés par l'activité de l'organisme, utilisation et fin de vie des produits et services vendus » ...

En général, lors de la réalisation de leur bilan carbone, les entreprises ne prennent en compte que les scopes 1 et 2 et « oublient » le scope 3. De plus, pour Frédéric Bordage, mesurer un équivalent CO₂ seulement au niveau national, voire organisationnel, n'a pas de sens. Le calcul des émissions CO₂ par pays « ne tient pas compte des émissions cachées, c'est-à-dire de toutes les émissions qui se produisent en Chine, par exemple lors de la fabrication de nos équipements numériques. C'est la magie du protocole de Kyoto qui laisse croire que nos émissions décroissent à mesure que nous nous désindustrialisons, alors qu'elles sont juste déplacées » (Bordage, 2019 pp. 95-96).

1.2. Les énergies

L'énergie est une « mesure de la capacité d'un système à modifier un état, à produire un travail entraînant un mouvement, un rayonnement électromagnétique ou de la chaleur » (Wikipédia). Le collectif Green IT distingue l'énergie finale de l'énergie primaire. L'énergie finale peut notamment prendre « la forme de l'électricité » tandis que l'énergie primaire « est le potentiel énergétique contenu dans 1l de pétrole, 1kg de charbon, 1 heure de rayonnement solaire, » etc (Bordage, 2019 p. 89). C'est donc l'énergie primaire qui est transformée en énergie finale pour faire fonctionner nos appareils électroniques par exemple. En plus de cette énergie finale électrique alimentant nos appareils numériques, n'oublions pas qu'il existe également ce qu'on appelle « énergie grise » ou cachée. C'est l'énergie nécessaire pour la fabrication d'un objet.

Dans les différentes énergies primaires existantes, on peut également distinguer les énergies renouvelables des énergies fossiles et fissiles. Les énergies renouvelables sont celles qui proviennent d'une source « inépuisable à l'échelle anthropique : le Soleil, le vent... ». Pour Frédéric Bordage, « les notions de « renouvelables » et de « bon pour la planète » » sont bien distinctes car la transformation de l'énergie primaire à l'énergie finale a des impacts environnementaux différents en fonction de la source : « la fabrication des panneaux photovoltaïques pollue et contribue à l'épuisement des ressources abiotiques ».

De la même manière, l'énergie fissile (uranium et le nucléaire) a des impacts environnementaux importants : « l'extraction de l'uranium dégrade l'écosystème », « requiert des engins de chantier qui émettent des GES » et « de très grandes quantités d'eau sont nécessaires pour contrôler la réaction nucléaire ».

L'énergie fossile (charbon, pétrole...) est celle ayant les impacts environnementaux les plus importants. En revanche, le débat semble ouvert entre l'énergie renouvelable et fissile. Frédéric Bordage (président du collectif GreenIT.fr), tout comme une partie d'EELV, semble prendre le parti des énergies renouvelables et notamment de l'électricité à origine hydraulique (barrage). Jean-Marc Jancovici (président du Shift Project et associé de Carbone 4) a un discours complètement différent. Selon lui, le nucléaire est l'énergie la plus neutre carbone, car elle n'oblige pas à démarrer des centrales à énergie fossile en l'absence de vent ou de soleil, et il milite donc pour que la France ne stoppe pas ses centrales nucléaires. (Jancovici, 2011)

1.3. Les ressources

Une ressource naturelle « est une substance, un organisme, un milieu ou un objet présent dans la nature, sans action humaine, et qui fait, dans la plupart des cas, l'objet d'une utilisation pour satisfaire les besoins des humains, animaux ou végétaux » (Wikipédia). Les ressources abiotiques désignent les ressources naturelles non renouvelable (à l'échelle anthropique). Aujourd'hui, c'est la fabrication de nos équipements numériques qui « nécessit[e] une grande quantité de ressources abiotiques » (Bordage, 2019 p. 92). L'épuisement des stocks de ces ressources de minerais est un enjeu environnemental majeur.

Le coltan, métal extrait en République démocratique du Congo, est utilisé pour fabriquer des condensateurs, composant électronique indispensable pour nos équipements numériques. En plus de ses impacts environnementaux, l'extraction de minerai se fait via le travail forcé de plus de 40 000 enfants, finance les groupes armés et déséquilibre la région (Amnesty International, 2016). Qui est responsable de ces maux ? L'extracteur forçant les enfants, le client de l'extracteur fabricant de nos chers téléphones et ordinateurs ou nous-mêmes – utilisateurs finaux, conscient de l'origine de nos équipements mais, fermant les yeux sur tous ces problèmes ?

L'eau, ressource indispensable à la vie se raréfie et sa qualité se dégrade. C'est l'une des rares ressources renouvelables dont les stocks à l'avenir doivent nous préoccuper. Car renouvelable ne veut pas dire illimité.

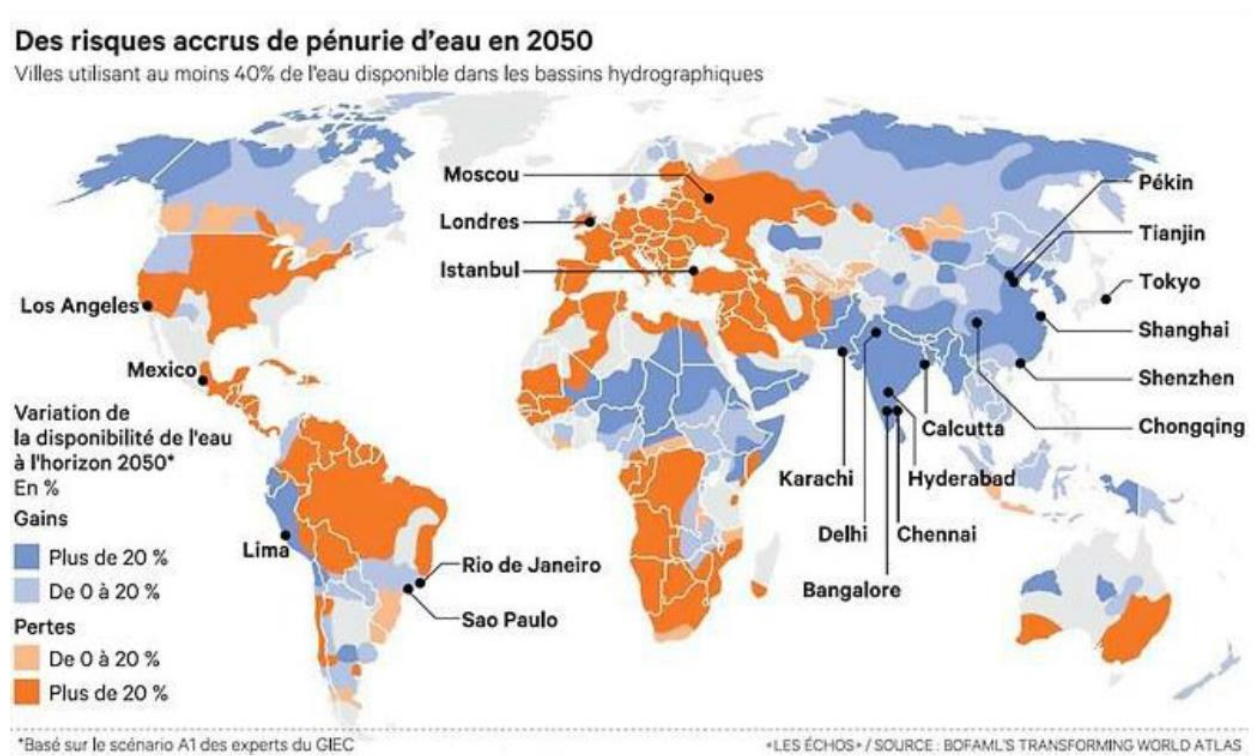


Figure 2 : Les risques de pénurie d'eau - Les Echos (2015)

Si l'on évoque l'eau, c'est parce que « l'empreinte eau du numérique » représente « deux fois la consommation d'eau douce des français » et équivaut à « un pack d'eau minérale de 6l par jour » et par individu. L'eau est utilisée dans le numérique pour le refroidissement des serveurs, la fabrication des infrastructures physiques (scope 3 des émissions) ...

2. QU'EST-CE QUE LA SOBRIETE NUMERIQUE ?

En parallèle des enjeux environnementaux, les performances du numériques ont crû de manière exponentielle. Ainsi, dès 1965, Gordon Moore, cofondateur d'Intel, annonce ce qui deviendra par la suite les lois (empiriques) de Moore :

- La complexité des semi-conducteurs proposés en entrée de gamme doublait tous les ans à coût constant depuis leur invention en 1959. Gordon Moore postule alors la poursuite de cette croissance.
- En 1975, l'ingénieur réévalue sa prédiction. Le nombre de transistors des microprocesseurs sur une puce de silicium double tous les deux ans.
- Ces postulats de Moore ont ensuite été extrapolés communément en devenant « quelque chose double tous les 18 mois ». Ce quelque chose pouvant être la puissance, la capacité, la vitesse...

Moore's Law: The number of transistors on microchips doubles every two years Our World
in Data

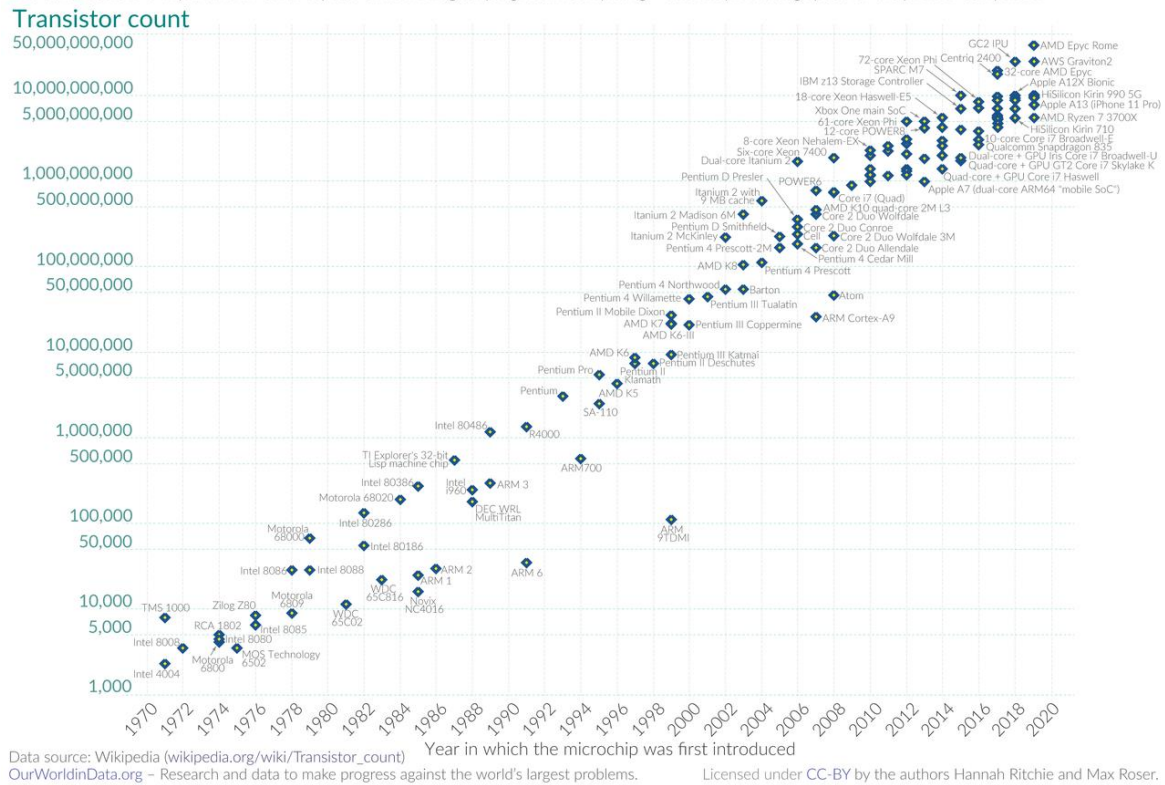


Figure 3 : Loi de Moore - Doublement du nombre de transistor

Ces postulats se sont avérés exacts puisqu'entre 1971 et 2001, la densité des transistors a doublé toutes les 1,96 années. On constate également que ces cycles de 18 mois de doublements du nombre de transistors rend nos ordinateurs rapidement obsolètes.

On peut également rappeler qu'en 1969, les Etats-Unis envoient la première fusée sur la Lune, à 384 400 km de la Terre, avec un volume de donnée de 70 ko (kilo-octets). C'est la capacité de

stockage de l'ordinateur de bord de la mission Apollo. Aujourd'hui, une simple photo pèse aux alentours de 1,5 Mo (méga-octets), soit 21 fois plus !

2.1. LES APPORTS DU NUMERIQUE POUR LA SOCIETE

Indubitablement, l'avènement du numérique a apporté à notre société de nombreux bienfaits. Le numérique n'est qu'un outil et ses apports sociétaux dépendent de l'usage qu'en font les Hommes. Comme toute innovation de rupture, des dérives sont apparues et il a été nécessaire d'en encadrer les pratiques.

Nous sommes tous conscients que le numérique a été une source de progrès pour la médecine (passer une IRM, séquencer un génome, détecter des cancers grâce à l'I.A.), pour la diffusion et le partage de connaissances à travers le monde (internet, Wikipédia) (Bordage, 2019). Il est également source de promesse, la *civic tech* pourrait permettre aux citoyens d'être plus actifs dans la vie démocratique, grâce à la transparence des institutions et même l'ouverture des données publiques (open data). N'importe qui peut se procurer des données publiques afin de les travailler et d'en tirer de la valeur pour la communauté. Le numérique et l'internet ont l'avantage de « libérer l'information des censures arbitraires des pouvoirs » et « peut alors participer à la constitution d'une belle sphère de conscience planétaire ».

En parallèle avec le sujet de Sobriété numérique et de Green IT, une nouvelle discipline émerge : l'IT for Green ou Green by IT. Le but est de (aider à) résoudre les défis climatiques par et grâce aux innovations du secteur numérique.

2.2. LA SOBRIETE NUMERIQUE : UNE VISION PHILOSOPHIQUE DE RECHERCHE DU BONHEUR

On trouve les origines du concept de sobriété dans l'Antiquité grecque et latine ainsi que dans le Moyen Age, avec les concepts de « tempérance » et de « frugalité » qui constituent le chemin du bonheur. Pour Aristote, la « tempérance est une vertu permettant d'atteindre un équilibre entre deux excès dangereux ». En suivant ce raisonnement, la sobriété numérique n'est donc pas l'abstinence (couper tous les équipements numériques) ni la dépendance. Dès l'Antiquité, les Grecs savent que la vertu demande pratique et discipline (Bulliard, 2020). Pour appuyer ces dires, nous pouvons reprendre l'exemple de Pierre Rabhi, décrivant la « sagesse ancestrale » d'un village africain du Sahel, découvrant les engrais apportés par « des Blancs ». Les engrais leur ont « permis d'obtenir deux fois plus de récolte que le fumier ». Le Doyen répond « puisqu'elle permet d'abondantes récoltes (...), nous pourrions désormais nous contenter de ne cultiver que la moitié de nos parcelles ». On peut y mettre en comparaison les Trente Glorieuses et le mouvement de mai 1968. Pour Pierre Rabhi, « les excès de l'avoir aboliss[ent] les besoins de l'être, la société de consommation créant simultanément besoins et frustrations » (Rabhi, 2010), lors des Trente Glorieuses. En réponse, le mouvement de Mai 68 a pu exprimer un désir (sous-

jaçant) de modération. « Surabondance et bonheur ne vont pas forcément de pair ; parfois même ils deviennent antinomiques ».

La décroissance est souvent perçue (à juste titre ?) négativement comme un retour en arrière. On a alors fait émerger d'autres termes comme la sobriété heureuse, du mouvement colibris qui propose une alternative joyeuse et constructive. L'écologiste américain Amory Lovins a instauré une notion de « Facteur 4 » : « Deux fois plus de bien-être en consommant deux fois moins de ressources ». L'idée est « qu'il est possible de doubler la richesse et le bien-être de l'humanité tout en diminuant par deux notre impact sur les ressources » (Bordage, 2019 p. 95). Pierre Rabhi, lui, cite l'économiste Roegen pour qui, « la seule économie qui vaille c'est celle qui produit du bonheur avec de la modération ».

Aujourd'hui, les technologies sont en opposition à ces concepts de frugalité et participent à une accélération du temps social. Elles nous déchargent de certaines tâches tout en augmentant le nombre de possibilités. La modernité et « la prolifération des outils semble[nt] avoir pour seul but de nous rendre la frénésie supportable », Rabhi cite également des amis du tiers-monde « Les Occidentaux inventent des outils pour gagner du temps et sont obligés de travailler jour et nuit », depuis la révolution industrielle (Rabhi, 2010). Comme le dit le journaliste Bruno Patino, « le nouveau capitalisme numérique est un produit et un producteur de l'accélération générale. Il tente d'augmenter la productivité du temps pour en extraire encore plus de valeur » (Patino, 2019). Cette accélération du temps crée un sentiment de manque de temps, augmente notre mal-être général et nous plonge dans ce que le philosophe Bernard Stiegler (cité par Dominique Bulliard, 2020) nomme l'immédiateté permanente, diminuant notre capacité à nous projeter dans le temps. La capacité d'attention de la génération Millenials est de 9 secondes, soit une seconde de plus que la capacité de concentration d'un poisson rouge (Patino, 2019). Le numérique fait se mélanger les sphères privées et professionnelles comme on peut le voir en ces périodes de télétravail contraint : les managers peuvent joindre plus facilement leurs collaborateurs, les étudiants leurs professeurs. Cette hyperdisponibilité augmente ce sentiment de manquer de temps pour soi, tandis que les réseaux sociaux en proposant des amitiés « dématérialisées » n'ont fait que se renforcer les sentiments de solitude. Les outils numériques (et donc les réseaux sociaux) ne serviraient qu'à « connecter vaille que vaille les solitudes d'une société en mal de lien social » (Rabhi, 2010). Pierre Rabhi ajoute que la sobriété c'est aussi instaurer une « existence où les rythmes et les cadences, les outils et les moyens seraient maîtrisés par une conscience individuelle et collective ».

Ainsi, le numérique tout en augmentant ses potentialités diminue nos capacités mentales et mnésiques. Stiegler suggère d'établir une « culture du numérique » nous permettant d'établir avec les outils numériques un rapport qui soit vraiment nécessaire et **sobre**, passant par une décélération de nos vies.

Netflix, Youtube et les autres, par leurs techniques de marketing tentent de capter et garder notre attention le plus longtemps possible, notamment grâce aux fonctionnalités de lecture automatique et créent une dépendance. C'est l'économie de l'attention. Les Français de 18-24 ans consultent en moyenne 50 fois par jour leur smartphone et pour 40 % d'entre eux c'est leur premier réflexe au réveil (Deloitte, 2016). En parallèle, une étude du Journal of Society and Clinical Psychology « évalue à 30 minutes le temps maximum d'exposition aux réseaux sociaux et aux écrans d'Internet au-delà duquel apparaît une menace pour la santé mentale » (Patino, 2019). Cette dépendance est semblable à un psychotrope : les messages clignotant sur l'écran entraînent une montée de dopamine, aussi appelée « molécule du plaisir », de la récompense et de la dépendance. « L'accélération du temps a remplacé la satisfaction par la dépendance » (Patino, 2019). Mais le plaisir n'est-il pas associé au bonheur ? Pour Dominique Bulliard, le bonheur « demande de modérer nos désirs et d'écarter ceux qui ne sont pas nécessaires ». Ce qui n'est pas simple au vu du nombre colossal de moyens que les géants du numérique mettent en œuvre pour capter l'attention et imposer des désirs (exemple : la difficulté qu'ont les parents à limiter les temps d'écran, par rapport aux débuts d'addictions au numérique des enfants).

D'après Dominique Bulliard, la sobriété numérique est « bel et bien une vertu, soit une pratique visant la recherche d'un équilibre entre des excès pouvant mener individuellement à la dépendance, et collectivement à une pollution destructrice. »

Si la sobriété est nécessaire pour des raisons sociales et écologiques, elle l'est aussi pour des raisons éthiques de recherche du bonheur, ce que les Grecs nommaient *la vie bonne*. « C'est notre capacité à entrer en relation avec ce qui nous entoure mais aussi avec nous-même qui est en jeu ».

2.3. LA SOBRIETE NUMERIQUE : UNE REFLEXION SUR NOS USAGES

The Shift Project est une association française dont l'objectif est la diminution du changement climatique et la réduction de la dépendance de l'économie aux énergies fossiles. En octobre 2020, le « think tank » publie son troisième rapport sur l'impact environnemental du numérique « Déployer la sobriété numérique ». Le même mois, le Cigref, association dont la mission est de « réussir le numérique », publie en partenariat avec le Shift le rapport « Sobriété numérique – une démarche d'entreprise responsable ». En plus de donner des clés pour mettre en place la sobriété numérique au sein des organisations, ces deux rapports apportent une définition commune de ce qu'est la sobriété numérique.

Alors que le numérique continue de croître exponentiellement en termes d'infrastructures, de matériels et de logiciels, le terme de sobriété numérique apparaît en France en 2008, traduction française de « Green IT », par Frédéric Bordage, dans le cadre du collectif GreenIT.fr. Il la définit alors comme une « démarche consistant à concevoir des services numériques plus sobres et à modérer ses usages numériques quotidiens ». La sobriété numérique englobe une dimension

systémique qu'on ne retrouve pas forcément dans le concept de Green IT, car elle doit concerner « l'ensemble des acteurs avec, par et pour le numérique » (Cigref, 2020). Elle est donc une démarche transverse aux organisations, avec des enjeux tant stratégiques qu'opérationnels.

La sobriété numérique consiste à concevoir des services numériques plus sobres en consommation énergétique et à modérer ses usages numériques quotidiens, avec un « aspect comportemental fort qui pousse à modérer l'explosion des usages et la démultiplication des équipements » (Cigref, 2020), tout en réduisant l'empreinte environnemental sur tout le cycle de vie des services. Il ne faut donc pas oublier la sensibilisation des utilisateurs et collaborateurs sur l'impact environnemental des technologies du numérique. « Mieux comprendre permet de mieux agir en conséquence ». L'objectif de la sobriété numérique est de ramener le numérique « à un niveau compatible avec les contraintes environnementales » et en préservant « ses apports sociétaux essentiels ».

Les usages du numérique sont profondément liés à l'aspect physique des infrastructures. Ainsi, la croissance du volume de données entraîne également le développement des infrastructures, serveurs et datacenters permettant de stocker, traiter ces nouvelles datas. De même, la présence de ce grand volume de données (« Big Data »), développe la possibilité de nouveaux usages tels que « l'Intelligence Artificielle » et ses algorithmes de Machine Learning. Ces nouveaux usages nécessitent eux-mêmes un développement des infrastructures physiques permettant des calculs de plus en plus complexes réalisés dans un temps quasi instantané. Plus les ressources sont disponibles, plus elles sont utilisées. La sobriété numérique répond donc ici à une question de bon sens : « savoir faire les bons choix en fonction de la valeur apportée par le numérique pour l'entreprise vis-à-vis des risques pour l'environnement ». D'après le Cigref, « on constate un décrochage entre la vitesse du progrès technologique (loi de Moore) et le besoin en puissance de calcul : celui-ci augmente désormais d'un facteur 100 tous les 2 ans, alors que la puissance des processeurs ne fait *que* doubler tous les deux ans. Le gain de performance marginal revient donc de plus en plus cher d'un point de vue énergétique ».

La sobriété numérique doit appeler à « tirer parti de nos capacités d'analyse » pour « passer d'un numérique devenu instinctif à un numérique conscient et réfléchi » (The Shift Project, 2020). Tout en restant dans cette problématique de conservation des apports sociétaux essentiels, le Shift Project appelle à identifier les apports « à préserver et à développer afin de pouvoir leur allouer en priorité les ressources disponibles ».

On constate donc que la sobriété numérique n'a pas pour objectif étié de rendre nulle l'empreinte environnementale du numérique. Pour que le numérique soit « neutre carbone », la solution est simple. Il suffirait d'éteindre tous les serveurs et appareils numérique (même dans ce cas, le numérique ne serait pas neutre avant le recyclage complet et fin de vie de tous les composants des infrastructures). Au vu des bénéfices humains du numérique, il n'est pas possible d'imaginer cette solution applicable durablement. Ainsi, le Shift Project et Dominique Bulliard

sont en phase sur la notion d'équilibre « entre deux excès ». Cette démarche de sobriété numérique nécessite donc des réflexions de la part de la population pour comprendre comment concevoir les services et infrastructures de manière plus sobre, durable et respectueuse de l'environnement mais aussi des attentes en termes d'usage. De même, nous devons apprendre à modérer nos usages du numérique.

2.4. POURQUOI LA SOBRIETE NUMERIQUE ? LES IMPACTS DU NUMERIQUE SUR L'ENVIRONNEMENT

Le numérique est le secteur dont l'empreinte environnementale croît le plus vite. Frédéric Bordage chiffre les impacts environnementaux annuels du numérique associé à un salarié en France : « 5740 kWh d'énergie primaire ; 800 kg de gaz à effet de serre ; 14 000 l d'eau ; 3kg de déchets électroniques », soit, pour une journée de travail d'un salarié : « 2 radiateurs de 600 W allumés pendant huit heures ; 29 km parcouru en voiture ; 1 douche ou 9 packs d'eau de 6 l ; 15 g de déchets électroniques (soit un smartphone tous les 10 jours) » (Bordage, 2019). Ces équivalents journaliers nous montrent que la journée de travail d'un salarié français équivaut approximativement à un second humain (1 douche par jour, 2 radiateurs pendant huit heures...)

D'après le Shift Project, la production et l'utilisation du numérique sont responsables de 4% des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) mondiales, soit 1,5 fois plus que le transport aérien (Müller, 2020). Dans un scénario émis par le Shift, sans sobriété numérique, cette part pourrait atteindre les 7 à 8% d'émissions mondiales dès 2025. A noter que même dans un scénario de sobriété, on atteindrait tout de même les 5 %.

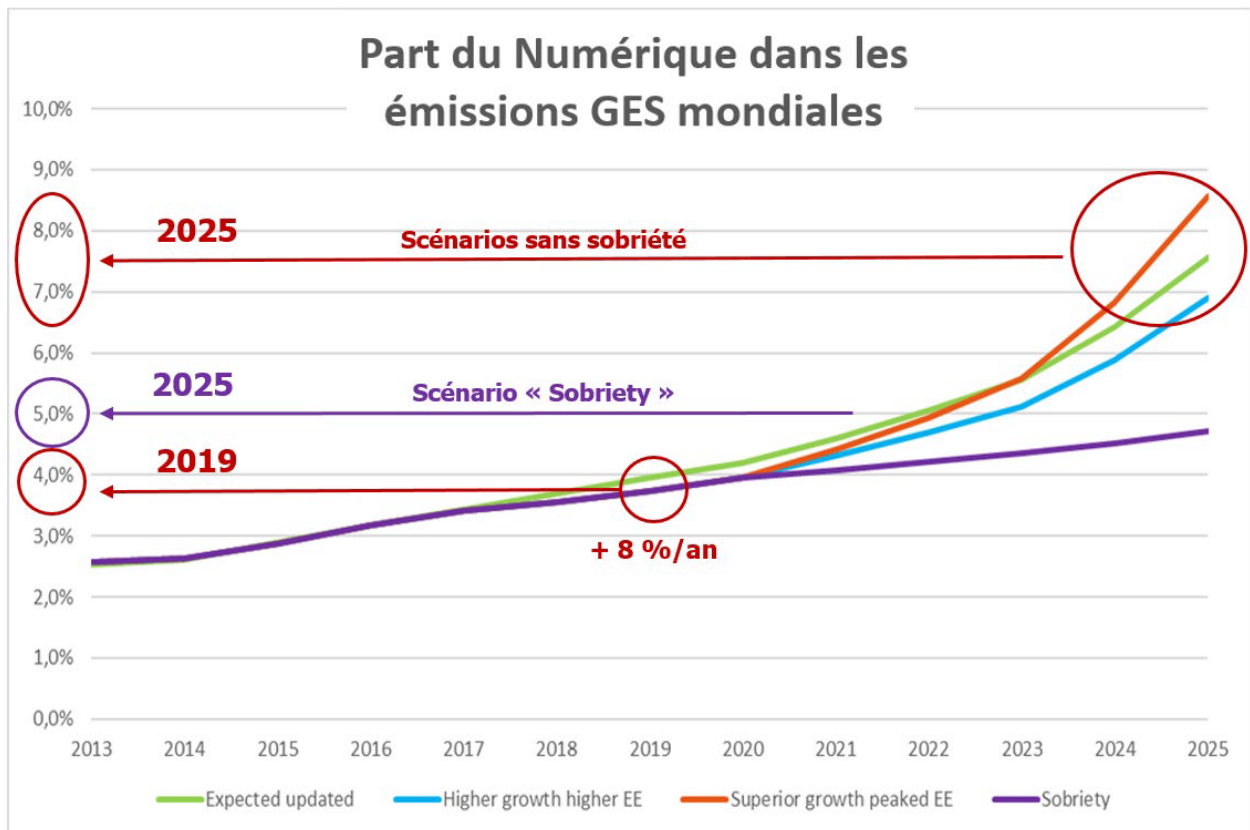


Figure 4 : Les émissions de GES du numérique - The Shift Project

Pour comparaison, on attribue 2 % des émissions au transport aérien civil, tandis que 8 % représente également la part d'émissions des voitures et deux roues.

Les accords de Paris, dont l'objectif est de limiter le réchauffement à + 2°C, nécessiterait une réduction des émissions mondiales d'au moins 5 % par an. On constate bien évidemment que le numérique, même dans le scénario « Sobriety » proposé par le Shift n'est actuellement pas en mesure de réduire ses émissions, seulement de les limiter.

Le rapport de GreenIT.fr « Empreinte environnementale du numérique mondial », nous apprend qu'en 2019, il existe 34 milliards d'équipements pour seulement 4,1 milliards d'utilisateurs ; soit 8 appareils par utilisateur. En plus des émissions de GES, le numérique est responsable de 4,2 % de la consommation d'énergie primaire¹, 0,2 % de la consommation d'eau et 5,5 % de la consommation d'électricité².

Le collectif GreenIT hiérarchise les sources d'impact par ordre décroissant :

1. La fabrication des équipements utilisateurs


¹ L'énergie primaire (EP) est l'énergie nécessaire pour fabriquer l'énergie finale. Exemple : pour extraire du minerai, on utilise du gasoil, l'électricité est fabriquée à partir de différentes sources d'énergie primaire : rayonnement solaire, vent, nucléaire, charbon...

² Le collectif GreenIT ne considère pas la consommation d'électricité comme un indicateur pertinent car son impact sur l'environnement dépend fortement du mix énergétique de la région, et donc de l'énergie primaire.

Etapes d'extraction des minerais et transformation en composants électroniques
 « qui induisent des impacts : épuisement de ressources abiotiques, pollution, émissions de GES, etc.. »

2. La consommation électrique des équipements utilisateurs
3. La consommation électrique du réseau
4. La consommation électrique des centres informatiques
5. La fabrication des équipements réseau
6. La fabrication des équipements et des centres informatiques (serveurs...)

Les équipements utilisateurs représentent 60 % (30 % pour la fabrication et 30 % pour l'utilisation) du bilan d'Énergie Primaire du numérique mondial en 2019. C'est **l'utilisation** des réseaux et des centres informatiques qui concentre la majeure partie du reste de l'électricité du numérique (35 %), contre seulement 5 % pour la fabrication de ces équipements (GreenIT.fr, 2019).

 Bilan EP	Fabrication	Utilisation	Total
Utilisateurs	30%	30%	60%
Réseau	3%	20%	23%
Centres informatiques	2%	15%	17%
	35%	65%	

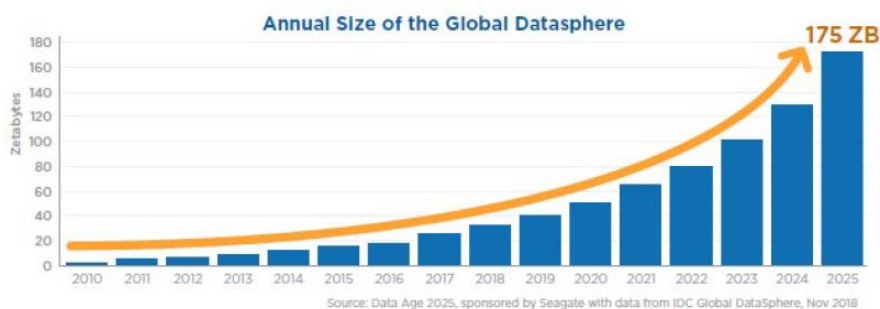
Bilan énergie primaire 2019

Figure 5 : Bilan d'EP par typologie d'équipement – GreenIT.fr

Suite à des années de numérisation d'un grand nombre de processus, les systèmes d'informations sont devenus « obèses » et composés « d'obésiciels ». Avec un très grand nombre de fonctionnalités intégrés au SI, celui-ci devient une véritable « usine à gaz ». Frédéric Bordage appelle à réfléchir à l'utilité du numérique dans certaines situations. Nous avons tendance à faire et nous permettre un *tout numérique*. Par exemple, une IA permet aujourd'hui de détecter certains cancers avec un gain de fiabilité indéniable. Mais, le projet Kdog de l'Institut Curie a fait aussi bien avec des chiens et leur sens de l'odorat !

De même, la dématérialisation en numérique de tout ce qui était papier aurait pu diminuer la quantité d'impression réalisées. Mais non. La raison est simple, « il est beaucoup plus facile d'imprimer 50 exemplaires d'un rapport de 200 pages que de photocopier celles-ci une par une » (Bordage, 2019). C'est l'effet rebond, ou paradoxe de Jevons : à mesure que les progrès technologiques améliorent l'efficacité avec laquelle une ressource est employée, la consommation totale de cette ressource peut augmenter au lieu de diminuer. Globalement, la numérisation des documents a un effet de démultiplication. Il est plus facile d'imprimer, on

imprime donc plus. De même, le stockage numérique et l'impression entraînent une redondance et une démultiplication car on stocke plus facilement deux fois le même document sur des supports différents.



*Figure 9 - les courbes d'explosion des données autrefois synonymes de croissance deviennent très préoccupantes
Source : (Reinsel, D., Gantz, J., Rydning, J., 2018)*

Figure 6 : Evolution du volume de données mondial - The Shift Project

Selon une étude du cabinet de recherche international IDC, « le volume de données stockées atteindra 175 Zo (zettaoctets) en 2025, soit 5,3 fois plus que ce qui était stocké en 2018 » (The Shift Project, 2020). Chaque octet supplémentaire c'est de l'électricité supplémentaire, non neutre pour l'environnement. Réduire nos émissions de GES, c'est donc aussi réduire le volume de données stockées.

Déjà aujourd'hui, l'impact environnemental du numérique est majeur. Mais les projections de croissance du numérique dans des scénarios qui se baseraient sur la continuité actuelle du développement du numérique, présagent que le numérique pourrait bel et bien devenir une catastrophe environnementale. Il apparaît alors nécessaire de repenser nos usages et conceptions du numérique, comme on a pu le faire avec le développement de l'agriculture biologique, des espaces verts, l'arrêt programmé des énergies fossiles pour la production électrique...

3. PROBLEMATIQUE

Qu'est-ce qu'un projet data ?

L'explosion du volume de données échangées et stockées mondialement ces dernières années nous amène à nous interroger sur leur coût environnemental. La donnée en elle-même n'est pas négative pour l'environnement. Mais son stockage, son traitement et son échange l'est, à la même échelle que d'autres opérations informatiques.

On trouve plusieurs types de projets datas, lesquels ont pu se développer au cours du temps et des besoins croissants.

1. La business intelligence consiste à agréger et croiser différentes sources de données afin de restituer des informations fiables et de qualité dans un but d'aide à la décision. Historiquement, les données étaient requêtées via le langage SQL directement sur la base de production, ce qui posait des problèmes de performances. Les besoins d'analyses ont augmenté et sont alors apparus les infocentres. L'infocentre est une base de données intermédiaire, soulageant les requêtes sur la base de production. On retrouvait les mêmes indicateurs à différents endroits, parfois avec des valeurs différentes, et sont alors apparus de nouveaux besoins comme le croisement de plusieurs sources. Apparaissent alors les datawarehouses permettant un croisement optimal des sources et l'automatisation de ces croisements. Aujourd'hui, les datamarts sont des couches supplémentaires et complémentaires au datawarehouse, segmentant les données par métier. (Le Roux, 2020)
2. Avec l'explosion du volume de données et l'émergence du Big Data, de nouveaux besoins se développent : traiter la data au fil de l'eau avec le mode streaming, les objets connectés et l'*Internet of Things* (IoT), smart cities... Ces données ne sont plus aussi structurées que dans la BI et de nouvelles technologies émergent permettant de traiter ces volumes gigantesques de données (Hadoop, DataLake, Data *swamp*...) structurées et non structurées (texte, image, son...).
3. La data science, le machine learning, l'intelligence artificielle consistent à créer des programmes permettant d'outrepasser les limites dans les prises de décisions humaines. Ces méthodes se basent sur des données passées afin de détecter des *patterns* et de pouvoir prédire les actions futures. Pour ce faire, il faut posséder un volume de données conséquent, pertinent et de qualité. C'est l'évolution des performances de calcul qui démocratise aujourd'hui ces algorithmes de machine learning

L'explosion du volume de données et l'ampleur du numérique dans nos vies peuvent faire apparaître le terme de sobriété numérique comme un oxymore. Pourtant il apparaît que c'est la seule option pour empêcher l'empreinte du numérique de continuer à croître. Elle permettra aussi de contribuer aux objectifs de limitation du réchauffement climatique. Car même si le

numérique n'est pas un secteur qui a encore été étudié, documenté et chiffré par le GIEC³, le numérique est clairement présent dans tous les secteurs : l'énergie, la construction, le transport, l'industrie, l'agriculture...

En cohérence avec les enjeux climatiques actuels et dans une perspective de sobriété numérique, nous pouvons nous demander s'il est encore envisageable de réaliser un projet informatique, et plus précisément data, écoresponsable ? Est-il possible d'allier qualité d'un projet data avec une réduction significative de son impact environnemental ?

A notre échelle, en tant que développeurs, décideurs et/ou collaborateurs d'une entreprise, quelles solutions pouvons-nous proposer pour réduire le coût environnemental, sans entrer dans une récession informatique ou une décroissance « punitive » ?

³ Groupe d'expert intergouvernemental sur l'évolution du climat, créé par l'ONU

4. ETAT DE L'ART

4.1. LES 4 LEVIERS DE LA SOBRIETE DANS UN PROJET DATA

Pour analyser chacune des étapes d'un projet informatique data, nous avons identifié 4 composantes :

- La gouvernance : les réflexions en amont qui s'inscrivent dans une gouvernance plus globale de la sobriété numérique dans l'entreprise.
- L'infrastructure physique sur lesquelles sont stockées les données et reposent les couches logicielles
- L'écoconception et le développement
- L'usage final des utilisateurs. Même si la mise en place de la sobriété numérique se concentre dans les services informatiques des organisations, rappelons que par définition, la sobriété numérique est systémique et doit donc prendre en compte tous ses aspects, jusqu'aux usages des services et outils numériques. En termes d'usage, les utilisateurs doivent bien sûr être sensibilisés sur l'impact environnemental de leurs activités numériques. Apparaît alors un paradigme. Le Shift Project décrit les « design addictifs » comme le fait de designer des applications en captant l'attention de l'utilisateur le plus efficacement possible (on pense notamment aux plateformes de streaming type Netflix ou YouTube : lecture automatique de la vidéo suivante...). Cette méthode permet de maintenir l'utilisateur en position de consommation numérique. La sensibilisation utilisateur sur ses usages du numériques est donc importante et pourrait peut-être permettre de faire levier pour changer ces pratiques au niveau des géants du numérique. Cet aspect ne sera pas détaillé précisément ici car il s'inscrit dans les réflexions de l'entreprise pour un système durable et n'a pas vocation à être analysée dans la solution en partie 5.

Chacune de ces étapes doit faire l'objet d'une mesure de son impact environnemental afin de pouvoir gérer de manière efficace le SI durable. Nous tenterons de présenter les enjeux et la complexité d'un outil de mesure précis et prenant en compte tout le cycle de vie du ou des produit(s).

4.2. GOUVERNANCE D'UN SYSTEME DE SOBRIETE NUMERIQUE

Pour mener à bien un projet data, mais plus globalement numérique, de manière sobre, il est nécessaire d'y réfléchir en amont de la phase de développement du projet. Comme le dit le Shift Project, nous devons « passer d'un numérique devenu instinctif à un numérique conscient et réfléchi ». Plusieurs questions sont donc à se poser, la première étape étant de le vouloir.

Cette première étape de volonté peut être proposée par les développeurs et chargés de projet mais, elle doit être suivie par les décideurs dans une politique globale d'entreprise et de démarche de Responsabilité Sociétale de l'Entreprise (RSE). Un seul projet qui serait sobre peut être le point de départ d'une démarche de sobriété numérique. Mais on ne pourrait pas qualifier l'entreprise d'adopter une véritable politique de sobriété numérique. C'est sur l'ensemble de ses projets, applications (internes comme externes) et usages que l'entreprise doit réfléchir à cette démarche de sobriété numérique.

C'est donc aux équipes IT et métiers qu'il revient de convaincre leurs décideurs et hiérarchie des bienfaits écologiques, comme économiques, d'une telle démarche. Ou aux décideurs qui en ont la volonté d'accompagner et de pousser leurs équipes sur ces sujets, mais aussi leurs fournisseurs (et agir sur le scope 3 des émissions).

Pourquoi mettre en place une politique de sobriété numérique au sein d'une organisation ? Le Cigref liste plusieurs arguments :

- Elle permet d'éviter les coûts, notamment en termes de consommation d'électricité
- Elle permet d'attirer les talents. D'après le rapport du Cigref, « la pression sociétale exercée sur les entreprises pour qu'elles prennent en compte les sujets de transition énergétique et environnementale est appelée à s'accroître. A tel point que le sujet devient par ailleurs un enjeu de recrutement. » Le monde étudiant a publié le « Manifeste étudiant pour un réveil écologique » et stipule « nous souhaitons bénéficier de la marge d'action dont nous bénéficions en tant qu'étudiants en nous tournant vers les employeurs que nous estimerons en accord avec nos revendications exprimées dans ce manifeste ».
- De la même manière, elle permet de travailler l'image de l'entreprise, mais peut parfois être perçue comme du *greenwashing*⁴.
- Elle est un nouveau levier de développement de l'écosystème. Le Cigref cite le développement de projets conjoints : partage de référentiels de mesure, de benchmarks, partenariat avec le monde du bâtiment pour la récupération de chaleur...
- Enfin, elle est aussi un levier d'innovation et de recherche d'efficience : « faire mieux avec moins » et « allier la high tech et la low tech » (Cigref, 2020).

De plus, la volonté « d'exemplarité de l'Etat (..) préfigure une évolution de la législation », comme peuvent en témoigner toutes les nouvelles législations autour de l'écologie ou encore la publication de la « feuille de route pour un numérique responsable » (The Shift Project, 2020). Certaines propositions de la *convention citoyenne pour le climat* traitent de la sobriété numérique. Il peut donc être intéressant pour les organisations d'anticiper cette potentielle,

⁴ Ou écoblanchiment, méthode de communication d'organisations affichant des préoccupations écologiques mais loin de leurs pratiques réelles.

future et probable législation (et donc pénalités et amendes) en intégrant dès maintenant ces questions de sobriété numérique.

Avec l'épuisement des ressources fossiles et la rareté des énergies, l'entreprise doit prendre conscience que ces questions – qui sont encore à l'échelle mondiale voire nationale – la concerne également. Comment pourra-t-elle continuer son activité si ses salariés n'ont plus d'essence pour venir travailler ? Comment maintenir son activité numérique s'il n'y a plus d'électricité disponible pour ses serveurs ? (La consommation d'électricité du numérique mondial augmente de 9 % par an entre 2015 et 2020.) Il convient donc à l'entreprise d'anticiper l'impact de futures disruptions technologiques en concevant dès maintenant des outils plus sobres.

Le Shift Project détaille ces potentielles évolutions de la législation et risques climatiques :

RISQUES DE TRANSITION		RISQUES PHYSIQUES
Réglementations	Marchés	Aigus
<ul style="list-style-type: none"> Augmentation du prix des émissions de GES Renforcement des obligations de reporting Réglementations sur les produits et services existants 	<ul style="list-style-type: none"> Modification des comportements des consommateurs Incertitude des signaux du marché Augmentation des coûts des matières premières 	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation de l'intensité et de la fréquence des événements extrêmes : <ul style="list-style-type: none"> Cyclones Ouragans Inondations <i>(causes de dommages sur les installations, de réduction des capacités de production...)</i>
Technologies	Réputation	Chroniques
<ul style="list-style-type: none"> Substitution de produits et services existants par des options moins émissives Investissement infructueux dans de nouvelles technologies Coûts initiaux de développement de nouvelles technologies bas-carbone Impact environnemental du Numérique 	<ul style="list-style-type: none"> Modification des préférences des consommateurs Stigmatisation d'un secteur Augmentation des commentaires négatifs des parties prenantes (ex: greenwashing...) 	<ul style="list-style-type: none"> Modification des régimes de précipitations et augmentation de leur variabilité Augmentation des températures moyennes Augmentation du niveau des mers <i>(causes de dommages sur les installations, d'augmentation des coûts d'exploitation, impact sur la productivité des salariés)</i>

*Tableau 3 - Typologie des risques climatiques de transition et physiques
Adapté de I4CE, à partir de (I4CE, 2017)*

Figure 7 : Typologie des risques autour du climat pour une organisation - The Shift Project

On constate donc que la plupart de ces risques dépassent le simple scope d'une entreprise. Les organisations doivent prendre conscience de leur part de responsabilité. C'est ce qu'on peut retrouver aujourd'hui avec la loi PACTE de 2019 permettant aux entreprises de « préciser une raison d'être, constituée des principes dont la société se dote et pour le respect desquels elle entend affecter des moyens dans la réalisation de son activité » (Code Civil, 2019).

Comme évoqué précédemment, pour une politique de sobriété numérique efficace, il est nécessaire de coordonner les actions de la DSI et de la RSE. La direction RSE peut mettre en place des actions de sobriété numérique : sensibilisation des utilisateurs et politique d'éteinte et mise en veille des appareils informatique... Mais sans un support et accompagnement de la DSI, ces actions seront marginales. De même, la DSI ne peut concevoir des applications sobres sans une sensibilisation des utilisateurs autour de ces problématiques.

L'objectif est de mettre en place une véritable gouvernance de la sobriété numérique dans les organisations. Tout ceci « demande à l'entreprise d'adopter un point de vue plus holistique, en considérant le facteur environnemental dans sa prise de décision ». Ce système holistique doit donc intégrer la sous-traitance des services, la fabrication du matériel des infrastructures, le mix énergétique des lieux de stockage... Tout comme le RGPD introduit la notion de « privacy by design », les SI doivent devenir « écologique by design » ou « sobre by design ». Cependant, pour rendre compte des bienfaits et de l'efficacité d'une politique de sobriété numérique auprès de la direction, il apparaît nécessaire de mettre en place des indicateurs et outils de mesure.

Aujourd'hui, construire un système d'information durable, ce n'est pas *aller dans le sens du vent* mais bel et bien une stratégie d'innovation et, éventuellement, devenir pionnier dans ce domaine. Pour Frédéric Bordage, la France a peut-être manqué le virage du numérique mais elle peut devenir pionnière en termes de sobriété numérique (Vers la sobriété numérique, 2021).

Comment ? Quelles questions se poser ?

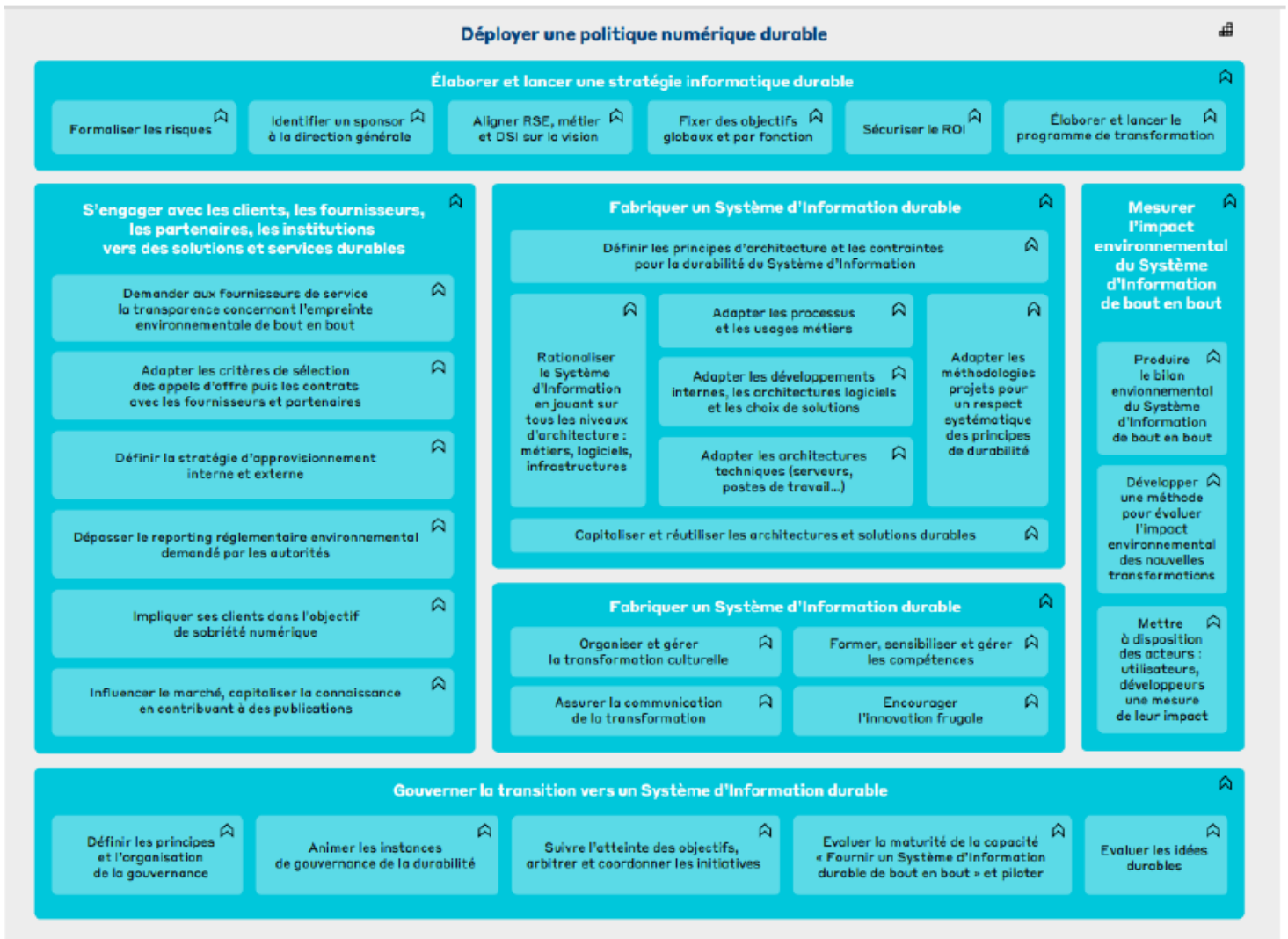


Figure 12 - Modèle de référence – vue détaillée - pour une remise en forme du Système d'Information
Source : The Shift Project, production du groupe de travail

Figure 8 : Déployer une sobriété numérique durable dans une organisation - The Shift Project

D'après le Shift Project, une politique de sobriété numérique nécessite tout d'abord de « comprendre la manière dont nos choix technologiques impliquent de véritables choix de société ». Le choix d'une certaine infrastructure et les technologies attendantes c'est « favoriser une certaine typologie d'usages ». 6 aspects interdépendants sont à analyser :

- La gouvernance
- L'engagement avec les partenaires (clients, fournisseurs...)
- Fabriquer le SI durable
- Développer une culture numérique durable
- Mesurer l'impact environnemental du SI

- Elaborer la stratégie informatique durable

Pour fabriquer un système d'information durable, tous les domaines sont concernés :

- Les métiers devront « remettre en cause le principe du tout numérique et sélectionner les offres les plus efficaces sur le plan environnemental ».
- Les applications doivent être économes en ressources, tant sur les serveurs que sur les terminaux clients.
- Les données doivent être gérées de façon économe et être justifiées par des usages et valeurs. Cela revient à appliquer le RGPD à tous les types de données, pas seulement aux données dites « à caractère personnel ».
- Les solutions techniques « seront choisies notamment pour leur réparabilité, leur durabilité, leur efficacité énergétique, la provenance de leurs composants ».

La transition vers la sobriété numérique est donc bel et bien transverse à toute l'organisation, même si le service informatique est au cœur de ces préoccupations.

4.3. INFRASTRUCTURE ET CONSOMMATION D'ÉNERGIE

Les premières démarches intuitives de sobriété numérique et d'économie d'énergie, déjà mises en place dans nombre d'entreprise, mais aussi dans le domaine du privé, consistent à ce qu'on peut nommer des « écocestes » : éteindre son ordinateur et son écran le soir, le midi, activer une mise en veille sans animation... Ecocestes qui s'intègrent également dans les démarches de Responsabilité Sociétale des Entreprises (RSE).

En poussant ces écocestes à une politique plus large du système d'information, on peut alors s'intéresser aux infrastructures : pouvons-nous éteindre les serveurs lors des heures d'inutilisation ? Comment réduire leur consommation énergétique ?

D'un point de vue réutilisation du matériel, vaut-il mieux changer le parc informatique pour des technologies moins énergivores ou garder le plus longtemps possible le matériel existant ?

4.3.1. Management environnemental des serveurs

Un datacenter est un « bâtiment qui héberge les serveurs et les baies de stockage des données. Les premiers sont de gros ordinateurs sans écran qui réalisent des traitements (...) ; les seconds sont des sortes d'armoires dans lesquelles sont empilés une multitude de disques durs où sont stockées les données » (Bordage, 2019).

L'industrie numérique est bien consciente de l'importance de la consommation énergétique des datacenters et de son impact environnemental. De nombreuses problématiques se posent aux gérants de datacenters comme le refroidissement (pour lutter contre le réchauffement global), la consommation énergétique, et même l'impact environnemental de la fabrication des serveurs. Mais, la pression exercée par les clients pour conserver un niveau technologique à la pointe et la

rapide innovation dans ces technologies transforme les problématiques environnementales et l'efficacité énergétique en une priorité mineure (Anthesis, et al., 2014). D'après le rapport conjoint de Anthesis et NRDC, les études montrent que l'utilisation moyenne des serveurs reste stable de 12 à 18 % entre 2006 et 2012. Cette sous-utilisation des serveurs a bien sûr un impact environnemental puisqu'un serveur non utilisé mais en état de marche consomme encore de l'électricité. Les serveurs pourraient être dimensionnés pour respecter leur réelle utilisation. On utiliserait alors moins de métaux rares et polluants pour le même niveau de service à la fin de la chaîne. Ce même rapport ajoute également que 20 à 30 % des serveurs sont obsolètes ou inactifs mais tout de même branchés, consommant de l'énergie à ne rien faire. Frédéric Bordage estime lui, en 2019, à 30 % le nombre de machines virtuelles à l'état de « zombies ». « Un serveur qui dort consomme 30 % du pic de consommation électrique » (Auffret, et al., 2020). Ceci est dû au fait que de nombreux responsables informatiques ne savent pas forcément à quoi servent ces charges de calcul mais sont réticents à les supprimer ou les mettre en *standby*, de peur des répercussions métiers imprévues. D'autres organisations, elles, ne prennent pas le temps – ou le budget – pour identifier les serveurs obsolètes ou non utilisés.

La source d'énergie

Dans une démarche communicante mais non moins vertueuse (?), les hébergeurs comme Google, Amazon et Microsoft, pour ne citer que les plus gros, multiplient les annonces en communiquant sur des datacenters alimentés par une énergie verte : les énergies renouvelables. Afin de faire disparaître les sources d'énergie fossiles (charbon) et polluantes, c'est une très bonne initiative. En revanche, comme exposé en partie 1, les émissions de gaz à effet de serre entre les sources d'énergie renouvelables et nucléaire est sujet à débat : vaut-il mieux une énergie renouvelable ou nucléaire ? D'un point de vue communication des hébergeurs, au vu de la réputation du nucléaire, il est préférable de parler d'énergie renouvelable. Mais, d'après Jean-Marc Jancovici, en France la production d'1 kWh d'électricité nucléaire représente environ 10 g de CO₂, comme pour les éoliennes. Mais, pour un kWh produit par un panneau solaire c'est 50 g de CO₂.

Refroidissement et réutilisation de chaleur

Comme tout appareil électrique, les serveurs émettent de la chaleur. C'est l'effet Joule. Plus la consommation électrique est importante, plus l'émission de chaleur est importante. Ceci contribue au réchauffement global, comme on peut le constater de manière relativement immédiate lors des périodes de canicule où les climatiseurs peuvent accroître jusqu'à 3,5°C la température extérieure à Paris (Face au réchauffement climatique, faut-il couper la clim ?, 2020). Pour pallier à ces problématiques, les hébergeurs mettent en place diverses méthodes de refroidissement, dont les deux principales consistent à refroidir avec de l'eau froide ou de l'air froid. Ces refroidissements consomment tout de même de l'énergie mais, les hébergeurs tentent d'en optimiser la consommation.

Le refroidissement par FreeCooling (air froid) consiste à envoyer de l'air froid sur la face avant des serveurs par le faux plancher. L'air chaud en sortie est aspiré par le plafond. (Refroidir nos data centers, un vrai casse-tête, 2018) L'autre méthode de FreeCooling consiste tout simplement à installer les datacenters dans des pays plus froids comme en Islande ou en Scandinavie. Cette méthode de Free Cooling dans des pays nordiques ne réchauffe-t-elle pas le pays en question et donc les glaciers ? Facteur majeur de la montée des eaux causée par le réchauffement climatique.

Le Liquid Cooling (refroidissement par eau froide) consiste à acheminer de l'eau tiède au plus près des composants informatiques chauffants.

Ces efforts pour réduire la consommation énergétique sont efficaces. Le PUE (Power Usage Effectiveness), indicateur servant à mesurer l'efficacité énergétique d'un centre de données⁵, s'améliore (Refroidir nos data centers, un vrai casse-tête, 2018). Le PUE ne s'intéresse qu'à la consommation électrique. Les nouvelles techniques de Liquid cooling, refroidissant les datacenters à l'eau entraîne cependant une nouvelle problématique non relevée par le PUE : l'eau n'est pas une ressource inépuisable. Comme indiqué par Raoul Auffret et Frédéric Shaw lors de leur présentation sur les impacts énergétiques des datacenters à l'association ADN Ouest, la consommation d'eau a augmenté d'1 % par an depuis 1980 et l'ONU « s'attend à ce que la demande en eau dépasse l'offre de près de 40 % dès 2030 ».

Les datacenters d'Europe et des Etats-Unis sont amenés à opérer dans des zones où l'eau devient et/ou deviendra rare (cf Figure 2 : Les risques de pénurie d'eau - Les Echos (2015)). Une nouvelle problématique environnementale émerge alors et apparaît le WUE (Water Usage Effectiveness) pour mesurer la consommation d'eau par kWh du datacenter.

La virtualisation

La virtualisation est évoquée par Josh Whitney et Pierre Delforge comme une technique permettant d'optimiser l'efficacité énergétique des datacenters.

La virtualisation est une technique qui permet la consolidation des charges de travail de serveurs sous-utilisés vers moins de serveurs.

4.3.2. Le choix de l'infrastructure : cloud ou on-premise ?

Par la suite, nous distinguerons deux grandes typologies d'infrastructure⁶ : « cloud » et « on-premise ». Nous tenterons également de déterminer les avantages et inconvénients de chacune.

On appelle **on-premise** une infrastructure « sur site ». C'est l'entreprise elle-même qui héberge ses serveurs et datacenters dans ses propres locaux. Ainsi les organisations ont le contrôle

⁵ PUE = Energie totale consommée par le centre informatique / Energie consommée par les équipements informatiques. Un PUE de 2 signifie que 1 Watt consommé par l'informatique (serveur, stockage, réseau), il faut 2 Watt à l'entrée du datacenter.

⁶ On pourrait également considérer une infrastructure hybride. Mais ce n'est, comme son nom l'indique, qu'un simple « mélange » de cloud et d'on-premise.

complet sur les paramètres de l'infrastructure. Les données, logiciels et autres restent au sein du réseau de l'entreprise et c'est à l'organisation d'en assurer la sécurité, la sauvegarde, la disponibilité, la redondance et le Plan de Reprise d'Activité en cas d'attaque. Mais elle doit aussi se préoccuper des salles serveurs, de la consommation électrique, de la climatisation, du renouvellement du parc serveur...

En parallèle, on appellera **cloud**, lorsque les données et logiciels se situent sur des datacenters mis à disposition par des fournisseurs. Le fournisseur met à disposition de ses clients des ressources de calcul pour une consommation en fonction du besoin. Ces ressources de calcul sont mutualisées entre les clients du datacenter avec des données sécurisées et cloisonnées par le fournisseur (ou « cloud provider ») lui-même. Le client ne se préoccupe que de l'usage et pas de la maintenance.

Quelques points à considérer dans le choix d'une infrastructure cloud ou on-premise

- Le dimensionnement des serveurs
Il faut se poser la question de la puissance de calcul nécessaire pour faire tourner son système d'information et connaître les variations. L'utilisation des serveurs sera-t-elle constante, saisonnière, avec des pics quotidiens ?
Comment va évoluer la charge de calcul d'ici à 3 ou 5 ans ? S'il faut 3 ans pour rentabiliser l'investissement de son infrastructure, il ne faudrait pas qu'elle soit sous-dimensionnée d'ici six mois.
- Les compétences internes. L'entreprise a-t-elle les compétences pour gérer l'installation et la maintenance de l'infrastructure ? De plus, les compétences ne seront pas exactement les mêmes dans le cadre du cloud ou on-premise. Le risque étant de se retrouver sans système d'information en cas de bug.
- La sécurité. A qui faire confiance pour assurer la sécurité de ses données ? A un fournisseur ayant une expertise en cybersécurité ou à l'entreprise ?

Bien sûr cette liste n'est pas exhaustive mais vise à sensibiliser pour la suite sur les problématiques survenant dans la gestion d'une infrastructure. Cependant, ces questions se basent sur des problématiques budgétaires et sécuritaires. Nous tentons, ensuite, de déterminer les avantages et inconvénients de chacune des infrastructures dans une démarche de sobriété numérique.

Le cloud

L'hébergement cloud est souvent qualifié de « as a service ».

L'avantage primordial du cloud est la possibilité de mise à l'échelle (scaling) à la demande. Si l'on a un besoin ponctuel de plus de puissance de calcul, il suffit d'en demander plus et d'en réduire ensuite la réservation de calcul. Etant sur des datacenters mutualisés, la ressource de calcul est donc libérée et peut être réallouée à un autre client du fournisseur : le serveur est donc toujours

(ou presque) utilisé à son maximum. On n'a pas de consommation électrique, que l'on peut qualifier de « déchet », parce que personne n'utilise le serveur.

C'est au fournisseur de s'assurer de cette réallocation de ressource. Dans le choix d'une infrastructure cloud pour des raisons de sobriété numérique, l'entreprise doit faire confiance à son fournisseur pour réellement réallouer les ressources. Cependant, dans une logique budgétaire, il n'a que peu d'intérêt à avoir des ressources serveur non utilisées.

Dans la continuité de cette réallocation, on est également capable d'automatiser l'arrêt et le démarrage des ressources. Ceci a également un gain économique puisque l'on bénéficie du « pay as you go ». L'organisation ne paie que ce qu'elle a réellement utilisé. Le coût est donc facilement lisible pour les décideurs et l'on peut plus facilement surveiller les ressources non utilisées.

Mais, on a également l'autre penchant : d'un simple clic on peut augmenter la puissance de calcul, sans être conscient de l'impact environnemental que cela engendre. La facilité est donc d'augmenter la puissance de calcul ou de stockage **avant** de s'intéresser à la source du problème : code mal développé et énergivore, mauvais paramétrage...

On peut également se poser la question de l'impact réseau. Les données étant stockées dans des serveurs distants, le rapatriement/téléchargement des données vers son poste de travail local pour analyse et traitement accroît l'utilisation du réseau et donc de son impact environnemental. Cette partie dépendra, bien évidemment, de la localisation du datacenter vis-à-vis du poste local. Même si la différence peut paraître infime, la donnée parcourant les câbles mondiaux mettra moins de temps à parvenir en France si elle est hébergée en Europe qu'en Amérique. Et consommera donc moins d'énergie.

La mutualisation des ressources entre tous les clients du fournisseur, simplifie la gestion du datacenter. Un seul acteur se voit en charge de leur gestion et l'optimisation des ressources, « qu'elles soient matérielles via des procédés de virtualisation ou énergétique via un suivi des consommations énergétiques » (Labaume, 2019). C'est au cœur de son métier, l'argument ici est de dire « laissons faire les experts ».

En revanche, le recours au cloud est généralement accompagné de fortes attentes au niveau sécurité car l'on délègue la sécurité de notre système à un prestataire. Ceci « résulte en un surdimensionnement des infrastructures physiques ». En effet, le cloud est assez pratique. Tristan Labaume prend l'exemple du télétravail. Notre environnement de travail nous accompagne partout, peu importe de notre localisation ou du PC que nous utilisons. Ceci permet donc de réduire nos déplacements (télétravail) et donc notre empreinte environnementale. Mais, le fournisseur a dupliqué les données par sécurité (backups) et, « l'illusion d'une capacité infinie, incite à une utilisation de l'informatique débridée : c'est ce que l'on appelle l'*infobésité* ».

Enfin, les possibilités du cloud computing présentent un nouveau mode de consommation de la donnée : le streaming, très énergivore.

On-premise

L'infrastructure on-premise est prédéfinie lors de l'installation des serveurs. On a alors tendance à surdimensionner la taille des serveurs pour faire face à une croissance de la demande de charge, ou à des demandes très ponctuelle (comme lors des soldes dans le e-commerce). De même, les serveurs sont rarement éteints, sans automatisation du « start & stop » et sont donc parfois/souvent *sous utilisés*.

Les serveurs étant à proximité de l'utilisateur de la donnée, l'utilisation du réseau est plus faible que dans une infrastructure cloud.

Cette infrastructure étant matérielle et sur site, on peut se poser la question si les DSI ont la possibilité de gérer et suivre la consommation électrique de leurs serveurs et s'ils le font. Probablement, la seule solution de gestion est la facture d'électricité mais qui est à un niveau plus macro sur les locaux de l'entreprise, couplée avec d'autres usages.

Même pour une entreprise, l'investissement dans une infrastructure on-premise reste considérable et rentable à plusieurs années. Elles ont donc moins tendance à renouveler leur parc régulièrement au fil des innovations (18 mois si l'on suit la loi de Moore). La fabrication de ces infrastructures (métaux...) se retrouve donc plus rentable d'un point de vue environnemental car elles sont utilisées plus longtemps et ont un meilleur taux d'amortissement.

4.4. ECOCONCEPTION

L'état de la recherche dans le domaine des logiciels et du code « durable » ou sobre est peu avancé, contrairement à la partie *hardware*. Ceci s'explique par la plus grande facilité de mesurer la consommation énergétique d'un serveur, d'un ordinateur ou de tout autre appareil numérique ; avec un wattmètre par exemple (Acar, 2017). Au contraire du logiciel où il est difficile d'évaluer l'impact du logiciel sur la CPU puis l'impact de la CPU sur la consommation énergétique.

Wirth observe en 1995 que les programmes ralentissent plus vite que le matériel n'accélère (Wirth, 1995). Ainsi, alors que les matériels deviennent de plus en plus performants, les logiciels, eux, ont de plus en plus de fonctionnalités et de plus en plus lents.

Hayri Acar dans sa thèse de 2017 observe que la majorité des études sur la consommation énergétique du software ne s'intéressent qu'à un seul, voire deux, composant ayant un impact : souvent le CPU et la mémoire vive. Elles négligent l'utilisation disque et réseau. De même, il y a un manque d'outils permettant de mesurer la consommation d'énergie d'un logiciel prenant en compte l'usage des quatre composants cités précédemment.

Comme on l'a vu, ce sont les équipements numériques physiques (serveurs, terminaux, réseaux) qui sont négatifs pour l'environnement. Cependant, en optimisant les applications et solutions présentes sur ces équipements, on peut en optimiser l'utilisation et la consommation énergétique. Le logiciel est le principe même du service numérique et « conditionne le matériel

nécessaire ainsi que sa durée de vie » (Groupement de service CNRS EcoInfo, 2020). Si l'on réussit à limiter l'usage de CPU, de RAM, de disque et de réseau de l'application, on pourra alors soit :

- Réduire le dimensionnement des équipements
- Ou installer plus d'applications sur le même environnement.

Les méthodologies d'écoconception doivent permettre de réduire les ressources nécessaires, tout en répondant au même besoin.

Pour ce faire, il est nécessaire de concevoir des services numériques plus sobres. De manière générale, un service numérique c'est « de l'information (les données), des traitements (algorithme, filtrage, simulation), des échanges d'information, des interfaces utilisateurs » (Groupement de service CNRS EcoInfo, 2020). EcoInfo détaille de manière générale le *workflow* d'un service numérique :

- Préparation des données d'entrée
- Transfert des données d'entrée vers la plateforme de calcul
- Calcul sur ladite plateforme
- Transfert de données vers la plateforme de post traitement
- Analyse et exploitation des données

On peut alors en déterminer une « vision globale » pour en réduire les impacts :

- Limiter les transferts de données
- Bien choisir la plateforme de calcul, de pré et de post traitement
- Post-traiter les données au plus proche de leur lieu de création
- Limiter les données d'entrée et de sortie
- Choisir des briques logicielles externes ou à redévelopper en interne.

Dans le même temps, dans l'enquête sur les pratiques des développeurs ingénieurs sur l'écoconception (Manotas, et al., 2016) on constate que peu de développeurs prennent en compte des considérations de consommation d'énergie dans leurs applications.

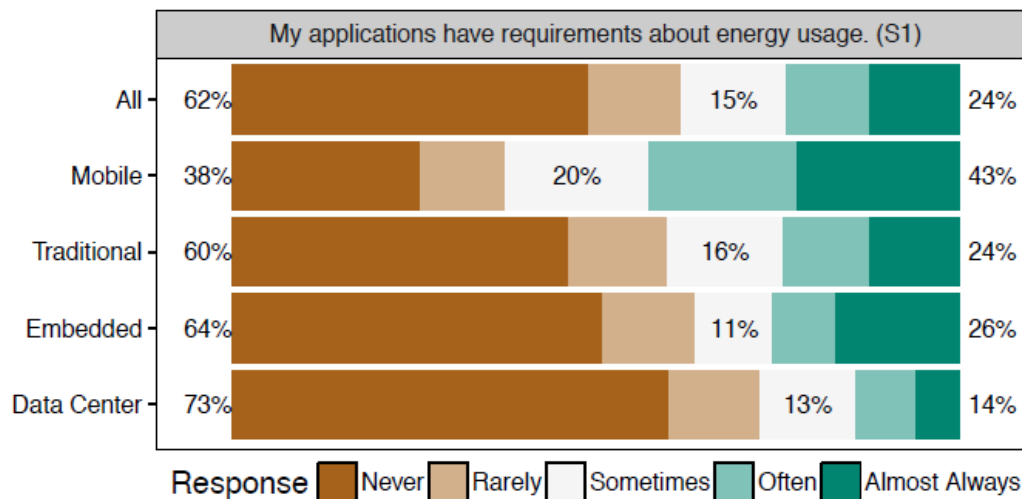


Figure 9 : Préoccupations énergétiques dans les applications informatiques

Ainsi, ce sont les applications mobiles qui prennent en compte le plus souvent l'énergie utilisée (43 %), en raison de la batterie limitée des smartphones. En revanche, les développeurs d'applications hébergées directement sur des datacenters ne sont que 14 % à prendre en compte cet aspect. Alors que pourtant une hypothèse faite par cette étude était « any watt we can save is either a watt we don't have to pay for, or it's a watt we can send to another server » ; chaque watt économiser est un watt que l'on ne paye pas ou que l'on peut utiliser sur un autre serveur.

4.4.1. Les réflexions d'écoconception

La première étape d'écoconception consiste à déterminer les fonctionnalités nécessaires du point de vue du métier. Si l'on a trop de fonctionnalités, l'ancienne infrastructure peut vite devenir obsolète. D'un point de vue UX (*user experience*), trop de fonctionnalités perd l'utilisateur et le service devient une « usine à gaz ».

Ensuite, la compréhension du besoin client doit être optimale avant le démarrage du développement. Une mauvaise compréhension de ce besoin peut entraîner, en cours ou en fin de projet, des retours sur des briques mal développées qui entraînent donc des surcoûts économiques et temporels ayant, naturellement, des effets négatifs sur l'environnement. (Acar, 2017) Pour pallier cette contrainte, le doctorant de « Software development methodology in a Green IT environment » propose d'écrire toutes les spécifications du logiciels afin d'éviter les allers-retours entre les spécifications des demandeurs et les développements. Aujourd'hui, tous les projets informatiques mettent en place des méthodologies Agile avec des *runs* de deux semaines. Cette méthode avec ses allers-retours fréquents entre un *Stakeholder* et l'équipe de développement permet de réduire les temps de développement dans « une mauvaise voie ». Faire des points réguliers avec les demandeurs de fonctionnalités permet de vérifier la bonne compréhension du besoin de la part des développeurs et évite des surcoûts de développement.

Dans une démarche d'écoconception, la documentation a toute sa place. En effet, un projet bien documenté est plus facilement maintenable, « débuggable », compréhensible et permet de futures évolutions plus pérennes dans le temps.

4.4.2. L'écodéveloppement

Le développement est la phase critique de l'écoconception d'un logiciel. C'est à ce moment précis que doivent être prises en compte les problématiques de performance. Si le logiciel est long à répondre, les utilisateurs vont réaliser plus d'opérations (rafraîchissements répétés...) non nécessaires dues à leur frustration. Ce surplus d'opérations entraîne naturellement un surplus de charge sur le serveur et donc une plus grande consommation de ressources. Même sans ces opérations, des performances médiocres entraînent un temps de calcul plus long sur l'infrastructure qui est donc sollicitée plus longtemps.

Dans cette lignée de frustration utilisateur, interviennent également les notions d'*User Experience* (UX) et d'*User Interface* (UI). En effet, une application trop compliquée, pas intuitive rendra réfractaire les utilisateurs à s'en servir. Tout le développement aura donc été inutile, pour une application « dormante ». En général, cette simplicité et ergonomie rend également l'application moins énergivore. Pour Frédéric Bordage, pour faire de l'écoconception numérique, « le plus efficace est d'adopter une posture de sobriété qui amène à se concentrer sur le besoin essentiel des utilisateurs ». « Pour y parvenir il suffit souvent de commencer par concevoir le service numérique pour les smartphones et de s'arrêter là ». Cette démarche de *mobile first* « permet d'éliminer tout le gras fonctionnel et graphique » (Acar, 2017). Aujourd'hui, une grande partie de la population est équipée d'un smartphone et réalise de plus en plus d'opérations numériques sur cet appareil. Les contraintes des smartphones (batterie limitée, taille d'écran) imposent une véritable démarche de sobriété pour conserver une expérience utilisateur optimale.

Pendant la phase de développement, Acar Hayri préconise de développer de manière modulaire, avec des composants indépendants. Chaque composant est ensuite testé individuellement et enfin intégré au reste de l'architecture logicielle. Cette méthode de développement modulaire facilite la/les maintenance(s) future(s). Dans une démarche d'apprentissage et de partage des connaissances, on attribuera les modules les plus simples à des profils juniors tandis que les plus complexes seront affectés à des experts, afin d'obtenir un code plus efficient. En effet, le développeur « expert » connaît mieux les différents pièges à éviter et possède une plus grande expérience quant à comment rendre son code le plus efficient possible. Il ne faut pas oublier les moins expérimentés. Les profils juniors sont donc accompagnés par les experts, pour apporter leurs connaissances et leur faire comprendre et remarquer comment optimiser leur développement d'application.

Le choix du langage et du framework

Étonnement, ce ne sont pas des développeurs ou informaticiens qui ont réalisé une étude sur l'impact environnemental du calcul en fonction de spécifications software (CPU, langage,...) mais l'astronome Simon Portegies Zwart dans la publication « The Ecological impact of High-Performance Computing in Astrophysics » en 2020.

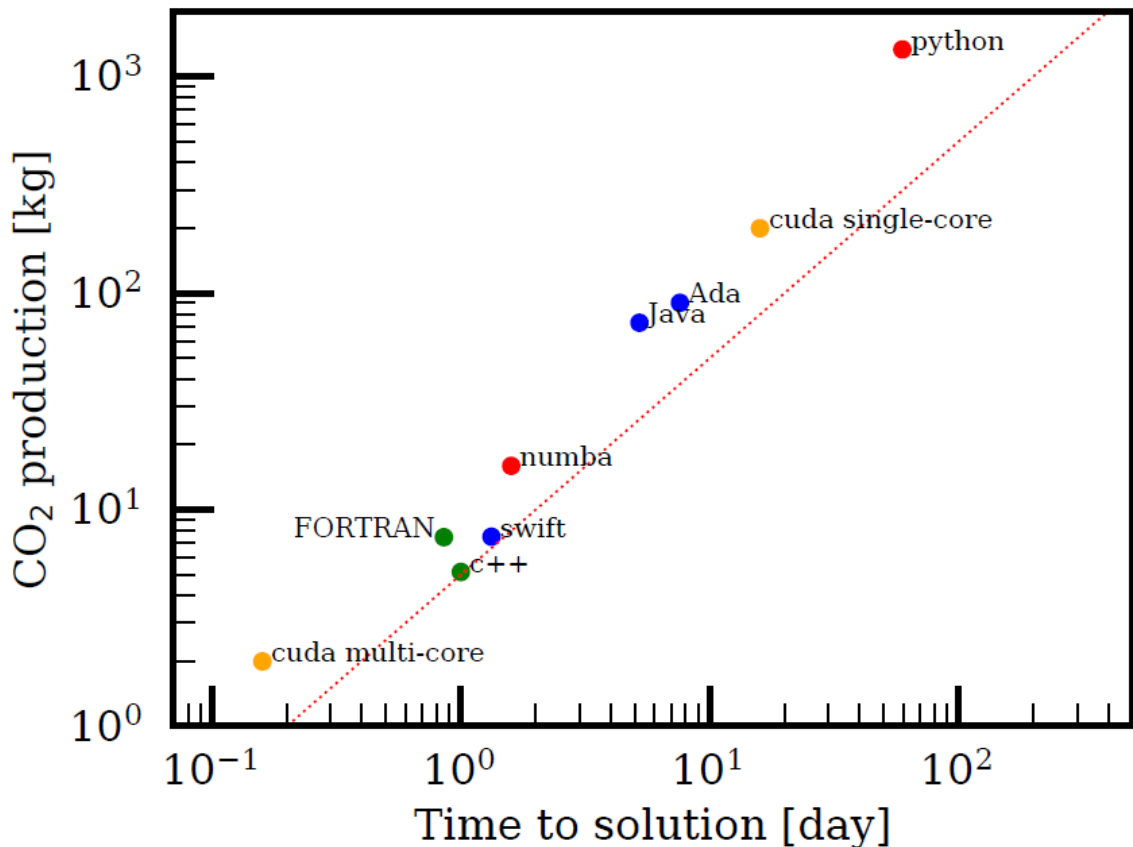


Figure 10 : Efficience et impact CO₂ des langages de programmation

Python, parmi les langages observés, en étant le plus long à répondre est également celui qui produit le plus de CO₂. L'auteur note tout de même que Python et sa popularité grandissante est bien plus facile à apprendre que d'autres langages comme C++ (Zwart, 2020). Il propose donc d'abandonner progressivement Python au profit de Julia, Rust, Alice ou Swift – langages proposant la flexibilité de Python avec des performances d'un langage compilé comme C++. On observe une relation linéaire entre le délai d'exécution et la production de gaz à effet de serre. On peut donc facilement en conclure que pour un même langage et pour la même tâche, un code durant plus longtemps sera aussi celui le plus polluant.

Le langage natif compilé est à privilégier pour les traitements lourds, de haute performance ou en temps réel. Les langages faciles d'accès, interprétés, sont à utiliser pour des traitements moins contraints. Ils permettent « la maintenance, le ré-usage et ainsi la durabilité » (Groupement de service CNRS EcoInfo, 2020).

Toutefois, le choix du framework ou des librairies apparaît également important. Même en Python, on retrouve des librairies à haute performances, comme NumPy (Zwart, 2020). Dans un principe de minimalisation, la réutilisation de librairies existantes simplifie le développement et réduit les nombreuses exécutions de bout de code à des fins de tests (Acar, 2017). En effet, il apparaît évident que si le numérique est négatif pour l'environnement, la moindre petite exécution de code est incluse dans l'impact environnemental. La réutilisation de package réduit le coût de développement et donc le coût environnemental. EcoInfo nous conseille également de privilégier le code open-source. Ce type de code est plus facilement maintenable et reproductible.

Les données

Le CNRS EcoInfo propose de suivre le principe FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable, Reusable*) et un plan de gestion de la donnée (DMP). L'objectif du principe FAIR est de « faciliter la découverte et la réutilisation des données scientifiques par les humains et les systèmes informatiques » (Insitut Pasteur, 2018). FAIR consiste à rendre les données et/ou les métadonnées :

- Findable (Facile à trouver) : à la fois par les humains et par les systèmes informatiques
- Accessible : les (méta) « données doivent être stockées à long termes de façon à ce qu'elles puissent être facilement accessibles et/ou téléchargées »
- Interoperable : « faciles à combiner avec d'autres jeux de données
- Reusable (Réutilisable)

Le principe FAIR permet de réduire l'empreinte environnementale des données car leur interopérabilité « permet d'éviter de multiplier les données avec des formats différents : diminution du nombre de données et du coût de conversion » (Groupement de service CNRS EcoInfo, 2020). Le fait de les rendre accessibles et reproductibles permet de « réduire l'empreinte environnementale en évitant des doublons. Moins de stockage (utilisation de web-services), moins de développement redondant ».

En lien avec la mesure, il est nécessaire de mesurer les performances de son code. On peut alors mesurer l'usage des ressources machine, le temps d'exécution et de réponse. En général, l'optimisation du logiciel permet de « réduire le temps d'exécution, ce qui conduit en général à une réduction de la consommation électrique et donc à une réduction des émissions eqCO₂ » (Groupement de service CNRS EcoInfo, 2020).

« Optimiser un logiciel peut induire à lancer davantage d'opérations ou traiter davantage de données, donc l'empreinte écologique du service ne sera pas réduite », c'est le paradoxe de Jevons (effet rebond) (Groupement de service CNRS EcoInfo, 2020). En effet, la mise en cache de données permet d'accélérer les traitements puisque la donnée est tout de suite accessible à l'ordinateur. En revanche à l'échelle d'un logiciel, la mémoire peut vite se retrouver saturée et

l'on pourrait alors augmenter la capacité en RAM et donc les caractéristiques physiques de la machine. Pour la même raison, il faut éviter de lancer trop de traitements en parallèle. De la même manière la compression de fichier permet de diminuer l'utilisation réseau mais « augmente légèrement l'utilisation du CPU ».

De même que l'on optimise le code, n'oublions pas que même sans logiciel en fonctionnement, une machine consomme toujours de l'électricité.

4.4.3. Maintenance et intégration continue

Dans la lignée de ses préconisations sur l'équipe de développement, Acar pense qu'il est préférable de conserver l'équipe de développement pour la phase de maintenance car ils connaissent le code et ses spécificités et sont moins à même de refaire des erreurs et induire des régressions à l'application.

Dans cette phase de maintenance et de suivi du logiciel, il est bien sûr possible d'ajouter de nouvelles fonctionnalités pour de nouveaux besoins. Ces nouvelles fonctionnalités mineures ne doivent pas induire une refonte complète de l'interface, au risque de frustrer les utilisateurs finaux, évènement explicité dans la partie d'écodéveloppement. En revanche, il ne faut pas oublier de supprimer les fonctionnalités qui ne seraient pas ou plus utilisées. En plus de l'amélioration des performances (logicielles comme environnementales), ceci permet d'améliorer l'ergonomie et permettre à l'utilisateur de mieux repérer les fonctionnalités qui l'intéresse.

L'optimisation du code n'est pas perçue par les ingénieurs comme une résolution de bug mais comme un changement de design (Manotas, et al., 2016). La conclusion majeure de ce rapport est que les ingénieurs logiciels ne sont conscients des performances énergétiques de leur application seulement grâce aux retours utilisateurs. Ils ne pensent pas avoir les outils pour détecter des problèmes d'énergies et n'ont pas les compétences pour savoir s'il est normal que la consommation de telle brique logicielle soit cohérente avec son but.

4.4.4. L'obsolescence

En fin de vie du logiciel, lorsqu'il devient inutilisé, obsolète ou même peu rentable, se pose alors la question de sa suppression, refonte ou remplacement. Avant ces étapes, une étude est à réaliser afin de déterminer les modules qui pourrait être réutilisés. Ces étapes doivent intervenir le plus tardivement possible après le lancement de l'application afin que le ROI, mais aussi l'impact environnemental du développement soit rentabilisé.

4.5. MESURES

Aparté : La métrologie

La métrologie, science de la mesure, consiste à définir des principes et méthodes permettant de garantir et maintenir la confiance envers les mesures résultant des processus de mesure

(Wikipédia). Une mesure permet de comparer des phénomènes entre eux. Il est alors nécessaire d'avoir des éléments comparables et des instruments, outils, méthodes de mesure fiables et de qualité. Chaque mesure doit avoir une référence, qui permet de comparer les résultats de façon permanente. Même si cette référence permet une comparaison, une incertitude de l'instrument (outil ou méthode) subsiste et quantifie le doute évalué au préalable lors de la mesure de référence.

4.5.1. Analyse de cycles de vie

Lorsque l'on s'intéresse à la mesure de l'impact environnemental du numérique, on souhaite généralement se ramener à la même référence que pour l'impact environnemental : un équivalent en grammes de CO₂. On pourrait également y ajouter la problématique du rapport impact-bénéfices lorsque l'on s'intéresse à des applications « IT for Green ». Aujourd'hui cette mesure d'impact environnemental est très complexe car il faut prendre en compte de nombreux aspects du numérique :

- La fabrication de l'infrastructure (serveurs, réseaux, terminaux) : de l'extraction des métaux à la fabrication finale, en passant par le transport
- L'équivalent CO₂ du coût énergétique (qui dépend du mix énergétique de la région où les infrastructures sont localisées) de :
 - Les serveurs
 - Les réseaux
 - Les terminaux et les usages
- La consommation d'eau : il paraît impossible d'avoir un équivalent CO₂ d'une consommation d'eau. La consommation d'eau peut donc devenir un indicateur à part entière de la mesure d'un impact environnemental.

On peut même y ajouter le papier et l'encre utilisé pour les impressions (ainsi que la fabrication et la consommation de l'imprimante) et la gestion de fin de vie de tous ces équipements numériques. La seule méthode de mesure de l'impact environnemental réel, global et complet est l'Analyse de Cycle de Vie (ACV).

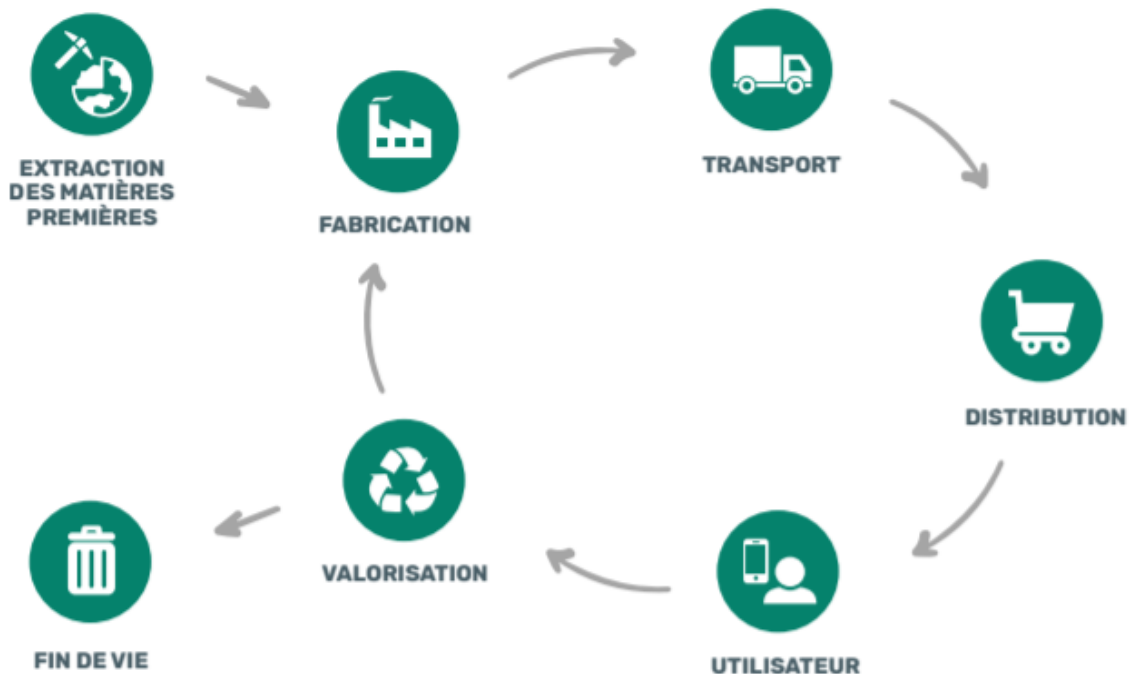


Figure 11 : Cycle de vie des appareils numériques (Syntec Numérique)

« Un bilan doit forcément porter sur l'ensemble des critères impactant l'environnement. Faire une évaluation monocritère, c'est prendre le risque d'opérer des transferts de pollution. Typiquement, en cherchant à réduire les gaz à effet de serre, on peut provoquer une augmentation de la consommation électrique, de l'eau ou encore des ressources abiotiques. Beaucoup d'entreprises se jettent sur le bilan carbone du numérique : c'est plus simple à réaliser, mais d'un point de vue empreinte environnementale de l'IT, cela n'a juste pas de sens. » (Bordage, 2020) Par exemple, lorsque l'on évalue l'empreinte carbone mondiale par pays, les études pointent du doigt la Chine. Mais, l'externalisation de la production industrielle des autres pays vers la Chine entraîne également une externalisation des émissions de gaz à effet de serre vers la Chine.

Une méthode d'ACV nécessite un véritable investissement en temps et en ressources humaines. ACV qui a aussi un coût : entre 10 000 et 150 000 euros. On a également de nombreuses difficultés lorsque l'on procède à l'évaluation :

- Comment évaluer et quantifier un flux de pollution qui peut être ponctuel ou passager, localisé ou distribué ?
- Comment obtenir la transparence des informations nécessaires à la quantification de la fabrication et le transport des équipements ?

- Comment évaluer la fin de vie d'équipements encore en cours de vie ?
- Comment connaître précisément le mix énergétique

Des cabinets se spécialisent dans les analyses de cycles de vie. Frédéric Bordage en réalise. Ces cabinets ont accumulé des données sur des dizaines d'années afin de connaître aujourd'hui très précisément la durée d'amortissement des matériels informatiques.

L'ADEME, en collaboration avec le GreenIT.fr, DDemain, et autres ont pour projet de produire un « référentiel de la performance environnementale » : NégaOctet. Ce projet fournirait un cadre méthodologique, une base de données consolidée et un outil d'évaluation communs aux entreprises. Ce référentiel est encore en phase d'expérimentation jusque octobre 2021.

4.5.2. Autres outils de mesure

Des outils de mesure de l'empreinte environnementale du numérique existent déjà. Mais chacun a ses propres et limites et aucun n'est aussi complet (ni complexe) qu'une analyse de cycle de vie. Nous en citerons deux.

Microsoft sustainability calculator⁷

Microsoft met à disposition de ses clients **grands comptes** une calculatrice d'émissions CO2. Cet outil se base sur la consommation des services cloud Azure pour proposer une estimation d'équivalent d'émission CO2. On obtient alors une estimation mensuelle, par service Azure et par région de localisation de ces services.

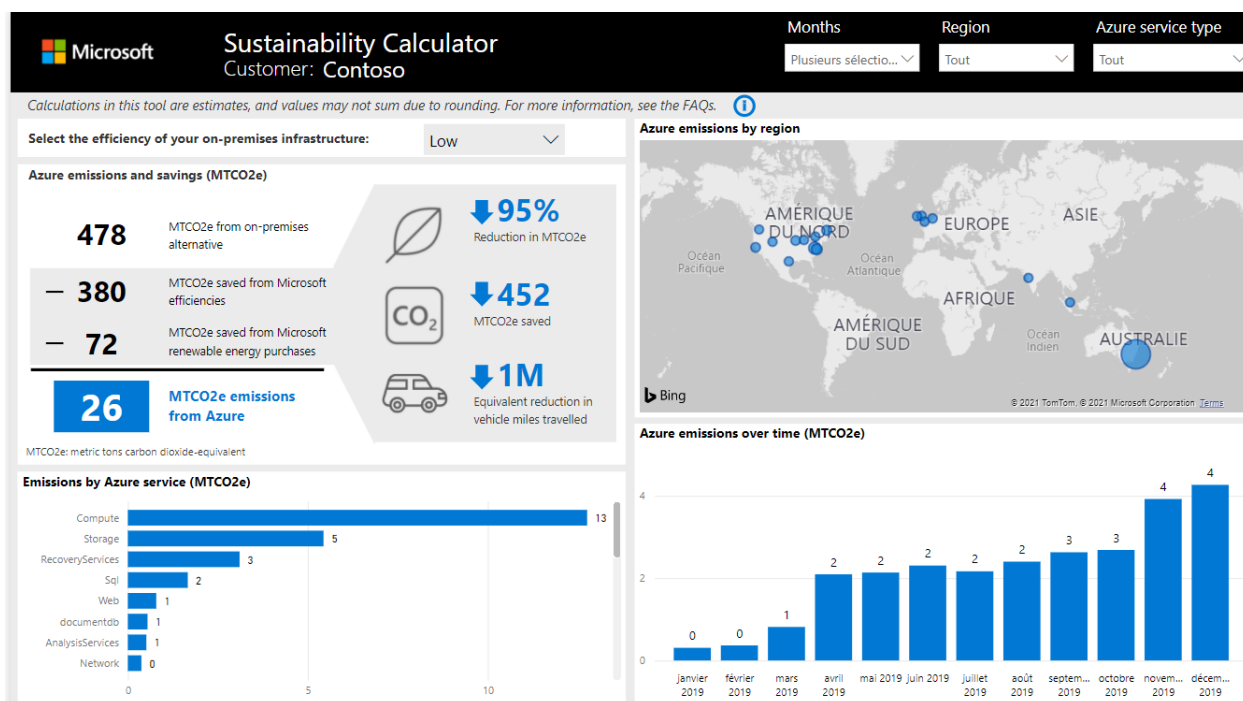


Figure 12 : Microsoft sustainability calculator

⁷ https://appsource.microsoft.com/en-us/product/power-bi/coi-sustainability.sustainability_dashboard

L'inconvénient de cet outil est qu'il ne mesure que la consommation des services cloud et ne prend pas en compte les usages du côté des serveurs non-cloud, des terminaux finaux (utilisateurs) ainsi que des réseaux. De plus, ce n'est qu'une estimation à partir de l'utilisation des services et non une réelle mesure des gaz à effet de serre émis.

*CodeCarbon*⁸

CodeCarbon est un package python permettant d'évaluer l'impact environnemental des algorithmes d'intelligence Artificielle. Il estime les gaz à effet de serre émis par le cloud ou les ressources locales utilisées pour exécuter le code. Il présente ensuite des recommandations pour réduire l'empreinte environnementale du code python. Cependant, il ne prend pas en compte les autres aspects d'architecture d'un Système d'information en dehors des composants Python, ni l'impact matériel.

4.5.3. De la complexité de la mesure

En réalité, il est impossible de mesurer de manière réelle les gaz à effet de serre émis par l'activité humaine. Les méthodologies et outils se basent sur des données d'études avancées pour mesurer au plus près un équivalent CO2.

Lorsqu'on tente d'évaluer cet impact, deux aspects sont à prendre en compte :

- Le matériel physique : construction, fin de vie...
- La consommation énergétique de ce matériel

Comme on l'a vu, la seule manière de mesurer l'impact du matériel physique est l'analyse de cycle de vie. Lorsque l'on s'intéresse à la consommation énergétique du matériel, on cherche à mesurer la consommation d'énergie primaire : pétrole, charbon, nucléaire, soleil... et donc son équivalent CO2. La première étape dans l'évaluation de la consommation énergétique est de mesurer la consommation électrique (c'est l'énergie primaire qui est transformé en électricité). Il faut alors ensuite s'intéresser à l'origine de l'électricité, qui dépend de la localisation du matériel physique : c'est ce qu'on appelle le mix énergétique (ou électrique) d'une région.

En informatique, on se retrouve vite confrontés à plusieurs problèmes :

- Comment connaître l'impact matériel physique de serveurs cloud ? Comment obtenir une transparence des informations auprès des fournisseurs cloud sur l'origine de leur matériel, leur recyclage, leur refroidissement... ?
- Comment mesurer la consommation électrique des serveurs dans le cloud ? Et l'origine de cette électricité ?

⁸ <https://codecarbon.io/>

Malgré la complexité d'obtenir une totale transparence sur ces données et la complexité des méthodes d'analyse, la sobriété numérique reste vertueuse. Utiliser moins de ressources machines, c'est pouvoir réduire le nombre de serveurs fabriqués et en service. Faire durer plus longtemps dans le temps un serveur, c'est amortir son impact environnemental dans son cycle de vie.

5. ANALYSE ENVIRONNEMENTALE D'UN PROJET DATA DE BUSINESS INTELLIGENCE

5.1. TREEZ DATA MANAGEMENT

Treez Data Management, créé en octobre 2015, est une Entreprise de Service Numérique spécialisée en Data Ingénierie et Data Science, autour des technologies Microsoft. A sa tête, trois associés : Arnaud De Temmerman, Olivier Dupont et Rémi Le Mauff. A l'origine installé à Lille, Treez a ouvert en 2019 une agence à Nantes et en 2021 à Paris. Aujourd'hui, Treez c'est plus d'une trentaine de consultants et développeurs, tous passionnés par les sujets data.

A l'origine nommée Axense, la société prend le nom « Treez » en 2019. A travers ce nouveau nom, évoquant un arbre (« tree » en anglais) et un logo vert, les associés souhaitent donner un nouveau cap et de nouvelles valeurs à leur société.



Des actions sont alors mises en place : visite d'une AMAP (Association pour le Maintien d'une Agriculture Paysanne) en août 2019, responsabilisation des collaborateurs autour du tri des déchets, d'économie d'énergie, opération « 1 jour 1 écocoste » lors de la semaine Européenne du Développement Durable...

« Les situations de cohérence entre nos aspirations profondes et nos comportements sont limitées, et nous sommes contraints à composer avec la réalité. Mais il est impératif d'œuvrer pour que les choses évoluent vers la cohérence, et que l'incohérence ne soit plus considérée comme la norme, et encore moins comme une fatalité. Toutes les occasions de nous mettre en cohérence sont à saisir. »

(Rabhi, 2010)

Jusqu'alors, l'entreprise ne s'est jamais intéressée à l'impact environnemental de sa propre activité : les projets data réalisés pour ses clients, comme les Data Warehouses développés par ses consultants. Afin d'être cohérente avec ses valeurs et grâce aux préoccupations environnementales des collaborateurs, l'entreprise est amenée à analyser le coût environnemental de ses projets et d'en réduire l'impact.

5.2. UN PROJET BI

Treez propose ses prestations à des clients pour des projets datas, historiquement des projets de Business Intelligence. Le projet qui sera analysé par la suite est un projet de business intelligence réalisé pour l'un de ses clients. Le client est une entreprise éditrice de solution pour la gestion de flottes automobiles. Elle accompagne ses propres clients entreprise dans la gestion de leur flotte de véhicules locatives. Ils font appel à Treez Data Management afin d'intégrer au sein de leur

solution des rapports et tableaux de bord permettant aux clients finaux de les aider à mieux gérer leur flotte automobile (gestion des coûts, gestion kilométrique et environnementale).

5.2.1. Qu'est-ce que c'est ? Présentation du projet

5.2.1.1. Les enjeux

L'objectif de la Business Intelligence (BI) est d'agrégier et de croiser les différentes sources de données composant le Système d'Information (SI) : ERP (Enterprise Resource Planning), CRM (Customer Relationship Management), SRM (Supplier Relationship Management) ... Ceci afin d'analyser et de croiser les indicateurs provenant de différentes sources entre eux. L'objectif final étant d'assurer la qualité de la donnée afin d'en restituer une vue fidèle et exacte de leurs données aux décideurs finaux.

On liste alors plusieurs enjeux lors de la réalisation de ce système décisionnel :

- Agrégation des différentes sources
- Intégration automatique des données
- Valoriser la donnée
- Assurer l'intégrité, la cohérence, la qualité, des données
- Historiser la donnée
- Sécurisation des processus
- Optimisation des temps de traitement

5.2.1.2. Comment ?

Pour mener à bien ces différents objectifs, nous utilisons 3 outils ou ressources différentes :

- Les bases de données SQL, pour stocker la donnée transformée
- L'ETL (Extract, Transformation, Load), pour extraire la donnée de sa source, lui appliquer des transformations et la charger dans la base de données de destination.
- L'outil de restitution : pour développer, partager et diffuser le reporting

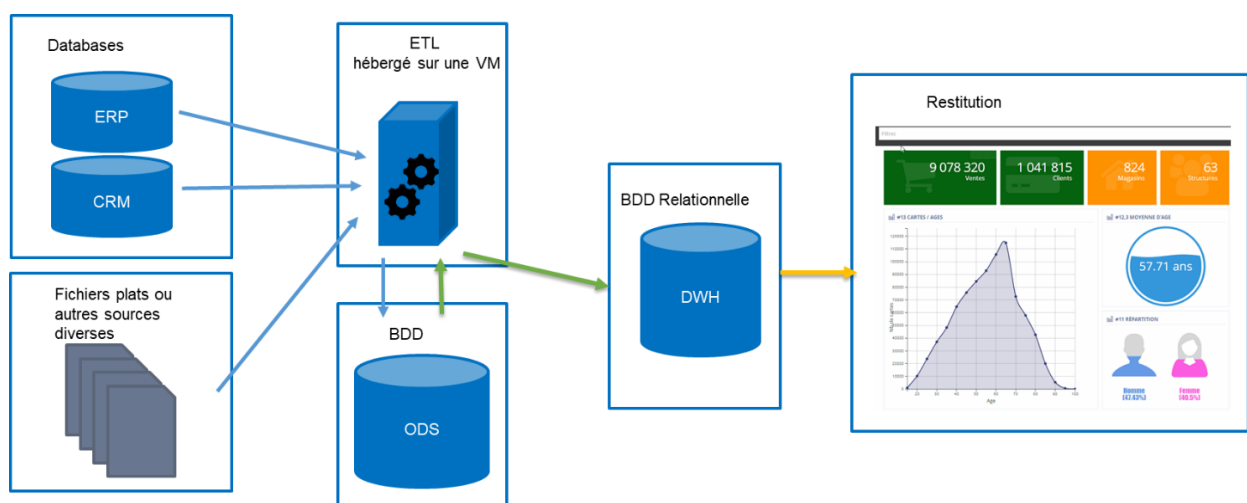


Figure 13 : Infrastructure type d'un projet décisionnel

A partir de l'outil ETL, nous nous connectons dans un premier temps aux données **sources** (bases de données, fichiers plats...) pour extraire et charger chaque table, complètement et sans transformations, dans une base intermédiaire de **destination**, nommée ODS (pour Operational Data Store).

Puis, toujours avec l'outil ETL, nous nous connectons à la base ODS afin d'en extraire les données, de les transformer et, finalement, de les charger dans une base de données de type relationnelle nommée DWH (pour DataWarehouse). Ce DWH stocke les données nettoyées et croise les différentes sources ERP, CRM... L'outil de restitution se connecte à cette base et permet de créer des visualisations ou datavisualisations.

Nous nous retrouvons finalement avec trois solutions :

- La première permettant de charger les données brutes dans l'ODS
- La seconde pour transformer et charger des données de qualité dans le DWH
- Et la partie de développement des tableaux de bord

Chacune ayant ses propres enjeux et objectifs.

5.2.1.3. L'ODS : pourquoi passer par une base intermédiaire ?

La solution ODS répond à un principe : une table source correspond à une table destination, sans transformation. L'alimentation se fait selon un principe de « annuler-remplacer ». A chaque fois, les tables destination sont vidées (instruction SQL *truncate* ou *delete*) puis réalimentées par le flux ETL. Ce annule et remplace maximise les performances et rend le flux plus rapide à cette étape d'import brut des données.

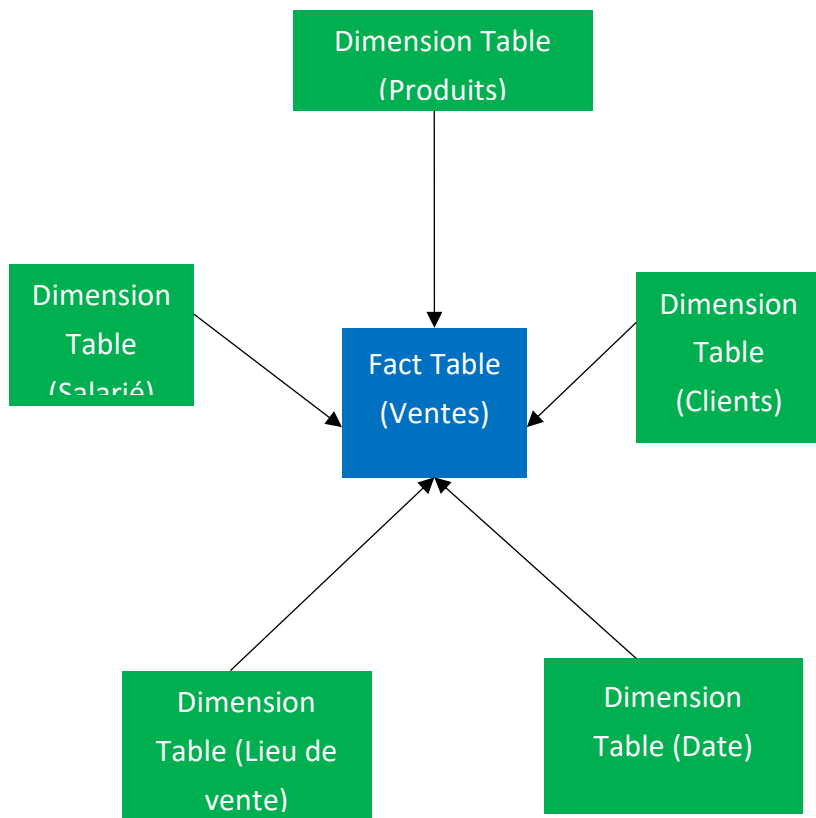
Pourquoi ne pas transformer et charger directement les données dans le DataWarehouse ?

La base ODS permet de centraliser au même endroit les tables de données issues de différentes sources. Comme nous le verrons par la suite, nous prioriserons les transformations SQL (au plus près de la source) que les transformations dans le flux ETL. Si l'on devait se passer d'ODS, ces transformations – parfois coûteuses – seraient réalisées directement sur les bases d'applicatifs servant à la production de l'entreprise. On risquerait alors de surcharger la base source, au détriment des transactions opérationnelles : transactions provenant des utilisateurs finaux, maintenances et sécurités de l'applicatif... Le chargement dans l'ODS en annule et remplace diminue les charges de calculs et temps de traitement sur les applications.

5.2.1.4. Le DataWarehouse, une base de données relationnelle

« Le datawarehouse est une collection de données orientées sujets, intégrées, non volatiles et historisées, organisées pour le support d'un process d'aide à la décision » d'après Bill Inmon, informaticien *père du datawarehouse* (Le Roux, 2020). Le datawarehouse est donc une base de données, composées de tables. Ces tables sont organisées et modélisées dans un objectif d'aide à la décision. On distingue deux types de tables :

- Les dimensions, qui représentent et listent des objets ou entités métiers. Par exemple, des produits, des fournisseurs, des clients...
- Les tables de faits, représentant des événements, souvent datés dans le temps : des ventes, des achats...



La modélisation de cette base se fait principalement selon ce qu'on appelle un modèle en étoile :

La table de fait est centrale et reliée par des relations (jointures) aux dimensions par lesquelles on pourra l'analyser. Les tables de faits contiennent alors des colonnes de clés étrangères pour chacune des dimensions associées. Les dimensions contiennent des clés primaires uniques. Une ligne d'une table de dimension doit représenter un objet, une entité métier unique, pour assurer la qualité de la donnée et proscrire les doublons.

Figure 14 : Modèle de données en étoile

La deuxième méthode de modélisation existante est le modèle en flocon. Semblable au modèle en étoile, le flocon consiste à normaliser toutes les colonnes de dimensions : on ne doit pas répéter de l'information. Par exemple, lorsque l'on s'intéresse à une catégorie de produits :

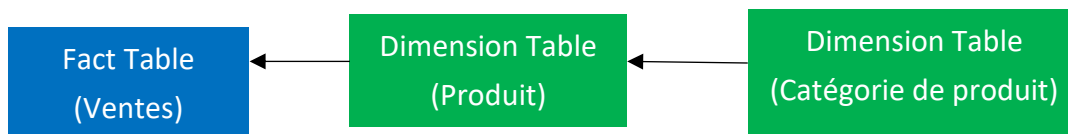


Figure 15 : Modèle de données en flocon

La table de dimension produit comporte une colonne de clé étrangère référençant la catégorie de produit.

Lors de l'intégration de données, via l'outil ETL, plusieurs points sont donc à prendre en compte :

- Les lignes de dimensions doivent être uniques. Les clés primaires ne doivent pas être dupliquées (doublons), au risque d'une erreur dans les indicateurs présentés aux utilisateurs finaux. En cas de doublons, il faudra instaurer des règles de gestion cohérente avec la finalité : rejet pour correction, suppression...

- La granularité des tables de faits doit être maîtrisée. Si le schéma de modélisation présente une relation entre le produit et les ventes, chaque ligne de vente doit être associé à un seul et unique produit. Le produit pouvant être répété sur d'autres lignes (car vendu plusieurs fois).

5.2.1.5. Présentation du flux ETL classique du chargement d'une table du DataWarehouse

Comme présenté, l'ETL est un outil d'extraction, de transformation et de chargement des données. Il se présente généralement sous une interface graphique permettant de glisser-déposer des composants prédéveloppés qu'il reste à paramétrer. SSIS (SQL Server Integration Services) est un ETL, développé par Microsoft. C'est celui que l'on utilisera dans le projet analysé. Il se présente sous forme de flux : le flux de contrôle, composé notamment d'un ou plusieurs flux de données.

Le package SSIS est constitué d'un flux de contrôle, avec différentes tâches : tâche SQL (SQL), flux de données (DFT pour *Data flow task*) :

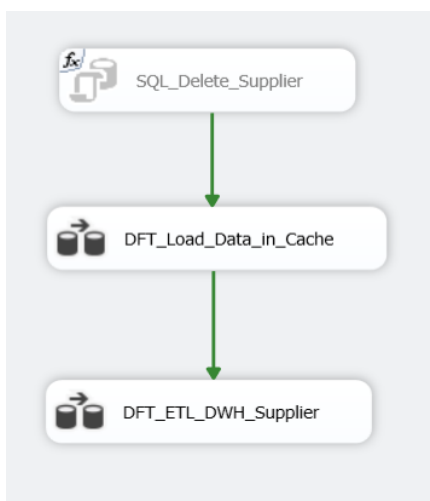


Figure 16 : Exemple de flux de contrôle type

Ici, nous prenons l'exemple du chargement des données dans la table Supplier (fournisseur). Ce flux sera exécuté régulièrement, comme tous les autres. Lors de l'exécution, chacune de ces tâches s'enchaînent selon leur ordre prédéfini. Comme son nom l'indique, la tâche de flux de données consiste au traitement de la donnée.

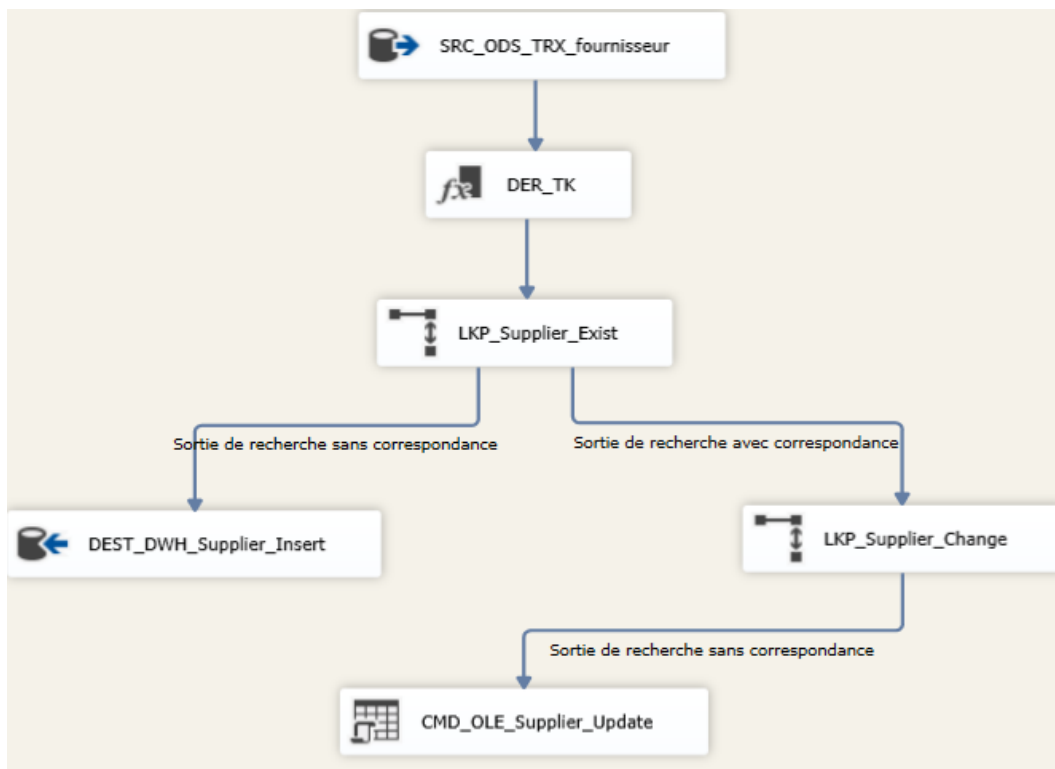


Figure 17 : Exemple de flux de données type

Le flux de données commence par une source de données (SRC), qui permet d'extraire de la donnée. Ici, la source est l'ODS depuis laquelle on exécute une requête SQL de type *SELECT*. A la sortie de ce premier composant, notre flux de donnée comprend toutes les colonnes et toutes les lignes choisies dans l'instruction SQL. Le second composant ajoute des colonnes dérivées (DER) de type technique (TK). Ces colonnes sont des colonnes d'audit déterminant quel package a inséré ou mis à jour la ligne de données et à quelle date.

Le composant de LOOKUP (LKP) est l'un de ceux que l'on utilisera le plus par la suite. Il permet d'enrichir notre flux de données de colonnes additionnelles via des jointures sur d'autres tables en source ou en destination, filtrer de la donnée, séparer conditionnellement le flux en sortie...

Il ne faut pas réinsérer à chaque exécution les mêmes lignes de Supplier. Il est donc nécessaire de vérifier si une ligne est déjà présente dans la table de destination ou non. Si elle est présente on ne l'insère pas, si elle est absente (et donc que c'est une nouvelle donnée), on l'insère. C'est l'objectif de cette brique LKP_Supplier_Exist. Nous allons nous connecter à la table de destination (dans le datawarehouse) Supplier en y récupérant les clés primaires et les clés fonctionnelles (clé qui définit une ligne d'un point de vue métier. Exemple : le code barre d'un produit). A partir des clés fonctionnelles de notre flux de données, on va réaliser une opération de recherche sur les clés fonctionnelles de la destination. Lorsque l'on a une correspondance, c'est-à-dire lorsqu'une ligne de notre flux de donnée correspond à une ligne de notre destination, nous ramenons dans le flux de données la clé primaire (qui est non significative). En sortie de composant, nous avons donc deux groupes de lignes de données constituant le flux de données :

- Celles qui ont eu une correspondance et qui possèdent désormais une clé primaire. C'est la sortie de recherche avec correspondance. Ce sont des lignes qui sont déjà passées par ce flux de données lors des exécutions précédentes.
- Celles qui n'ont pas eu de correspondance, et n'ont donc pas de clé primaire. C'est la sortie de recherche sans correspondance. Ce sont de nouvelles données, insérées en source depuis la dernière exécution.

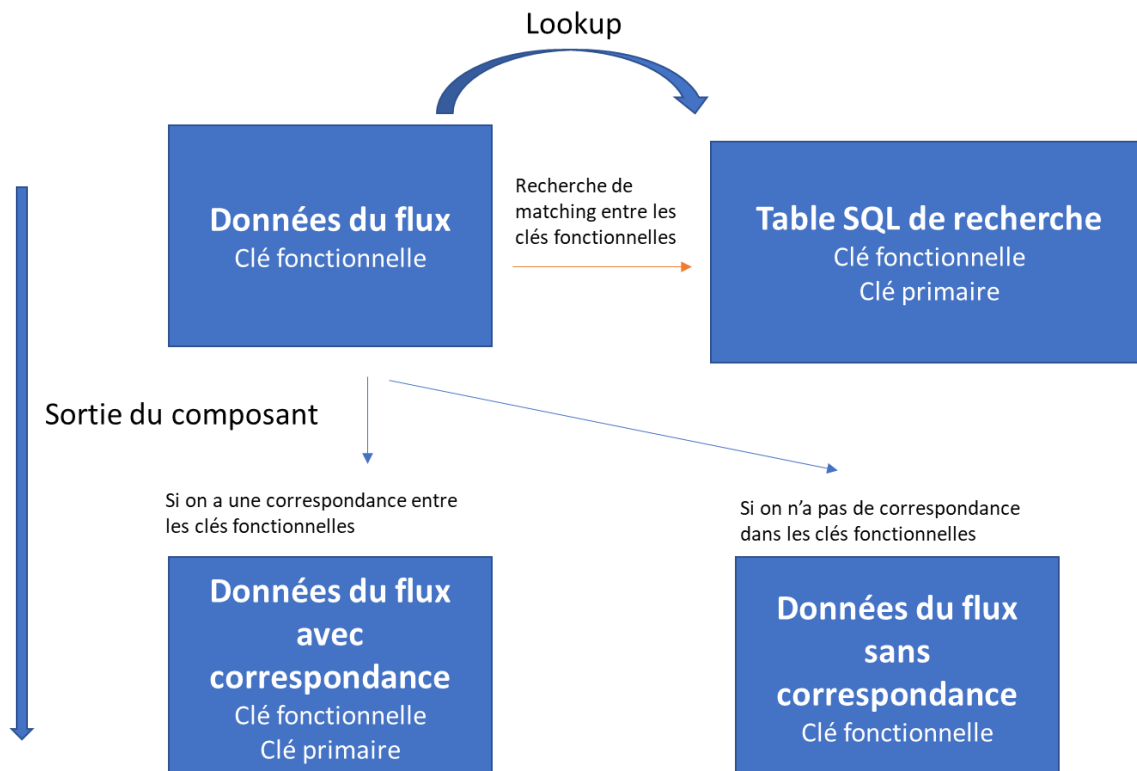


Figure 18 : Fonctionnement du composant Lookup

Ce composant de LOOKUP permet donc de détecter de nouvelles insertions dans la source de données.

Nous allons alors appliquer des opérations différentes à chacune de ces sorties.

La sortie de recherche sans correspondance

Le composant DEST_DWH_Supplier_Insert, va insérer les lignes dans la table de destination. L'avantage apporté est la possibilité d'insérer les lignes en bloc, par défaut de 10 000 lignes. Ce qui rend l'insertion de larges volumes plus rapide que si on les insère une par une.

La sortie de recherche avec correspondance

Nous allons appliquer un autre LOOKUP afin de savoir si la ligne de donnée a changé depuis son dernier passage dans le flux. Cette fois-ci, les colonnes de recherche vont être la clé primaire et toutes les colonnes qui sont susceptibles d'avoir été mises à jour. Nous n'appliquons rien sur la sortie avec correspondance car la donnée n'a pas bougé. Pour la sortie sans correspondance, le

composant Commande OLE DB (CMD_OLE_Supplier_Update) va envoyer une instruction SQL *UPDATE* à la destination pour mettre à jour les colonnes nécessaires. Contrairement à l'insertion, ce composant met à jour les données lignes par lignes, ce qui est plus long.

Ce flux ETL est répété sur toutes les tables nécessaires dans le datawarehouse, en modèle en étoile, pour l'analyse finale dans l'outil de restitution. Chaque flux aura ses spécificités afin d'assurer la qualité de la donnée, optimiser les performances d'exécution...

5.2.1.6. Restitution et tableaux de bord

Une fois les données chargées dans le datawarehouse, nous pouvons passer à la partie émergée de l'iceberg : la restitution et datavisualisation. Nous utilisons la solution Power BI de Microsoft.

Les données sont chargées dans un fichier Power BI, de type pbix. Power BI met en place plusieurs techniques d'optimisation de la taille de stockage de ses données : hachage... Une fois les données chargées, nous définissons les relations (jointures) que le rapport doit utiliser lors de la restitution des résultats. Power BI a donc son propre système de stockage, ne reposant pas sur la base de données source (DWH). La base de données source DWH permet simplement d'actualiser les données du rapport quotidiennement.

Nous pouvons alors commencer la partie de datavisualisation en glissant-déposant les colonnes que l'on souhaite analyser dans des visuels prédéfinis. L'outil se charge de l'agrégation automatique des données. Mais, nous n'avons chargé dans le datawarehouse que des données « unitaires » et « fines » : le montant de la vente le 22/03/2021, concernant tel produit, à tel client. Pour connaître le montant de l'année ou du mois passé, le stock de la veille, nous allons devoir passer par une étape de calcul d'indicateur. Dans PowerBI, ces indicateurs se nomment *mesures* et se développent en DAX (*Data analysis expression*). Contrairement aux colonnes du rapport, ces mesures sont calculées à la demande : en fonction du contexte des filtres du rapport, l'indicateur se recalcule pour donner la valeur actualisée et exacte. Pour ce faire, le *moteur* PowerBI va charger les données des colonnes nécessaires en RAM (mémoire vive) et réaliser les opérations mathématiques nécessaires.

5.2.2. L'enjeu de sobriété

Ce projet est une refonte de système décisionnel. En effet, une solution décisionnelle était déjà en place. Située sur la base de production de l'applicatif (de type ERP), elle consistait principalement à alimenter de nouvelles tables et transformer les données deux fois par jour. A chaque réalimentation, les tables cibles étaient vidées puis réalimentées sur l'historique complet de l'ERP, soit plus de 10 ans. Le volume total de données, en ne comptant que les 3 tables de faits principales, représentait plus de 8 GB, avec des processus redondants. La base de données

hébergeant toutes ces données est une base cloud Azure d'un niveau de 3000 DTU⁹, avec un coût économique mensuel de 3 800€. En comparaison avec un serveur au même prix, on peut considérer que ça représente environ 24 processeurs virtuels et 224 Go de RAM.

Notre client avait donc avant tout une problématique de performance sur sa solution décisionnelle. N'ayant pas un budget illimité, plutôt limité, la seconde problématique était économique. La nouvelle solution décisionnelle devait être économique pour l'entreprise au quotidien¹⁰. Avec une solution à 3 800€ par mois, on voit bien que nous étions dans une situation que l'on peut qualifier de « pur gaspillage » numérique.

En plus de ces enjeux, en cohérence avec nos valeurs et celles du décideur client (CTO du groupe), nous avons ajouté un enjeu de sobriété numérique. La réponse principale à cet enjeu, et l'axe qui nous a guidés tout au long de la réalisation de ce projet, a été un principe **d'autolimitation**. Nous avons développé sur des environnements serveurs très bas et relativement minimaux. L'objectif était de réussir à faire s'exécuter nos flux et transformations sur des environnements sous-taillés (peu performants), dans des temps les plus courts possibles. On utilisait alors les ressources à leur maximum, sur des ordinateurs moins énergivores. Ce n'est que lorsque l'on avait épuisé les possibilités d'optimisation logicielle que nous avons augmenté la puissance de calcul. Pour l'optimisation logicielle, nous avons appliqué de nombreuses pratiques d'écoconception, que l'on a adapté à notre domaine de Business Intelligence.

Problématique de la multiplication des plateformes

Lors d'un projet informatique, pour la sécurisation des processus, on a au maximum 5 plateformes de développement (sur de gros projets à forts budgets) :

1. Développement
2. Intégration
3. Recette
4. Pré-production
5. Production

Chacune des plateformes a sa propre fonction, permettant de sécuriser les processus, éviter des régressions et valider d'un point de vue utilisateur la validité d'une nouvelle fonctionnalité. 5 plateformes ça signifie également 5 fois l'infrastructure que l'on a présenté en Figure 13 : Infrastructure type d'un projet décisionnel) et donc, un coût énergétique et environnemental de l'infrastructure multiplié par 5, avant même d'avoir débuté le projet.

⁹ DTU : Database transaction unit, représente la puissance de calcul d'une base de données Azure, qui reprend des caractéristiques telles que la CPU, la mémoire, I/O... <https://docs.microsoft.com/fr-fr/azure/azure-sql/database/service-tiers-dtu>

¹⁰ On parle ici principalement de la location ou achat de ressources machines

Cependant, en général sur des projets à taille plus raisonnable, nous travaillons avec 3 plateformes (développement, recette et production), ce qui est nécessaire et suffisant à la sécurisation des processus. Notre projet analysé est sous cette configuration : développement, intégration/recette, production.

5.2.3. La recherche de sobriété : une proposition du prestataire, en symbiose avec les valeurs du décideur client

Avant la prestation de Treez, notre client avait un autre prestataire en charge de la refonte décisionnelle. Ce prestataire n'a pas donné satisfaction, car ses préoccupations n'étaient pas en accord avec le CTO, qui avait à cœur de mettre en place des solutions efficaces et à moindre coût (financier, humain et environnemental). Ce prestataire manquait d'expertise technique pour réaliser des solutions sobres et efficaces. Après des premiers échanges d'audit entre le consultant associé de Treez et le CTO du client, la première conclusion a été que l'on ne pouvait pas garder une base décisionnelle dans cet état et qu'il fallait faire quelque chose. C'est un partage de vision entre le prestataire et son client. Le coût de 3800€ de la base de données en comparaison aux services rendus était extrêmement élevé. La puissance de calcul était énorme pour des résultats décevants.

Autour de ce projet sobre, Treez a pu également organiser avec l'association ADN Ouest une série de webinaires sur la thématique de la sobriété numérique. Cette série s'est conclue par un retour d'expérience sur ce même projet, en coopération avec notre client. Qui a pu lui-même communiquer autour de ce sujet.

5.3. LES MESURES PRISES

5.3.1. Tentative de mesure

Au vu de l'infrastructure cloud et de la complexité de mesurer de manière fiable et complète (coût d'une ACV) l'impact environnement d'un projet informatique en général, nous montrons que nous avons fait en sorte de conserver une infrastructure cloud la plus sobre possible (infrastructure ajustée exactement au besoin) et avons développé un code le plus performant et le moins énergivore possible.

5.3.2. Le choix d'une infrastructure cloud

Pour des raisons économiques et de cohérence avec le reste du système d'information du groupe, le choix a été fait d'utiliser une infrastructure cloud Microsoft Azure. En tant que prestataire, nous avons également pu valider ce choix pour des raisons de sobriété numériques. Treez étant expert sur les technologies Azure, nous étions en mesure de savoir comment bien gérer cette infrastructure et éviter les pièges. L'infrastructure du projet est donc la suivante :

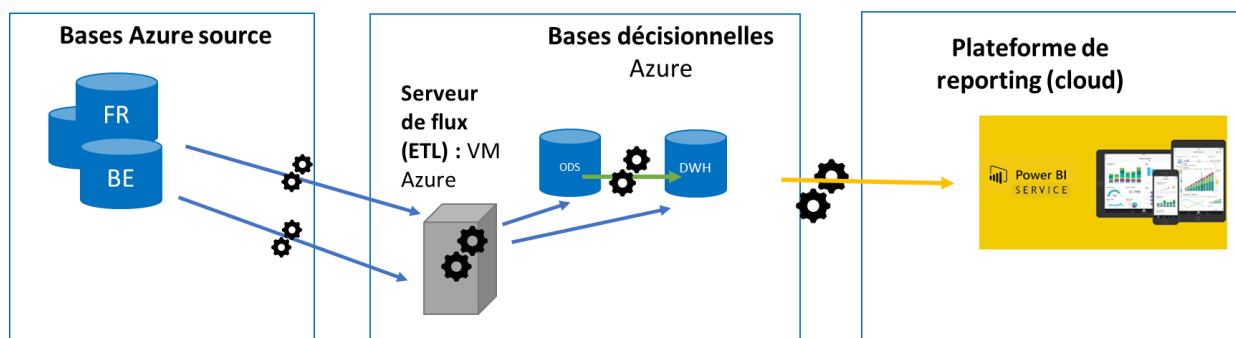


Figure 19 : Infrastructure du projet décisionnel

Le système décisionnel se compose donc de :

- 2 bases Azure SQL Database : ODS et DWH
- 1 VM (Virtual Machine), hébergeant le serveur des flux, c'est-à-dire l'ETL SSIS qui s'occupe des requêtes, transformations et écriture sur les bases cibles
- Le service Power BI, hébergé dans le cloud, pour la diffusion des reportings.

Etant sur un projet décisionnel et donc ayant un but d'aide à la décision, nous n'avons pas besoin d'avoir des données en *streaming*. Il n'est donc pas nécessaire que nos flux de transformation soient en exécution permanente (ou en temps réels). De la même manière, une fois les données du datawarehouse chargées dans les rapports Power BI, nous n'avons plus besoin de les recharger avant la prochaine actualisation des flux. Nous avons fait le choix d'actualiser les flux quotidiennement, à raison d'une fois par jour et du lundi au vendredi. Puisque les équipes métiers travaillent peu ou pas du tout le weekend, il n'est pas nécessaire d'exécuter les flux. Etant donné que les rapports s'étalent sur des périodes s'arrêtant au 31 du mois précédent, nous pourrions n'actualiser les données que mensuellement. Mais, certains flux de table (comme la table « Vehicle »), historisent certains champs. Sans actualisation quotidienne, cette historisation se trouverait erronée.

Avec cette méthode, la machine virtuelle et les deux bases de données ne sont utilisées que le temps de l'actualisation des données dans le service Power BI. Seul le service Power BI est actif 24h/24, et en attente d'utilisateurs finaux. Grâce à notre infrastructure cloud Azure, nous allons pouvoir automatiser l'arrêt et le démarrage de la machine virtuelle, à des heures prédéfinies. Cependant, nous ne pouvons pas arrêter les bases de données qui sont en mode SAAS¹¹. Nous pouvons, en revanche, ajuster leur puissance de calcul réservée (ou « downscale »). Lorsque nous n'aurons plus besoin d'exécuter des requêtes sur la base, nous allons diminuer sa puissance de calcul au minimum. Ce faisant, nous libérons des ressources sur le serveur physique hébergé par Microsoft. Microsoft Azure va alors pouvoir réallouer ces ressources mutualisées vers d'autres clients qui en auraient besoin à ce moment-là, par exemple dans un pays dont l'activité est décalée avec l'Europe sur un plan horaires. Cela est possible grâce aux machines virtuelles qui

¹¹ Software as a service

composent les serveurs Cloud Azure. Plusieurs machines virtuelles sont hébergées sur un même serveur physique (ou « host »), plusieurs serveurs physiques sont hébergés dans un Data Center.

On peut alors schématiser le start&stop de la VM, la mise à l'échelle des bases de données et le lancement des flux ETL de la manière suivante :

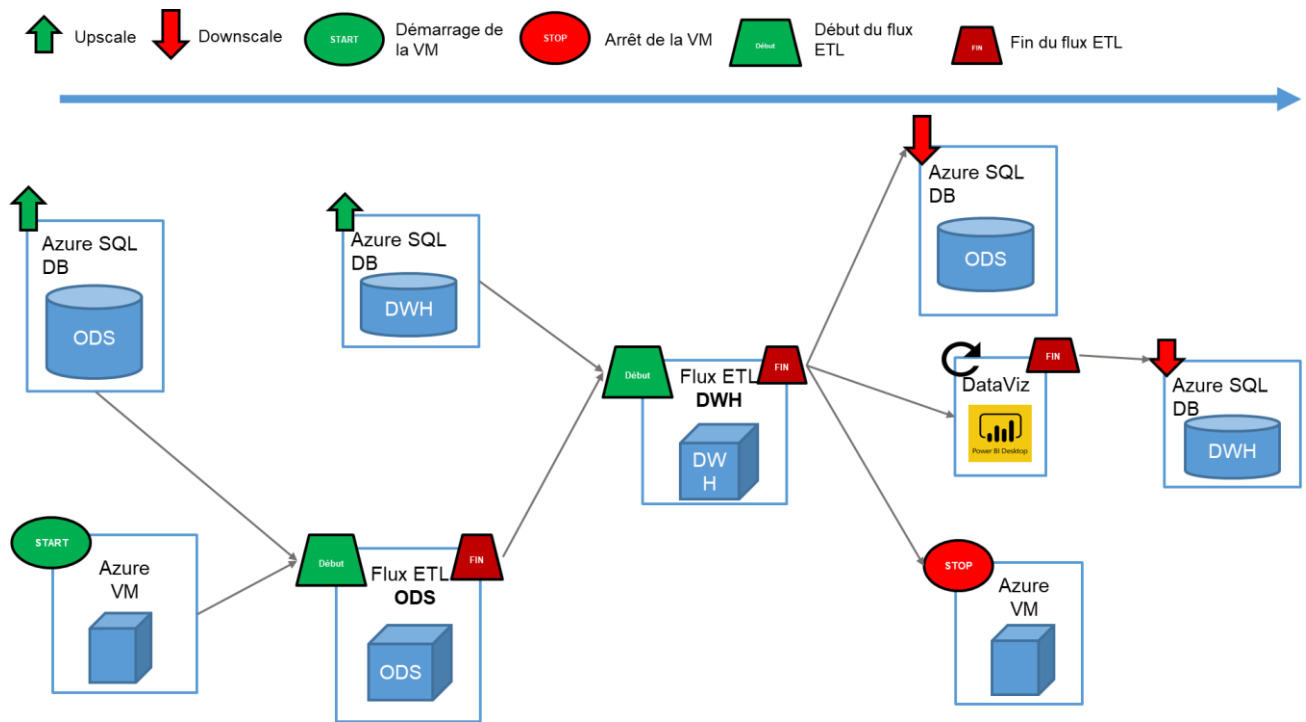


Figure 20 : Lancement récurrent des flux

Au lancement des flux ETL : on commence par démarrer la machine virtuelle et augmenter la base ODS afin de pouvoir exécuter les flux ETL qui actualisent la base ODS. En parallèle, on augmente la base DWH. Dès que le flux de l'ODS est terminé, on peut exécuter les flux d'actualisation du DWH. Une fois cette étape terminée, on n'a plus besoin de la base ODS (on la downscale), ni de la VM (on la stoppe) et on peut lancer l'actualisation des rapports. Et dès que les rapports sont actualisés, on downscale la base DWH. On minimise les temps de sollicitation de chacune des ressources.

Pour la partie technique, le start&stop et la mise à l'échelle sont gérés par le service Azure Automation Account, qui exécute à des heures prédéfinies, des scripts Powershell. Le lancement des flux ETL SSIS est géré par l'agent SQL, hébergé par la machine virtuelle, de la même manière.

De cette manière, les serveurs physiques Azure ne sont pas éteints, mais, optimisés. Pour notre client, il a libéré une ressource mutualisée, et n'en est donc plus responsable, d'un point de vue économique mais aussi environnemental. A l'échelle de Microsoft (et si tous ses clients faisaient la même chose), s'ils ont une bonne gestion de leurs serveurs, ces derniers sont utilisés le plus souvent possible au maximum de leur capacité. Ce qui diminue le nombre de serveur sous-

utilisés, et évite la création de nouveaux serveurs. C'est le bénéfice de la mutualisation, comme on peut mutualiser des vélos ou des voitures dans le monde « physique » (vélib, autopartage...).

Au lieu de payer et réserver des ressources allumées, notre système décisionnel utilise les seules ressources nécessaires à son fonctionnement. En caricaturant, on peut déjà dire que si nos flux s'exécutent pendant une heure quotidiennement, on divise par 24 le coût environnemental de notre infrastructure.

Actuellement, au « repos », nos bases de données sont à 10 DTU (unité de capacité de calcul dans Azure), capacité minimale disponible. Lorsque nous les sollicitons, nous les augmentons à 50 DTU. La VM de flux a 2 processeurs virtuels et 7 Go de mémoire vive. Les flux s'exécutant pendant 1h quotidiennement, on peut alors évaluer le coût économique des deux bases ainsi que la VM à environ 60 € mensuels. En comparaison, sans gestion sobre, avec deux bases à 50 DTU et une VM allumée en permanence, le coût reviendrait à 290 €. On peut en conclure qu'au long terme, une infrastructure gérée sobrement est avantageuse économiquement. De plus, on constate que la base de production (qui hébergeait jusqu'alors la solution décisionnelle) à 3 800€ par mois et 3000 DTU, même si elle apporte des services applicatifs additionnels, était bien trop surtaillée.

Il est maintenant nécessaire de s'intéresser aux mesures prises pour éco-concevoir cette solution.

5.3.3. L'éco développement

Dans cette partie, nous allons analyser trois flux ETL d'alimentation du datawarehouse et l'actualisation de la plateforme de reporting, chacun ayant quelques particularités répondant à des besoins fonctionnels et de qualité. A eux trois, ces flux représentent globalement toutes les problématiques de chargement rencontrées sur ce projet.

Ce projet décisionnel a 3 sources de données différentes à sa disposition. Chacune de ces bases de données correspondait à une filiale du client : France, Belgique et Pays-Bas. Ces 3 filiales ayant le même applicatif, la structure de leurs bases de données était strictement identique. Nous avons donc pu réduire le coût de développement par 3 en paramétrant les flux, de telle sorte qu'un flux pour une table puisse être utilisé pour les trois filiales. Par exemple, les données de *vehicule* de chaque filiale sont chargées dans la même table du DWH *Vehicle*, grâce au flux « ETL_DWH_Vehicle », qui a un paramètre « Subsidiary », indiquant au composant source de se connecter à telle ou telle source de données.

Notre méthode de développement éco responsable :

Notre méthode est très simple :

- Nous développons dans les bonnes pratiques du code afin de consommer le minimum de ressources possible pour chaque brique développée

- Nous développons sur un serveur aux performances faibles, afin de bien identifier les éléments de code qui seront à optimiser, c'est-à-dire les endroits des flux pendant lesquels le serveur de développement s'étouffe (plus assez de RAM, CPU ou trop de I/O disques¹²)
- Une fois toutes les optimisations possibles réalisées, nous dimensionnons le serveur afin d'exécuter le code dans des temps de réponses acceptables pour les utilisateurs



Figure 21 : Notre méthode d'écoconception

5.3.3.1. Flux « classique » : alimentation des objets Vehicle

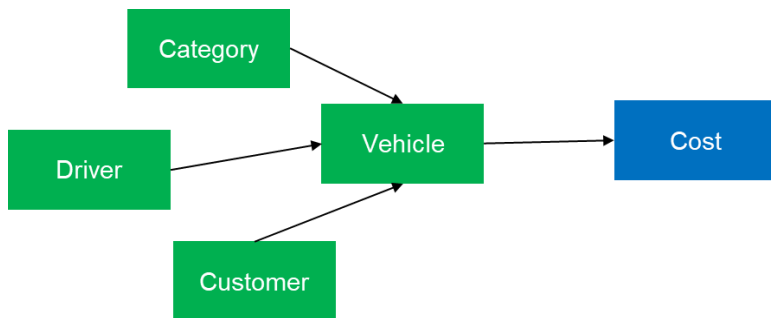


Figure 22 : Vehicle : modélisation (partielle) en flocon

Le flux *DWH_Vehicle* alimente la table *Vehicle*, composé des objets décrivant les véhicules. La table *Vehicle* est la dimension centrale car c'est l'objet central du métier et c'est elle qui permet d'analyser les coûts (associés à un véhicule), l'historisation des statuts et les relevés kilométriques. Le modèle est « floconné » autour de cette table

car un véhicule appartient à un client, conducteur ainsi qu'à un certain découpage de la société du client : société, business unit, catégorie...

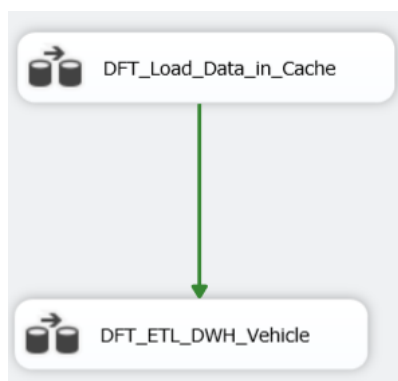


Figure 23 : Vehicle - Flux de contrôle

Lors de l'alimentation ETL, il est nécessaire d'utiliser des composants *lookup* afin d'aller récupérer les clés primaires des dimensions associées (alimentées précédemment) et de pouvoir les utiliser en tant que clés étrangères dans la table *Vehicle*. Le développement de notre flux étant unique pour l'alimentation des objets véhicules provenant de nos trois sources de données différentes, nous avons automatisé et filtré les données provenant de ces tables de recherche pour ne ramener, à chaque fois, seulement les données correspondant à la filiale (France, Belgique, Pays-Bas) concernées par l'alimentation. Le composant *lookup* stocke les données de recherche en RAM (mémoire vive). De cette manière, nous limitons l'utilisation de la mémoire vive lors de l'exécution du flux. Ce sont ces opérations

¹² Ecritures et lectures sur le disque dur

qui sont réalisées dans la tâche de flux de données « DFT_Load_Data_in_Cache ». Nous utilisons des *transformations de cache* afin de stocker des données de dimension dans le cache (en mémoire). Ces données stockées sont utilisées par la suite dans la tâche de flux de données suivante : « DFT_ETL_DWH_Vehicule ».

La première étape du flux de données principal, est la requête SQL SELECT sur la source de données (SRC_ODS_TRX_vehicule).

Ici, on va réaliser un maximum de transformation car :

- On est au plus près de la source de données : les requêtes SQL se réalisent sur la base de données source
- Le moteur SQL est très performant pour toutes les opérations de conversions, filtres, agrégats et tris¹³
- Les opérations de jointures internes et externes sont performantes directement sur la source de données.

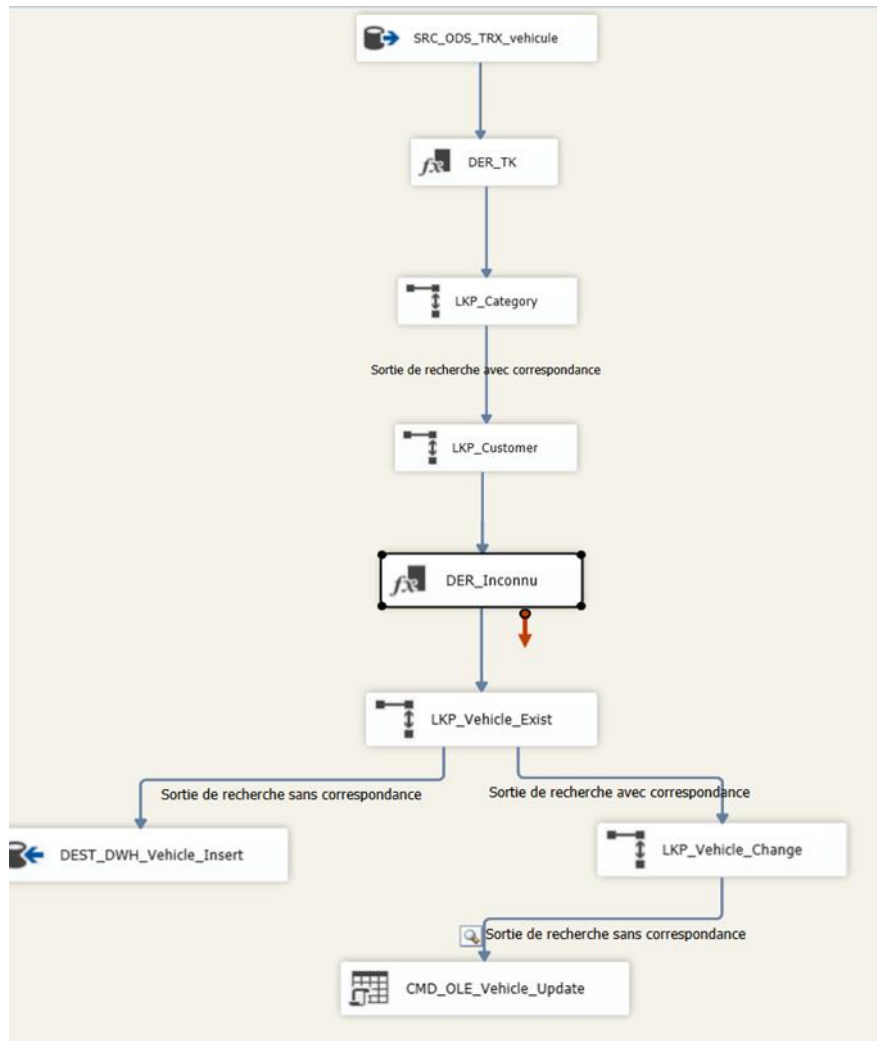


Figure 24 : Vehicule - Flux de données

Nous sélectionnons donc les colonnes **nécessaires**. Nous ne ramenons pas de colonne qui n'ait pas de sens fonctionnel, technique ou qui ne seraient pas utilisées dans la finalité du projet et ses reportings. Une colonne représente, bien évidemment, de la donnée qui va transiter d'un serveur à l'autre, d'une base à une autre et donc consommer du réseau, de l'espace de stockage, de la ressource machine (CPU, RAM) et, *in fine*, de l'énergie électrique (et donc de l'énergie primaire). Si, par la suite, une colonne supplémentaire est nécessaire, le coût de développement pour la rajouter est relativement faible, grâce à une bonne documentation et normalisation du développement des flux. De la même manière, on filtre les lignes qui n'ont pas d'intérêt (aucun filtre ici). Nous convertissons si besoin les données dans leur type cible. Ainsi, nous privilégierons

¹³ Même si ces deux derniers sont à éviter au maximum, voir à proscrire

le type *float* au *numeric*. Le stockage d'un float est moins important qu'un numeric car le float a une précision par défaut (moindre). De même on préférera utiliser du *nvarchar* plutôt que du *nchar* car le stockage du premier est variable en fonction de la longueur de la valeur, et non fixe comme le *nchar*. La dernière « transformation » lors de la requête source sont les jointures, qui nous permettent d'enrichir les informations de nos objets véhicules : informations du contrat, loyer du véhicule... Si possible et cohérent, on privilégie ici les jointures internes aux jointures externes pour leurs plus grandes performances. Si certaines lignes de la table jointes ne sont pas du tout utilisées, on peut définir un filtre supplémentaire (dès la jointure) pour accélérer le temps de traitement de la jointure et le parcours de la table par le moteur SQL.

Ensuite, les composants de lookup font appel aux données du cache, stockées précédemment pour récupérer les clés étrangères. Il n'est pas possible de faire cette opération sur la requête source grâce à une jointure SQL car, la requête source se réalise sur la base source ODS, tandis que les tables de recherche se trouvent sur la base de destination DWH.

Les derniers composants d'*upsert*¹⁴ permettent de déterminer si une ligne de véhicule existe déjà dans la table cible, et d'agir en conséquence. Le composant d'insertion permet une insertion *en bloc*, par défaut de 10 000 lignes et est donc plus performant qu'une instruction SQL *INSERT*, ligne par ligne. Le composant d'update, au contraire, est plus lent, en envoyant les données ligne par ligne. Dans certains cas, il peut être à éviter, si les données de la table varient régulièrement. Mais, les procédés pour pallier à cette problématique sont plus consommateurs de ressources machine et de stockage intermédiaire. Dans notre cas, peu de lignes de véhicule sont modifiées tous les jours. Ce composant est donc tenable.

Pour démontrer les avantages environnementaux de chacune de ces mesures, nous avons mesuré les temps d'exécution du flux Vehicle avec quelques modifications. Nous avons également relevé le pourcentage de batterie au démarrage et à la fin de l'exécution, à luminosité constante, wi-fi désactivé.

Comme nous avons pu le voir précédemment, si nous sollicitons moins (moins de consommation de RAM et de CPU et moins longtemps) les ressources d'une machine, alors on peut diminuer la taille de l'ordinateur et consommer moins d'énergie.

¹⁴ Insert or update

Flux	% batterie début	% batterie fin	Durée d'exécution
Vehicle (optimisé)	100	99	30 s
Toutes les colonnes sources	100	97	56 s
Toute la table dans les lookup	100	99	42 s
Insert ligne par ligne	95	87	263 s
Les 3 mauvaises pratiques ci-dessus combinées	90	81	275 s

Figure 25 : Comparaison des mesures d'écodéveloppement

Nous nous sommes intéressés principalement au chargement initial de la table Vehicle. Nous n'avons donc jamais de données passant dans le flux d'update. Contrairement à ce que nous nous attendions, le fait de prendre la table entière dans les lookup ne réduit pas fortement les performances. Le composant lookup, lorsqu'il n'induit pas de requêtes SQL sur la table de recherche semble optimiser la taille des données mises en cache pour la recherche. En revanche, c'est bien le fait d'insérer les données lignes par lignes (et non par bloc de 10 000) qui réduit fortement les performances d'exécution, avec une durée de 263 secondes contre 30. Ce flux sollicite donc plus longtemps les ressources de la machine, ce qui nous empêcherait, à terme de l'éteindre plus tôt.

Pendant l'exécution de ces packages, nous avons également mesuré les ressources utilisées (CPU et RAM) grâce à l'utilitaire QuickCPU¹⁵, qui permet de mesurer le minimum, maximum et la moyenne d'indicateurs à partir de capteurs tels que l'usage de la mémoire vive, la température de la CPU. Ainsi le flux vehicle optimisé utilise en moyenne 7,16 Gb de mémoire vive contre 7,61 pour celui qui insère ligne par ligne.

Au vu de ces mesures, nous avons pu valider que notre développement de flux Vehicle que nous avons éco-conçu est le plus optimisé et le plus performant, tout en respectant nos contraintes de qualité de données.

5.3.3.2. Flux avec rejet : Driver

Le second flux présenté ici concerne l'alimentation des objets représentant les conducteurs. Dans ce cas précis, la source de données de l'applicatif contenaient des doublons de conducteurs : certains conducteurs avaient le même nom, prénom, date de naissance, numéro de permis... A des fins décisionnelles, il était donc souhaitable de nettoyer dans le datawarehouse ces doublons. Nous avons donc mis en place un flux de rejet sur les doublons de conducteur, afin de les remonter dans une table précise au client et qu'il puisse, à terme nettoyer sa base de données

¹⁵ <https://coderbag.com/product/quickcpu>

source. Dans le flux ETL, cela impliquait d'utiliser des composants dits bloquants : tri et agrégat, fortement consommateurs de mémoire vive.

La requête sur la source ODS renvoie les données triées en fonction des colonnes composant la clé fonctionnelle (le tri est nécessaire pour les composants suivants d'agréments et de jointure de fusion).

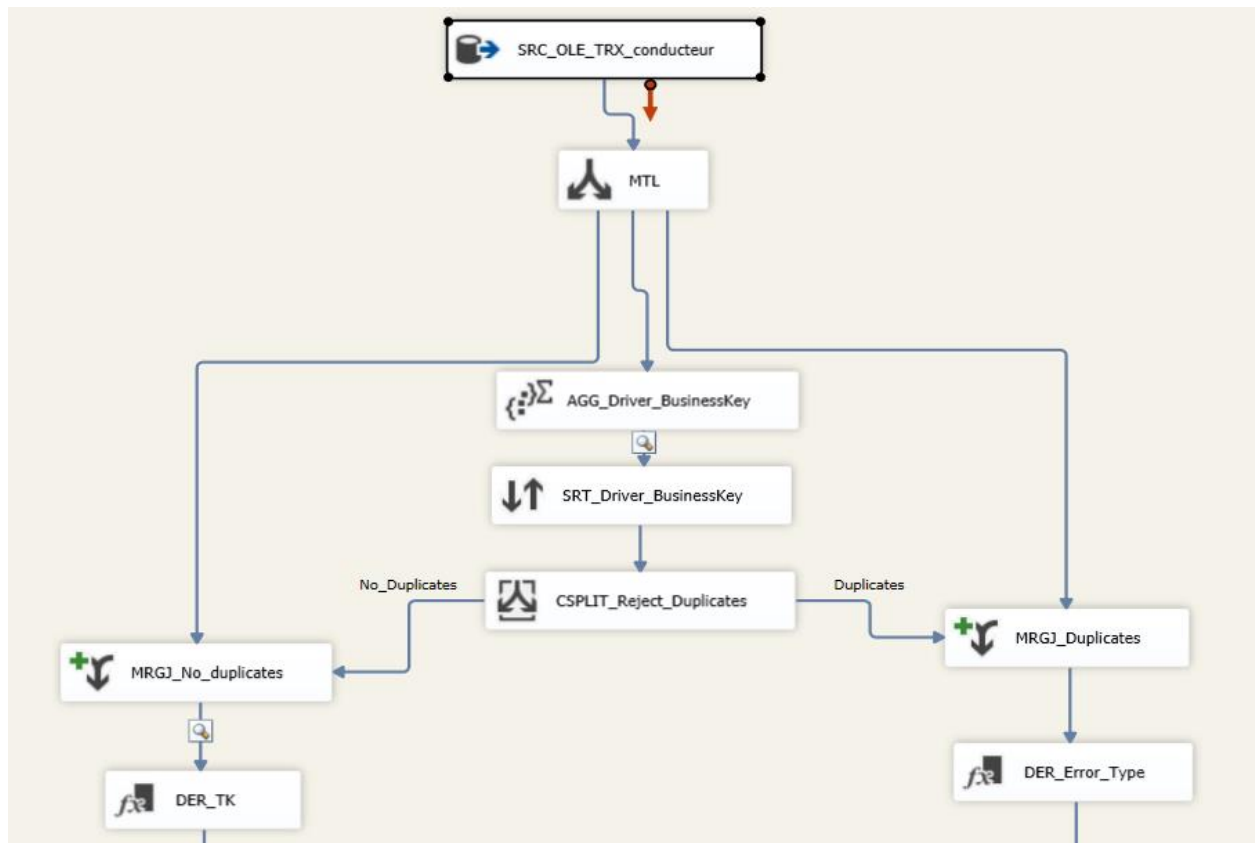


Figure 26 : Flux Driver : gestion des doublons

Le composant suivant (MTL) permet de dupliquer le flux en 3 sorties. A cet endroit, chaque ligne de donnée est donc présente 3 fois dans la mémoire de l'appliquet. Le flux central est agrégé par rapport à la clé fonctionnelle. En sortie du composant AGG_Driver_BusinessKey, nous n'avons plus que les colonnes de clés fonctionnelles (sur lesquelles nous ne souhaitons pas de doublons) et une colonne *Count* du nombre de ligne dans chacun des groupes. Ce flux est ensuite trié dans le même ordre que lors de la requête SQL. Le composant CSPLIT permet de rediriger les lignes de sorties selon une condition. A gauche, on redirige les lignes agrégés où *Count* est égal à 1, c'est-à-dire les conducteurs uniques. A droite, ce sont les autres lignes : les conducteurs dupliqués. Finalement, les composants de jointure de fusion (MRGJ) permettent de réaliser une jointure interne avec les données « brutes » issues de la source de données, afin de récupérer toutes les colonnes. A gauche, dans la suite du flux, les données de conducteurs uniques sont insérées dans la table correspondante du DWH. La qualité de ces données est vérifiée et validée pour de futures analyses. A droite, les doublons sont rejetés dans une table spécifique « d'erreur » et remontés aux métiers et/ou gestionnaires IT pour des actions correctives (suppression, mise à jour des clés fonctionnelles...). Une fois ces doublons corrigés et devenus uniques dans la base source, ils sont

automatiquement revérifiés dans ce flux et finalement insérés dans le datawarehouse, en tant qu'objet validé et qualitatif.

Ce retravail de données et de dédoublement est donc principalement consommateur de mémoire vive. Les composants d'agrégat et de tri sont dits bloquants car ils stockent toutes les données en mémoire avant d'effectuer leurs transformations aux composants suivants. Contrairement à un flux classique où dès qu'un paquet de ligne a terminé d'être transformé, il est directement envoyé au composant qui suit.

Ce flux n'est pas mieux éco-conçu, au contraire. Mais, nous n'avons pas d'autres moyens pour respecter notre contrainte de qualité de données.

Sans phase de rejet, notre flux (en local) dure 9 secondes, contre 27 avec le rejet. Le fait d'introduire cette contrainte de qualité de données sur les doublons multiplie la consommation énergétique de ce flux par 3.

5.3.3.3. Alimentation d'une table de fait : ODS et DWH

Les tables de faits (coûts, relevés kilométriques, historisation des états de véhicule) sont les plus volumineuses, jusqu'à 8 Gb. La première mesure prise est de limiter, via une condition SQL *WHERE* aux seuls faits des 5 dernières années : le client n'a pas besoin d'analyser ses données sur un historique plus long. En revanche l'upsert n'est pas possible dans ces cas-là : mettre en cache pour un lookup toute la table destination, de 8 Gb consommerait toute la mémoire vive disponible sur une VM disposant de 8Go de RAM. Il n'y aurait donc plus de mémoire pour exécuter les autres opérations de transformation et d'insertion.

De même, lors de l'insertion dans l'ODS, réaliser un « annule et remplace » sur cette table serait très coûteux. Nous n'insérons donc seulement les dernières lignes insérées (en source) depuis la dernière exécution du package. Nous commençons par sélectionner dans notre destination la clé de la dernière ligne insérée dans la table, et stockons cette valeur dans une variable. Dans la table source de l'applicatif, cette clé est auto-incrémentée.

Nous savons donc que toutes les lignes insérées après auront une clé supérieure à celle-ci. Puis dans la requête source, nous sélectionnons seulement les lignes où la clé est supérieure à celle stockée. De cette manière notre flux est incrémentiel : il n'insère que les nouvelles données depuis la dernière exécution du flux.

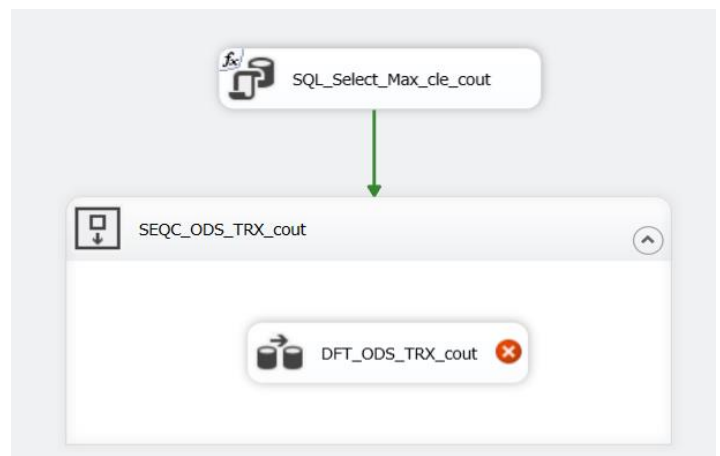


Figure 27 : Coûts : flux de contrôle

Lors de l'alimentation dans le datawarehouse, nous appliquons le même processus incrémentiel. Les seules transformations supplémentaires appliquées ici sont les ajouts de clés étrangères.

Cette méthode d'insertion incrémentielle était possible car nous étions sûrs, et avons vérifié, que cette table dans l'application source ne pouvait pas avoir d'opérations de mise à jour des données. Dans le cas contraire, nous aurions été obligés de mettre en place un processus de détection de mise à jour de données sur la base source. Ceci aurait ralenti les performances globales des flux d'alimentation du datawarehouse.

Ainsi, l'import de données incrémentielles nous évite de requêter, uploader puis downloader quotidiennement 8 Go de données. Même si nous en sommes obligés lors de la première importation.

5.3.3.4. *Power BI : actualisation incrémentielle, minimalisation...*

Une fois toutes les données de toutes les tables nécessaires importées dans le datawarehouse, les rapports Power BI doivent récupérer ces données afin de pouvoir présenter des rapports actualisés automatiquement et quotidiennement. Le fonctionnement de Power BI nécessite donc de charger les données du datawarehouse dans le fichier de rapport. Nous avons donc une duplication de la donnée, ce qui, naturellement, entraîne un coût de stockage, énergétique et environnemental plus important.

Pour réduire au maximum ce surplus de coût, nous faisons attention à n'importer que les données nécessaires au rapport : nous n'importons pas les colonnes techniques d'audit (TK_Source et TK_Date d'insertion et de mise à jour de la donnée). Les rapports couvrant un périmètre de 3 ans, nous importons seulement les données de coûts, de relevés kilométriques et d'historisation des états de véhicule couvrant cette période. De plus, nous n'avons pas de dimension calendrier dans le datawarehouse, qui permettrait de gérer facilement des croisements entre la date, l'année, le mois, le trimestre, les jours fériés... Power BI permet de calculer de manière simple cette table directement dans le rapport, ce qui évite de stocker deux fois cette information (dans le rapport et en base). Nous variabilisons également cette table afin qu'elle ne couvre que notre périmètre de 3 ans : son volume n'augmente pas au fil des jours et reste stable. Nous restons donc toujours sur notre principe de minimalisation des données et donc, *in fine*, d'autolimitation.

Une fois le rapport développé, il est publié dans le service Power BI, en ligne pour partage et diffusion du rapport. Dans le service Power BI, notre rapport est représenté par deux objets : le rapport lui-même et le jeu de données sur lequel il repose. Nous automatisons le rafraîchissement de ces données quotidiennement grâce à une actualisation planifiée afin que les données du rapport soient toujours à jour. De plus, pour ne pas réactualiser et donc réimporter quotidiennement le volume de données correspondant à 3 ans de faits, nous mettons en place dans le rapport Power BI l'actualisation incrémentielle. Ceci permet de n'importer

quotidiennement que les nouvelles données (de la veille) et de supprimer les données qui ne correspondent plus à notre période de 3 années. Ainsi, nous limitons la taille de stockage du jeu de données dans le service (cloud), le volume de données requêté quotidiennement et le temps de rafraîchissement (et donc de sollicitation de la base de données).

5.3.3.5. *Récapitulatif des mesures d'écodéveloppement*

Nous avons donc optimisé le code de nos flux de données en comprenant le fonctionnement des composants ETL utilisés et du moteur SQL. De cette manière, nous avons utilisé des composants ETL et écrit un code SQL sobre. Avoir repéré que nous avons 3 sources de données identiques nous a permis d'automatiser les flux et de réduire le temps de développement (et donc les tests, consommateurs en énergie). Nous avons réduit au maximum le volume de données (en nombre de lignes et en nombre de colonnes).

Toutes ces mesures ont été prises sur des environnements serveurs peu performants. Ce n'est qu'après que nous avons augmenté les performances physiques du serveur.

5.3.4. *Regard critique*

Ces méthodes d'écodéveloppement ont également un avantage économique. Pour rappel, le datawarehouse originel coûteux environ 3 800 € par mois. Aujourd'hui grâce à toutes ces optimisations, le coût économique revient à 60 € mensuels.

L'interface par composants en « glisser-déposer » d'un ETL facilite la maintenance des flux, par rapport à un code écrit et développé. En effet, il n'y a pas besoin d'être expert dans la technologie (ou le langage) pour comprendre l'utilité de chacun des composants. Il suffit d'avoir des connaissances sur les principes de fonctionnement d'un ETL.

En termes d'écoconception, il aurait pu être intéressant de placer les composants d'upsert dès la sortie de la source SQL. Ainsi nous aurions moins de données à transiter quotidiennement dans le flux : les données déjà insérées et qui n'ont pas bougées (été mises à jour) seraient abandonnées dès le début du flux et ne subiraient pas des transformations inutiles : lookup, ajout de colonnes... transformation qui seraient ajoutés en sortie des composants d'upsert. Cette méthode, en revanche, doublerait le coût en composants de transformation et augmenterait légèrement le coût de développement. Nous étant plus penché sur les méthodes pour optimiser l'insertion initiale des données, nous avons possiblement négligé la partie quotidienne de l'exécution des flux.

Du côté de l'ODS, nous aurions pu lancer des purges des tables de faits, éventuellement quotidiennes, afin de diminuer le stockage : les faits ne sont jamais mis à jour. Une fois importés dans le datawarehouse, ils n'ont plus d'intérêt à être stockés dans l'ODS. On réduirait alors drastiquement le coût de stockage de l'ODS. On pourrait faire la même chose dans la base de données source de l'applicatif.

Sans une connaissance approfondie des sources de données il peut être difficile de déterminer quelles sont les tables qui ont des mises à jour de masse fréquemment. Par exemple, pour la table Vehicle, on a déjà eu une mise à jour de masse sur la quasi-totalité des occurrences. Mais habituellement on n'en a pas trop. Il est donc difficile de trouver la frontière de volume optimal entre un update (ligne à ligne pour Vehicle) et un merge (comme pour la table Cost). D'où l'importance du monitoring et du suivi des performances quotidiennes afin de déterminer la solution optimale dans chacun des cas.

Le client n'a demandé que 5 ans d'historique mais n'en utilise finalement réellement dans la restitution que 3. En tant que prestataire, en début du projet, nous sommes limités sur notre vision des données de l'entreprise. Nous n'avons pas forcément la vision exacte finale du projet et une compréhension optimale des demandes clients. Il nous faut également répondre aux exigences client : s'il nous demande 5 ans, alors nous lui donnons 5 ans. Il faut rappeler que la démarche de sobriété numérique est initiée par Treez, fournisseur, faisant « pression » sur son client. La démarche inverse a plus de vertus et plus de poids. Il est plus simple pour un client de faire pression sur son fournisseur, qui changera ses habitudes, au risque de perdre des marchés et appels d'offres.

Un regard externe sur notre autolimitation aurait pu être intéressant : cette personne aurait pu nous dire si oui ou non ceci ou ceci est vraiment nécessaire. Mais cela devrait s'inscrire dans une démarche plus globale de politique RSE d'entreprise, qui se confronterait vite aux réalités et avantages commerciaux de cette solution décisionnelle de reporting.

Nous nous sommes intéressés à l'impact environnemental global de ce projet. C'est-à-dire, quel sera son empreinte une fois mis en production. Mais, la phase de développement peut avoir un impact non négligeable. Les séries d'exécutions et de réexécution pour réaliser les tests, et aussi se faire son expérience (notamment en tant que développeur junior), ainsi que le débogage et les recherches des sources d'erreur ont un coût. Comment peut-on réduire au maximum le coût environnemental de développement tout en conservant la qualité du projet ? Plusieurs pistes de réflexions peuvent s'offrir à nous :

- Travail sur des échantillons pour la phase de développement. L'inconvénient de cette solution est que l'on pourrait manquer des cas faisant échouer le flux. On ne verrait ces erreurs que lors de l'intégration, ce qui en augmenterait le coût.
- Développement sur poste en local, afin de réduire la charge environnementale des serveurs cloud.

CONCLUSION & PERSPECTIVES

La sobriété numérique est avant tout une démarche d'introspection et de prise en considération des problématiques environnementales dans le numérique. Cette démarche initie les réflexions menant à la sobriété numérique. Finalement, les bonnes pratiques y conduisant sont les pratiques naturelles (« innées ») d'efficacité numérique : optimisation du code, minimalisation, limitation... On retrouve également des réflexes « écologiques » : réutilisation des appareils et allongement de leur durée de vie, mutualisation, lutte contre l'obsolescence...

Au vu de ces pratiques, oui, il est encore possible de réaliser des projets datas écoresponsables. Dans les mêmes démarches de réflexion, il est toutefois nécessaire et indispensable de s'interroger sur les usages du projet et d'en comprendre les impacts environnementaux :

- A-t-on vraiment besoin d'ingérer et envoyer les données en streaming ?
- Est-il nécessaire de conserver tout cet historique, tous ces attributs ?
- etc...

Il faut recentraliser la solution à son usage final et se débarrasser des fonctionnalités accessoires, inutiles ou non-demandées. De cette manière, la solution est plus pérenne dans le temps car elle est moins susceptible de comporter des fonctionnalités et données saturant le système, et plus facilement maintenable. La durée de vie de l'infrastructure est allongée, ainsi que la durée d'amortissement de l'impact environnemental.

Cette limitation de fonctionnalités pourrait être perçue par certains comme une décroissance punitive. Or d'un point de vue UX et ergonomie pour les utilisateurs finaux, cela fait totalement sens. Moins de fonctionnalités, c'est une solution plus simple et plus agréable pour les utilisateurs. L'utilisateur est plus satisfait et on peut donc conclure sur une qualité globale du projet data écoresponsable.

En tant que développeurs, décideurs, collaborateurs d'une entreprise, nous sommes aussi des citoyens en démocratie. Nous nous devons de faire valoir notre écocitoyenneté numérique et pousser les organisations, au sein de nos entreprises ou de notre nation, à adopter des pratiques écoresponsables, que ce soit dans le numérique ou non. C'est cette prise de conscience collective qui nous permettra d'assurer une réelle et vertueuse transition vers la sobriété numérique.

Concernant la partie matérielle du numérique, on pourrait se demander s'il est possible d'optimiser son impact (métaux rares). Quelques pistes d'amélioration et de recherche autour d'un « autre numérique » émergent (Monnin, 2021):

- Le photonique (basé sur des photons)
- L'ordinateur quantique
- Le biomimétisme et neuromorphisme (des machines *sensibles*)

- De nouveaux langages, architectures, logiques ?
- De nouveaux matériaux pour les microprocesseurs ?

Malgré les potentielles évolutions de ces différents domaines, la temporalité de leurs applications est très lointaine par rapport à l'urgence climatique.

Cependant, toutes ces pratiques et volontés de sobriété numérique peuvent se heurter à des freins internes. On peut notamment penser à des développeurs, aux profils plus technophiles, qui peuvent avoir une forte appétence pour les « grosses » technologies et usages énergivores, comme dans le domaine du big data et du streaming (de données, de vidéo...). Comment attirer ces « bons » profils tout en adoptant une politique de sobriété numérique, limitant les usages opulents et énergivores du numérique ? Il nous semble que la clé est, ici aussi, la sensibilisation citoyenne aux enjeux du numérique. Jean-Marc Jancovici, dans une conférence à Sablé-sur-Sarthe en 2021¹⁶, traite du sujet du mimétisme humain : c'est de là que viennent toutes les modes et apprentissages humains. Si des développeurs commencent à prendre en considération les limites écologiques de leurs applications, les autres les suivront !

En parallèle des notions de sobriété numérique et de Green IT, se développent également les concepts de *IT for Green* ou *Green by IT*, qui consistent à trouver des solutions numériques à impact positif pour l'environnement. Mettre le numérique au service de la cause environnementale. Aujourd'hui, l'IA est au cœur de ces préoccupations. De nombreuses applications d'intelligence artificielle existent autour de la réduction de la consommation énergétique, l'optimisation de la collecte et du recyclage des déchets, des robots récupérant les déchets plastiques dans l'océan¹⁷, la préservation de la biosphère... Toutes ces applications d'intelligence artificielle nécessitent d'importantes quantités de données. Données qui sont aujourd'hui de plus en plus collectées par de nombreux capteurs grâce à l'IoT (et la 5G). De plus, l'entraînement de ces modèles de machine learning et deep learning peut être coûteux en termes de ressources de calcul, d'infrastructure physique, et par conséquent d'énergie primaire. Sans dénigrer ces applications qui ont leurs vertus, il peut alors apparaître paradoxal que la masse de données et les ressources de calcul nécessaires à l'entraînement des modèles d'IA puissent « sauver la planète »¹⁸, au vu de la potentielle surconsommation énergétique provoquée. C'est bel et bien une balance bénéfices/risques qu'il nous faut ici considérer. Comment pouvons-nous être sûrs que la balance environnementale de ces applications soit réellement positive, vis-à-vis des problématiques de sobriété numérique et d'écoconception ? Quelle est la part de données collectées de laquelle n'est tirée aucune valeur (et devient donc inutile) ? Le gain de

¹⁶ Conférence de Jean-Marc Jancovici aux élus locaux de Sarthe, le 31/05/2021 : <https://www.youtube.com/watch?v=3vg9kffxPtE>

¹⁷ The Ocean Cleanup

¹⁸ « L'IA peut-elle sauver la planète ? » - Blog microsoft, 14/10/2019 -

<https://experiences.microsoft.fr/articles/intelligence-artificielle/ia-peut-elle-sauver-la-planete/>

consommation électrique est-il supérieur à la consommation électrique de l'algorithme d'intelligence artificielle et à l'impact de l'infrastructure ?

En matière d'écologie, le retour à un monde « d'avant » est impossible. Les caractéristiques des gaz à effet de serre font que ceux déjà émis restent longtemps dans l'atmosphère et continue à contribuer au réchauffement. Et pourtant, nous parlons encore de croissance économique « infinie ». Il nous faut revoir notre rapport au monde dans tous les domaines et, éventuellement, changer nos modes de vies et usages. On peut appliquer cette réflexion au numérique. Devons-nous vraiment continuer à appliquer le numérique pour tout et partout ? Notre attachement profond au numérique peut nous en empêcher. Il nous faut reporter nos attachements vers d'autres activités. Comment se détacher des nouveaux usages apportés par le numérique, comme les réseaux sociaux ? Il nous faudra peut-être renoncer à certaines fonctionnalités (que ce soit dans le numérique ou ailleurs). C'est l'objectif de « la fresque du renoncement »¹⁹ : débattre et imaginer à quelles activités nous pourrions renoncer pour respecter les limites planétaires.

¹⁹ <https://lafresquedurenoncement.xyz/>

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Projections d'émissions de GES annuelles selon différentes politiques - Climate Action Tracker.....	8
Figure 2 : Les risques de pénurie d'eau - Les Echos (2015).....	11
Figure 3 : Loi de Moore - Doublement du nombre de transistor.....	12
Figure 4 : Les émissions de GES du numérique - The Shift Project.....	18
Figure 5 : Bilan d'EP par typologie d'équipement – GreenIT.fr.....	19
Figure 6 : Evolution du volume de données mondial - The Shift Project.....	20
Figure 7 : Typologie des risques autour du climat pour une organisation - The Shift Project	25
Figure 8 : Déployer une sobriété numérique durable dans une organisation - The Shift Project	27
Figure 9 : Préoccupations énergétiques dans les applications informatiques	35
Figure 10 : Efficience et impact CO2 des langages de programmation	37
Figure 11 : Cycle de vie des appareils numériques (Syntec Numérique).....	41
Figure 12 : Microsoft sustainability calculator	42
Figure 13 : Infrastructure type d'un projet décisionnel	46
Figure 14 : Modèle de données en étoile	48
Figure 15 : Modèle de données en flocon	48
Figure 16 : Exemple de flux de contrôle type	49
Figure 17 : Exemple de flux de données type	50
Figure 18 : Fonctionnement du composant Lookup	51
Figure 19 : Infrastructure du projet décisionnel	55
Figure 20 : Lancement récurrent des flux	56
Figure 21 : Notre méthode d'écoconception	58
Figure 22 : Vehicle : modélisation (partielle) en flocon	58
Figure 23 : Vehicle - Flux de contrôle	58
Figure 24 : Vehicle - Flux de données.....	59
Figure 25 : Comparaison des mesures d'écodéveloppement.....	61
Figure 26 : Flux Driver : gestion des doublons	62
Figure 27 : Coûts : flux de contrôle	63

BIBLIOGRAPHIE

- ACAR, Hayri. *Software development methodology in a Green IT environment*. 2017. Thèse.
- ADEME. Bilan GES Organisation. *ademe.fr*. [en ligne]. Disponible sur: <https://www.bilans-ges.ademe.fr/fr/accueil/contenu/index/page/bilan%2Bges%2Borganisation/siGras/1>.
- AMNESTY INTERNATIONAL Le travail des enfants derrière la production de smartphones et de voitures électriques. *Amnesty International*. [En ligne] 2016. Disponible sur: <https://www.amnesty.org/fr/latest/news/2016/01/child-labour-behind-smart-phone-and-electric-car-batteries/>.
- AUFFRET, RAOUL et SHAW Frédéric. *Sensibilisation sur les impacts énergétiques dans les datacenters*. ADN Ouest. 2020. Rapport de présentation à la communauté ADN Ouest.
- BORDAGE, Frederic. Mesurer l’empreinte environnementale du numérique. *IT for business*. [En ligne] 2020. <https://www.itforbusiness.fr/mesurer-lempreinte-environnementale-du-numerique-36967>.
- BORDAGE, Frederic. *Sobriété Numérique, Les clés pour agir*. Paris : La Buchet Chastel Verte, 2019. 978-2-283-03215-2.
- BULLIARD, Dominique. *La sobriété numérique, plus que jamais nécessaire ?* Septembre-Octobre 2020, Relations.
- CIGREF. *Sobriété numérique : une démarche d'entreprise responsable*. 2020.
- Code Civil. Article 1835 du Code Civil. 2019.
- CORMATY, Isabelle. *Face au réchauffement climatique, faut-il couper la clim ?*. 2020. 24 07 2020, La Croix.
- DELOITTE. *Les Français et le smartphone en 2016 : une relation fusionnelle*. 2016. Etude - Rapport d'enquête.
- Disrupt Campus Toulouse. *Vers la sobriété numérique*. 2021.
- GreenIT.fr. *Empreinte environnementale du numérique mondial*. 2019.
- Groupement de service CNRS EcoInfo. *Je code : les bonnes pratiques en écoconception de service*. 2020. Plaque.
- Institut Pasteur. *Les données FAIR : qu'est-ce que c'est*. 2018.

JANCOVICI , Jean-Marc. Sortir du nucléaire, cela veut dire quoi exactement ? *Blog de Jean-Marc Jancovici*. [En ligne] 2011. <https://jancovici.com/transition-energetique/nucleaire/sortir-du-nucleaire-cela-veut-dire-quoi-exactement/>.

JULIAN, Sébastien. *Refroidir nos data centers, un vrai casse-tête*. 2018, L'Express.

LABAUME, Tristan. *Le cloud est-il green ?* [éd.] actu-environnement.com. 14 Janvier 2019.

LE ROUX, Vincent. *Etat de l'art de la BI, du Big Data et de l'IA*. 2020. USID09, pour le master MédAS.

MANOTAS, IRENE, et al. An Empirical Study of Practitioners' Perspectives on Green Software Engineering. *IEEE Xplore*. 2016, pp. 237-248

MONNIN, Alexandre. Séminaire "Politiques environnementales du numérique". s.l. : Groupes de travail politiques environnementales du numérique, 17 Juin 2021

MULLER, Didier. *L'impact environnemental du numérique*. 2020.

PATINO, Bruno. *La civilisation du poisson rouge - Petit traité sur le marché de l'attention*. s.l. : Grasset, 2019.

RABHI, Pierre. *Vers la sobriété heureuse*. s.l. : Babel, 2010.

Syntec Numérique. *FAQ Numérique et environnement*.

The Shift Project. *Déployer la sobriété numérique*. 2020.

WIKIPEDIA. Changement climatique. 2021 [En ligne] https://fr.wikipedia.org/wiki/Changement_climatique#cite_note-1.

WIKIPEDIA. Energie (physique). 2021 [En ligne] [https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_\(physique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_(physique)).

WIKIPEDIA. Métrologie. 2021 [En ligne] <https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9trologie#:~:text=La%20m%C3%A9trologie%20est%20la%20science,r%C3%A9sultant%20des%20processus%20de%20mesure..>

WIKIPEDIA. Ressource naturelle. 2021. [En ligne] https://fr.wikipedia.org/wiki/Ressource_naturelle.

WHITNEY Josh (Anthesis) et DELFORGE, Pierre (NRDC). 2014. *Scaling Up Energy Efficiency Across*. 2014.

WIRTH, Niklaus. *A plea for lean software*. 1995.

ZWART, SIMON PORTEGIES. *The Ecological Impact of High-performance Computing in Astrophysics*. 2020.

ANNEXES

WEBINAIRES ADN OUEST

Dans le cadre de l'association ADN Ouest et de son groupe « Ethique et data », nous avons animé et organisé 4 « pause-café » pour discuter autour des problématiques de sobriété numérique. Ce cycle de pauses café s'est conclu par un retour d'expérience de Treez avec son client sur l'implémentation d'une solution écoresponsable. Ce dernier webinar est complété par une intervention de la directrice RSE d'Orange sur l'accompagnement de ses clients entreprises sur ces sujets.

- [Pause-café #1 : Sobriété numérique et « green data »](#)
- [Pause-café #2 : L'infrastructure](#)
- [Pause-café #3 : Le Green code](#)
- [Pause-café #4 : Les usages](#)
- [Pause-apéro #REX : Sobriété numérique sur un projet data : le bilan](#)