

Table des matières

1. Introduction	9
1.1 Qu'est-ce que le Green IT ?	11
1.2 Pourquoi favoriser le Green IT ?.....	12
1.2.1 Économies.....	13
1.2.2 Écologie.....	13
1.2.3 Législation	14
1.3 Pourquoi les bonnes pratiques du Green IT ne sont pas implémentées partout ?..	14
1.3.1 Manque d'information	14
1.3.2 Manque de temps.....	14
1.3.3 Résistance au changement	14
1.3.4 Visibilité	15
1.3.5 Coût	15
2. Le Green IT dans un centre de données.....	16
2.1 Optimiser l'aménagement physique d'un centre de données.....	16
2.1.1 Maintenir la température	16
2.1.2 Regrouper les services	16
2.2 Optimiser le matériel d'un centre de données	16
2.2.1 Consolidation informatique	17
2.3 Optimiser la couche logicielle d'un centre de données.....	18
2.3.1 Architectures économiques et écologiques.....	18
2.4 Mesurer l'efficacité énergétique	22
3. Conception des centres de données de l'État de Genève et problématique liées	23
3.1 Architecture	23
3.1.1 Architecture physique	23

Rechercher et proposer une solution pour favoriser le Green IT dans les centres de données de l'État de Genève

3.1.2	Architecture logique	24
3.2	Sauvegardes	25
3.3	Énergie	26
3.3.1	Origine de l'énergie	26
3.3.2	Efficacité énergétique.....	28
3.4	Climatisation	29
3.5	Recyclage	31
3.6	Identification des facteurs de consommation	32
3.6.1	Changement de matériel	32
3.6.2	Durée de migration.....	33
3.6.3	Calculs inutiles	34
4.	<i>Exemple d'actions prises pour d'autres organisations.....</i>	35
4.1	Google™	35
4.1.1	Plateforme informatique intelligente en carbone.....	35
4.1.2	Économie circulaire	36
4.2	Pure Storage™.....	37
5.	<i>Actions envisageables pour l'État de Genève.....</i>	40
5.1	Actions sur l'urbanisation	40
5.1.1	Profiter des jours froids	40
5.1.2	Optimiser la climatisation.....	40
5.2	Actions matérielles.....	40
5.2.1	Optimiser la durée de migration.....	40
5.3	Actions logicielles	41
5.3.1	Éteindre les VM ^{G20}	41
5.3.2	Sauvegardes.....	43
5.3.3	Déduplication.....	43

Rechercher et proposer une solution pour favoriser le Green IT dans les centres de données de l'État de Genève

5.3.4	Valider l'architecture en place avec le besoin réel du client	44
5.3.5	Identifier les ressources mutualisables et statiques.....	44
5.3.6	Implémenter les architectures écologiques et économiques.....	45
6.	<i>Communication des résultats</i>	46
6.1	Comment implémenter les améliorations ?	46
6.2	Quels seront les gains	47
6.3	Communication interne et externe	48
6.4	Accompagnement du changement	48
6.4.1	Application de la méthode de Kotter	49
7.	<i>Conclusion</i>	50

Liste des figures

Figure 1: Évolution des émissions de CO2.....	9
Figure 2 : Architecture client-serveur simple.....	20
Figure 3 : Architecture client-serveur avec proxy.....	20
Figure 4 : Architecture façade et proxy	21
Figure 5: Robot de sauvegarde sur bande physique	25
Figure 6 : Local de mise à plat du courant secouru	27
Figure 7 : Répartiteur d'électricité	28
Figure 8 : Porte avec système de refroidissement dynamique	30
Figure 9 : Demi cold corridor.....	31
Figure 10: Consommation mensuelle de DC2 entre janvier 2018 et décembre 2019 ..	33
Figure 11 : Armoire vide.....	34
Figure 12 : Magic Quadrant pour le stockage primaire.....	38
Figure 13 : Interface de Splunk ^{G18}	42
Figure 14 : Étapes du changement de Kotter	49

Glossaire des termes

G1.	: Cluster	Groupe de serveurs
G2.	: Cold corridor	Couloir froid
G3.	: CPU	Central Processing Unit (processeur)
G4.	: Blade	Lame
G5.	: EPDU	Prises électrique contrôlable à distance
G6.	: FIFO	First In First Out (premier entré, premier sorti)
G7.	: LAN	Réseau local (Local Area Network)
G8.	: Load balancer	Équilibreur de charge
G9.	: NAS	Serveur de stockage en réseau (Network Attached Storage)
G10.	: OCBA	Office Cantonal des Bâtiments à Genève
G11.	: OCSIN	Office Cantonal des Systèmes d'Information et du Numérique
G12.	: PUE	Indicateur d'efficacité énergétique (Power Usage Effectiveness)
G13.	: Quick win	Gain rapide
G14.	: Racks	Étagères où est installé du matériel informatique (serveurs, équipement réseau, etc.)
G15.	: RSE	Responsabilité Sociétale des Entreprises
G16.	: SAN	Réseau de stockage qui permet la mutualisation des ressources de stockage (Storage Area Network)
G17.	: SIG	Services Industriels de Genève
G18.	: Splunk	Logiciel de recherche, de suivi et d'analyse de données machines
G19.	: TIC	Technologies de l'Information et de la Communication
G20.	: VM	Machine virtuelle
G21.	: VTL	Virtual Tape Library (bibliothèque de bandes virtuelles)

Rechercher et proposer une solution pour favoriser le Green IT dans les centres de données de l'État de Genève

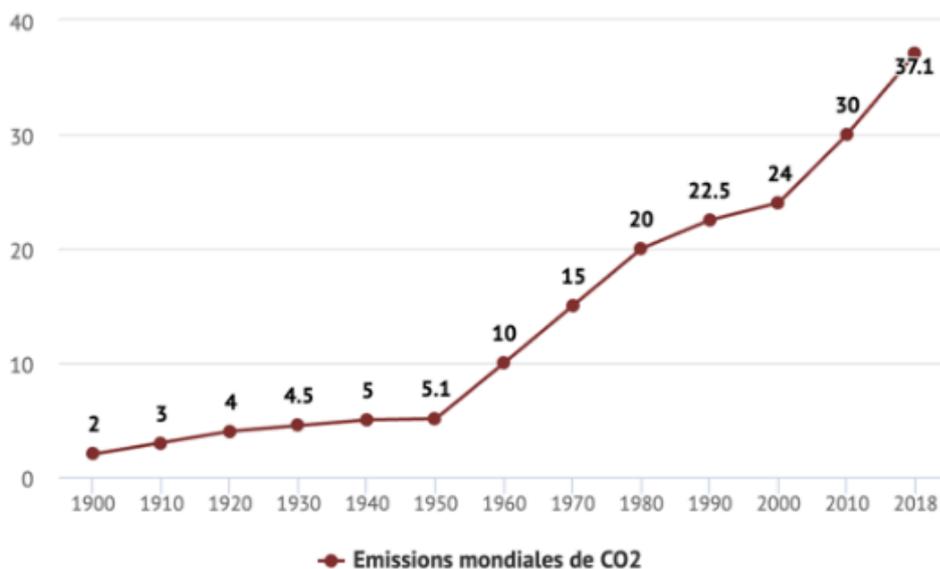
1. Introduction

Le monde fait face à une urgence environnementale : en 2017 le monde a consommé environ 53 milliards de tonnes équivalent CO₂ de gaz à effet de serre², soit une augmentation de plus de 60% par rapport à la consommation des années 1990, alors que les objectifs de l'accord de Paris³ se situent aux alentours de 40 milliards de tonnes équivalent CO₂.

Figure 1: Évolution des émissions de CO₂⁴

Evolution des émissions mondiales de dioxyde de carbone 1900-2018

EN MILLIARDS DE TONNES (GIGATONNES)



(Source : COHEN, Claudia, 2019)

² VATEAU, Caroline. *Vers un modèle de consommation plus green et moins cher*. 2020

³ Accord qui engage tous les États à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre [source : https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/french_paris_agreement.pdf]

⁴ Le CO₂ est le principal gaz à effet de serre, mais d'autres gaz s'additionnent à l'évolution de cette courbe.

Le monde se digitalise de manière exponentielle⁵ et les centres de données sont utilisés dans la majorité des services actuels. Cette expansion s'est d'ailleurs accélérée avec la crise du Covid-19, pendant laquelle le télétravail s'est mondialement démocratisé⁶. La digitalisation de la vie associée à l'augmentation du nombre de personnes connectées à l'échelle mondiale fait qu'on assiste à une explosion des usages numériques et de tout ce qui est associé : les données, les terminaux, les infrastructures réseau et les centres de données. Tout le trafic internet, bien qu'invisible, consomme des ressources et contribue à la pollution de l'environnement. Cette pollution est d'autant plus élevée que tous les systèmes n'ont pas été pensés pour réduire leur impact écologique et tous les utilisateurs ne sont pas assez sensibles à ce problème. Toutes ces transactions n'ont fait qu'augmenter le nombre et la taille des centres de données au cours des dernières années.

De plus, l'utilisation non optimisée des centres de données génère un coût car une mauvaise gestion de l'énergie entraîne une surconsommation qui, à l'échelle d'un centre de données, n'est pas négligeable. La consommation mondiale d'énergie des centres de données est souvent comparée à celles de grands pays. Ainsi, en se basant sur les calculs d'Anders Andrae, chercheur chez HuaweiTM ⁷ en Suède, un journaliste de la CBC écrit que « c'est presque autant d'électricité que l'ensemble du secteur énergétique du Canada produit »⁸.

Il est pourtant possible de réduire la consommation et plusieurs bonnes pratiques sont de plus en plus mises en place dans les centres de données du monde entier. À une échelle mondiale, ces bonnes pratiques permettent de réduire la pollution. La consommation électrique mondiale n'a d'ailleurs que peu augmenté ces dernières

⁵ Selon Strategy AnalyticsTM, il y aurait 22 milliards d'objets connectés dans le monde actuellement, et « elle prévoit 38,6 milliards d'appareils connectés d'ici 2025 et 50 milliards d'ici 2030 » [source : ANON., Laurence, 2019].

⁶ « En Suisse, on observe une augmentation de trafic moyen de plus de 27% comparé à la même période l'an dernier. » [source : ENIGMA, 2020].

⁷ HuaweiTM est une entreprise chinoise fondée en 1987 et qui fournit des solutions dans les secteurs des technologies de l'information et de la communication.

⁸ [source : Thomas DAIGLE, « Completely unsustainable »: How streaming and other data demands take a toll on the environment].

années malgré la croissance des besoins en calcul et du trafic réseau, car les serveurs sont de plus en plus efficaces⁹ et que les nouveaux centres de données conçus ces dernières années implémentent des techniques pour réduire leur besoin en refroidissement. A une échelle plus microscopique, les bonnes pratiques permettent aux entreprises d'économiser leurs ressources financières, car elles dépensent moins en achat d'électricité ou de matériel informatique.

À l'ère digitale dans laquelle nous vivons, les systèmes doivent être pensés pour supporter la masse de nouvelles technologies qui voient le jour ainsi que pour répondre aux problématiques économiques et écologiques qu'elles apportent. Par exemple, les crypto-monnaies, qui ont été popularisée par le Bitcoin¹⁰ en 2009, consommaient en 2019 plus d'énergie que toute la Suisse selon des chercheurs de l'université de Cambridge¹¹.

« Les TIC^{G19} sont à la fois une partie du problème et une clé de la solution. »
(greenit.net)

1.1 Qu'est-ce que le Green IT ?

La définition du Green IT¹² évolue en permanence et est associée à d'autres termes, comme « conception numérique responsable » ou « TIC^{G19} durables », qui se mélangent ou se distinguent suivant l'utilisation. La définition suivante du Green IT est celle qui sera

⁹ « Les besoins en calcul ont explosé ces dernières années. Ils ont été multipliés par 6 entre 2010 et 2018 au sein des centres informatiques, tandis que le trafic réseau a été multiplié par 10 et la capacité de stockage par 25. [...] Malgré cette forte croissance, la consommation électrique des centres informatiques n'a quasiment pas progressé entre 2010 et 2018 : de l'ordre de 6 % » [source : Frédéric BORDAGE, 4 mars 2019].

¹⁰ Le Bitcoin est une cryptomonnaie fonctionnant grâce à une blockchain.

¹¹ [source : James VINCENT : journaliste à The Verge].

¹² Le journal officiel français du 12 juillet 2009 donne « éco-TIC » comme abréviation de « écotechniques de l'information et de la communication ». Ces termes sont l'équivalent de l'anglais « Green information technology, Green IT ». [source : BORDAGE, Frédéric, 2009].

appliquée à tout ce document et il n'est pas exclu qu'elle englobe la définition d'autres termes.

Le « Green » est une tendance actuelle qui se décline sur toutes les activités humaines. De plus en plus d'entreprises essayent de suivre cette tendance en implémentant des stratégies écoresponsables dans leur business.

Le Green IT concerne les mesures prises pour rendre l'utilisation des technologies respectueuses de l'environnement et optimiser au maximum la consommation des ressources dans une démarche d'amélioration continue.

Cette démarche vise à réduire l'empreinte tant économique qu'écologique d'un produit ou d'un service. Elle peut s'appliquer à toutes les couches d'un système ou d'une application. Nous pouvons citer l'exemple de « l'ajout d'une fonctionnalité d'éco-conduite dans le GPS livré avec une voiture » (greenit.fr, 2020), qui voudrait éveiller la conscience écologique des utilisateurs.

Dans un centre de données, le Green IT s'applique à plusieurs niveaux. Premièrement au niveau de l'urbanisation de celui-ci, c'est-à-dire son architecture et comment l'optimiser pour réduire sa consommation électrique. Deuxièmement au niveau matériel, tant dans la gestion du cycle de vie des équipements que dans le choix du matériel. Enfin, au niveau logiciel avec la virtualisation, la déduplication des données, la mutualisation des ressources ou l'optimisation des applications.

En résumé, on peut considérer le Green IT comme un ensemble de bonnes pratiques visant à favoriser l'écoconception des systèmes, l'économie des ressources et leur réutilisation.

1.2 Pourquoi favoriser le Green IT ?

Il peut sembler facile de se dire que le Green IT devrait être implémenté par défaut dans tous les systèmes. Cependant, la majorité des systèmes peuvent encore être améliorés. Aujourd'hui, le numérique responsable devient un enjeu fort dans la stratégie RSE^{G15} d'une entreprise¹³.

¹³ « Démarche visant à intégrer les enjeux du développement durable, à moyen et long terme, dans la vision et la stratégie d'une organisation. ». [source : resonance.com : *La RSE, c'est quoi ?*].

1.2.1 Économies

Un système mal conçu peut engendrer des coûts supplémentaires. Un système mal conçu peut concerner autant l'architecture logique d'une application que l'architecture physique des ressources matérielles. Par exemple, si une application interroge une base de données une seule fois et partage l'information à chacun des composants, il y aura moins d'appel que si chaque composant refait un appel à la base de données. Le serveur sera alors moins sollicité et la consommation électrique baissera.

Un autre exemple dans un centre de données : si deux serveurs doivent s'échanger des informations régulièrement, il peut être intéressant de les placer côte à côte pour diminuer le nombre de passerelle (routeurs, switches) à chaque échange et donc réduire au maximum l'utilisation de l'équipement réseau qui consomme aussi de l'énergie.

Enfin, plus le centre de données est géographiquement éloigné de l'utilisateur final, plus il y aura de matériel à faire fonctionner pour une simple requête. Il est avantageux de placer les centres de données au plus proche des utilisateurs cibles afin d'améliorer le temps de réponse, les coûts de maintien et le coût de chaque sollicitation.

1.2.2 Écologie

Dans certaines régions du monde, l'écologie est une tendance¹⁴ sur laquelle beaucoup d'entreprises se basent pour plaire à leurs clients qui s'intéressent de plus en plus à l'environnement. C'est une manière de se vendre en faisant bonne impression. Au-delà de l'image de marque, les bonnes pratiques apportées par une conception Green IT entraînent une réduction de la consommation, et donc du forfait alloué aux ressources.

Le numérique est responsable de 3,8% des émissions de gaz à effet de serre dans le monde¹⁵ et les déchets engendrés doivent également être traités : environ 50 millions de tonne de déchets numériques sont générés chaque année¹⁶. Ces déchets sont

¹⁴ « L'environnement est plus que « tendance » : les Français sont de plus en plus nombreux à avoir adopté des comportements visant à préserver l'environnement. Plus de 9 Français sur 10 (95%) en ont déjà adopté au moins un ! » [source : ODOXA : *Les Français, plus « écolos » que jamais*].

¹⁵ Selon une étude réalisée par GreenIT.fr.

¹⁶ Selon un rapport des Nations Unies et du World Economic Forum.

massivement transportés pour être traités ailleurs, souvent dans des décharges illégales.

1.2.3 Législation

Le contexte réglementaire se durcit et il y a de plus en plus de réglementations pour inciter les acteurs du numérique à une prise de conscience et à transmettre les informations relatives à l'impact environnemental des produits et services qu'ils proposent.

1.3 Pourquoi les bonnes pratiques du Green IT ne sont pas implémentées partout ?

Les exemples suivants sont des hypothèses et reflètent une analyse personnelle.

1.3.1 Manque d'information

Les gens ne sont pas conscients ou ne comprennent pas l'impact énergétique de leurs systèmes. Ça peut être plus souvent vrai dans de petits systèmes où les architectes et les développeurs ne se compliquent pas à prendre ce genre de paramètres en compte. De plus, les impacts environnementaux sont multiples : énergie, gaz à effet de serre, épuisement des ressources, consommation d'eau, production de déchets. Toutes ces informations sont difficiles à monitorer alors que ce sont celles qui donnent la véritable information quant à l'impact écologique et économique de l'utilisation des ressources.

« Nous sommes encore au début de l'ère digitale et il est difficile de concevoir l'incidence de la consommation des équipements. » (FERREIRA, Gabriel, 2020)

1.3.2 Manque de temps

Mettre en place des modèles qui prennent en compte l'utilisation des ressources est compliqué et demande plus de temps. Pourtant, plusieurs modèles sont déjà recommandés dans les bonnes pratiques de l'architecture des systèmes d'information.

1.3.3 Résistance au changement

Les changements majeurs sont décourageants. Tout n'est cependant pas à refaire et apporter des modifications petit à petit est aussi possible. Dans un centre de données, le changement paraît encore plus abstrait et il est plus difficile de se rendre compte de son impact, car il est éloigné du business réel.

De plus, les gens ont peur du risque et n'ont pas envie de casser ce qui fonctionne déjà bien. Avec la mutualisation et la virtualisation, l'impact d'un risque est plus important.

1.3.4 Visibilité

Certaines choses ne sont pas autant visibles que d'autres. Par exemple, il est facile d'éteindre un poste de travail allumé qui n'est pas utilisé. Mais avec la démocratisation du modèle « as a service »¹⁷ (en tant que service), de plus en plus de clients utilisent l'informatiques comme du consommable et les services tournent sur des serveurs distants. Le serveur ne peut pas être éteint comme le serait un poste de travail et il est difficile de savoir quels services peuvent être mis hors tension.

1.3.5 Coût

Modifier l'existant représente un coût. Certaines machines ne sont peut-être pas encore amorties ou bien la transition engendre une indisponibilité des services qui n'est pas envisageable. Il faut aussi de la main d'œuvre, pour repenser l'actuel et mettre en place le nouveau. Toutes les entreprises n'y voient pas de bénéfice réel et préfèrent donc rester avec un système fonctionnel.

¹⁷ En 2008, seulement 12% des organisations utilisaient des services. En 2019, c'est 73% des organisations qui prévoient de déplacer presque toutes leurs applications vers du SaaS pour 2020. [source: Steven MACDONALD, How fast growing companies use SaaS to increase growth rates by 19.6%?].

2. Le Green IT dans un centre de données

Ce chapitre vise à identifier les leviers d'actions dans un centre de données pour favoriser le Green IT. Le Green IT s'implémente autant dans l'architecture que dans le matériel utilisé et la conception des services.

2.1 Optimiser l'aménagement physique d'un centre de données

En plus de faciliter les modifications ou les agrandissements dans le futur, ce qui apporte un gain de temps et donc d'argent, l'optimisation de l'aménagement physique du centre de données permet d'obtenir de meilleures performances avec une consommation plus basse. L'aménagement joue donc un rôle clé pour le passage au Green IT. Les techniques présentées dans ce chapitre permettent d'améliorer les performances des serveurs.

2.1.1 Maintenir la température

Au niveau du local, des allées chaudes et froides sont souvent mises en place. Ce concept veut que l'avant d'un serveur, qui est froid, ne doit jamais être en face de l'arrière d'un serveur, qui expulse de l'air chaud. L'objectif est de contrôler l'air chaud et d'éviter qu'il ne réchauffe tout le local, en cloisonnant les allées d'air chaud. Une autre solution est l'implémentation du refroidissement liquide. Les serveurs peuvent être refroidis avec des liquides comme de l'eau ou de l'huile.

Les centres de données sont généralement climatisés pour maintenir une température ambiante optimale pour le matériel.

2.1.2 Regrouper les services

Lors de la mise en place des serveurs, il est possible de savoir quel appareil aura quelle fonction. Ainsi, il paraît logique de placer des services qui vont régulièrement communiquer ensemble côte à côte. Le parcours de l'information sur le réseau interne du centre de données est alors réduit et l'utilisation du matériel (switches, routeurs) est moindre. Les bases de données communes peuvent aussi être stockées au même endroit.

2.2 Optimiser le matériel d'un centre de données

Les centres de données ont besoin d'équipement de stockage qui nécessitent moins de ressources et qui sont plus performants, car les systèmes de stockage actuels sont très

consommateurs en énergie. Par exemple, l'Eiffage¹⁸ a constaté une réduction de 15% de la facture liée à la consommation globale de leur centre de données en installant du matériel plus économique et plus écologique¹⁹.

Les appels d'offres pour de nouveaux composants doivent prendre en compte le développement durable des équipements. L'utilisation de composants de plus en plus petits permet de condenser le matériel et moins il y a de matériel physique pour une même qualité de service, plus le coût d'alimentation, d'entretien et de refroidissement baisse.

2.2.1 Consolidation informatique

La consolidation est le fait de réduire ses actifs informatiques en utilisant des technologies plus efficaces. Des études ont été menées sur plusieurs organismes et la consolidation informatique ressort dans la majorité des cas comme étant l'un des moyens clé pour réduire la consommation électrique²⁰.

La consolidation permet d'augmenter l'utilisation d'un serveur et donc de tirer le meilleur parti du matériel existant. Ainsi, un serveur qui est sous-utilisé (qui n'utilise pas la totalité de sa capacité) sera plus utilisé et ne tournera pas dans le vide. De plus, les services répartis sur plusieurs serveurs peuvent être regroupés et donc les autres serveurs peuvent être éteints. L'un des moyens les plus efficaces d'appliquer la consolidation est la virtualisation.

Cette approche permet de réduire le temps que passe un processeur à ne rien faire, de réduire l'impact environnemental et de réduire les coûts du matériel. Moins il y a de serveurs qui sont allumés en simultanément, plus les coûts baissent, car il y a besoin de moins d'énergie pour faire tourner les machines ainsi que pour le refroidissement.

¹⁸ EiffageTM est une société française spécialisée dans les travaux publics, qui emploie plus de 66'000 employés à travers 70 pays et réalise plus de 100'000 chantiers par année.

¹⁹ Selon un témoignage fait par l'Eiffage à Pure Storage [source : FERREIRA, Gabriel, 2020 : *Vers un modèle de consommation plus green et moins cher*].

²⁰ [source : Austrian Energy Agency, IBM, SUN, University of Karlsruhe, French Environment and Energy Management Agency & Robert Harisson Associates LTD : *The e-Serveur-Consortium*, Février 2009].

La consolidation augmente l'impact d'une panne, mais la fiabilité des nouveaux composants est sans cesse en amélioration et la probabilité d'occurrence d'une panne diminue avec cette amélioration.

2.3 Optimiser la couche logicielle d'un centre de données

Le stockage est une ressource qui est consommée par les services numériques. Il faut intégrer une notion de sobriété à la conception des services afin qu'ils consomment le moins de stockage possible. Les applications doivent aussi gérer la suppression de données inutilisées.

2.3.1 Architectures économiques et écologiques

2.3.1.1 Tactiques d'amélioration de la performance

Il existe des tactiques permettant d'optimiser la performance. Ces tactiques permettent d'utiliser le processeur le mieux possible et se divisent en trois catégories. Ce sont ces tactiques qu'il faut viser à implémenter lors de la conception des modèles.

2.3.1.1.1 Demande de ressource

L'utilisation des ressources est une des causes de la consommation élevée des centres de données et une mauvaise gestion de celle-ci entraîne un gaspillage. Afin d'allouer correctement la charge de travail sur un processeur et de l'utiliser au maximum de sa capacité, il faut :

- Améliorer l'algorithme
- Réduire les overheads
- Gérer les événements

En améliorant l'algorithme déjà implémenté, il est possible d'augmenter l'efficacité du processeur en optimisant les calculs.

Réduire les overheads signifie réduire le temps que fait le processeur à attendre. Lorsque le processeur attend, il consomme quand même de l'énergie et il faudrait donc qu'il soit toujours utilisé en introduisant de la concurrence.

Enfin, gérer les événements (ou leur séquence) se fait en se posant les bonnes questions. Par exemple : y a-t-il besoin d'enregistrer la température d'un bâtiment toutes les 3 secondes sachant à quelle vitesse cette donnée change ? Il faut réfléchir sur les

besoins réels pour savoir à quelle vitesse on va mesurer les événements afin d'alléger la charge du processeur.

2.3.1.1.2 *Gérer les ressources*

Pour la gestion des ressources, il faut se concentrer sur l'utilisation du processeur par exemple :

- En implémentant de la concurrence
- En instaurant du cache

La concurrence permet aux différents processus qui ont différents temps de réponse de se partager le processeur pour l'utiliser au maximum. Le cache, lui, permet de stocker les résultats intermédiaires afin d'éviter de les calculer une seconde fois.

2.3.1.1.3 *Arbitrage*

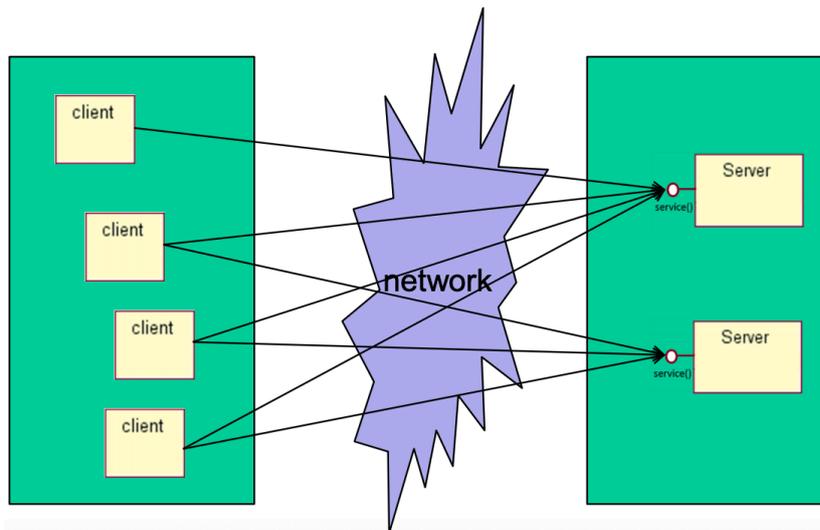
En partant du principe que nous savons qu'il y a trop de demande par rapport à la disponibilité du processeur, il faut instaurer un arbitrage pour déterminer quand un processus a le droit d'utiliser le processeur et pour combien de temps. Par exemple, il existe la méthode du premier arrivé premier servi (FIFO^{G6}), ou bien on peut décider d'implémenter une priorité tournante entre les processus.

2.3.1.2 Exemples de modèles de conception

2.3.1.2.1 *Proxy distant*

Lorsque deux machines, l'une contenant des clients et l'autre des serveurs, sont connectées sur le réseau, on risque d'avoir autant de connexions que de clients intéressés par les services fournis [Figure 2]. La bande passante peut se retrouver rapidement surchargée en cas de multiplication des connexions entre les clients et les serveurs.

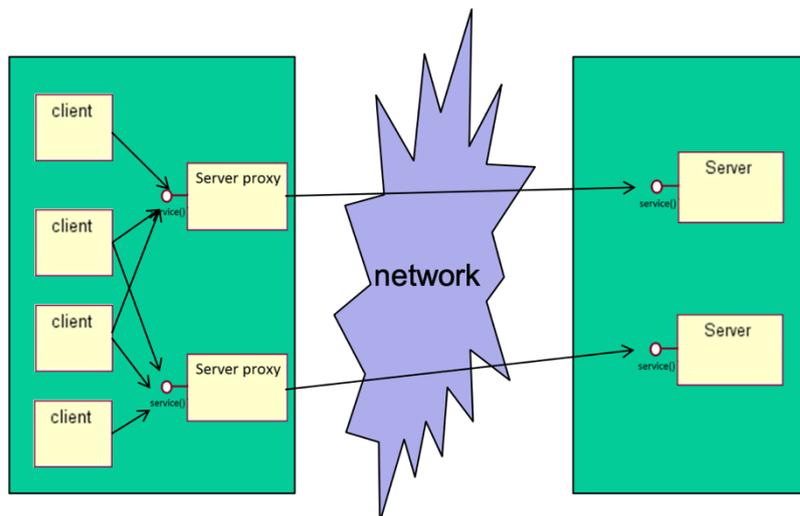
Figure 2 : Architecture client-serveur simple



(© Ph. Dugerdil 2020, p. 17)

Un proxy distant permet au client de s'adresser à un proxy en interne plutôt qu'au serveur. Le proxy présente le service comme s'il était le serveur, mais fait une indirection vers le service souhaité [Figure 3]. Le proxy permet également d'intégrer du caching, car une page ou un résultat peut être stockées localement et on peut donc éviter un appel vers le serveur si le résultat est déjà connu.

Figure 3 : Architecture client-serveur avec proxy

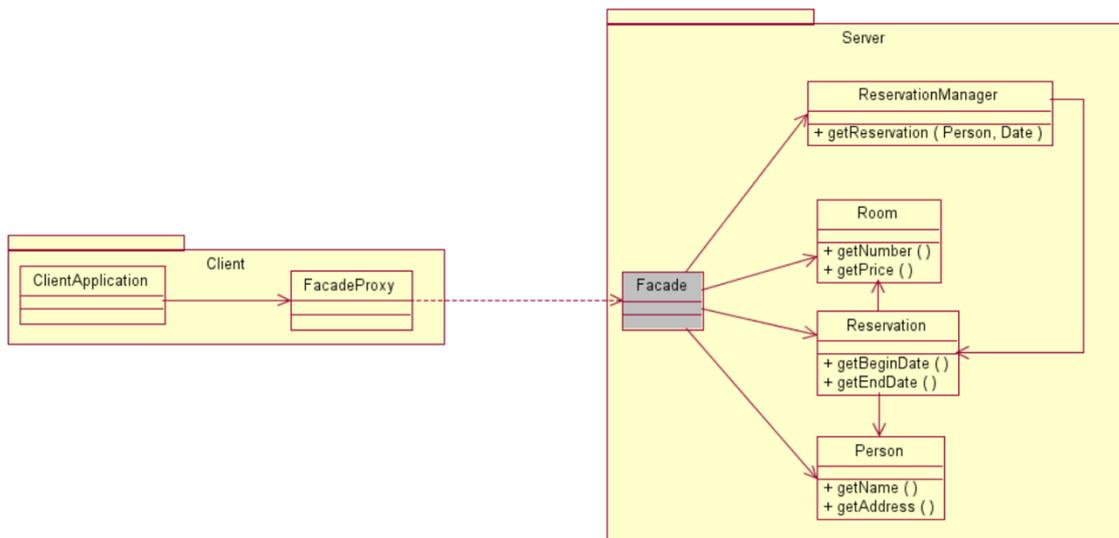


(© Ph. Dugerdil 2020, p. 19)

2.3.1.2.2 Façade

Lorsqu'il y a trop de chemins de communication, lorsqu'un client appelle plusieurs composants, la façade joue le rôle d'intermédiaire qui publie l'interface correspondant aux besoins du client [Figure 4]. Le client a besoin de plusieurs méthodes réparties dans plusieurs composants et c'est la façade qui va se charger d'appeler les composants qui correspondent aux besoins du client.

Figure 4 : Architecture façade et proxy



(© Ph. Dugerdil 2020, p.29)

La façade peut jouer le rôle de load balancer^{G8} : en fonction de la charge dirigée vers tel serveur, elle peut décider d'envoyer les nouvelles requêtes vers l'une des copies du serveur. Ou bien, elle peut distribuer les requêtes avec une priorité tournante.

Cette architecture permet également de cacher l'information des serveurs aux clients et donc d'augmenter la sécurité. Enfin, la façade peut aussi garder du cache et donc éviter certains appels aux serveurs, ce qui réduit la consommation ainsi que le temps de réponse.

2.3.1.2.3 Broker

Lorsque les serveurs se retrouvent sur plusieurs machines distantes, un broker peut être implémenté afin de servir de dictionnaire que le client utilise pour savoir où trouver le service demandé.

Un client s'adresse au broker pour lui demander quelle est l'adresse du service souhaité. Le broker connaît toutes les adresses et est le seul à être mis à jour en cas de changement d'adresse.

En cas de demande très élevée de service²¹, la duplication des serveurs permet de répondre rapidement. Il faut donc copier le service afin qu'il réponde de la même manière que le premier. En cas de duplication, il y a de nouvelles adresses que le client ne connaît pas. Il va donc s'adresser au broker pour savoir où diriger sa requête. Tout comme la façade²², le broker peut jouer le rôle de load balancer^{G8}.

Avec un broker, les clients appellent toujours les services de la même manière, mais reçoivent des adresses différentes en fonction de la décision du broker qui se charge de répartir les requêtes sur des serveurs qui fournissent le même service.

2.4 Mesurer l'efficacité énergétique

Pour mesurer l'efficacité, on peut se référer à son PUE^{G12}, qui calcule un ratio en divisant l'énergie totale consommée dans le centre de données par l'énergie consommée par les équipements informatiques. L'énergie totale comprend l'énergie consommée par les équipements informatiques, mais aussi l'énergie consommée par les autres équipements, tels que les climatiseurs.

Plus le ratio se rapproche de 1, plus la consommation d'énergie du centre de données est optimale. Depuis la création de ce ratio, les entreprises ont réussi à le faire baisser en implémentant différentes méthodes de Green IT²³.

²¹ Lorsque plusieurs clients font plusieurs appels simultanément

²² Cf. 2.3.1.2.2

²³ Google™ est passé de 1,22 de PUE en 2009 à 1,10 en 2020 [source : GOOGLE, 2020]

3. Conception des centres de données de l'État de Genève et problématique liées

L'infrastructure informatique de l'État de Genève est répartie sur deux centres de données principaux : DC1 et DC2²⁴, qui sont placés de chaque côté du Rhône, afin d'éviter qu'un incident majeur²⁵ sur l'un n'impacte l'autre. Ils sont gérés par l'OCSIN^{G11}, qui est le service informatique de l'État de Genève. Les centres de données sont principalement utilisés pour héberger les serveurs, le stockage et le matériel télécom sur lesquels reposent la totalité des applications et des données. Un 3^{ème} centre beaucoup plus petit est utilisé comme site d'arbitrage pour les installations en haute disponibilité.

La plupart des applications est composée d'un middleware²⁶, d'une base de données et de code applicatif. Les applications sont classifiées selon un niveau de criticité afin d'offrir un hébergement adapté. Ainsi, une application en lien avec les services d'urgence doit toujours être disponible, elle sera répartie sur les deux centres de données. A l'inverse, si un service peut accepter une indisponibilité sans impact conséquent, l'application ne sera pas redondée de la même manière.

L'OCSIN^{G11} favorise aussi la livraison de VM^{G20}, ce qui permet de mutualiser les ressources de plusieurs services, plutôt que des serveurs dédiés. Les VM^{G20} facilitent aussi le renouvellement et accélèrent la migration du matériel physique.

3.1 Architecture

3.1.1 Architecture physique

Les centres de données sont composés de racks^{G14} équipés d'EPDU^{G5} redondés. Pour chaque rack^{G14}, il y a soit de l'équipement réseau (switches, routeurs), soit des serveurs. Il existe deux types de serveurs : rackable^{G14} ou châssis de blades^{G4}.

²⁴ DC1 et DC2 ne sont pas les vrais noms des centres.

²⁵ Un incident majeur peut être un incendie ou une inondation du bâtiment, par exemple.

²⁶ Logiciel qui crée un réseau d'échange d'informations entre différentes applications informatiques [source : Wikipédia].

Un serveur rackable^{G14} possède son propre accès aux ressources. La connexion se fait directement et le temps de réponse est donc très bon. Un châssis de blades^{G4} permet de mutualiser les ressources des serveurs (fond de panier commun : alimentation électrique, accès au réseau et au stockage), mais nécessite une taille minimale d'activité pour être rentable. Pour chaque châssis, jusqu'à 16 serveurs blades^{G4} peuvent être installés. Les serveurs rackables^{G14} sont utilisés pour des configurations spécifiques.

Les centres de données possèdent également des baies de stockage NAS^{G9} et SAN^{G16}, qui possèdent chacune leur réseau dédié. Le NAS^{G9} utilise le réseau LAN^{G7} du centre de données alors que le SAN^{G16} utilise un réseau fibre channel²⁷ séparé. Les baies de stockage sont répliquées et les serveurs écrivent leurs données en miroir sur les deux baies (écriture en Y).

Le SAN^{G16} permet principalement de faire des accès aux bases de données avec une connexion directe sur le réseau. Cette technologie est très rapide²⁸ et donne un accès simultané à plusieurs utilisateurs. Le NAS^{G9} sert à faire de l'accès aux fichiers sur des disques réseaux. Cette technologie est moins rapide que le SAN^{G16}.

Au niveau énergétique, l'électricité ainsi que la climatisation sont redondées à l'intérieur des centres de données. Lors d'une panne de courant, un groupe électrogène de secours permet de prendre le relai.

Lors des appels d'offres pour du matériel, l'OCSIN^{G11} valorise le développement durable et le Green IT.

3.1.2 Architecture logique

L'accès aux applications se fait au travers de reverse proxies, qui permettent d'avoir une couche d'abstraction. Tout client passe d'abord par un reverse proxy qui va ensuite appeler le service souhaité et renvoyer le résultat au client²⁹. Cette architecture apporte une couche de sécurité, car le client ne connaît jamais l'adresse exacte du service souhaité.

²⁷ Protocole qui permet une connexion haut débit entre un ordinateur et son système de stockage [source : Wikipédia].

²⁸ On parle ici de millisecondes.

²⁹ Cf. 2.3.1.2.2

Le reverse proxy n'appelle pas directement un serveur, mais plutôt un membre d'un cluster^{G1}. Enfin, il permet de faire du load balancing^{G8} en fonction de l'utilisation des serveurs et de leur disponibilité.

3.2 Sauvegardes

Deux robots de sauvegardes sur bande physique sont répartis dans les deux centres. Chacun effectue la sauvegarde de son site et contient la copie des bandes de l'autre site. Les données stockées sur bandes physiques s'écrivent très rapidement (jusqu'à 160 Mo/s), mais le temps d'accès est plus long. C'est pourquoi la politique en place veut que seuls les fichiers qui doivent être stockés sur le long terme et qui ne sont pas souvent sollicités y sont enregistrés.

Figure 5: Robot de sauvegarde sur bande physique



(Source : auteur)

Lors de ma visite de DC1, j'ai pu voir le robot de sauvegarde sur bande physique [Figure 5]. Il possède quatre bras mécaniques qui vont chercher les bandes physiques rangées sur les quatre étages, en se déplaçant le long du couloir Il sélectionne la bande contenant l'information recherchée et la charge dans un lecteur. Lorsque l'opération est terminée, le bras range la bande automatiquement.

Deux autres types de robots sont répartis dans les deux centres : les VTL^{G21}. Ils fonctionnent de la même manière que les robots physiques, mais virtualisent le stockage sur des disques. À l'inverse des robots physiques, ils sont plus rapides en lecture qu'en écriture et sont donc utilisés pour des données qui seront accédées sous moins de 30 jours.

Les données sauvegardées sont dupliquées et chaque serveur de sauvegarde gère son site en priorité. Les deux systèmes VTL^{G21} se répliquent entre eux alors que la copie des données entre les deux robots physiques est réalisée le lendemain des sauvegardes.

Un certain nombre de politiques de sauvegardes ont été instaurées. Elles permettent de réaliser chaque jour des sauvegardes incrémentales des serveurs ainsi que des sauvegardes des bases de données, en fonction des besoins. Les sauvegardes incrémentales des serveurs sont rapides, car chaque sauvegarde se base sur la précédente³⁰ et ajoute les nouvelles informations. En revanche, le temps de restauration est relativement long, car il faut pouvoir récupérer les informations sur les différents disques et les reconstituer. Les sauvegardes les plus anciennes sont stockées sur les bandes physiques.

3.3 Énergie

3.3.1 Origine de l'énergie

La partie énergétique de DC1 est gérée par l'OCBA^{G10} alors que DC2 est hébergée par une société externe qui s'occupe de toute l'infrastructure d'hébergement (racks^{G14}, électricité, refroidissement). Pour ce qui est de l'électricité, DC1 est capable de produire sa propre énergie en cas de panne de courant par deux systèmes, soit avec une turbine à gaz, soit avec des groupes électrogènes. L'électricité produite en trop peut être

³⁰ A l'inverse d'une sauvegarde complète où toutes les données sont entièrement sauvegardées.

redistribuée sur le réseau des SIG^{G17}. Il n'y a pas de contrat d'électricité verte avec l'OCBA^{G10}.

Pour DC1, le centre de données fonctionne sur du courant secouru à 100%. Tout le courant utilisé vient d'une production ondulée. Les SIG^{G17} fournissent le courant et 2 transformateurs internes avec des redresseurs permettent de mettre l'énergie sur des batteries qui font office de tampon au cas où il y a une perte de courant.

Figure 6 : Local de mise à plat du courant secouru



(Source : auteur)

L'électricité produite dans le local de mise à plat [Figure 6] est redirigée ensuite dans le local des serveurs dans un répartiteur qui réachemine l'électricité vers les serveurs [Figure 7].

Figure 7 : Répartiteur d'électricité



(Source : auteur)

Chacune de ces armoires possède des outils de monitoring pour comptabiliser l'énergie redistribuée. Actuellement, DC1 ne consomme même pas la moitié de ce que produisent les onduleurs³¹.

3.3.2 Efficacité énergétique

Le PUE^{G12} de DC1 et de DC2 est en général de 1.5 en hiver et de 1.9 en été. La différence s'explique notamment par la température ambiante qui est plus basse en hiver et que les climatiseurs consomment moins d'énergie. Même si des mesures sont déjà

³¹ Selon la présentation de DC1 par Pierre Mesot, ingénieur système en charge des serveurs en datacenters à l'État de Genève.

prises³² pour s'aligner avec les normes actuelles, l'OCSIN^{G11} peut encore travailler à faire baisser ce ratio.

3.4 Climatisation

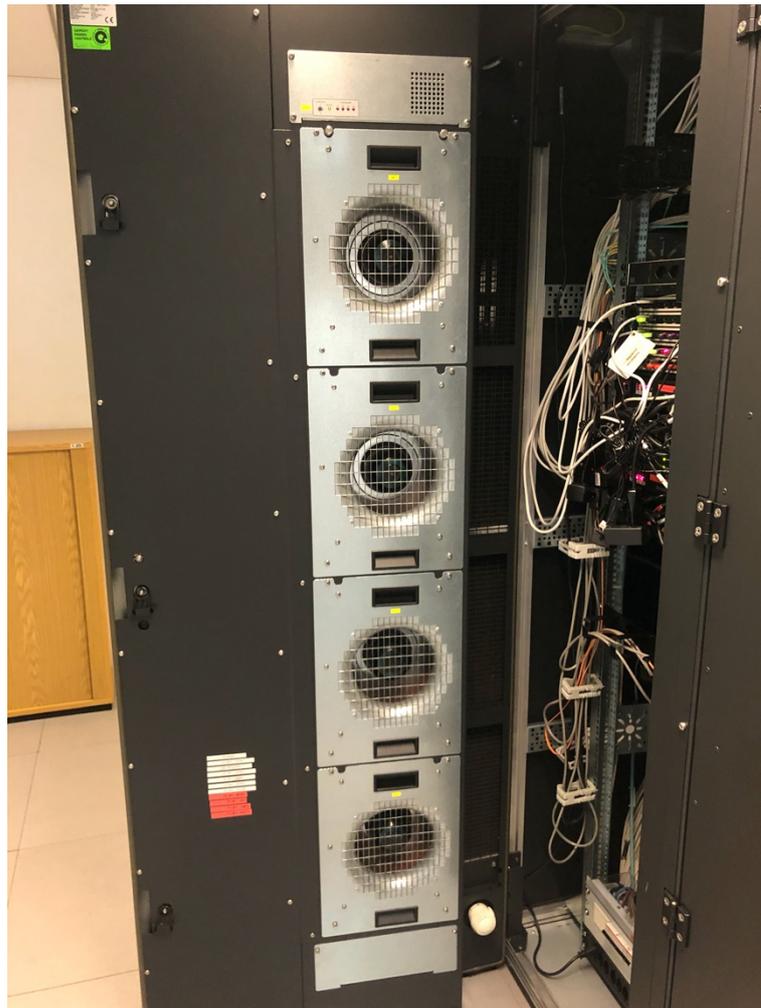
Au départ, dans les années 80, la préoccupation n'était pas la même qu'aujourd'hui et la climatisation était simplement dans l'air ambiant du local. L'air froid était produit directement dans la salle.

Avec leur évolution et la diminution de leur taille, les serveurs ont été placés dans des armoires. L'air froid est envoyé dans un faux plancher et ressort par des bouches d'aération, mais toute la salle est climatisée en permanence.

Puis, quand l'air froid a commencé à devenir trop cher, il a commencé à être confiné. Des portes ont été installées avec un système d'eau qui arrive par le bas et des ventilateurs qui expulsent l'air refroidi par l'eau [Figure 8]. Les ventilateurs sont dynamiques et fonctionnent selon l'utilisation du serveur. Ces portes ont été mise en service en 2008.

³² L'OCSIN^{G11} applique le Code of Conduct for Energy Efficiency in Data Centres de la Commission Européenne depuis 2013.

Figure 8 : Porte avec système de refroidissement dynamique



(Source : auteur)

Les équipements utilisés ont continué d'évoluer et aujourd'hui des cold corridors^{G2} ont été installés pour isoler l'air climatisé acheminé par le faux plancher. Un demi cold corridor^{G2} qui est installé à DC1 [Figure 9] n'est pas très efficace car il ne refroidit qu'une seule rangée d'armoire. Il est cependant prévu de l'étendre pendant l'été 2020.

Figure 9 : Demi cold corridor



(Source : auteur)

Les climatiseurs du local des serveurs envoient l'air partout sous le faux plancher et il y a beaucoup de dispersion de l'air. Plus un appareil est éloigné du climatiseur, moins il y aura de débit.

3.5 Recyclage

La chaleur générée à DC1 est réutilisée pour chauffer une partie du bâtiment où se situe le centre de données, qui contient des bureaux de l'un des départements de l'État de

Genève. Quant aux composants obsolètes, ils ne sont pas réutilisés mais récupérés par Swico RecyclingTM³³ qui prend en charge le recyclage.

3.6 Identification des facteurs de consommation

3.6.1 Changement de matériel

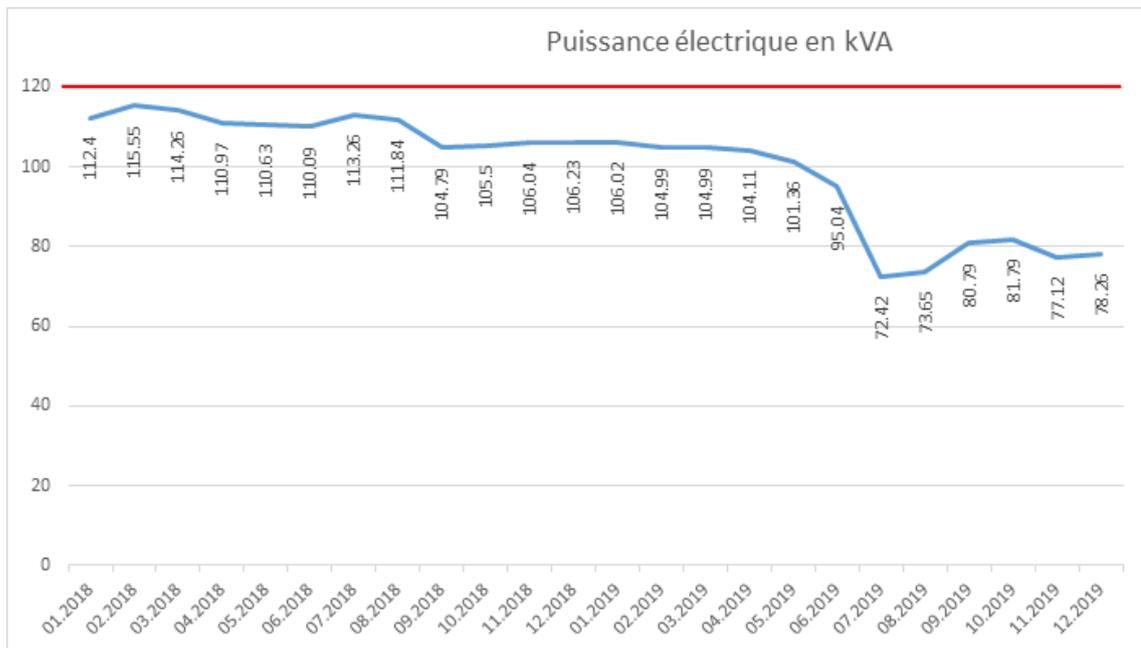
Le graphique ci-dessous [Figure 10] représente l'utilisation mensuelle de DC2 entre janvier 2018 et décembre 2019. La ligne rouge est la limite à ne pas dépasser et la bleue les valeurs enregistrées.

Si la consommation est sur une tendance décroissante jusqu'en juin 2019, le mois suivant affiche une nette baisse de la consommation mensuelle. C'est dû aux anciens châssis qui ont été débranchés à DC2 suite à l'acquisition de nouveaux serveurs physiques plus modernes et plus puissants. Sur un même serveur, il est maintenant possible de créer plus de VM^{G20} et donc de baisser la consommation globale³⁴. Quant aux disques des baies de stockage, ils ont été remplacés à 100% par des disques flash qui consomment moins d'énergie que les disques mécaniques qui étaient installés auparavant.

³³ « Swico RecyclingTM est un système de reprise à but non lucratif d'appareils électriques et électroniques en fin de vie des secteurs informatique, électronique grand public, bureautique, communication, industrie graphique, métrologie et médecine. » [source : swico.ch].

³⁴ Cf. 2.2.1

Figure 10: Consommation mensuelle de DC2 entre janvier 2018 et décembre 2019



(Source : OCSIN^{G11})

Grâce à cette baisse de consommation, la limite à ne pas dépasser peut baisser. Le prix étant fixé selon cette limite, le forfait diminue également.

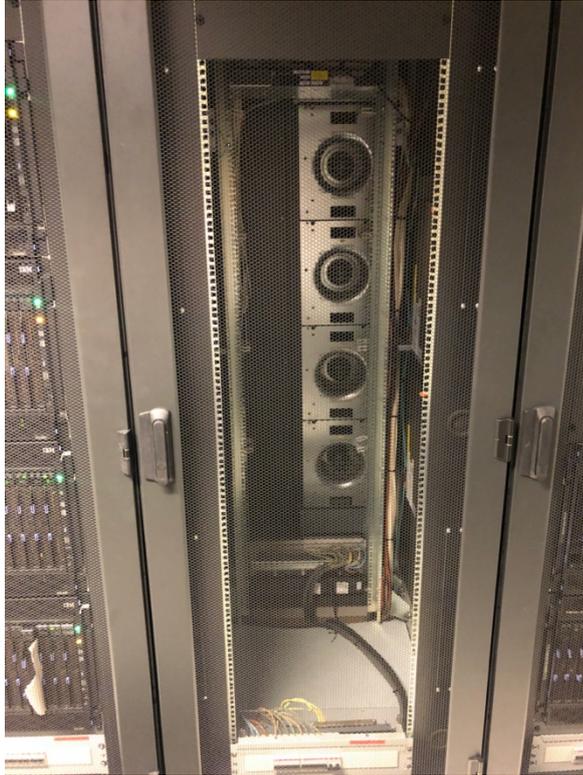
3.6.2 Durée de migration

La durée de migration est le laps de temps qui se situe entre la mise sous tension de nouveaux appareils et la migration des données des anciens vers les nouveaux.

Il peut se passer plusieurs mois avant qu'un ancien appareil soit débranché alors qu'un nouvel appareil est installé et capable de prendre le relais. La durée de migration actuelle est longue et engendre des coûts, car il faut plus d'énergie pour faire tourner l'ensemble des nouveaux appareils acquis en plus des anciens qui doivent être débranchés.

De plus, lors du changement de matériel, il arrive que certains éléments restent dans une partie climatisée [Figure 11]. Cette armoire n'est pas branchée et ne consomme donc pas de courant directement. Cependant, elle se situe à côté d'autres armoires qui fonctionnent et qui doivent être climatisées. Elle occupe donc un espace supplémentaire qui est refroidi pour rien et ce genre d'équipement devrait être évacué au plus vite lors de la mise hors tension.

Figure 11 : Armoire vide



(Source : auteur)

La virtualisation permet de réduire le temps de migration, car les données étant stockées sur le SAN^{G16}, il n'y a pas besoin de déplacer physiquement les données d'un serveur à l'autre.

3.6.3 Calculs inutiles

3.6.3.1 Mutualisation

Environ 800 applications tournent dans les centres de données de l'État de Genève et à chaque fois son logo est stocké localement. Pour ce genre de ressource, on a donc plusieurs centaines de serveurs qui effectuent la même tâche de sauvegarde.

Plutôt que de stocker localement une ressource, la mutualisation permet d'accéder à cette ressource de manière uniforme pour toutes les applications puisqu'elle n'est stockée qu'à un seul endroit. Cela facilite également la mise à jour, car lorsqu'il y a un changement, il n'y a qu'un seul endroit où il faut l'apporter.

4. Exemple d'actions prises pour d'autres organisations

Beaucoup d'entreprises ont pris des mesures pour réduire leur impact écologique et faire baisser leur facture d'électricité. Les entreprises citées dans ce chapitre le sont à titre d'exemple et ne constituent pas une liste exhaustive des meilleures entreprises du marché. Les résultats sont ceux annoncés par l'entreprise citée, mais l'industrie en général continue de progresser et d'autres organisations peuvent fournir des résultats tout autant efficaces, voire plus, avec d'autres technologies ou modèles innovants.

4.1 Google™

Depuis 2007, Google™³⁵ s'est engagé à devenir neutre en carbone. Ils s'appuient majoritairement sur de l'énergie renouvelable pour alimenter les installations.

4.1.1 Plateforme informatique intelligente en carbone

Google™ a récemment mis en place un système qui permet de planifier certains calculs en fonction de la disponibilité des sources d'énergies à faible émission, comme le vent ou le solaire. C'est-à-dire que les tâches les moins importantes, comme ajouter de nouveaux mots à Google Traduction™ ou le traitement d'une vidéo YouTube™, seront effectuées lorsque le système détectera qu'il fait beau ou qu'il y a plus de vent.

Ils n'ont pas eu besoin de nouveau matériel informatique pour implémenter ce système et assurent que la performance des services sur lesquels les utilisateurs comptent 24h/24 n'est pas impactée.

Dans le futur, Google™ envisage de ne pas prendre en compte seulement l'heure, mais aussi de déplacer la charge physiquement afin de maximiser la réduction des émissions.

³⁵ Google™, entreprise américaine de services technologiques.

4.1.2 Économie circulaire

Plutôt que de jeter les matériels usés, Google™ a travaillé avec la fondation Ellen MacArthur³⁶ afin d'instaurer une stratégie d'économie circulaire dans leurs centres de données. Ils ont identifié 4 stratégies :

- Maintenir** : Réparer les composants plutôt que de les remplacer
- Remettre à neuf** : Les parties remises à neuf sont utilisées pour construire des serveurs avec des performances équivalentes aux nouvelles machines
- Réutiliser** : Les pièces qui ne sont plus utiles à Google™ sont revendues à d'autres organisations
- Recycler** : Les éléments qui ne peuvent pas être vendus sont recyclés

³⁶ La fondation Ellen MacArthur, fondée en 2010, s'est donné pour mission d'accélérer la transition vers l'économie circulaire.

4.2 Pure Storage™

Suite au webinaire donné par l'Alliance Green IT™³⁷, APL Datacenters™³⁸ et Pure Storage™³⁹, j'ai retenu certains aspects de Green IT appliqués par Pure Storage™, ainsi que les résultats obtenus.

Les centres de données pourraient représenter 13% de la consommation électrique mondiale d'ici 2030⁴⁰. Afin de maîtriser cette croissance de la consommation et accompagner leurs clients pour réduire les déchets, Pure Storage™ s'est créé avec la mission d'apporter des innovations technologiques en continu pour moderniser les centres de données. Ils veulent faire bénéficier aux entreprises des systèmes qui peuvent être mis à jour technologiquement sans devoir jeter les équipements et donc générer des déchets importants.

³⁷ L'Alliance Green IT™ (AGIT) est une association des acteurs engagés pour le numérique responsable.

³⁸ APL Datacenter™ est un cabinet de conseil et d'ingénierie spécialisé dans la conception et construction de datacenters en France.

³⁹ Pure Storage™ est une entreprise américaine qui développe des logiciels et du matériel de stockage 100% flash.

⁴⁰ [source : DIGUET, Cécile, LOPEZ, Fanny, LEFEVRE, Laurent, 2019 : *L'impact spatial et énergétique des data centers sur les territoires*].

Figure 12 : Magic Quadrant pour le stockage primaire



(Source : Gartner, août 2019)

Technologiquement, Pure Storage™ a réussi à réduire drastiquement la consommation électrique : elle a été divisée par 100 en 10 ans⁴¹. L'espace consommé dans les centres de données a également été réduit. Ils apportent un nouveau modèle de consommation et d'utilisation qui consiste à n'acheter que ce qui est nécessaire et ne pas de surprovisionner la taille des équipements.

Les équipements denses favorisent les technologies de stockage électroniques aux disque durs. Lorsqu'un système de stockage est remplacé chez un client, Pure Storage™ annonce remplacer une dizaine d'armoires informatiques par une portion d'armoire avec un équipement qui consomme très peu.

Les stockages électroniques (technologie flash) possèdent, comme tout composant, une limite d'utilisation et lorsqu'elles sont usées, elles doivent être remplacées. Toujours

⁴¹ [source : FERREIRA, Gabriel, 2020 : *Vers un modèle de consommation plus green et moins cher*].

selon Pure Storage™, ces mémoires durent en général plus longtemps que les supports de stockage mécaniques. Un support de stockage électronique peut facilement être utilisé plus de 10 ans s'il correspond toujours aux besoins.

En 8 ans, l'économie de consommation électrique estimée par Pure Storage™ est de 2TWh, ce qui équivaut à un quart de la consommation d'un réacteur nucléaire. En termes de place, ça correspond également à la réduction de plus de 10'000 racks^{G14}, soit un peu plus de 5 gros centres de données⁴².

Par rapport à la croissance des données, Pure Storage™ pense pouvoir réussir à contenir l'extension des centres de données avec leur technologie, mais la progression de la croissance des données est plus forte que leur capacité de densification.

En termes de recyclage, tous les composants ne vieillissent pas de la même manière et ne sont donc pas obsolètes au même moment. Les équipements sont conçus à partir d'une architecture qui permet de mettre à jour un équipement composant par composant. Tous les composants obsolètes sont renvoyés à l'usine et recyclés, puis réutilisés dans d'autres composants. La réduction des déchets générée à partir du renouvellement de ces équipements est estimée à une économie de 1200 racks^{G14} qui n'ont pas été jetés à la poubelle.

Toutes leurs actions mènent à une réduction des déchets ainsi qu'à une meilleure rentabilité pour leurs clients. Leur modèle permet également d'engendrer une réduction de la consommation électrique grâce à la réduction de place, car il y a moins de matériel à faire fonctionner et à refroidir. De plus, il y a moins de matériel à entretenir, ce qui facilite la maintenance et réduit les coûts liés. Le tout sans impacter la qualité du service. Ils permettent d'être plus green, mais aussi moins cher.

⁴² réf. note 41

5. Actions envisageables pour l'État de Genève

Selon les exemples vus aux chapitres précédents, plusieurs pistes d'amélioration peuvent être envisagée pour favoriser une approche Green IT dans les centres de données de l'État de Genève.

5.1 Actions sur l'urbanisation

5.1.1 Profiter des jours froids

Lors des journées froides, l'air extérieur peut suffire à refroidir tout ou partie du centre de données. Il faudrait que les systèmes de refroidissements soient utilisés en fonction de ce paramètre afin de diminuer la création de froid artificiel lorsque l'air extérieur peut prendre le relai.

5.1.2 Optimiser la climatisation

Au lieu d'envoyer l'air froid sous tout le faux plancher⁴³, il faudrait canaliser l'air produit et l'acheminer directement vers les bouches d'aération. Cela éviterait de fabriquer de l'air froid qui se disperserait sous le faux plancher. En plus de contenir la dispersion, le débit vers les bouches d'aérations les plus éloignées serait plus fort. Ces conséquences permettront de réduire l'utilisation des climatiseurs et de ne produire que ce qui est nécessaire.

La température minimale a déjà été revue à la hausse. Actuellement, les serveurs sont maintenus entre 22°C et 24°C, mais l'OCSIN^{G11} a décidé de passer à 30°C. Les climatiseurs utiliseront moins d'énergie puisqu'ils auront moins besoin de produire de l'air froid.

5.2 Actions matérielles

5.2.1 Optimiser la durée de migration

Lorsque le matériel physique ancien devient obsolète, il est remplacé par du nouveau matériel, mais les deux cohabitent pendant un moment⁴⁴. Plus la durée de migration est

⁴³ Cf. 3.4

⁴⁴ Cf. 3.6.2

longue, plus l'État de Genève doit payer des ressources pour faire tourner des machines qui ne sont pas utilisées au maximum de leur capacité.

Il faudrait mettre en place un nouveau processus pour mieux organiser les migrations et faire en sorte de raccourcir au maximum la durée de migration. De cette procédure doit ressortir notamment une date de passage à une nouvelle version du centre de données après laquelle toutes les données doivent avoir migré sur les nouveaux serveurs.

Le travail fourni en amont pour pouvoir mettre à jour l'ensemble du centre de données dans un temps minimisé permet de réduire la consommation d'énergie.

5.3 Actions logicielles

5.3.1 Éteindre les VM^{G20}

Lorsqu'elle n'est plus utilisée, une VM^{G20} peut être éteinte afin d'éviter qu'elle ne tourne dans le vide. Une VM^{G20} allumée continue de consommer des ressources, même lorsqu'elle est inutilisée. Elle continue d'utiliser du trafic réseau notamment pour les sauvegardes ou pour la surveillance des VM^{G20}. En l'éteignant, on économise non seulement des serveurs physiques, mais aussi de la climatisation et de la place dans les racks^{G14}.

Il est difficile de savoir quel service peut être désactivé sans impact et il faut pour cela établir des règles. Pour savoir si une VM^{G20} est utilisée ou non, les indicateurs suivants ont déjà été identifiés par l'OCSIN^{G11} :

- Utilisation du CPU^{G3}
- Utilisation de la mémoire
- Écriture/lecture du disque
- Trafic réseau

Ces indicateurs sont représentatifs de l'utilisation d'une VM^{G20}, car ils sont tous activés lorsqu'elle est utilisée.

Splunk^{G18} est un outil qui permet de faire du suivi et de l'analyse de données sur les VM^{G20} à l'État de Genève. Son interface [Figure 13] permet d'identifier les machines inutilisées ou dormantes au cours d'une période définie ainsi que les ressources à récupérer.

Figure 13 : Interface de Splunk^{G18}



(Source : OCSIN^{G11})

En liant les filtres avec des « ET » (mémoire utilisée ET lecture du disque ET écriture sur le disque ET bande passante) on obtient les VM^{G20} inutiles, ou dormantes. Si on place des « OU », cela signifie qu'au moins une ressource est sur-allouée.

Il est également possible de prévoir qu'un service sera plus utilisé à un moment donné. Par exemple, pour les impôts, la demande de disponibilité sera plus élevée entre janvier et mars que le reste de l'année.

L'OCSIN^{G11} devrait définir un plan de capacité afin d'ajuster les ressources en fonction de l'application et de la période de l'année. Les données fournies par Splunk^{G18} doivent être utilisées pour établir ce plan de capacité. Par exemple, on pourra voir qu'une application est généralement sollicitée à une même période dans l'année. C'est le cas pour les votations, comme cité ci-dessus, mais aussi pour les inscriptions au parascolaire, dont le pic se situe en septembre.

Actuellement, la sur-allocation est très peu surveillée, contrairement à la sous-allocation, ce qui démontre que la priorité de l'OCSIN^{G11} est plus la performance que la bonne utilisation des ressources. Le plan de capacité devra tenir compte des ressources allouées inutilement afin de les diminuer en dehors des pics de consommation de l'application.

Il faudrait mettre en place un outil qui puisse avertir lorsqu'une machine mériterait qu'on réduise l'allocation d'une ressource (utilisation du « OU ») et qui indiquerait clairement quelles machines sont inutiles (utilisation du « ET »). Cet outil ainsi que le plan de capacité de chaque application seront des ressources pour faciliter la prise de décision quant aux actions à entreprendre sur une VM^{G20}.

Lorsque toutes les VM^{G20} dormantes seront éteintes et que l'allocation des ressources sera ajustée, la consommation énergétique baissera en conséquence.

Rechercher et proposer une solution pour favoriser le Green IT dans les centres de données de l'État de Genève

5.3.2 Sauvegardes

La méthode de sauvegarde actuelle⁴⁵ implique une sauvegarde complète des trois environnements : développement, test et production.

En fonction du cycle de vie de l'application, les sauvegardes peuvent être effectuées différemment. Par exemple, pendant la phase de développement, l'environnement de test peut être sauvegardé moins régulièrement, et inversement pendant la phase de test.

5.3.3 Déduplication

La déduplication aide à réduire la quantité de stockages des données. Le but de la déduplication est de ne stocker qu'une seule image d'une donnée, car il n'est pas utile de sauvegarder plusieurs fois la même donnée.

La déduplication produit un maximum de résultat⁴⁶ lorsque sont créées :

- Des sauvegardes concernent des données similaires provenant de différentes sources : systèmes d'exploitation, machines virtuelles, applications déployées à partir d'une image standard.
- Des sauvegardes complètes des systèmes précédemment sauvegardés sur le même espace de stockage.
- Des sauvegardes incrémentielles de données similaires provenant de différentes sources.
- Des sauvegardes incrémentielles de données qui ne changent pas mais dont l'emplacement des données change.

Pour fonctionner, cette stratégie nécessite l'utilisation d'une machine de déduplication afin d'éliminer les données redondantes grâce à des algorithmes spéciaux. L'OCSIN^{G11} a mis en place la déduplication au travers de ses VTL^{G21}.

⁴⁵ Cf. 3.2

⁴⁶ [source : ACRONIS, [sans date]. *Déduplication - Qu'est-ce que la déduplication de sauvegarde ?*].

Le processus de déduplication génère un temps supplémentaire à la sauvegarde. La sécurité est aussi un frein à la déduplication, car les données chiffrées sont, par définition, de mauvais candidats à la déduplication.

5.3.4 Valider l'architecture en place avec le besoin réel du client

Actuellement, un client qui a besoin de ressources (CPU^{G3} et mémoire) pour une application sélectionne le montant des ressources qui lui seront nécessaires. Ce montant est souvent très au-dessus du besoin réel. Il faudrait donc rajouter une étape de vérification et de validation afin de se rapprocher des besoins réels du client.

L'OCSIN^{G11} pourrait mettre en place un comité de gouvernance chargé de chapoter les applications et de leur donner une priorité. Lorsque la criticité est élevée, par exemple une application pour les services d'urgence, on acceptera d'allouer beaucoup de ressources. A l'inverse, si la criticité est basse, une perte est tolérable et les ressources seront ajustée en fonction.

Les clients, qui sont les autres départements de l'État de Genève, ne payent pas les ressources. L'économie est réalisée uniquement du côté de l'OCSIN^{G11} qui, grâce à ce comité, pourrait prévenir la sur/sous-consommation et réduire le coût des ressources nécessaires en économisant de l'espace ainsi que des ressources.

5.3.5 Identifier les ressources mutualisables et statiques

Étant donné que certaines ressources qui ne changent que rarement sont utilisées localement plusieurs fois par jour⁴⁷, l'OCSIN^{G11} devrait les identifier afin de modifier dans les applications existantes et futures la manière dont est récupérée la ressource.

Dans le cas du logo de l'État de Genève, il est tellement peu susceptible de changer qu'il faudrait repenser l'architecture de manière à ce que l'application ne se demande plus si le logo a changé mais que ce soit le logo qui indique aux applications qu'il a été mis à jour.

⁴⁷ Cf. 3.6.3.1

Pour identifier les ressources déjà implémentées qui pourraient être mutualisées, il faudrait analyser le trafic réseau pour voir les données qui reviennent fréquemment. Le reverse proxy⁴⁸ en place peut aider à identifier ces ressources grâce à ses logs.

Pour les identifier lors du développement, il faudra se demander pour chaque ressource si elle est cachable, et donc statique.

Un autre exemple de ressources qui pourraient être mutualisables sont les noms des départements, qui ne sont modifiés qu'à chaque changement de législature, soit tous les 5 ans.

5.3.6 Implémenter les architectures écologiques et économiques

Une architecture similaire à la façade⁴⁹ est déjà mis en place avec le reverse proxy⁵⁰. Pour optimiser encore plus cette architecture, il faudrait implémenter l'utilisation du cache dans ce reverse proxy afin de servir les objets statiques⁵¹. Ce cache permettrait de diminuer le trafic réseau et de limiter l'accès aux disques.

⁴⁸ Cf. 3.1.2

⁴⁹ Cf. 2.3.1.2.2

⁵⁰ Cf. 3.1.2

⁵¹ Cf. 3.6.3.1

6. Communication des résultats

6.1 Comment implémenter les améliorations ?

Modifier la conception d'un centre de données est une action qui prend du temps et tout ne doit pas être fait d'un coup. Ce travail fastidieux sera d'autant plus démotivant si les résultats ne se font pas ressentir rapidement. Pour commencer, il faut implémenter les solutions en suivant la notion de quick win^{G13}, qui veut que les modifications permettent d'obtenir rapidement des résultats (financiers, motivation, etc.), afin de maximiser l'adhésion et d'augmenter la motivation à continuer sur cette voie.

Une solution possible serait de commencer par optimiser l'urbanisation des centres de données en maximisant le rendement des climatiseurs. Pour ce faire, il faudrait étudier une solution qui permettrait de canaliser l'air froid produit⁵², mais aussi réduire les espaces inutiles en enlevant les équipements inutilisés du local des serveurs⁵³. L'utilisation des cold corridors^{G2} est également à améliorer afin d'éviter de n'avoir qu'une seule rangée d'armoires. Ces couloirs qui permettent d'isoler l'air froid fabriqué par les climatiseurs devraient être plus utilisés pour potentiellement remplacer tout le système des armoires qui ont un système de refroidissement intégré. Dans un deuxième temps, il faudrait étudier l'utilisation de l'air froid extérieur pour venir soulager le travail du climatiseur lorsque c'est possible⁵⁴.

L'étape suivante serait de maîtriser les ressources allouées. Pour cela, le plan de capacité⁵⁵ doit être défini. Une fois mis en place, les VM^{G20} pourront réduire leur demande en ressources. Il faut ensuite qu'un comité de gouvernance valide l'allocation des ressources selon les besoins des clients, afin d'endiguer la sur-allocation des ressources⁵⁶. Puis, un modèle d'architecture qui limite les communications doit être instauré. Le modèle doit permettre d'optimiser le processus de conception lors de

⁵² Cf. 5.1.2

⁵³ Cf. 3.4

⁵⁴ Cf. 5.1.1

⁵⁵ Cf. 5.3.1

⁵⁶ Cf. 5.3.4

l'hébergement d'application⁵⁷, de mutualiser les ressources statiques⁵⁸ et implémenter des architectures écologiques et responsables⁵⁹.

Ensuite, un nouveau processus doit être mis en place pour optimiser la durée de migration et ainsi éviter la période où du vieux matériel tourne en même temps que du neuf⁶⁰. Chaque « mise à jour » du centre de données doit être faite dans un délai impartit qui reste encore à définir. Tous les équipements qui seront débranchés devront être évacués au plus vite afin d'éviter l'utilisation inutile de l'air froid créé.

Finalement, les sauvegardes devront être adaptées à l'environnement d'exploitation⁶¹. Toutes ces améliorations seront mesurables grâce au PUE^{G12}, qui permettra à l'OCSIN^{G11} d'utiliser ce ratio pour se comparer aux autres centres de données.

6.2 Quels seront les gains

Les gains seront premièrement écologiques, puisque toutes les propositions d'amélioration citées dans ce document visent à réduire la consommation d'énergie globale des centres de données.

En réduisant la taille des centres de données et en réduisant le coût alloué à l'achat d'énergie, l'OCSIN^{G11} réalisera aussi des économies de budget et évitera de se diriger vers une surconsommation engendrant plus de charges.

Enfin, les bons résultats obtenus augmenteront la motivation des ingénieurs qui seront félicité pour avoir réalisé des économies, mais aussi la confiance de la population Genevoise sur la stratégie green de l'État de Genève. Les économies réalisées permettront aussi de réinvestir dans des énergies renouvelables.

⁵⁷ Cf. 5.3.4

⁵⁸ Cf. 5.3.5

⁵⁹ Cf. 5.3.6

⁶⁰ Cf. 5.2.1

⁶¹ Cf. 5.3.2

6.3 Communication interne et externe

A l'interne, un plan clair des bonnes pratiques à suivre doit être rédigé et fourni aux développeurs et aux ingénieurs. Ce plan devrait inclure des conseils pour identifier des ressources statiques lors du développement ou encore des limites pour l'allocation des ressources en fonction du type d'application et de son niveau de criticité. Un PUE^{G12} cible devrait être défini et servir d'objectif.

A l'externe, l'État de Genève pourrait plus partager les actions entreprises et indiquer les économies réalisées afin de motiver plus de centre de données, de développeurs ou d'ingénieurs à prendre en compte le Green IT dans leur développement. Ça lui permettrait d'améliorer son image et la confiance de citoyens envers l'État de Genève.

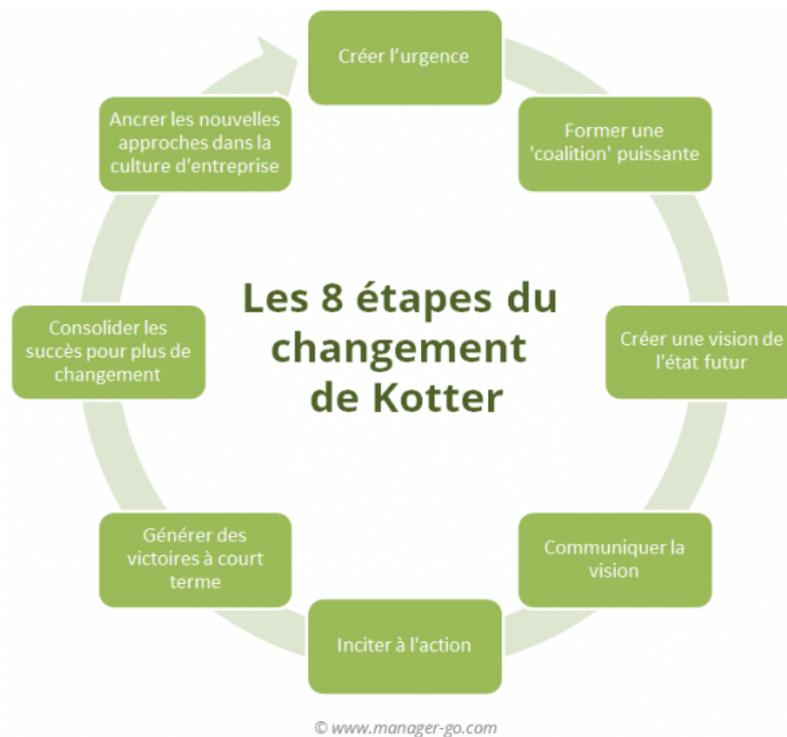
6.4 Accompagnement du changement

Comme dans tout changement, on peut appliquer des méthodes classiques telle que la méthode de Kotter.

La méthode de Kotter se décompose en 8 étapes :

1. Créer l'urgence
2. Former une « coalition » puissante (nulle génération soudée)
3. Créer une vision de l'état futur (proposition de gestion avec amélioration)
4. Communiquer la vision (au couches dirigeantes)
5. Inciter à l'action
6. Générer des victoires à court terme (quick win)
7. Consolider les succès pour plus de changement
8. Ancrer les nouvelles approches dans la culture de l'entreprise

Figure 14 : Étapes du changement de Kotter



(Source : www.manager-go.com, 2020)

Les méthodes telles que la méthode de Kotter permettent de gérer efficacement un changement, afin de limiter la résistance au changement⁶².

6.4.1 Application de la méthode de Kotter

Le changement pour favoriser le Green IT dans les centres de données de l'État de Genève a déjà commencé : l'urgence climatique a encouragé plusieurs personnes à entreprendre des mesures pour économiser les ressources. Ce travail propose une vision de l'état futur et communique cette vision afin d'inciter à l'action. En suivant le plan proposé⁶³, des résultats rapides augmenteront l'enthousiasme et la motivation.

⁶² Cf. 1.3.3

⁶³ Cf. 6.1

7. Conclusion

Le Green IT s'implémente dans toutes les organisations qui vendent et consomment des services et permet de réaliser des gains budgétaires. C'est également une tendance marketing qui est de plus en plus appliquée, et beaucoup de grandes multinationales montrent l'exemple avec différentes innovations technologiques. Après avoir regroupé toutes les informations obtenues via les différents articles, interview et conférences, j'en arrive à la conclusion qu'il est urgent de concilier la transition numérique et la transition environnementale.

J'ai remarqué que la frontière entre le monde informatique et le monde extérieur est de plus en plus abstraite et que l'environnement commence à faire partie de la conception, par exemple en réutilisant la chaleur générée par les serveurs pour réchauffer un bâtiment. D'une manière générale, beaucoup d'optimisations sont nécessaires pour rentabiliser au maximum l'énergie créée et éviter les dispersions. Beaucoup d'acteurs importants (par leur impact ou par leur influence) ont déjà réalisé des tests aux résultats convaincants, dont tous ceux qui voudraient favoriser le Green IT devraient s'inspirer.

Personne n'a de solution miracle et parler de neutralité carbone est en général utopique ou pour se démarquer, mais le partage des connaissances est la clé pour réussir à maintenir la progression de la consommation et limiter la pollution de l'environnement. J'ai souvent eu l'impression qu'être écologique impliquait un coût élevé, mais dans le cas des centres de données, où de l'énergie est simplement créée pour ne pas être utilisée, il s'agit surtout de rentabiliser l'utilisation des équipements et donc de faire des économies financières avant de réinjecter les économies réalisées dans l'achat d'énergies renouvelables.

J'ai beaucoup apprécié travailler sur ce sujet qui m'a ouvert les yeux sur une problématique que je ne connaissais pas assez. Ma visite à DC1 m'a permis de me rendre compte des problèmes concrets de conception du centre de données, notamment la surproduction d'air froid. Je pense que tout le monde est concerné et peut agir à son échelle, que ce soit en termes d'architecture des centres de données et de conception, mais aussi en termes d'usage. J'espère que ce travail permettra à ses lecteurs de prendre conscience que l'invisible est important et que des mesures peuvent être entreprises à toutes les échelles. Je voudrais encourager tout le monde à utiliser les différentes méthodes de Green IT.

Ce travail m'a permis de prendre conscience de l'impact de ma profession et le concept du Green IT me restera en tête dans mes futurs projets. Je pense que ce rapport mériterait encore beaucoup d'ajouts, car les possibilités pour implémenter le Green IT sont très nombreuses et la liste des solutions proposée dans ce document n'est pas exhaustive. De plus, l'innovation est constante et chaque année de nouvelles technologies apparaissent sur le marché, qui font qu'un centre de données peut continuellement être optimisé. Les leaders du marché sont à surveiller de près pour pouvoir réappliquer les futures découvertes à d'autres échelles.

Bibliographie

ACRONIS, [sans date]. *Déduplication - Qu'est-ce que la déduplication de sauvegarde ?* [en ligne]. [Consulté le 16 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.acronis.com/fr-fr/articles/deduplication/>.

ANDRAE, Anders, HU, Ling, LIU, Long, SPEAR, John, RUBEL, Keagan, 2017. *Delivering Tangible Carbon Emission and Cost Reduction through the ICT Supply Chain. International Journal of Green Technology* [en ligne]. Novembre 2017. Vol. 3, n°1, pp. 01-10. [Consulté le 22 avril 2020]. Disponible à l'adresse : <https://ijgtech.com/wp-content/uploads/2017/11/For-web-Andrae-MS.pdf>.

ANON., Laurence, 2019. Il y aurait 22 milliards d'objets connectés dans le monde (Strategy Analytics). *Mac4Ever* [en ligne]. [Consulté le 5 juin 2020]. Disponible à l'adresse : https://www.mac4ever.com/actu/143604_il-y-aurait-22-milliards-d-objets-connectes-dans-le-monde-strategy-analytics.

ASR, 2020. *La consommation d'énergie dans les centres de données deviendra « insoutenable », prédit un chercheur.* [en ligne]. [Consulté le 22 avril 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.anguillesousroche.com/internet/la-consommation-denergie-dans-les-centres-de-donnees-deviendra-insoutenable-predit-un-chercheur/>.

ATS, 2020. Coronavirus : l'utilisation des réseaux sociaux explose, mais Facebook perd des revenus. *La Côte* [en ligne]. 25 mars 2020. [Consulté le 12 juin 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.lacote.ch/articles/lifestyle/techno-et-sciences/coronavirus-l-utilisation-des-reseaux-sociaux-explose-mais-facebook-perd-des-revenus-923078>.

AUSTRIAN ENERGY AGENCY, IBM, SUN, UNIVERSITY OF KARLSRUHE, FRENCH ENVIRONMENT AND ENERGY MANAGEMENT AGENCY, ROBERT HARRISON ASSOCIATES LTD, 2009. *Energy and cost savings by energy efficient servers – case studies* [en ligne]. Février 2009. [Consulté le 6 mai 2020]. Disponible à l'adresse : https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/e-server_e_server_case_studies_en.pdf.

AVELAR, Victor, [sans date]. *Méthode de calcul de l'efficacité énergétique (PUE) dans les datacenters.* [Consulté le 8 juin 2020]. Disponible à l'adresse : http://apcmmedia.com/salestools/SNIS-7E6LKL/SNIS-7E6LKL_R2_FR.pdf?sdirect=true.

Blockchain. *Wikipédia : l'encyclopédie libre* [en ligne]. Dernière modification de la page le 4 mars 2020 à 14:36. [Consulté le 22 avril 2020]. Disponible à l'adresse : <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Blockchain&oldid=168089308>.

Rechercher et proposer une solution pour favoriser le Green IT dans les centres de données de l'État de Genève

BORDAGE, Frédéric, 2009. Eco-TIC : les écotechniques entrent dans le dictionnaire. *Green IT* [en ligne]. 1 septembre 2009. [Consulté le 5 juin 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.greenit.fr/2009/09/01/eco-tic-les-ecotechniques-entrent-dans-le-dictionnaire/>.

BORDAGE, Frédéric, 2011. Le green data center existe-t-il ? *Green IT* [en ligne]. 12 juillet 2011. [Consulté le 6 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.greenit.fr/2011/07/12/le-green-data-center-existe-t-il/>.

BORDAGE, Frédéric, 2019. Empreinte environnementale du numérique mondial. *Green IT* [en ligne]. Septembre 2019. [Consulté le 30 mai 2020]. Disponible à l'adresse : https://www.greenit.fr/wp-content/uploads/2019/10/2019-10-GREENIT-etude_EENM-synthese-accessible.VF.pdf.

BORDAGE, Frédéric, 2020. Data center : seulement 6% de hausse en 8 ans. *Green IT* [en ligne]. 4 mars 2020. [Consulté le 6 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.greenit.fr/2020/03/04/data-center-seulement-6-de-hausse-en-8-ans/>.

CHAVANNE, Yannick, 2019. *Les entreprises dépenseront cette année plus de mille milliards pour leur transformation digitale* [en ligne]. 6 mai 2019. [Consulté le 30 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.ictjournal.ch/etudes/2019-05-06/les-entreprises-depenseront-cette-annee-plus-de-mille-milliards-pour-leur>.

COHEN, Claudia, 2019. Climat: les émissions mondiales de CO2 ont augmenté de 55% en vingt ans. *Le Figaro.fr* [en ligne]. 19 avril 2019. [Consulté le 5 juin 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.lefigaro.fr/economie/le-scan-eco/dessous-chiffres/climat-les-emissions-mondiales-de-co2-ont-augmente-de-55-en-vingt-ans-20190419>.

DAIGLE, Thomas, 2020. « *Completely unsustainable* »: *How streaming and other data demands take a toll on the environment* [en ligne]. 2 janvier 2020. [Consulté le 22 avril 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.cbc.ca/news/technology/data-centres-energy-consumption-1.5391269>.

Déduplication. *Wikipédia : l'encyclopédie libre* [en ligne]. Dernière modification de la page le 13 novembre 2019 à 13:34. [Consulté le 16 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=D%C3%A9duplication&oldid=164472032>.

DELUZARCHE, Céline, 2019. Quelle est l'empreinte carbone d'un e-mail ? *Futura* [en ligne]. [Consulté le 30 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.futura->

sciences.com/planete/questions-reponses/eco-consommation-empreinte-carbone-email-10840/.

DIGUET, Cécile, LOPEZ, Fanny, 2019. *L'impact spatial et énergétique des data centers sur les territoires* [en ligne]. Janvier 2019. [Consulté le 30 mai 2020 f]. Disponible à l'adresse :

https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/synthese_enenum-20fevrier2019.pdf.

DUGERDIL, Philippe, 2020. « *Module 626-1, Organisation du développement – GL, Philippe Dugerdil, 27.02.2020* » [document PDF].

Support de cours : Cours « Architecture des systèmes d'information », Haute école de gestion de Genève, filière Informatique de gestion, année académique 2019-2020.

ENIGMA, 2020. Marketing et Coronavirus (COVID-19) : les effets sur le digital en Suisse. *Enigma* [en ligne]. 9 avril 2020. [Consulté le 12 juin 2020]. Disponible à l'adresse : <https://enigma.swiss/fr/blog/covid-19-marketing/>.

Fibre Channel. *Wikipédia : l'encyclopédie libre* [en ligne]. Dernière modification de la page le 10 janvier 2019 à 16:36. [Consulté le 8 juin 2020]. Disponible à l'adresse : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fibre_Channel&oldid=155686084.

FRANCE. Pure Storage, l'Alliance Green IT, APL Data Center, 2020. *Vers un modèle de consommation plus green et moins cher, 26 mai 2020* [séminaire en ligne].

GOOGLE, [sans date]. Circular economy of Google data centers. *Google Sustainability* [en ligne]. [Consulté le 11 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://sustainability.google/projects/circular-economy/>.

GOOGLE, [sans date]. *Efficacité – Centres de données* [en ligne]. [Consulté le 8 juin 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.google.com/intl/fr/about/datacenters/efficiency/>.

GOOGLE, 2020. Our data centers now work harder when the sun shines and wind blows [en ligne]. 22 avril 2020. [Consulté le 11 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://blog.google/inside-google/infrastructure/data-centers-work-harder-sun-shines-wind-blows/>.

Green IT. *Wikipédia : l'encyclopédie libre* [en ligne]. Dernière modification de la page le 8 avril 2020 à 09:43. [Consulté le 18 avril 2020]. Disponible à l'adresse : https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Green_IT&oldid=198637889.

Rechercher et proposer une solution pour favoriser le Green IT dans les centres de données de l'État de Genève

GREENIT.FR, [sans date]. *Définition* [en ligne]. [Consulté le 18 avril 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.greenit.fr/definition/>.

GREENIT.NET, [sans date]. *Why GreenIT ?* [en ligne]. [Consulté le 18 avril 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.greenit.net/whygreenit.html>.

Huawei. *Wikipédia : l'encyclopédie libre* [en ligne]. Dernière modification de la page le 1 juin 2020 à 12:32. [Consulté le 5 juin 2020] Disponible à l'adresse : <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Huawei&oldid=171538563>.

IEA, 2019. *Tracking Buildings, IEA, Paris* [en ligne]. [Consulté le 18 avril 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.iea.org/reports/tracking-buildings/data-centres-and-data-transmission-networks>.

Indicateur d'efficacité énergétique. *Wikipédia : l'encyclopédie libre* [en ligne]. Dernière modification de la page le 3 mai 2020 à 13:33. [Consulté le 8 juin 2020]. Disponible à l'adresse : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Indicateur_d%27efficacit%C3%A9_%C3%A9n%27erg%C3%A9tique&oldid=170385795.

INGENOVA, [sans date]. *Réussir l'urbanisation de datacenter avec Ingenova* [en ligne]. [Consulté le 6 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.ingenova.com/ref/urbanisation-data-center.html>.

IONOS, [2017]. Réduction de données via déduplication et compression. *IONOS Digitalguide* [en ligne]. [Consulté le 16 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.ionos.fr/digitalguide/serveur/know-how/reduction-de-donnees-via-deduplication-et-compression/>.

LA DEPECHE, 2019. *Le numérique responsable de 4% des émissions de gaz à effet de serre* [en ligne]. 21 octobre 2019. [Consulté le 30 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.ladepeche.fr/2019/10/21/le-numerique-responsable-de-4-des-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre,8494629.php>.

MACDONALD, Steven, [2019]. What is SaaS? A Data-Driven Guide to Software-as-a-Service. *CRM Blog: Articles, Tips and Strategies by SuperOffice* [en ligne]. [Consulté le 11 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.superoffice.com/blog/saas/>.

MANAGER GO, 2020. *Mettez en œuvre les 8 étapes du changement de Kotter*. [en ligne]. Dernière mise à jour le 19 mars 2020 [Consulté le 5 juin 2020]. Disponible à

l'adresse : <https://www.manager-go.com/gestion-de-projet/8-etapes-du-changement-de-kotter.htm>.

MICELI, Nicolas, 2018. Relever la température des salles serveurs pour améliorer la performance énergétique des data centers. *Global Security Mag Online* [en ligne]. Novembre 2018. [Consulté le 8 juin 2020]. Disponible à l'adresse : <http://www.globalsecuritymag.fr/Relever-la-temperature-des-salles,20181107,81940.html>.

NATIONS UNIES, 2015. *Accords de Paris* [en ligne]. [Consulté le 5 juin 2020]. Disponible à l'adresse : https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/french_paris_agreement.pdf.

NIEUWELING, Carine, 2016. Code of Conduct for Energy Efficiency in Data Centres. *EU Science Hub - European Commission* [en ligne]. 14 novembre 2016. [Consulté le 8 juin 2020]. Disponible à l'adresse : <https://ec.europa.eu/jrc/en/energy-efficiency/code-conduct/datacentres>.

NOVELL, [sans date]. *Virtualisation et consolidation* [en ligne]. [Consulté le 8 juin 2020]. Disponible à l'adresse : http://www.novell.com/fr-fr/docrep/documents/x9ou3j6cfm/Virtualization_and_Consolidation_Solution_Flyer_FR_fr.pdf.

ODOXA, 2019. *Les Français, plus « écolos » que jamais*. [en ligne]. [Consulté le 17 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <http://www.odoxa.fr/sondage/barometre-economique-doctobre-francais-plus-ecolos-jamais/>.

OFFICE FÉDÉRAL DE L'ENVIRONNEMENT, 2018. *L'accord de Paris sur le climat*. [en ligne]. Dernière modification le 21 août 2018. [Consulté le 5 juin 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themen/thema-klima/klimawandel-stoppen-und-folgen-meistern/klima--internationales/das-uebereinkommen-von-paris.html>.

OVH, 2009. *Green IT* [en ligne]. [Consulté le 8 juin 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.ovh.com/images/housing/documents/presentation/ecologie.pdf>.

Proxy inverse. *Wikipédia : l'encyclopédie libre* [en ligne]. Dernière modification de la page le 20 mars 2020 à 07:52. [Consulté le 23 mai 2020]. Disponible à l'adresse : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Proxy_inverse&oldid=168590132.

Rechercher et proposer une solution pour favoriser le Green IT dans les centres de données de l'État de Genève

RADWARE, [sans date]. *Server Consolidation*. [en ligne]. [Consulté le 6 mai 2020]. Disponible à l'adresse : https://www.radware.com/resources/server_consolidation.aspx.

RAO, Santhosh, MONROE, John, W. COX, Roger, UNSWOTH, Joseph, 2019. *Magic Quadrant for Primary Storage* [en ligne]. 17 septembre 2019. [Consulté le 30 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.gartner.com/doc/reprints?id=1-KPMX0VO&ct=190620&st=sb>.

RESONANCE RSE [sans date]. *La RSE, c'est quoi ?* [en ligne]. [Consulté le 30 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.resonancerse.com/qui-sommes-nous/la-rse-cest-quoi/>.

ROMARIC, David, 2017. *Bonnes pratiques d'aménagement et de monitoring* [en ligne]. 16 mars 2017. [Consulté le 6 mai 2020]. Disponible à l'adresse : https://ecoinfo.cnrs.fr/wp-content/uploads/2017/03/2017_03_16_edge_datacentres_publish.pdf.

SWICO, [sans date]. *Recyclage* [en ligne]. [Consulté le 8 juin 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.swico.ch/fr/recyclage/>.

UNITED NATIONS, WORLD ECONOMIC FORUM, 2019. *UN, World Economic Forum and Partners Come Together to Address E-Waste Challenges* [en ligne]. Janvier 2019. [Consulté le 30 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.itu.int/en/mediacentre/Pages/2019-PR01.aspx>.

VINCENT, James, 2019. Bitcoin consumes more energy than Switzerland, according to new estimate. *The Verge* [en ligne]. 4 juillet 2019. [Consulté le 22 avril 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.theverge.com/2019/7/4/20682109/bitcoin-energy-consumption-annual-calculation-cambridge-index-cbeci-country-comparison>.

VMWARE, [sans date]. *Server Virtualization & Consolidation* [en ligne]. [Consulté le 6 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.vmware.com/solutions/consolidation.html>.

WEIHL, Bill, 2009. Reducing our carbon footprint. *Official Google Blog* [en ligne]. [Consulté le 11 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://googleblog.blogspot.com/2009/05/reducing-our-carbon-footprint.html>.

WMGRIES, 2017. *Data Deduplication Overview*. [en ligne]. [Consulté le 16 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://docs.microsoft.com/en-us/windows-server/storage/data-deduplication/overview>.

Rechercher et proposer une solution pour favoriser le Green IT dans les centres de données de l'État de Genève