

Université Libre de Bruxelles
Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire
Faculté des Sciences
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

« Comment le secteur des data centers peut répondre aux pressions des enjeux énergétiques, climatiques et environnementaux actuels. »

Mémoire de Fin d'Etudes présenté par
MARTIN Laetitia
en vue de l'obtention du grade académique de
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement
Finalité Gestion de l'Environnement Ma 120ECTS ENVIG
Année Académique : 2016-2017

Directeur : Prof. HUART Michel

Co-Directeur : Dr. WALLENBORN Grégoire

Résumé

Face cachée ou oubliée de notre vie quotidienne, les data centers sont devenus un élément clé en relation avec toutes les technologies modernes et les objets connectés qui nous entourent et que nous utilisons, parfois de façon machinale. Les data centers sont le centre névralgique de toute une économie et la moindre défaillance a un impact direct sur notre vie selon le type d'usage fait des données ou applications. De plus, nous assistons à une augmentation massive d'échanges de données et par conséquent du besoin de les traiter, de les analyser et de les stocker. Face à cette demande grandissante, les enjeux environnementaux, énergétiques et climatiques sont de plus en plus présents car nous oublions bien trop souvent que les ressources en matières premières ne sont pas illimitées et que leurs transformations requièrent elles aussi un travail, une énergie sous-estimée. Les principaux composants structurels des data centers que sont l'IT, l'énergie et le refroidissement sans oublier la redondance, laissent place à de nombreuses opportunités d'optimisation pour les centres.

Cette revue des divers processus successifs amène à se pencher sur trois indicateurs qui ensemble regroupent une vision large des impacts des data centers. Le Power Usage Effectiveness est le plus couramment utilisé. Il est défini par le ratio de l'énergie totale consommée par le centre informatique par rapport à l'énergie consommée par les systèmes informatiques. Le second indicateur concerne l'utilisation de l'eau, paradoxalement, dans un milieu que l'on imagine très électrique, la gestion de l'eau peut aussi revêtir son importance. Le troisième et dernier indicateur abordé se porte sur l'intensité carbone des centres.

Face aux consommations énergétiques de plus en plus importantes du secteur, des inquiétudes sont apparues et plusieurs acteurs du secteur se sont regroupés sous la forme de consortium afin d'homogénéiser le domaine et d'émettre des lignes directrices pour une meilleure gestion.

Plusieurs perspectives d'améliorations s'offrent aux opérateurs de data centers. Elles concernent le refroidissement (températures recommandées, techniques...) et l'efficacité énergétique. Des solutions plus technologiques sont également possibles comme la virtualisation et la modularité. Enfin, il faut mentionner les apports positifs des énergies renouvelables, de la localisation du centre ou encore la récupération de la chaleur. L'importance du facteur humain en tant que gestionnaire sera également à garder à l'esprit.

Ces solutions sont ensuite discutées dans une application théorique dans le cadre de la rénovation du centre de données de l'ULB. Cet exercice permet de constater que les dispositions actuelles ne peuvent pas toujours être mises en pratique.

Remerciements

J'adresse mes remerciements aux personnes qui m'ont aidée dans la réalisation de ce mémoire.

En premier lieu, je veux adresser mes remerciements à mon directeur de mémoire Prof. Michel Huart et ainsi qu'à mon co-directeur Dr Grégoire Wallenborn, pour leurs disponibilités et guidances tout au long de l'année. Merci pour votre rigueur et vos remarques critiques qui m'ont permise d'affiner ma réflexion.

Je remercie également M. Francis Gillard de Low Energy Consulting pour sa collaboration en me fournissant les informations et précisions nécessaires. Merci aussi à Mme Karin Doguet, Directrice Informatique du centre informatique de l'ULB, pour le temps qu'elle m'a accordé.

Je souhaite particulièrement remercier tous ceux qui ont aidé à la relecture et à la correction de ces nombreuses pages.

Enfin, à ma famille, source d'encouragement et de motivation tout au long du travail de rédaction.

Merci à mes amis, connaissances et à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué d'une manière ou d'une autre au bon déroulement de mon master et surtout de ce mémoire.

Table des matières

Résumé	iii
Remerciements	v
Introduction	3
Le B.A.-BA. des data centers	6
Petit historique.....	6
Usages actuels	7
Définition	8
Typologie	9
Infrastructure des data centers.....	11
Infrastructure IT	12
Infrastructure énergétique.....	12
Infrastructure de refroidissement.....	13
Redondance	15
Impacts des centres de données.....	17
Impacts énergétiques	17
Impacts climatiques.....	18
Impacts environnementaux	20
Consortium et programmes liés au centre de données	22
Indicateurs	24
Power Usage Effectivness	25
Water Usage Effectiveness.....	29
Carbon Usage Effectiveness.....	31
Bonnes pratiques	33
Refroidissement.....	33
ASHRAE.....	33
Confinement des ailes chaudes et froides	34
Techniques de refroidissement naturel.....	35
Efficacité énergétique.....	37
Virtualisation.....	38
Modularité	39
Énergie renouvelable.....	40
Localisation	42
Récupération de la chaleur	43
Facteur humain.....	45
Application : la rénovation du data center de l’ULB	46

Conclusion.....	52
Glossaire.....	57
Bibliographie.....	58
Annexes.....	65
Annexe 1	65
Annexe 2	67
Annexe 3	68

Introduction

Dans un article datant du 21 octobre 2010, The Guardian annonçait que l'empreinte carbone d'un email est de 4 g équivalents CO₂ et de 0,3 g dans le cas d'un spam (Berners-Lee et Clark, 2010). Ces chiffres proviennent en partie d'une étude réalisée par la société éditrice de logiciels McAfee, en collaboration avec ICF international (McAfee et ICF, 2009). Ces derniers précisent que l'envoi d'emails professionnels par un utilisateur lambda est responsable de l'émission de 131 kg CO₂ eq. par an. Dans le cadre de ce même rapport, l'ICF a estimé à 0,2% la contribution des spams au total des émissions de CO₂. Si ces chiffres semblent peu impressionnants, il faut les restituer dans un contexte de multiplication des opérations et du partage des données via internet. Le groupe Radicati estime qu'en 2016, 215,3 milliards de mails ont été envoyés quotidiennement dans le monde (The Radicati Group, 2016). Le calcul est assez simple 4g CO₂ eq. multiplié par 215,3 milliards mails correspond à 861 200 tonnes de CO₂ soit autant que le transport routier de la région Bruxelles-Capitale en 2009 (Bruxelles Environnement, 2014).

En 2014, l'ADEME calcule qu'une entreprise française comptant 100 employés envoyant en moyenne 73 040 mails annuellement, génère des émissions de gaz à effet de serre s'élevant à 13,6 tonnes CO₂ eq (ADEME, 2014). Il en va de même pour une recherche internet. Selon la littérature, les estimations d'une recherche via le moteur de Google varient entre 1 et 10g (vom Brocke *et al.*, 2012), tandis que le moteur de recherche annonce lui-même émettre seulement 0,2 g de CO₂ par recherche (Google, 2009). L'analyse de cycle de vie d'une requête sur le web via un moteur de recherche affiche un résultat de 9,9 kg CO₂ eq. par an et par internaute français (Le Guern et Farrant, 2011). L'agence constate que lors de l'utilisation d'un moteur de recherche internet, l'étape de la recherche de résultats est à l'origine des impacts potentiels. Or, au sein de cette partie, la quasi-totalité des impacts est liée au stockage des données indexées, en particulier la consommation électrique (*Ibid.*).

Mais quelle est la source de ces impacts ? L'ADEME pointe du doigt deux facteurs : d'une part l'ordinateur des utilisateurs et d'autre part les data centers. C'est sur ces derniers que nous allons nous focaliser. Avant d'aller plus loin, il paraît opportun de donner une première définition de data centers (ou centre de données en français). Les data centers « *sont des dépôts centraux, physiques ou virtuels pour le stockage la gestion et la dissémination des données et d'informations* » (Rouse, 2010). Cette définition sera précisée et nuancée par la suite.

Ces infrastructures sont caractérisées par leur gigantesque besoin en électricité qui engage une forte facture énergétique mais également une empreinte carbone importante (Buyya *et al.*, 2010). Une recherche portant sur les émissions de gaz à effet de serre dans le secteur des Technologies de l'Information et de la (TIC) calcule qu'en 2007, le secteur a émis

620 Mt CO₂ eq dont 180 Mt proviennent uniquement de l'opération des data centers (Malmodin *et al.*, 2010).

En fournissant les technologies utiles aux banques, entreprises, hôpitaux, universités ... les data centers sont devenus un rouage essentiel dans l'opération des TIC à travers le monde (Brady *et al.*, 2013). La montée de ces TIC, de l'utilisation d'internet, du développement de l'Internet of Things (IoT) et de l'expansion du Cloud accroissent les besoins en espace de stockage et de puissance de calcul nécessitant un nombre croissant de data centers (Marty et Lohier, 2012 ; Syntec Numérique, 2011). Cependant, leur nombre exact est difficilement chiffrable, car les compagnies ayant recours à ces infrastructures préfèrent rester discrètes à ce sujet au vu de la sensibilité des données qui peuvent y être contenues (Miller, 2011a). En effet, un des rôles principaux des data centers est d'assurer la sécurité des données tout en garantissant la continuité des activités de la compagnie (Ounifi *et al.*, 2015). Emerson Network Power recense à l'échelle mondiale 509 147 data centers, ce qui correspondrait à 26,551 km² dédiés aux centres de données (Miller, 2011b) soit près de 2/3 de la ville de Bruxelles. À une autre échelle, le Cabinet du Gouvernement Britannique déclarait en 2011, que 220 data centers sont détenus par le gouvernement central du pays, tandis que les gouvernements locaux et le secteur public totalisent 600 data centers (Hayes, 2011). Si le nombre exact de data centers reste inconnu, la littérature actuelle s'accorde sur un point : le nombre de data centers croît de manière exponentielle (Capozzoli et Primiceri, 2015 ; Howard et Henretig, 2012 ; Shehabi *et al.*, 2016 ; Yuventi et Mehdizadeh, 2013).

Ce n'est pas tant le nombre de centres de données qui est pertinent mais bien leur consommation. Selon Howard et Henretig (2012), les data centers ont consommé 1% de l'électricité mondiale en 2005. Ces infrastructures sont un gouffre énergétique entraînant avec lui les émissions de gaz à effet de serres liées à la production électrique.

Dans un contexte de lutte contre le changement climatique, des collectifs environnementaux se dressent face aux data centers. Le monde scientifique et politique commence également à s'intéresser à la cause (Mingay, 2007). Face à ces pressions, les opérateurs ne sont pas seuls. Ils peuvent compter sur diverses associations ou consortiums en vue de partager leur expérience, leurs avancées et bonnes pratiques. Ces améliorations peuvent prendre diverses formes. Par exemple, le Green Grid, rassemblement international de parties prenantes autour de l'efficacité énergétique des centres de données, a mis au point plusieurs indicateurs utilisables par le secteur. Le monde « politique » entre aussi en scène en collaborant avec ces consortiums et en s'inspirant de leurs recommandations afin de rédiger des lignes de conduite volontaires pour les opérateurs.

Les data centers augmentent de plus en plus en importance que ce soit par leur activité ou leur consommation énergétique. Suite à ce constat, le mémoire ci-présent tentera d'exposer comment le secteur des data centers peut répondre aux pressions des enjeux énergétiques, climatiques et environnementaux actuels. D'ailleurs, il semblerait que le secteur réagisse selon deux stratégies différentes. La première est basée sur l'utilisation d'indicateurs de performance, tandis que la deuxième se concentre sur la mise en place de bonnes pratiques.

Afin d'illustrer les différentes stratégies du secteur et de compléter la littérature, un entretien a été mené auprès d'un consultant du secteur M. Francis Gillard Data Centre Expert, Critical Infrastructures, Energy Optimization pour Low Energy Consulting.

De plus, une étude sur les sociétés opératrices a été mise en œuvre. Une centaine de sociétés ont été ainsi passées au crible. L'échantillon regroupait différents noms issus de la littérature ou de recherches personnelles, mixant tailles, chiffres d'affaires et localisations. Le but premier était de récolter des témoignages sur les différentes solutions mises en place. Environ la moitié de ces sociétés ont été contactées principalement par mail. Seulement, le peu de réponses obtenues n'ont pas été positives car, d'une part les entreprises annoncent clairement leur refus de collaborer (en particulier avec un étudiant), d'autre part les interlocuteurs ne maîtrisent pas ou peu le sujet. Dans ce dernier cas de figure, le service presse est généralement en charge de répondre mais possède peu de connaissances techniques et est donc incapable de fournir des informations différentes que celles déjà présentées sur l'interface web. De plus, le service presse et le service technique se renvoient les responsabilités. Le service presse ne pouvant fournir des informations pointues et l'assistance technique ne pouvant communiquer sans l'aval du service presse.

L'analyse se base donc, malheureusement, uniquement sur les informations disponibles au public. Cette attitude adoptée par les opérateurs reflète le manque de transparence dénoncé par Greenpeace lors de ses rapports. Toutefois, la recherche personnelle a donné quelques résultats qui seront évoqués dans ce mémoire sous le terme d'« enquête exploratoire » au vu de la qualité insatisfaisante des réponses reçues. De plus, l'expression « opérateurs verts » désignera les acteurs ayant développé des arguments pouvant répondre aux impacts des data centers.

Dans un premier temps, nous définirons le concept de data centers en explicitant son évolution au fil du temps, ses usages et ses différentes caractéristiques. En second lieu, nous décrirons les infrastructures matérielles des centres de données. Après quoi, les impacts énergétiques, climatiques et environnementaux des data centers seront évoqués. Ensuite, nous essayerons de mettre en avant les tendances développées par le secteur pour y répondre. Cette partie inclura un tour d'horizon des consortiums et des indicateurs utilisés par le secteur en tant que réponse aux pressions. Elle se concentrera également sur les bonnes pratiques visant la diminution

d'impacts. Enfin, le dernier chapitre est un exercice d'application théorique des pratiques décrites précédemment dans le cadre de la rénovation du data center de l'ULB.

Le B.A.-BA. des data centers

Petit historique

Initialement la majorité des data centers étaient situés dans un bâtiment industriel existant ou dans un entrepôt aménagé, afin d'héberger les baies, mais ces derniers ne correspondent plus aux demandes modernes (Jones *et al.*, 2013). De plus, avec l'arrivée des contenus numériques, les différentes manières de stocker l'information évoluent; passant d'un simple serveur à une armoire, puis à une pièce entière et enfin à des « fermes » de serveurs (Horner, N. et Azevedo, 2016). Pramod et Yogendra (2012) retracent l'évolution des centres de données. Selon les auteurs, l'existence des data centers coïncide avec la construction de l'ENIAC¹. L'accès aux premiers centres de données était très restreint et ses domaines d'application se limitaient aux technologies spatiales, la défense ou autre département gouvernemental. Leur ouverture au grand public date d'une dizaine d'années et est attribuable à l'évolution rapide des TIC. Suite au changement de régime d'exploitation, le data center, anciennement géré et opéré par une seule personne, s'externalise, permettant ainsi la création de plus grands centres mutualisés sans besoin d'en posséder l'infrastructure (Kant, 2009).

Deux facteurs contribuent fortement aux succès des opérations des data centers : une énergie et un refroidissement infaillibles. Durant des dizaines d'années, la préoccupation majeure fut d'accéder à une énergie de qualité disponible et fiable (Pramod et Yogendra, 2012). Les centres de données conçus durant les années 60 et 70, faisaient face à des charges thermiques entre 200 et 750 W/m² et de l'air entre 13 et 17°C. La plupart étaient implantés dans les espaces de bureaux. La densité thermique moyenne étant basse, les climatiseurs, déjà présents pour le confort des employés, géraient également le surplus de chaleur des équipements informatiques. Cependant, la croissance des demandes IT couplée à la

Distribution of heat and temperatures within IT servers.

Component	For standard server		For high performance cluster (HPC)	
	Proportion of total heat	Temperature (°C)	Proportion of total heat	Temperature (°C)
Microprocessors	30%	85°C	63%	85°C
DC/DC conversion	10%	50°C	13%	115°C
I/O processor	3%	40°C	10%	100°C
AC/DC conversion	25%	55°C	Other components:	
Memory chips	11%	70°C	14%	40°C
Fans	9%	30°C		
Disk drives	6%	45°C		
Motherboard	3%	40°C		

Tableau 1 Températures à l'intérieur d'un serveur. Extrait de Davies *et al.*, 2016.

¹ E.N.I.A.C. est l'acronyme pour *Electronic Numerical Integrator and Computer*. Mis au point durant la Seconde Guerre mondiale, à l'université de Pennsylvanie États-Unis, il est considéré comme le premier ordinateur numérique électronique programmable.

tendance à la miniaturisation des équipements a accru les niveaux d'énergies et de refroidissement nécessaires aux data centers. La chaleur dégagée par l'équipement informatique (cf. Tableau 1 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) exige l'installation de refroidisseur et de centrales de traitement d'air. Seulement, le bruit généré par les ventilateurs rend impraticables ces espaces de travail. On assiste donc à la séparation entre les espaces de bureaux et les salles informatiques, qui deviendront ensuite les data centers. La tendance actuelle viserait à bâtir des méga-data centers aux capacités excédant les 40MW (Song *et al.*, 2015).

Usages actuels

Si les data centers existent, c'est pour traiter et stocker les données. La croissance exponentielle de ces dernières est la justification de l'augmentation du besoin en centres de données. En 2016, le trafic de données à l'échelle mondiale s'élevait à 1,2 Zettabytes ($1,2 \cdot 10^{12}$ Gigabytes) et devrait atteindre 3,3 ZB d'ici 2021 (CISCO, 2017). Le trafic internet mondial en 2021 serait 127 fois plus important qu'en 2005. Les raisons de cette expansion sont multiples et interconnectées. Un des facteurs principaux est l'augmentation de la vidéo. En 2021, chaque seconde, l'équivalent d'un million de minutes de vidéo devrait transiter sur le réseau. Le trafic vidéo augmentera de 82 % en 2021 par rapport à 2016, dont 13% seraient attribuables à la vidéo en direct. La surveillance vidéo par internet n'est pas en reste, puisqu'elle a fait un bond de 72 % entre 2015 et 2016, se plaçant devant les 50% de vidéo à la demande pour la télévision seule. Dans la perspective de 2021, ces deux dernières devraient croître respectivement de 26% et de 360 % (*Ibid.*). Ce sera la vidéo à la demande qui se taillera la part du lion, à l'exemple de Netflix présent dans 60 pays en 2015, et prévoyant de s'étendre à 130 autres destinations dès 2016 (Conseil Supérieur de l'Audiovisuel, 2016).

Sont aussi à prendre en compte dans le « tsunami » de données, tout le trafic des messageries, le transfert de fichiers "peer-to-peer" (ex: BitTorrent, eDonkey,) et enfin les jeux en ligne. Cette hiérarchie actuelle sera bouleversée d'ici 2021 où les jeux supplanteront le partage de fichiers (CISCO, 2017).

Le phénomène du déluge de données s'est également amplifié par l'amélioration constante des appareils connectés comme les tablettes, les téléphones portables et autres objets connectés. Sur 9 milliards d'appareils connectés mondialement, plus de la moitié sont liés à l'IoT (ADEME, 2017). La multiplication des points de connexion ainsi que le développement des réseaux ont participé à la propagation des habitudes de consultation et d'échange partout et à toute heure. Selon Cisco, ce trafic mobile devrait, pour sa part, augmenter de 67% sur la période 2016 à 2021 (CISCO, 2017). Ces dernières années, les réseaux sociaux ont explosé qu'ils soient pour le divertissement (ex. Facebook) ou à des fins professionnelles (ex. LinkedIn). L'usage intuitif

des applications et la façon dont ils rendent les contenus multimédias facilement partageables pèsent également dans la balance des données.

N'oublions pas, par contre, les services que peuvent rendre les data centers et les réseaux en conservant les dossiers médicaux et examens radiologiques ou en nous permettant d'effectuer nos achats ou nos réservations de vacances en ligne. Les centres de recherches ou bibliothèques peuvent mutualiser leurs données, effectuer des échanges plus rapidement sans devoir opérer parfois de longs déplacements. Cependant, la dématérialisation met le monde à portée de main de beaucoup de personnes sans que l'on en réalise forcément les impacts en arrière-plan.

Définition

Les data centers (en français : centres de données) sont la colonne vertébrale de l'IT (Brady *et al.*, 2013). En effet, de par leur large gamme de service, nous les retrouvons dans tous les secteurs de l'économie: l'hébergement internet, les emails, les réseaux sociaux, les services de traitement de données, le commerce en ligne (du site internet au suivi des colis), les transactions bancaires, les assurances, les hôpitaux (suivi de dossiers médicaux), les universités, les gouvernements ... tous reposent sur le bon fonctionnement des centres de données (Blackburn, 2010 ; Daim *et al.*, 2009 ; Horner, N. et Azevedo, 2016 ; Jones *et al.*, 2013 ; Kant, 2009).

Avant de donner une définition exacte des data centers, il semble opportun de les situer brièvement dans le secteur d'activité auquel ils appartiennent. Les Technologies de l'Information et de la Communication sont l'usage d'équipement de télécommunication, d'appareil électronique informatique et de logiciels afin de convertir, conserver, protéger, traiter, transmettre et récupérer des informations numérisées (European Commission DG INFSO, 2008). Selon le rapport pour la Commission Européenne, le secteur de TIC est divisé en trois niveaux : technologies, équipements et services. Les data centers font partie des équipements en tant qu'infrastructure TIC puisqu'ils combinent les aspects matériels et logiciels créant ainsi un système fonctionnel.

Il n'y a pas de consensus sur une définition précise concernant les data centers, par ailleurs celle-ci aurait évolué ces 25 dernières années (Jones *et al.*, 2013). Cependant les différents auteurs rencontrés dans la littérature montrent une certaine constance. Les définitions recueillies, décrivent le plus couramment un data center par sa fonction principale comme « *un site hébergeant des équipements IT ayant pour but de stocker, traiter et partager des données* » (Brady *et al.*, 2013) et de « *bâtiment technique qui est utilisé afin d'héberger les systèmes informatiques et ses composants associés (comme les systèmes de télécommunication et de stockage)* » (Sharma, M. *et al.*, 2015). Wang et Khan (2013) utilisent un champ sémantique similaire, mais ajoutent que les data centers sont une « *infrastructure de l'IT moderne* ». Leur

rôle essentiel pour les entreprises, ainsi que leur structure complexe sont également mis en avant par Newcombe (2008) et Santana (2014). Si les différentes définitions s'orientent dans la même direction, aucune ne précise la taille de l'espace concerné. En effet, ceux-ci peuvent être de tailles variables d'une simple armoire à une salle de quelques mètres carrés, de plusieurs étages d'un bâtiment à un bâtiment entier de plus de 40 000 m² (Jones *et al.*, 2013 ; Syntec Numérique, 2011 ; Yogendra et Pramod, 2012). Un des data centers les plus imposants avec un peu plus de 10 hectares (1,1 million de pieds carrés) de surface est celui de *350 EAST CERMAK* à Chicago (Data Center Knowledge, 2014) . Mais comme le précisent Yuventi et Mehdizahed (2013), on utilise conventionnellement le terme de data center pour qualifier un bâtiment entier dont le rôle principal est d'héberger les serveurs et dispositifs informatiques en service.

Typologie

Les data centers se déclinent dans une large gamme de taille et de fonction, ce qui rend difficile leur classification. La répartition actuelle ne se fait plus en termes de taille mais plutôt entre data center interne et fournisseur de service. Les premiers sont des installations destinées aux activités internes (emails, logiciel de productivité) et associées à des institutions non liées à la fourniture de service IT (finance, éducation ...). À l'inverse, la deuxième catégorie, regroupe les data centers appartenant à une entreprise dont le produit essentiel est la vente de services de communication (ex. Google, Facebook, Amazon) (Shehabi *et al.*, 2016).

Une autre division entre centres de données est également soulevée : ceux possédés et gérés par une entreprise versus ceux en colocation (Newcombe, 2008). Le premier groupe convient aux organisations dont les demandes en espace et en énergies sont conséquentes, rendant ainsi rentable la possession et la gestion de ce type d'établissement. Tandis que l'avantage de data centers en colocation ressort lorsque le coût initial de la construction d'un centre doit être minimisé. Audrey Chopiton émet la même différenciation entre les data centers d'entreprises importantes qui ne sont exploités que par l'entreprise qui en est propriétaire, et les data centers hébergeurs, proposant des services de location aux entreprises et particuliers souhaitant externaliser leurs données. L'externalisation des données a l'avantage de permettre aux entreprises de se concentrer uniquement sur leur activité principale tout en restant compétitives. L'auteure va plus loin dans la catégorisation en divisant les hébergeurs en fonction de leur offre : location de service (le client loue une surface nue et y place ses installations), la colocation (le client loue un emplacement libre dans une baie de stockage et y insère ses équipements), la prestation totale (location de plusieurs baies où le client installe ses données et applications) et enfin le data center privatif (une salle est entièrement allouée à l'usage exclusif du client) (Chopiton, 2015).

Cependant Horner et Azevedo (2016) remarquent que les répartitions entre data centers combinent plusieurs caractéristiques : tantôt les critères de la taille, tantôt la criticité des services ou le type de service. Dès lors, les auteurs distinguent six catégories de centre de données. Premièrement, les armoires à serveurs, allouées aux petites entreprises, gérées, soit par du personnel du département IT, soit par une personne non spécialisée. Deuxièmement, les salles de serveurs, sorte de petits data centers pour les petites entreprises ou des groupes appartenant à une plus grosse structure, dont la gestion dépend de l'équipe IT centrale ou de leur propre division de l'entreprise. Ensuite, les centres de données localisés fournissant des applications essentielles à l'entreprise. Ces derniers possèdent un système de redondance pour l'énergie et le refroidissement, un temps d'arrêt (de l'ordre de l'heure) n'est pas catastrophique. Inversement dans les data centers intermédiaires, un temps d'arrêt de quelques minutes aura un impact important sur l'entreprise, puisque, dans ce cas-ci, l'infrastructure, opéré par le département IT central, héberge les applications des entreprises pour les ressources humaines (emails, dossiers, données internes...). Quant aux data centers d'entreprises, occupant une grande surface, ils sont utilisés par des sociétés non impliquées dans les TIC (banques, assurances, ...) afin de subvenir aux besoins de leurs activités principales. Afin d'éviter les temps d'arrêt catastrophiques pour les affaires, l'infrastructure mise en place est fort redondante. Enfin, les data centers hyperscale (ou *warehouse-scale computer*) sont de très larges volumes généralement construits par des compagnies spécialisées dans les TIC et dont les activités tournent autour des données (ex Google, Amazon, Facebook ...)

En ce qui concerne la suite de ce mémoire, le terme data center ne visera pas un centre appartenant à une catégorie ou taille particulière mais sous-entend l'idée générale d'une salle assez importante ou d'un bâtiment entier dédié à l'hébergement des services informatiques. De plus, nous ne ferons pas de différence entre les différentes offres d'hébergement.

Infrastructure des data centers

On peut décrire l'intérieur type d'une salle informatique comme un grand plateau avec un faux plancher (plenum) et des chemins de câbles au plafond. Le plenum permet le passage de l'air conditionné et des câbles pour les alimentations électriques. Quant aux chemins de câbles, ils sont dédiés aux fibres optiques assurant la liaison entre les baies (rack en anglais) ou vers l'extérieur (Internet). Sur le plateau des baies remplies de serveurs sont placées ; elles sont organisées par allées. Une baie informatique est une armoire métallique standard dans laquelle sont insérés horizontalement les modules TIC (Ebrahimi *et al.*, 2014). Chaque baie contient des parties modulaires, telles que des serveurs, commutateur, dispositif de refroidissement (Ebrahimi *et al.*, 2014 ; Kant, 2009). Elles ont l'avantage d'optimiser l'espace en mutualisant les systèmes d'alimentation et de refroidissement entre les équipements. Leur disposition en rangées permet également l'accès du personnel aux baies, routeurs, commutateurs. (Boucheix *et al.*, 2011 ; Brady *et al.*, 2013 ; Jones *et al.*, 2013 ; Sharma, M. *et al.*, 2015).

Globalement, l'infrastructure des data centers est divisée selon trois parties interdépendantes : infrastructure liée à l'énergie, l'IT et le refroidissement (cf. Figure 1) (Callou, 2013 ; Callou *et al.*, 2014 ; Marwah *et al.*, 2010). Dans la section suivante, les différentes divisions sont brièvement décrites, afin de mieux visualiser les composants d'un data center et d'en comprendre les tenants. En plus de ces trois infrastructures, les installations disposent également de dispositifs incendies, de systèmes de sécurité physique (restriction d'accès et surveillance), de systèmes de contrôle de l'environnement (humidité, température, qualité de l'air) (Arregoces et Portolani, 2004 ; Jones *et al.*, 2013).

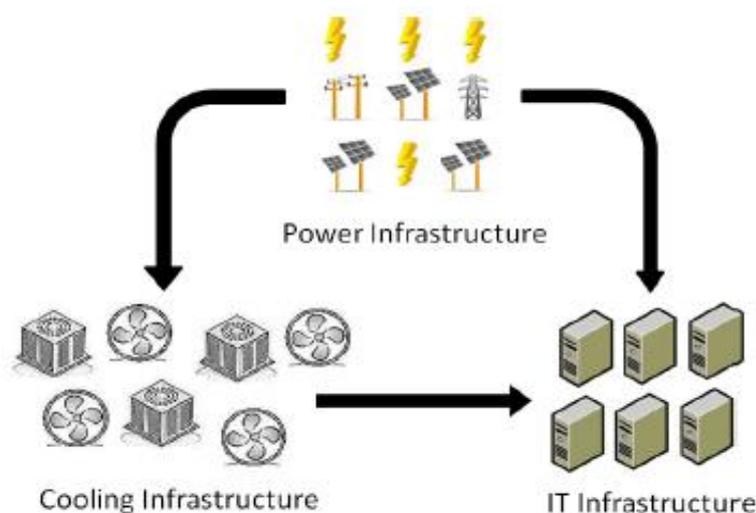


Figure 1 Infrastructure globale des centres de données. Extrait de Callou *et al.*, 2014.

Infrastructure IT

Cette infrastructure englobe trois composants principaux : les appareils de réseau et de communication (routeur, commutateur), le dispositif de stockage et le traitement de données (les serveurs) (Callou *et al.*, 2014 ; Marwah *et al.*, 2010 ; Shehabi *et al.*, 2016). Pour des gains de fonctionnalité et de place, les serveurs sont mis dans un châssis qui s'insère ensuite dans un rack (Kant, 2009).

Infrastructure énergétique

La disponibilité électrique est une caractéristique fondamentale du data center. En effet ce dernier nécessite un apport constant en énergie de qualité suffisante (pas de coupure, surtension ou baisse) (Callou *et al.*, 2014 ; Marwah *et al.*, 2010 ; Syntec Numérique, 2011). À ce titre, le système UPS (onduleur) est important, car il constitue une première barrière contre les perturbations énergétiques (Sharma, M. *et al.*, 2015).

L'infrastructure énergétique du centre de données conditionne l'énergie reçue en vue de rencontrer le voltage et la fréquence corrects, afin d'approvisionner l'équipement IT contenu dans les baies (Marwah *et al.*, 2010). Comme simplifié sur le schéma ci-dessous (Figure 2 Figure 1), le courant subira de nombreuses manipulations et distribution avant d'atteindre l'équipement IT. L'énergie du fournisseur est acheminée via un transformateur d'entrée, chargé de convertir le courant en basse tension. Puis, une centrale de distribution (Power Distribution Unit - PDU) dirige l'électricité à travers différents postes, tels que l'alimentation générale du bâtiment, les refroidisseurs (CRAC), etc Pour des exigences techniques, le courant est soumis à plusieurs transformations entre courant alternatif et courant continu.

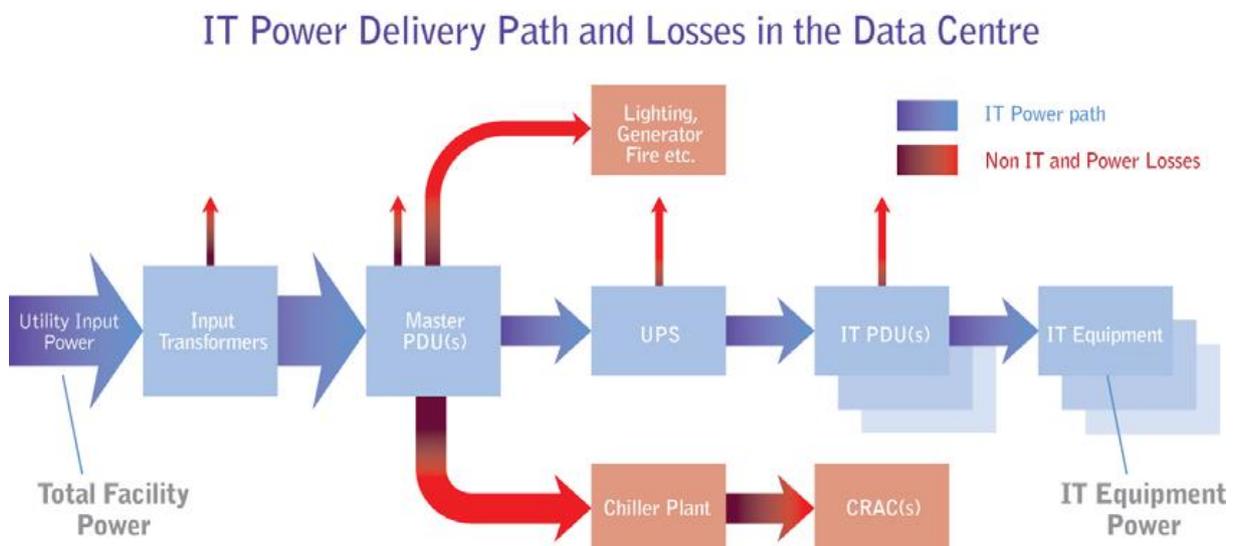


Figure 2 Distribution de l'énergie dans le data center. Extrait de Newcombe, 2008.

À chaque étape de la distribution sont liées des pertes d'énergie. Le rapport français TIC et le développement durable, explique: « *D'après IBM, seule 45% de l'électricité d'un centre de données alimente les baies de serveurs, et dans cette part, seulement 30% alimente le processeur (le reste étant lié aux alimentations internes, à la ventilation, à l'entraînement des disques...)* » (Breuil *et al.*, 2008, p. 68). Un serveur standard consomme entre 300-400W. La majorité d'entre eux opèrent sous 20 % de leur capacité maximale et rarement à 100% (Brady *et al.*, 2013 ; Ebrahimi *et al.*, 2014).

La majorité de cette énergie est transformée en chaleur, ce qui requiert l'utilisation d'un système de refroidissement. Cependant, ce dernier constitue une charge supplémentaire pour le data center (Newcombe, 2008).

Infrastructure de refroidissement

La dissipation de la chaleur est un facteur crucial pour la fiabilité et la disponibilité des équipements informatiques. Le système de refroidissement doit être capable de contrôler parfaitement plusieurs paramètres : température de l'air, humidité, concentration de la pollution (Capozzoli et Primiceri, 2015). Si le niveau d'hygrométrie est trop faible, cela peut engendrer de l'électricité statique et inversement, un niveau trop élevé peut provoquer des courts-circuits. Il existe plusieurs configurations de distribution de l'air, chacune présentant des avantages et des inconvénients. Conventionnellement, les baies sont disposées de manière à créer des ailes chaudes et froides (cf. Figure 3). Généralement, le soufflage s'effectue par un plenum. Le flux d'air frais passe au travers des équipements IT, refroidissant au plus près les appareils électroniques. Par l'arrière des baies ressort de l'air chaud qui sera ensuite capté par les unités de traitement d'air (AHU). Ces unités sont traversées par de l'eau glacée, provenant d'un système de pompage et circulation. Le système de circulation pousse l'eau glacée dans les AHU et la ramène chaude au système de production d'eau glacée (Li *et al.*, 2016 ; Marwah *et al.*, 2010 ; Song *et al.*, 2015).

Ceci étant, le refroidissement des centres de données peut se montrer gourmand en énergie. Sa consommation est estimée à 40% (Capozzoli et Primiceri, 2015) ou entre 10-50% (Marwah *et al.*, 2010). La variabilité de cette consommation dépend de la localisation, de l'ancienneté du data center et de la conception du système de refroidissement. Cette forte consommation d'énergie est également en partie causée par des températures de refroidissement déterminées plus basses que nécessaire (Li *et al.*, 2016). Finalement, ces données sont propres et spécifiques à un data center. À titre d'illustration, voici un extrait d'une enquête de référence réalisée par le Lawrence Berkeley National Laboratory sur

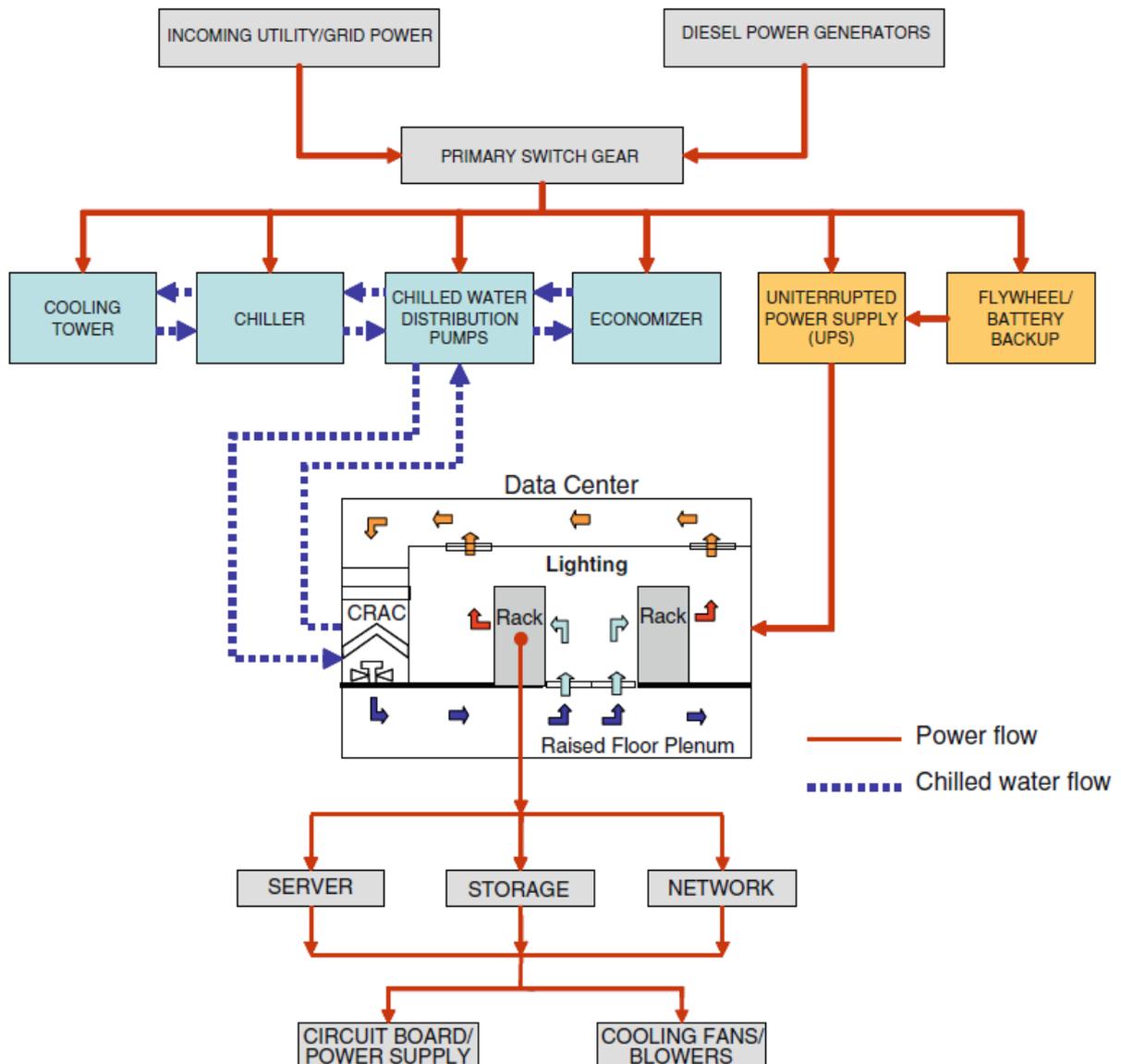


Figure 3 Flux d'énergie et d'eau dans un centre de donnée typique. Extrait de Pramod et Yogendra, 2012.

une vingtaine de centres (cf. Tableau 2). Les data centers 18 et 19 sont respectivement les ailes ouest et est d'une entité commune, située à Los Angeles. Malgré leurs caractéristiques semblables, la répartition des besoins est différente (Xu et Greenberg, 2007). Une autre étude basée sur 10 data centers sélectionnés aléatoirement arrive à la même conclusion. La Figure 4 montre la distribution énergétique en fonctions des différents postes. On peut constater que la part du refroidissement varie

Energie dédiée	N°18	N°19
Rack	59%	67%
Refroidissement	33%	26%
Éclairage	3%	1%
Perte UPS	4%	4%
Autres pertes	1%	1%

Tableau 2 Répartition de la consommation énergétique des data centers n°18 et n°19. Adapté de Xu et Greenberg, 2007.

entre 30% et 55% selon les centres (Song *et al.*, 2015). Les data centers peuvent être différents les uns des autres. Aussi, avant de faire des comparaisons hâtives, il est nécessaire de tenir compte des éléments les caractérisant.

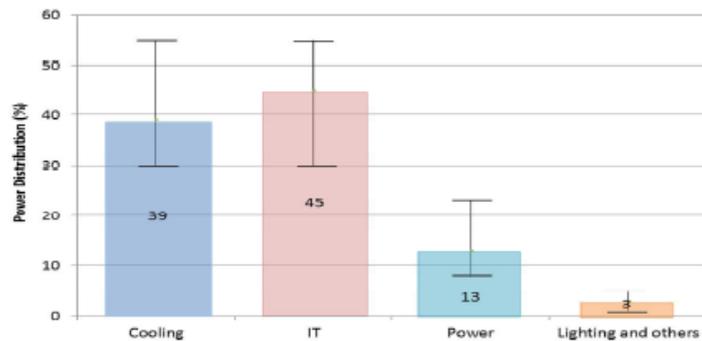


Figure 4 Distribution et variation de la consommation d'énergie dans les data centers. Extrait de Song *et al.*, 2015.

On constate une tendance actuelle visant l'amélioration de l'efficacité du système de refroidissement, notamment via l'arrivée de nouvelles technologies en cours de test (ex. fully immersed direct liquid-cooled, micro-channel single-phase flow, micro-channel two phase flow (Li *et al.*, 2016)), mais aussi par la mise en place de bonnes pratiques qui seront décrites plus loin.

Redondance

Une panne technique entraîne l'indisponibilité temporaire des données informatiques. Ces pannes sont dues à des surchauffes ou des coupures de courant (Boucheix *et al.*, 2011 ; Capozzoli et Primiceri, 2015). Une distribution optimale de l'air permet d'utiliser pleinement les performances du système de refroidissement et ainsi, d'éviter les interruptions (Boucheix *et al.*, 2011). L'humidité, ainsi que la pollution de l'air, peuvent être également des causes d'une dysfonction.

Or, si les opérations du data center s'arrêtent, cela engendre des problèmes pour les clients, tels que la perte de données sur une application en cours, un site internet non disponible, une opportunité de vente manquée (Yogendra et Pramod, 2012). La presse se fait régulièrement l'écho de problèmes de rupture de divers services suite à l'arrêt des data centers. Un exemple proche : le service population de la commune de Schaerbeek a été rendu inaccessible durant une matinée (Durant, 2017). Certes, cela a provoqué des désagréments de courte durée, mais à une échelle locale. Plus impactant la panne d'Amazon en février 2017, avait perturbé son service de vente en ligne, mais également des structures reposant sur le géant AWS, tel que Netflix, Adobe, Giphy, ainsi que Tinder, Airbnb, Reddit , Expedia, Coursera, Quora, Slack ou Business Insider. (Laurent, 2017 ; Moss et Smolaks, 2017 ; Smolaks, 2015). Ainsi le temps d'interruption impacte la production, mais également le profit d'une compagnie. Il est donc impératif pour les data centers d'être opérationnels sans temps d'arrêt (Callou, 2013). Pour pallier toute éventualité, les opérateurs dédoublent leur accès énergétique, mais aussi le système

de refroidissement. Cette évolution vers plus de redondance entraîne l'achat d'équipements additionnels, gonflant la consommation électrique et les investissements financiers (Syntec Numérique, 2011). Indirectement, la redondance peut être considérée comme ayant une incidence négative sur l'environnement, puisque les impacts environnementaux sont, eux aussi, dédoublés. De plus, les générateurs de secours fonctionnent généralement au diesel que ce soit pour la production électrique ou le refroidissement (Oró *et al.*, 2015).

L'Uptime Institut a mis en place un système de classification « Tiers » portant sur le niveau de disponibilité et sécurité des data centers. Cette nomenclature allie les niveaux de redondance pour l'électricité et la climatisation avec la somme des durées de coupures annuelles. Au plus ce temps est faible, plus haut sera le niveau de classification. L'Uptime Institut se reverse le droit d'être le seul organisme apte à certifier un data center selon ce système.

Niveau Tier	Niveau de redondance	Durée annuelle moyenne d'indisponibilité	Taux de disponibilité
I	Aucune redondance. N	28,8 heures	99,67%
II	Redondance partielle. Seuls certains composants sont redondants. N+1	22 heures	99,75%
III	Redondance N+1 Redondance permettant d'être maintenable sans coupure.	1,6 heures (96 min)	99,98%
IV	Redondance 2N+1 Redondance complète (circuits électriques, refroidissement, réseau). Tolérance à la panne	0,8 heures (24min)	99,99%

Tableau 3 Classification Tiers. Adapté de Turner *et al.*, 2006.

Impacts des centres de données

Après cette revue de l'organisation structurelle d'un centre de données, il paraît évident que certaines fonctions critiques soient génératrices d'impacts. Ces derniers peuvent être divisés en trois catégories intrinsèquement liées : énergie, climat et environnement.

Impacts énergétiques

Premièrement, les data centers sont très énergivores. Le tableau ci-dessous (cf. Tableau 4) recoupe diverses sources s'étant prêtées au jeu des estimations sur différents territoires. Ces chiffres sont des estimations, car ni le nombre de data centers, ni leurs consommations ne sont

Échelle	Consommation estimée (% de la consommation en électricité à l'échelle)	Date	Auteurs
Mondiale	71 TWh	2000	(Kooimey, 2011)
	152 TWh	2005	
	397,6 TWh (projection) 1,1 à 1,5 % (mondiale)	2010	
	180 TWh	2007	(Malmodin <i>et al.</i> , 2010)
	270 TWh (projection)	2012	(Van Heddeghem <i>et al.</i> , 2014)
USA	61 TWh Dont 6 TWh uniquement pour l'état fédéral 1,5% (USA)	2006	(Brown, 2008)
	28 TWh	2000	(Kooimey, 2011)
	56 TWh	2005	
	135,1 TWh (projection) 3,48% (USA)	2010	
	70 TWh 1.8 % (U.S.A).	2014	(Shehabi <i>et al.</i> , 2016)
73 TWh (projection)	2020		
Europe (EU 25)	29,1 TWh	2005	(European Commission, s.d.)
	34 TWh	2007	
Allemagne	8,67 TWh	2006	(Fichter, 2009)
	10,1 TWh	2008	(Fichter, 2008)
	14,86 TWh (estimation)	2013	
France	4 TWh	2008	(Breuil <i>et al.</i> , 2008)

Tableau 4 Consommations électriques des centres de données

répertoriés dans une quelconque base de données. Les projections effectuées se basent sur des extrapolations réalisées sur un scénario « *business-as-usual* ». Ce dernier perpétue la tendance actuelle pour plus d'efficacité énergétique dans les centres, mais n'inclut pas de prise de mesures supplémentaires. En comparant la projection pour 2010 aux États-Unis et les estimations de 2014, on peut constater que ce modèle a surestimé la consommation des data centers. De même, la projection mondiale de Koomey pour 2010 est supérieure à celle de 2012, ce qui paraît assez contradictoire. Remarquons au passage qu'aucune donnée n'a été trouvée pour les autres continents. Si le tableau montre la consommation des centres de données, il ne faut pas oublier de remonter jusqu'à la source de la production électrique. Par exemple, pour 70 TWh au seuil des centres américains, selon nos hypothèses, ce sont 225,83 TWh qui doivent entrer en amont de la chaîne énergétique, soit 27,7 millions de tonnes de charbon brut (pour plus de détails se référer à l'annexe 1).

Avec la propagation des data centers, il faut non seulement être capable d'assumer la production au cours de l'année, mais aussi lors des heures d'utilisation intense. En 2006 aux États-Unis, ce pic avoisinait les 7GW « *soit l'équivalent de la production de 15 centrales de base* » (Brown, 2008). Avec la persistance de la tendance actuelle, les projections estimaient que les 12 GW seraient atteints en 2011, soit 25 centrales (*Ibid.*).

Par ailleurs, il semblerait que le secteur soit lui-même conscient de ces défis énergétiques auxquels il se heurte. Cela s'aperçoit notamment au fait de l'émergence de consortiums et d'initiatives dédiées à l'amélioration de l'efficacité énergétique ainsi que par la création d'indicateurs propres aux data centers. Les décideurs politiques ont également identifié le secteur IT et spécifiquement l'utilisation d'énergie par les centres de données comme une branche ayant une expansion rapide ces dernières années (Newcombe, 2008).

Impacts climatiques

Qui dit service énergétique, dit également ressources. En fonction de leur localisation et de leur politique interne, les centres ont recours à un mix plus ou moins vert. Depuis plusieurs années au travers de leurs rapports « *How dirty is your data* » « *How clean is your cloud* » et « *Clicking clean* », Greenpeace pointe particulièrement le choix de ressource énergétique polluante, fait par le secteur (Cook, G et Pomerantz, 2015 ; Cook, Gary, 2012 ; Cook, Gary *et al.*, 2017 ; Greenpeace International, 2011).

À l'issue de l'Accord de Paris, les pays ont convenu de maintenir l'augmentation de la température mondiale en dessous de 2°C. Dans ce contexte de multiplication des actions de lutte contre le changement climatique, chaque geste compte. Plus largement, les TIC pourraient réduire les émissions de CO₂ de 9,1 Gt d'ici 2020, ce qui permettrait au terme de 2030, dans le

meilleur des cas, de revenir au même niveau d'émission qu'en 2015 (Global e-Sustainability Initiative, 2012, 2015). Or, l'empreinte carbone des TIC serait équivalente à celle de l'aviation civile sur une année (ADEME, 2012). « *Aujourd'hui ce chiffre est malheureusement déjà dépassé, en raison de l'augmentation du trafic aérien autant que celui des TIC. Pour l'aviation, on est plutôt autour de 2,5, voire 3 %, des émissions de GES planétaires, et d'après certaines études les TIC consommeraient 50 % d'énergie en plus que ce secteur* » (Flipo, 2014, p. 4). Dès lors que les gains d'efficacité énergétique des TIC ne parviennent pas à compenser leur expansion, la réduction des émissions des gaz à effet de serre (GES) des TIC devient un enjeu, que ce soit en phase de conception, de mise en œuvre ou de déploiement de ces technologies.

Dans le guide méthodologique pour un bilan de gaz à effet de serre, l'ADEME répertorie les différentes sources d'impact appliqué au cas des centres de données (ADEME, 2012). Ce bilan GES permet de discerner les principaux postes d'émission et d'inciter une démarche d'amélioration vers la réduction de l'empreinte carbone. On y remarquera en premier lieu les émissions directes provenant des sources fixes de combustion, dans le cas présent les groupes électrogènes de secours nécessitant des tests de fonctionnement réguliers et générant des émissions lors de la combustion du fioul (~25l/an/baie). En ce qui concerne les émissions indirectes, est incluse la flotte de véhicules utilisée pour les déplacements professionnels ainsi que pour les trajets du personnel et du transports de matériel IT dans l'entreprise même.

S'y ajoutent les émissions directes fugitives des fuites de gaz ou de liquides frigorigènes présents dans certains systèmes de refroidissements. D'autres émissions indirectes sont liées à la consommation d'électricité : par les infrastructures techniques (serveurs, stockage) et de refroidissement. Une autre catégorie, achats de services et de produits, recouvre les interventions humaines locales utilisant le réseau et la téléphonie, ainsi que les interventions associées à la maintenance et à l'assistance des systèmes, sans oublier les services de sécurités. Les biens immobilisés, ainsi que les biens et services loués engendrent, eux aussi, des GES lors de leur fabrication et de leur transport. À noter que la plupart des matériaux informatiques proviennent d'Asie, où le « *kWh est près de 10 fois plus carboné qu'en France* ». La catégorie traitement des déchets (DEEE) n'est pas oubliée et intègre la durée de vie des équipements. Cette liste se clôture par l'ensemble des utilisations des produits et applications vendues les qui consomment aussi de l'énergie. Il est difficile de donner un ordre de grandeur à ces différents postes étant donné que la conception de chaque data center est différente. Il n'y a aucune généralisation possible quant aux valeurs, puisque la simple configuration matérielle varie entre fabricants.

La mise en route d'un plan d'action ambitieux ne peut que présenter des avantages, comme le montre le tableau ci-dessous (cf. Tableau 5) basé sur des projections de consommations électriques des serveurs et des centres de données américains pour la période 2007 à 2011 selon quatre scénarios (Brown, 2008). L'orientation actuelle, visant une certaine efficacité énergétique, se découple des tendances historiques réduisant de 10% les rejets envisagés .

Scenario	2007	2008	2009	2010	2011	2007-2011 Total	% of historical trends scenario	% of current efficiency trends scenario
Historical trends	44.4	51.2	59.2	69.2	78.7	302.8	100%	111%
Current efficiency trends	42.8	47.9	53.6	60.5	67.9	272.8	90%	100%
Improved operation	34.8	39.0	43.5	48.4	53.1	219.0	72%	80%
Best practice	30.2	30.0	29.8	29.7	30.1	149.8	49%	55%
State-of-the-art	28.1	25.7	23.5	21.4	21.2	119.9	40%	44%

Tableau 5 Emissions de CO2 associées à la consommation électrique des serveurs et centre de données aux USA, en MtCO2/an. Extrait de Brown, 2008.

Impacts environnementaux

Enfin la propagation des data centers peut être couplée à un stress environnemental que ce soit sur le plan de l'eau ou de l'utilisation de ressources (métaux, terres rares ...).

Par exemple, Ristic et ses co-auteurs soulignent l'importance de ce sujet en estimant que 1 MW d'un data center peut consommer jusqu'à 68 m³ d'eau (Ristic *et al.*, 2015).

Du reste, l'industrie électronique est connue pour être une grande consommatrice d'eau, d'énergie, de matériaux et métaux par unité de production. Le tableau 6 reprend des éléments courant dans la composition des équipements TIC. La criticité des métaux se base sur deux arguments : les risques concernant les réserves et la production (Bihouix et Guillebon, 2010). Le premier comprend des réserves insuffisantes pour faire face à la demande actuelle. Le seuil théorique est fixé à moins de 40 ans de réserves. C'est le cas de l'argent, du cuivre et de l'indium. Tandis que le deuxième indice met en avant une production localement concentrée à certaines zones, ce qui les expose à des risques géopolitiques. Ce critère est considéré comme critique à partir du moment où 3 pays contrôlent à eux seuls 70% de la production ; c'est le cas des terres rares, du tantale, de l'indium, du lithium.

	Argent	Cuivre	Indium	Gallium	Germanium	Lithium	Tantale	Terres rare
Utilisation	Contacts	Câbles	Écrans	LED	WIFI	Batterie	LCD, condensateurs	LCD, aimants
Part de la production mondiale dédiée au TIC	21%	42%	>50%	40%	15%	20%	65%	20%
Criticité	Risque élevé	Risque potentiel, notamment à moyen terme	Risque élevé	Risque élevé	Non précisé	Risque potentiel, notamment à moyen terme	Risque élevé	Risque potentiel, notamment à moyen terme
Recyclage	>50%	>50%	<1%	<1%	<1%	<1%	<1%	<1%

Tableau 6 Métaux présents dans les data centers. Adapté de Bihoux et Guillebon, 2010 ; Iliance Green IT et al., 2016.

À titre d'exemple, on notera le tantale, dont les deux tiers de la production sont dédiés aux nouvelles technologies. Bien que les réserves ne posent pas de problèmes à court terme (il en resterait pour une centaine d'années), il fait partie des petits métaux dont les réserves deviendront tôt ou tard critiques du fait de l'augmentation de leur utilisation (Bihoux et Guillebon, 2010). Tout n'est pas joué pour autant à l'image du cuivre. Cet élément est fortement présent dans les TIC, mais se recycle bien et correspond à des applications de longue durée de vie. Puis, dans le cas de l'électronique, la tendance est à son remplacement par la fibre optique (Mining, Minerals, and Sustainable Development Project, 2002).

Les problématiques liées à l'utilisation de ces ressources ne sont pas abordées plus en profondeur dans le cadre de ce travail en raison de la difficulté d'améliorer directement ce paramètre au sein des data centers. Toutefois, des actions peuvent être menées comme l'achat responsable d'équipements, le recyclage, la substitution et la réduction des besoins en ressource.

Consortium et programmes liés au centre de données

Des initiatives ont fleuri un peu partout afin de se pencher sur la problématique des data centers. Certaines sont de portée internationale comme le Green Grid, d'autres d'origine plus locale comme le programme Energy Star se sont développées afin d'atteindre un public plus éloigné. Enfin certains programmes ont des objectifs plus régionaux.

Le *Green Grid* rassemble à travers le monde des compagnies, agences gouvernementales et institutions académiques souhaitant se pencher sur la question de l'efficacité énergétique des data centers. Bien que certains membres du consortium soient associés à des vendeurs IT, ce ne sont pas les produits qui sont mis en avant mais bien des solutions sous la forme de bonnes pratiques, technologies ou indicateurs. Le consortium s'est notamment fait remarquer pour sa production d'indicateurs utiles au secteur dont certains vont être abordés ci-dessous.

Lancé en 2007 par Google et Intel, le *Climate Saver Computing Initiative* avait pour objectif de diminuer les émissions de GES des ordinateurs et serveurs en promouvant leur efficacité énergétique. Dans ce cadre, deux approches sont mobilisées : une optant pour plus d'efficacité énergétique dans les produits et l'autre visant l'éducation les acheteurs d'IT (Climate Savers Computing sm, s.d.). Aujourd'hui l'initiative a été intégrée au Green Grid.

Au niveau des États-Unis, l'Environmental Protection Agency (EPA) a lancé le programme *Energy Star* avec pour objectif l'amélioration de l'efficacité énergétique dans divers domaines (ampoule, électroménager, bureautique, audiovisuel). Par la suite l'initiative s'intéresse aux serveurs puis aux équipements IT et à l'utilisation d'énergie dans les data centers (Howard et Henretig, 2012 ; Schmidt *et al.*, 2007) . Depuis sa création, le label s'est exporté en Europe au travers d'un partenariat entre l'EPA et la Commission Européenne.

Le certificat *LEED (Leadership in Energy and Environmental Design)* est un système de classement établi par le Conseil du Bâtiment Durable des USA. Cet organisme sans but lucratif promeut la durabilité dans la construction et l'opérationnalisation des bâtiments. L'accès volontaire au système de certification opère sur base de critères stricts, qu'il a adapté au cadre des centres de données. L'accumulation de points axés sur des thèmes précis (choix de l'emplacement, usage efficace de l'eau, énergie et atmosphère, matériaux et ressources, qualité de l'environnement interne, design innovant) donne accès à un certificat différent. Le plus haut niveau atteignable est le statut Platinum (>80 points), puis dans l'ordre décroissant l'Or (60-79 points), Argent (50-59 points) ou le simple statut de LEED certified (40-49 points) (Daim *et al.*, 2009 ; Samarasekera, 2017). Dans l'enquête exploratoire, 23 entreprises ont reçu le certificat LEED pour un ou pour plusieurs de leurs centres.

L'Europe n'est pas en reste puisque la Commission Européenne a lancé en 2008 un « *Code de conduite européen pour l'efficacité énergétique des centres de données* » (EU CoC DC) (Newcombe *et al.*, 2012) dont l'objectif est de réduire la consommation énergétique des centres de données européens, limitant ainsi leur impact sur le changement climatique tout en effectuant des économies (European Commission et Joint Research Center, 2016). Comme son nom l'indique, ce guide liste une série de bonnes pratiques à respecter pour les parties prenantes désireuses de rejoindre l'initiative, ainsi que d'autres non imposées. Si un participant ne peut mettre en place une des pratiques minimales attendues, il doit le justifier lors du rapport. La participation est donc sur base volontaire. Actuellement, 130 participants sont répertoriés pour un total de 310 data centers répartis à travers toute l'Europe. Cette liste mentionne de grandes sociétés du secteurs (Equinix, Verizon...) mais aussi d'autres intervenants tels que des banques (Banque de France, Crédit Agricole), des opérateurs de télécommunication (Bouygues Telecom, Portugal Telecom...), des universités (University of Sheffield, Wirtschaftsuniversität Wien...), des bureaux gouvernementaux (Gobierno de Cantabria) mais aussi Facebook Ireland LTD., Google Data Centers, UK Meteorological Office, Unilever, Thomsons Reuters...(European Energy Efficiency Platform (E3P), 2017). Selon le baromètre 2015 des pratiques de green IT des entreprises françaises (Botella *et al.*, 2015), le niveau de maturité des acteurs du marché français reste relativement faible en matière l'efficience énergétique de leur data center étant donné que moins d'un quart de répondants mettent en place les bonnes pratiques proposées dans le Code. Dans l'enquête exploratoire, seules 16 compagnies sur les 30 ayant des implantations européennes adhèrent au Code de Conduite.

La version 2017 du Code ne laisse rien au hasard puisqu'elle comprend différentes sections, dont la gestion et l'utilisation du centre de données, les équipements et services IT, le refroidissement, l'infrastructure énergétique, le bâtiment et enfin le suivi des mesures énergétiques et environnementales.

De plus, les organismes de normalisations européens, CEN/CENELEC/ETSI se rassemblent dans un groupe de coordination dédié aux « Green Data Centers » afin d'accorder les activités et normes européennes. À la suite de leurs travaux, le groupe a publié un recueil de recommandations de bonnes pratiques ainsi qu'une liste des différentes normes affectant les data centers (CEN/CENELEC/ETSI Coordination Group on Green Data Centres, 2015, 2016).

Indicateurs

Par ailleurs, les propriétaires de data centers, conscients de leur consommation, tentent de rendre leurs biens moins énergivores (Carr, 2015). Cependant, la maîtrise de leur consommation énergétique passe par la création d'indicateurs. En effet, les sociétés ont recours à ces derniers, afin de mesurer l'efficacité de leurs initiatives de sauvegarde d'énergie (Daim *et al.*, 2009).

Il existe un large éventail d'indicateurs ayant pour but d'évaluer et de communiquer sur l'efficacité énergétique des data centers (Yuventi et Mehdizadeh, 2013). Il faut espérer que l'emploi des indicateurs incitera des comportements de diminution de consommation d'énergie. Nous nous concentrons ici sur le PUE (Power Usage Effectiveness) puisqu'il est l'indicateur phare des opérateurs (*Ibid.*). En outre, les indicateurs d'efficacité énergétique ne sont plus seuls dans les data centers, on constate notamment l'apparition d'un indicateur concernant le carbone (Carbon Usage Effectiveness -CUE) (Belady, D., 2010), mais également l'eau (Water Usage Effectiveness -WUE) (Azevedo *et al.*, 2011). Toutefois, ces indicateurs semblent rester assez marginaux ; à titre d'exemple, peu de publications par rapport à l'usage de l'eau sont présentes dans la littérature (Ristic *et al.*, 2015).

L'arrivée de ces deux nouveaux indicateurs est vue par le Green Grid comme un moyen d'évaluer la durabilité des data centers. Or, la définition de la durabilité est assez variable dans le secteur (Mingay, 2007). Certaines définitions mettent en avant tout le cycle de vie du data center (Marwah *et al.*, 2010) et leur impact sur la santé humaine et l'environnement (Collins, 2012). Tandis que d'autres prennent également en compte l'énergie et les émissions de CO₂ (Callou, 2013).

Avant tout, il convient de définir un indicateur comme un « *instrument de mesure utilisé comme indicateur de progrès. L'importance d'un indicateur rationnel et mesurable devient impérative pour mesurer et gérer un data center* » (Daim *et al.*, 2009). Les indicateurs mettent en évidence les points faibles d'une situation de départ et les progrès effectués après la mise en oeuvre des décisions (Klubeck, 2011). Ils possèdent différentes intentions d'usage : amélioration au fil du temps, comparaison avec d'autres centres de données, choix de la conception ou de la localisation, mise en œuvre opérationnelle, sélection de l'hébergeur (Patterson, 2012). Le Green Grid précise les caractéristiques d'un bon indicateur : clair, intuitif, capable de s'adapter aux buts de sa création et de prendre en compte les changements (technologiques, économiques, environnementaux ...), scientifiquement correct et utilisation précise, suffisamment détaillée pour analyser un aspect individuel, capable de fournir des décisions sur base de données (Green Grid 2009, cité dans Daim *et al.*, 2009).

Power Usage Effectivness

Bien que perfectible, l'indicateur le plus communément utilisé lorsqu'il s'agit d'efficacité énergétique serait le Power Usage Effectivness (PUE) (Horner, N. et Azevedo, 2016 ; Sharma, M. *et al.*, 2015 ; Yuventi et Mehdizadeh, 2013). Richard Clark explique dans un échange de mail la perception du PUE selon de Vantage Data Center : « *A low PUE means we're efficient and are thus able to offer a better price to our end users and be more profitable. Data centers in buildings that were not purpose-built to be data centers tend to have much higher PUE numbers. A lower PUE (and access to less expensive electricity) are things an end user looks for before signing up with a data center* ».

L'indicateur est défini par le ratio de l'énergie totale consommée par un centre informatique par rapport à l'énergie consommée par les systèmes informatiques (Belady, C., 2008). La Figure 5 illustre les différents éléments pris en compte dans l'équation, une liste plus exhaustive est disponible à l'annexe 2.

Initialement défini par le Green Grid, l'indicateur est désormais consacré dans la norme internationale ISO/IEC 30134-2 fixant clairement les limites du système. La mesure devrait également être intégrée dans la nouvelle norme européenne EN 50600 (CENELEC, s.d.).

$$PUE = \frac{\text{Total Facility Power}}{\text{IT Equipment Power}}$$

Suivant la précision de PUE recherchée, les mesures peuvent s'effectuer sur 3 niveaux correspondant à des fréquences de relevés :

- Niveau basic (L1) = Mensuel/ hebdomadaire
- Niveau intermédiaire (L2) = Quotidien / par heure
- Niveau avancé (L3) = Continu (intervalle de 15 min.)

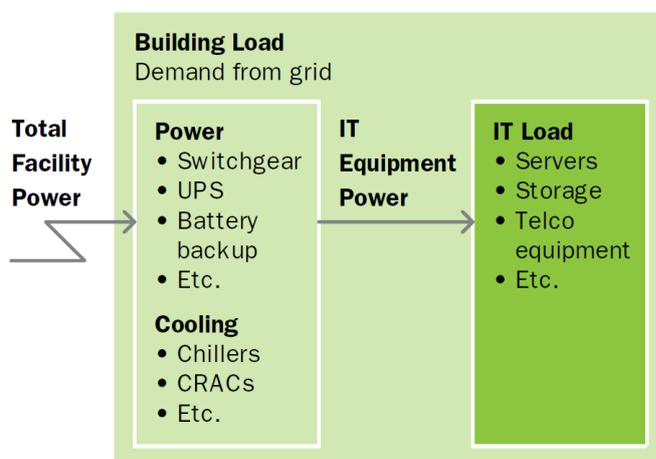


Figure 5 Schéma simplifié des composants du PUE. Extrait de Technical Committee White Paper, 2007.

Le niveau choisi conditionne l'endroit adéquat pour le recueil des données (Avelar *et al.*, 2012). Pour le niveau L1 et L2, il est recommandé de prendre les mesures au même moment de la journée. La Figure 6 illustre une installation lambda et indique les différents points où les mesures doivent être effectuées selon le niveau de détail voulu. Quel que soit le niveau de précision recherché, le

dénominateur de notre calcul reste le total de l'énergie entrante dans le site, identifié par le point A rouge dans le coin supérieur gauche. En prenant l'exemple du niveau basic, le numérateur sera pris à la sortie de l'UPS. Dans ce cas, l'équation s'écrit :

$$PUE L1 = \frac{A}{B(UPS A) + B(UPS B)}$$

Pour un niveau intermédiaire, le relevé des mesures s'effectue à la sortie des PDU alimentant les serveurs et autres équipements IT liés (L2, en bleu sur le schéma); la somme de ces relevés sera le dénominateur. De manière similaire, le dénominateur du niveau sera la somme des mesures prises directement à l'entrée de chaque des serveurs et des équipements IT (L3, en vert sur le schéma).

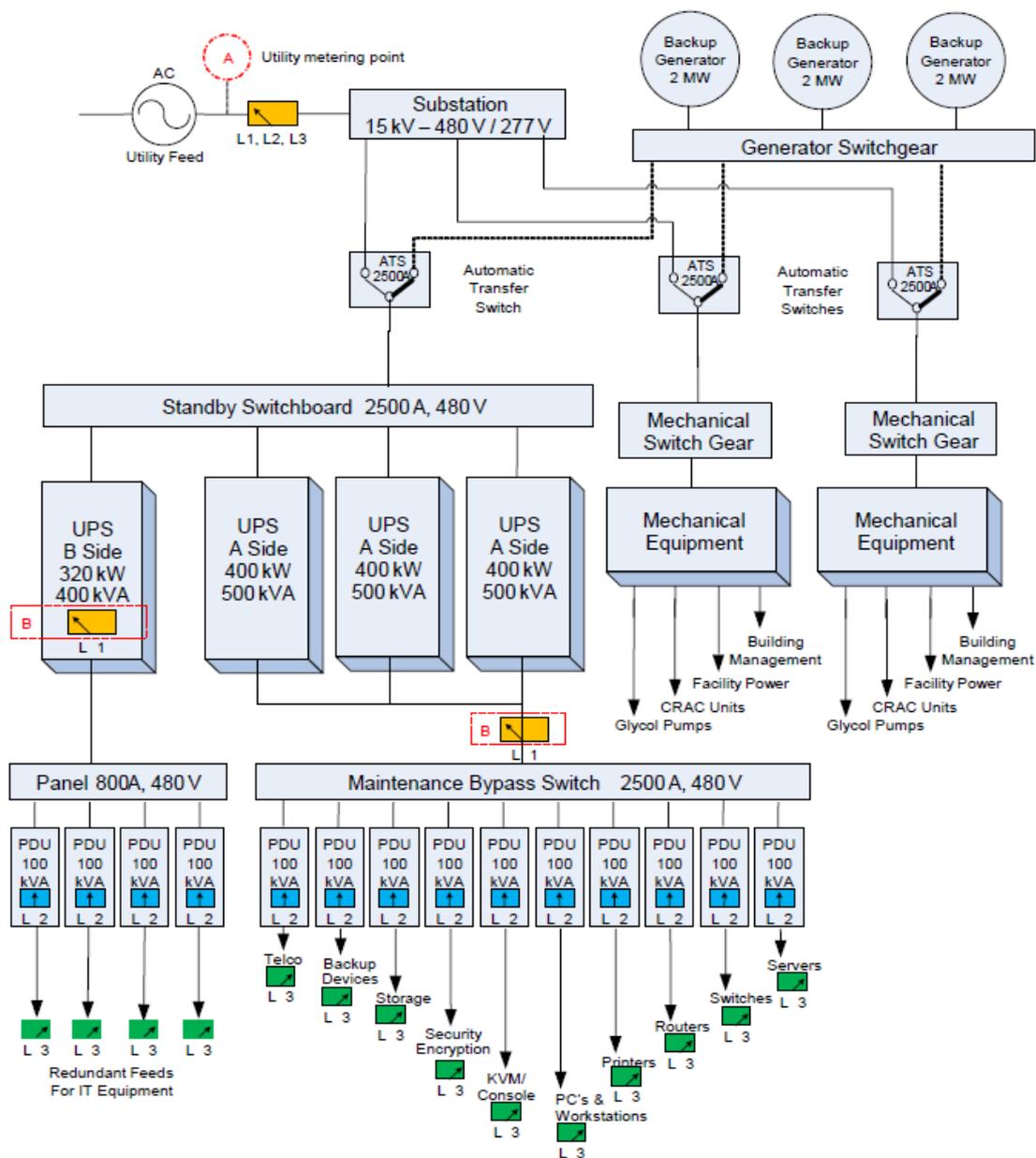


Figure 6 Représentation schématique des trois niveaux de prise de PUE dans un data center type. Extrait de Avelar et al., 2012.

L'indicateur peut être calculé lors des activités opérationnelles du data center tout comme lors de la phase design/construction afin d'indiquer l'efficacité potentielle du futur centre. Dans ce dernier cas, la valeur n'est qu'une pure estimation.

Un PUE égale à 2,0 indique que, pour chaque watt consommé par la partie informatique, un autre est consommé par le data center dans le refroidissement et la distribution d'énergie dans l'ensemble de l'infrastructure (Wang et Khan, 2013). Plus sa valeur est proche de 1, meilleure est la performance énergétique des infrastructures informatiques. Toutefois, un PUE idéal de 1 est impossible, car l'équipement non IT consommera toujours de l'énergie.

Suite à l'attention portée au PUE, on enregistre au fil de temps une diminution de celui-ci (Uchechukwu *et al.*, 2014). Selon le Green Grid, depuis l'apparition du PUE en 2007, les compagnies américaines du secteur ont noté une baisse de 20% de leur PUE, économisant l'équivalent de 1,4 million de dollars de factures électriques par an (The Green Grid, 2015). Il n'existe pas de PUE moyen calculé à l'échelle mondiale, mais Brady et ses co-auteurs (2013) constatent sur des petits échantillons des PUE variant entre 1,33 et 3. Selon le baromètre 2015 des pratiques de Green IT des entreprises françaises (Botella *et al.*, 2015), 65% des entreprises françaises rapportent un PUE inférieur à la moyenne européenne située à 2,53. Parallèlement, dans une autre étude, la majorité des 87 centres français interrogés (soit 15-25% du parc français) ont un PUE compris entre 1,13 -2,50 (Barbier *et al.*, 2016). Dans l'enquête exploratoire sur les 50 opérateurs verts, 29 sociétés affirment utiliser le PUE. Cependant, toutes ne livrent pas de valeurs pour chacune de leurs infrastructures. Par exemple, *Naver* se contente de signaler « un PUE proche de 1 ». À l'inverse, *DFT Data Centers* se vante d'avoir « *industry leading PUE* » descendant à 1,15. Globalement, les chiffres recueillis oscillent entre 1,07 et 1,50 avec une moyenne se situant à 1,26.

Selon Francis Gillard (Data Centre Expert, Critical Infrastructures, Energy Optimization pour Low Energy Consulting) : « *Un bon data center aura un PUE autour de 1,05-1,3 ; un moyen 1,3-1,5 ; un médiocre 1,6-1,9 et un mauvais 2-2,5.* ». Les data centers plus anciens ont tendance à posséder des valeurs plus élevées. F. Gillard précise la marche à suivre en cas de mauvaises notes « *(les sociétés) doivent faire un audit, revoir leurs processus au niveau du facteur humain et au niveau des installations. La vétusté des installations fait en sorte que le rendement soit moins bon à différents niveaux. [...] Il faut analyser pour régler le problème là où il se trouve, voir s'il y a une dérive.* » Il précise aussi qu'une valeur aberrante ou une variation anormale dans le PUE peut provenir d'une défaillance dans la gestion opérationnelle ou d'un équipement mais parfois aussi d'éléments de mesures défectueux.

Globalement, le PUE est un outil de diagnostic pertinent pour l'évaluation de la consommation propre d'un centre. Pourtant, le PUE est devenu également un outil marketing visant à attirer la clientèle (Brady *et al.*, 2013). La dérive de son utilisation entraîne une compétition à celui qui affichera le PUE le plus faible. Or l'indicateur n'est pas voué à être utilisé comme critère de classement, mais comme comparateur interne de mutation. La sensibilité du PUE à certains critères le disqualifie comme comparateur objectif. D'une part, l'indicateur est conditionné par la localisation géographique du centre, la température extérieure influencera les valeurs obtenues. De même, la saisonnalité impacte le PUE. En effet, si les mesures sont prises de manière régulière (mensuelle), on constatera une augmentation de l'indicateur les mois les plus chauds étant donné que le système de refroidissement est plus sollicité (Yuventi et Mehdizadeh, 2013). D'autre part, le taux de disponibilité (niveau tiers) entre également en ligne de compte. Avec la redondance, certains éléments ne travaillent pas à pleine capacité, mais génèrent les mêmes pertes de transformations. Par exemple, le dédoublement du système refroidissement et son fonctionnement en *load balancing*² multiplient les pertes, étant donné que deux machines fonctionnent simultanément au lieu d'une seule. Enfin, le taux de charge marque également le PUE. En effet, le centre conçu pour l'accueil d'une certaine charge se remplit progressivement. Or une salle à 50 % de sa charge nominale aura un PUE plus insatisfaisant qu'une à 80% malgré qu'elle consomme moins d'énergie (Alliance Green IT *et al.*, 2016).

Cependant, le PUE reste manifestement un bon indicateur de suivi (Oró *et al.*, 2015). Il facilite la collecte d'informations utiles qui traduiront les progrès réalisés. Comme le précise Brady *et al.* (2013) « *mesurer l'efficacité énergétique des data centers est clairement important si les émissions de CO₂ du secteur IT doivent être réduites et si les compagnies doivent réduire leurs consommations énergétiques* ». D'un point de vue énergétique, le PUE est suffisant, mais il ne peut servir d'indicateur de performance environnemental (Cook, Gary, 2012 ; Horner, N. et Azevedo, 2016). D'autres mesures, telles que le WUE ou CUE, ont pour vocation de prendre en compte les paramètres environnementaux ignorés par le PUE, tels que le facteur d'émission de GES selon la source de production électrique.

² Répartition des charges (50-50 ou autre) entre les systèmes.

Water Usage Effectiveness

De prime abord, l'impact eau n'apparaît pas comme une évidence lorsqu'il s'agit de data center. Pourtant, elle est bien présente lorsqu'il s'agit de refroidissement, de processus de traitement de l'air et, sans oublier, lors de la production d'énergie primaire. Facebook annonce avoir utilisé en 2016, un volume total de $1,19 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ d'eau dont 74 % directement pour l'exploitation de ses centres de données (Facebook Inc., 2016). Ristic et *al.* (2015) se risquent à une évaluation de l'empreinte eau des centres de données à l'échelle mondiale qui se situerait entre 767- 147 810 millions de m^3 par an. Selon Shehabi et ses co-auteurs (2016), 626 millions de m^3 d'eau ont été utiles aux centres de données américains en 2014. Leur estimation pousse ce chiffre à 660 millions pour 2020. Toutefois, le choix du site d'implantation est important, car les conditions climatiques (températures et humidité) peuvent avoir un impact sur ces estimations.

Le Green Grid a développé le Water Usage Effectiveness (WUE). Il le définit comme l'utilisation totale d'eau dans le centre sur l'utilisation en énergie de l'équipement IT.

$$WUE = \frac{\text{consommation d'eau annuelle}}{\text{Énergie utilisée par l'équipement IT}} \quad (L/kWh)$$

Le dénominateur de cet indicateur a l'avantage d'être commun au PUE évoqué ci-dessus. Tandis que le numérateur incorpore la gestion de l'hygrométrie, l'eau utilisée pour la production d'énergie, mais également l'eau consommée pour rafraîchir le centre de données et les équipements producteurs d'énergie. Un indice faible signifie une faible association entre l'eau et le data center avec une valeur idéale de 0.

Une variante du WUE existe également afin de prendre en compte l'eau employée dans la production énergétique en dehors du site des infrastructures. Le WUE peut alors mesurer les consommations d'eau directe et indirecte liées à l'énergie de l'IT. Toutefois, il faut garder à l'esprit que l'indicateur est fortement influencé par le mix énergétique, ainsi que les valeurs hygrométriques adoptées.

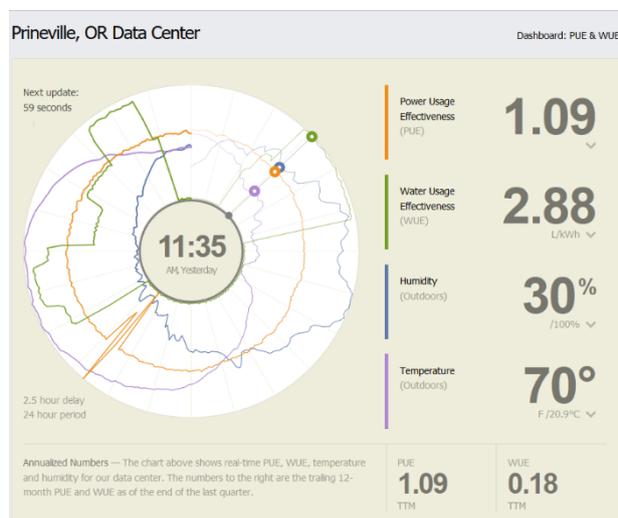
Bien que la problématique de l'eau puisse paraître anodine, elle prend plus de sens dans un contexte particulier. Par exemple, la Silicon Valley est le deuxième marché américain en matière d'espace de centre de données, avec plus de $241\,500 \text{ m}^2$ (2,6 millions de pieds carrés), qui y sont dédiés pour une demande de 343 MW (Data Center Frontier, 2016). Or, la sécheresse est un phénomène récurrent dans l'état californien. La dernière date de 2012 à 2017, avec des extrêmes atteints entre 2014 et 2015 où certains comtés du nord californien n'ont pas reçu de

précipitations mesurables durant plus de 50 jours consécutifs, alors que cette période devait marquer le pic des précipitations annuelles (California Department of Water Resources, 2015). Le manque d'eau peut amener à se questionner sur les systèmes de refroidissements, mais également sur la production hydroélectrique. Une étude a démontré que la part de production d'énergie hydroélectrique de l'État est passée de 21,2% à 8,3% entre 2011 et 2014. Cela est imputable au manque de précipitations et de neige ne remplissant dès lors pas suffisamment les réservoirs (Hardin *et al.*, 2017). Cette diminution a été compensée par l'utilisation du gaz naturel, ce qui a eu pour conséquence d'augmenter de 33% les émissions de CO2 de la production électrique californienne.

L'utilisation du WUE peut, dès lors, aider à la décision en favorisant des technologies plus efficaces en termes de consommation d'eau globale, réduisant ainsi le stress subit par les ressources aquatiques.

Le WUE n'a pas la cote auprès des entreprises de l'enquête exploratoire. Seulement trois d'entre elles y font référence. *Compass datacenters* et *Marilyn* mentionnent un WUE de 0 car leurs centres n'auraient aucunement recours à l'eau. Le troisième data center utilisant le WUE appartient à Facebook. Mais avant de développer ce cas, précisons que même si le WUE n'est pas publié sur les sites internet des autres compagnies, 20 d'entre elles signalent des mesures relatives à l'eau. Ces dernières sont de natures diverses, allant du recyclage et traitement à la conservation de l'eau de pluie en passant par l'optimisation des usages.

Pour revenir à Facebook, l'entreprise met à disposition un tableau de bord pour quatre de ces centres (Prineville, Altoona, Forest City, Luleå), permettant de visionner en temps réel et rétrospectivement (7, 30, 90 jours à un an) le PUE, le WUE, l'humidité et la température du centre. Pour l'ensemble de ses centres, Facebook affiche un WUE moyen de 0,21 (Facebook



Inc., 2016). La Figure 7 illustre qu'à l'échelle journalière on remarque une augmentation sporadique du WUE correspondant aux périodes où le taux d'humidité est faible. Ce qui laisse à penser que cette augmentation est liée à une réinjection d'humidité dans le centre.

Figure 7 WUE élevé. Les données mentionnées concernent le 05 août 2017 11h35. Capture d'écran du 06 août 2017 du site Facebook <https://www.facebook.com/PrinevilleDataCenter/app/399244020173259/>

De même, on constate une augmentation épisodique du PUE au moment de la journée où la chaleur atteint son pic (Figure 8). Cette accentuation est probablement en corrélation avec l'augmentation des besoins du système de refroidissement. Le graphique hebdomadaire présent sur le site internet semble refléter cette tendance.

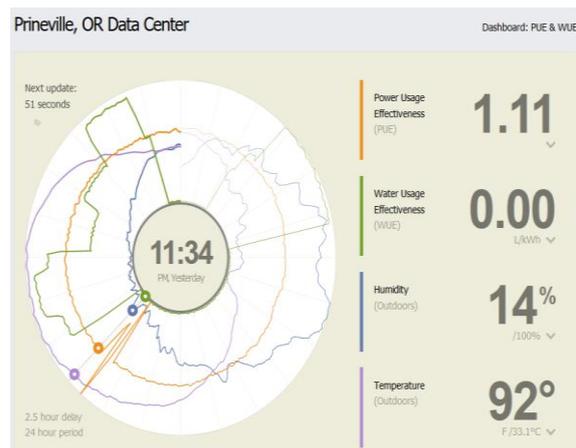


Figure 8 PUE élevé.. Les données mentionnées concernent le 05 août 2017 23h34. Capture d'écran du 06 août 2017 du site Facebook <https://www.facebook.com/PrinevilleDataCenter/app/399244020173259/>

Carbon Usage Effectiveness

La prise en compte des émissions de GES n'est pas toujours évidente à réaliser pour les opérateurs. Pourtant, des outils leur sont fournis quand il s'agit de mettre en place un bilan GES (ADEME, 2012). Mais comme évoqué dans la partie impact, cette opération peut se révéler compliquée à gérer en interne face aux quantités de données requises et le peu d'informations directement disponibles. Afin de donner un ordre de grandeur, l'ADEME propose des données génériques pour la phase fabrication de certains équipements. Par exemple la climatisation représenterait 13 kg CO₂ eq par kg d'appareil, 400 à 800kg CO₂ eq pour les serveurs, 500kg CO₂ eq pour les racks.

Le Green Grid propose un autre moyen pour estimer l'intensité carbone des centres de données : le Carbon Usage Effectiveness (CUE) (Belady, D., 2010). La présente approche consiste à réaliser le quotient de la somme de toutes les émissions de CO₂, provenant des diverses sources d'énergie du centre par rapport à l'énergie nécessaire pour l'équipement IT. Ce ratio informe sur une valeur moyenne de CO₂ eq émis pour chaque kWh utilisé par IT. Les valeurs sont rapportées par année. Cependant la formule est centrée sur le data center et non sur le cycle de vie complet des équipements.

$$CUE = \frac{\text{Total CO}_2 \text{ emissions caused by the Total Data Center Energy}}{\text{IT Equipment Energy}} \quad (\text{Kg CO}_2\text{eq/kWh})$$

Une autre méthode « plus rapide » consiste à multiplier le PUE par le facteur d'émission de Carbone (CEF) défini pour la région d'implantation des centres de données, cette formule simplifiée devient : CUE = PUE x CEF. Contrairement au PUE, le CUE possède une unité de mesure. De même, les valeurs idéales sont différentes. Dans le cas présent, l'objectif à atteindre

est 0, indiquant qu'aucune émission de carbone n'est associée aux opérations du centre de données.

Le CUE manque de popularité puisque seule la société *Switch* publie à son sujet. Dans le cas présent, le CUE est égal à 0, mais l'opérateur se garde de préciser clairement les tenants et aboutissants.

Le Green Grid considère le CUE comme un moyen, entre autres, de comparer les centres de données, de vérifier leur évolution positive au cours du temps, et d'envisager l'utilisation d'énergie renouvelable. Cet indicateur, couplé au PUE et WUE est développé par le Green Grid pour aider les organisations à « *évaluer rapidement la durabilité des ressources hydriques, énergétique et carbone des centres, de comparer les résultats et déterminer si des améliorations d'efficacité énergétique/durabilité peuvent être mises en place* » (Belady, D., 2010, p. 3). Ces améliorations se justifient par le fait que la consommation d'énergie, les émissions de gaz à effets de serre et la gestion de l'eau influencent les prises de décisions sur les choix stratégiques, tels que le développement, la localisation et la sous-traitance des data centers. Pour le consortium, le secteur de l'IT pourra gérer au mieux son expansion grâce à des data centers durables qui permettent de réduire les frais, tout en restant compétitif. Le Green Grid met également en garde contre certains risques, notamment par rapport à la taxation carbone, mais aussi au coût et l'accessibilité à l'eau. Une démarche proactive permettrait à ce secteur de réduire ces risques, et mieux gérer leurs coûts environnementaux.

PUE, CUE, WUE, ces trois paramètres ont été imaginés comme appartenant à une même famille (xUE). Aussi, ils utilisent tous le même dénominateur et couvrent les aspects opérationnels des centres de données sans prendre en compte le cycle de vie complet de ces derniers ou de leur équipement.

Bonnes pratiques

Si les indicateurs servent à mesurer des performances (énergétiques, environnementales ...), la mesure seule ne suffit pas, elle doit être accompagnée d'actions. La section suivante présentera diverses bonnes pratiques qui, mises en place, réduisent les impacts des centres de données. Les approches présentées rassemblent un panel de solutions fréquemment conseillées dans la littérature.

Refroidissement

Le refroidissement constitue une part entre 35-40% du total de la consommation électrique du bâtiment. Les recherches industrielles se focalisent principalement sur l'efficacité énergétique, en particulier celle liée au refroidissement (Oró *et al.*, 2015). Et pour cause, son optimisation revient non seulement à des économies d'énergies (et indirectement de CO₂), mais également à une amélioration du paramètre eau.

Un premier geste consiste à prendre en compte les recommandations de l'Association Américaine des Ingénieurs du Chauffage, de la Climatisation et de l'Air Conditionné (ASHRAE). Ensuite, des améliorations peuvent être effectuées dans la conception des infrastructures de refroidissement, notamment via l'aménagement du confinement des ailes chaudes et froides, l'utilisation du *free cooling* et du *free chilling*.

ASHRAE

L'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) a joué un rôle novateur en identifiant les tendances et lignes de directives opérationnelles pour le refroidissement via son *Technical Committee 9.9*, notamment axé sur les data centers. Une des recommandations majeures concerne les plages de températures et d'humidité sous lesquelles l'équipement informatique est capable de fonctionner. Lors d'une étude, l'Association constate que les opérateurs optaient pour des températures avoisinant les 20°C, avec la philosophie que la fraîcheur était meilleure pour l'environnement technique du centre. Cependant, les équipements peuvent supporter des températures supérieures, tout en continuant correctement leurs activités. Depuis, l'ASHRAE recommande de faire fonctionner les équipements informatiques jusqu'à 27°C et autorise même une température maximale de 35°C pour certains équipements (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, 2011). Ainsi, en augmentant la température acceptable au sein de la salle informatique, les opérateurs économisent de l'énergie en refroidissement. En rehaussant la température d'1°C, 2 à 5% de l'énergie investie pourraient être épargnées (Li *et al.*, 2016).

Confinement des ailes chaudes et froides

En dehors, sur le côté ou dans les baies, peuvent avoir lieu des remix entre air chaud et air froid. Cette sorte de court-cuits (cf. Figure 9) empêche un refroidissement efficace de par le retour direct de l'air froid dans le système de refroidissement (A1) ou par le retour d'air chaud dans les racks (A2). Selon F. Gillard : « *Les remix sont des pertes mais additionnées 5%+5%+5%, cela fait vite 15%. Or, 15% de perte sur le transfert d'air, il faut gonfler la puissance et augmenter le débit d'air, ce qui consomme de l'énergie. L'air va tourner dans son jus plusieurs fois avant d'être refroidi.* ». Pour y remédier, le cloisonnement des ailes chaudes et froides fait figure de bonne pratique. Les corridors peuvent être isolés les uns des autres, car le confinement de ces différentes allées permet l'amélioration de l'efficacité du refroidissement (Song *et al.*, 2015). La raison de cette amélioration est liée aux réductions des pertes d'air. Le confinement de la façade et du plafond de l'allée froide (en pointillés bleus sur le schéma) permet d'injecter cet air froid là où il y en a besoin, c'est-à-dire à l'entrée des serveurs et jusqu'au sommet du rack. Tandis que le confinement de l'air chaud (en pointillés rouges sur le schéma) permet de concentrer la chaleur en un espace et de la récupérer pour l'acheminer directement vers le système de conditionnement de l'air. Cette pratique permet de minimiser la recirculation de l'air vers des endroits indésirables (Sharma, M. *et al.*, 2015).

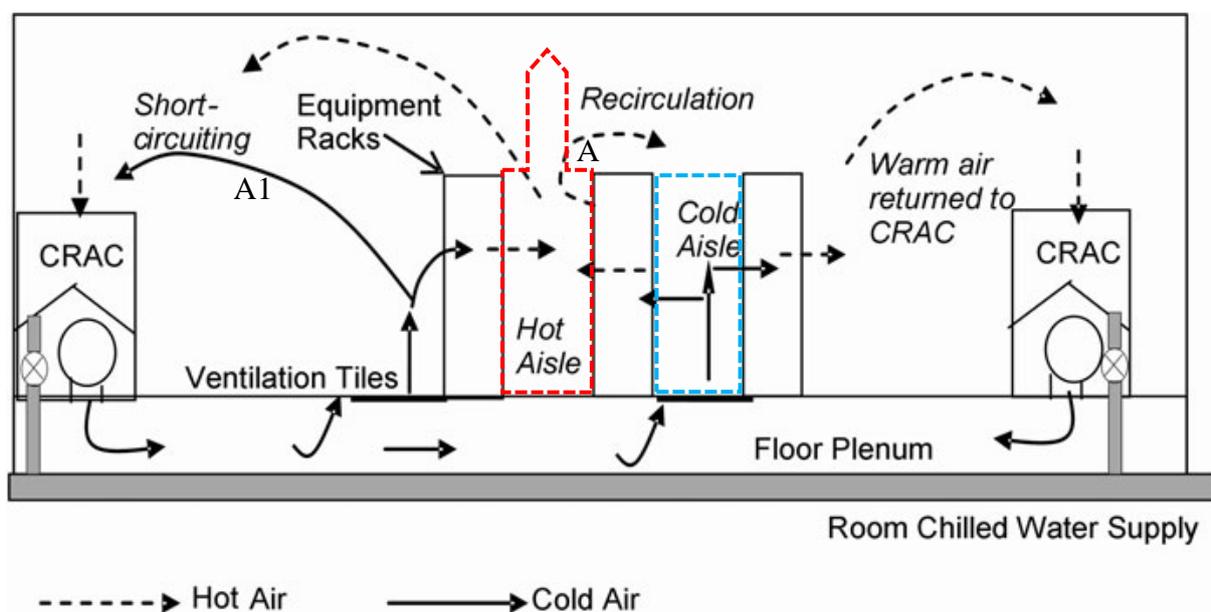


Figure 9 Confinement ailes chaudes et froides. Adapté de (Shah *et al.*, 2012)

Techniques de refroidissement naturel

De nombreuses solutions technologiques différentes existent en matière de refroidissement (Li *et al.*, 2016). Cependant, deux d'entre elles sont intéressantes à développer en raison de la diminution d'énergie qu'elles impliquent.

Premièrement le *free cooling*, cette technique de refroidissement est considérée comme très efficace, puisqu'elle utilise l'air froid extérieur du data center permettant ainsi l'économie du système de refroidissement. De manière simpliste, on peut décrire le processus comme ouvrir la fenêtre du data center. L'air injecté provient donc directement de l'extérieur ou d'un mélange avec l'air interne, afin d'éviter l'ajout d'eau pour l'humidification. Cependant, cette approche ne peut se faire que sous certaines conditions de température extérieure et d'humidité, puisque l'air extérieur doit être sous une température inférieure à celle fixée dans le data center (Li *et al.*, 2016 ; Newcombe *et al.*, 2012). La localisation du centre de données joue donc un rôle essentiel. C'est donc sans surprises que des grands opérateurs, tel que Google ou Facebook, choisissent des emplacements hauts en latitudes afin de minimiser les coûts de refroidissement. Là est bien l'avantage majeur des techniques de refroidissement naturel : l'air froid est gratuit et abondant selon les régions (Fernández-Montes *et al.*, 2015).

Selon F. Gillard, la technique connaît aussi des inconvénients : « *Les poussières, particules, monoxydes peuvent être des éléments agressifs par rapport aux serveurs. Les systèmes vont s'encrasser plus fort. De plus, lorsqu'il n'y a plus suffisamment d'air et qu'il faut ajouter des ventilateurs ou qu'il faut traiter, on perd du bénéfice.* ». Les particules fines ne sont pas dangereuses lorsqu'elles sont sèches. Mais des pannes peuvent avoir lieu, si elles absorbent l'humidité, alors qu'elles se sont logées près de certains conducteurs (Pramod et Yogendra, 2012).

Tandis que le *free chilling* utilise l'air de l'extérieur (suffisamment froid par rapport aux températures de traitement) pour produire directement de l'eau glacée plutôt que d'utiliser un froid mécanique. F. Gillard explique les raisons des gains de cette technique : « *Le froid à compression est relativement énergivore, on travaille avec des différences de pressions qui sont considérables. Il y a un travail à fournir et il est assez conséquent. Le free chilling, se passe du cycle de Carnot et du froid à compression. Il utilise directement un radiateur extérieur et fait passer de l'air froid dessus, refroidit le liquide utilisé pour refroidir les serveurs. On supprime un certain nombre d'étapes et on gagne pas mal avec ça.* ».

La technique du *free chilling* est également possible en utilisant de l'eau provenant de nappes, rivières ou encore l'eau profonde d'un lac. Google utilise même l'eau de mer dans son centre à Hamina en Finlande (Google, 2017b).

Malgré son coût d'investissement, cette solution permet des économies. Même durant les conditions plus extrêmes de l'été, l'eau reste une source froide sûre. Le dimensionnement des installations de refroidissement peut donc être proportionnel aux cas estivaux les plus défavorables.

L'École polytechnique fédérale de Lausanne utilise tout au long de l'année, l'eau du lac récupérée entre 6-8°C par la station de pompage. Cette eau circule dans des échangeurs installés dans les portes arrière des racks. Les ventilateurs des serveurs suffisent à générer le flux d'air nécessaire pour le passage de l'air chaud dans l'échangeur. L'école évite ainsi de produire de l'eau glacée, ce qui se traduit par des économies d'énergie et de matériels. Sa gestion de l'eau va même plus loin, puisque des vannes thermostatiques modulent le débit de l'eau en fonction de la puissance utilisée dans les racks. Au total, 170m³ d'eau circulent par heure afin de refroidir 1 MW (Boisseau, 2012).

La combinaison entre les deux techniques de refroidissement avec les recommandations de l'ASHRAE peut s'avérer être une combinaison gagnante. En effet, en augmentant les températures tolérées dans la salle IT, il y a géographiquement plus d'espace potentiel où il est concevable de systématiser ces méthodes. Suite à la parution des recommandations de l'ASHRAE, le Green Grid a mis à jour ses cartes concernant de régions avantageuses pour le free cooling (Harvey, s.d.). Le consortium constate qu'en appliquant ces nouvelles valeurs, près de 90% de l'Europe, de l'Amérique du Nord et du Japon seraient des territoires propices pour le déploiement du free cooling. Les températures préconisées par l'ASHRAE pourraient permettre des économies financières mais également d'énergie, de carbone et d'eau. De même, les nouveaux centres pourraient faire fit de certaines installations de refroidissement. Le Green Grid met à disposition un site internet³ évaluant les économies possibles grâce au free cooling. L'annexe 3 détaille une simulation réalisée sur un centre de données fictif situé en région bruxelloise. Dans le cas présent, une économie annuelle de 160 000€ pourrait être faite en ayant recours au free cooling.

³ http://cooling.thegreengrid.org/EUROPE/WEB_APP/calc_index_EU.html

Effacité énergétique

L'efficacité énergétique est importante pour les data centers car elle permet de minimiser l'impact environnemental, diminuer les coûts liés à la consommation énergétique et d'optimiser les performances du centre de données (Song *et al.*, 2015). Pourtant, les centres sont peu efficaces en la matière, et ce pour des raisons historiques. En effet, les centres étaient perçus comme porteur de productivité et de compétitivité pour l'entreprise sans regard pour la consommation énergétique (Breuil *et al.*, 2008). Le modèle économique appliqué au secteur a longtemps été résumé à : temps, coût, qualité, flexibilité (vom Brocke *et al.*, 2012).

Aujourd'hui, 10 à 20 % de la capacité de calcul des serveurs sont réellement utilisés avec des pointes jusqu'à 50 % et cela en consommant tout de même entre 60-80% de leur puissance énergétique (Ebrahimi *et al.*, 2014 ; Uchechukwu *et al.*, 2014). Une des premières solutions est donc l'amélioration du taux de charge, en concentrant le traitement de données sur une machine et d'éteindre les autres via, par exemple, la virtualisation (ADEME, 2012).

Les grandes lignes en matière d'efficacité ont déjà été précitées via les méthodes de refroidissement, mais d'autres propositions sont sur la table. Par exemple, les acteurs pourraient s'atteler aux thèmes de la limitation des pertes de transformations de courant, le regroupement des environnements, la réduction des infrastructures inutiles

Puisque l'efficacité énergétique des équipements influence directement la consommation d'un data center, il suffirait d'opter pour du matériel approprié. Différents labels garantissant une certaine efficacité énergétique des équipements informatiques existent et sont même préconisés dans le Code de Conduite européen, parmi eux, le standard SPEC Power et le label EnergyStar. Cependant, on peut comprendre qu'une partie des équipements à haut rendement soit souvent snobé à cause de leur coût initial (Sharma, M. *et al.*, 2015). De potentiels effets rebond peuvent avoir lieu avec la surutilisation ou mauvaise utilisation des appareils plus efficaces, d'où l'intérêt d'utiliser des indicateurs comme moyen de contrôle (Daim *et al.*, 2009).

Une autre voie est la réduction des infrastructures inutiles. L'augmentation constante du volume de données est de l'ordre de 40 % par an (van Bussel *et al.*, 2015). Afin de faire face à ce déluge d'informations, le nombre de serveurs dédiés à l'archivage est en hausse permanente car sont stockées toutes les informations, des vidéos virales de chatons à la pièce jointe inutilisée d'un mail.

Une revue régulière de leur taux d'utilisation permettrait de détecter des serveurs « zombies⁴ », inactifs ou inutilisés depuis de longues dates. Entre 20-30% des serveurs des grands data centers seraient concernés dans ce cas. À l'image d'AOL, qui en 2013, a économisé près de 5 millions de dollars en décommissionnant plus de 9 400 de ses serveurs zombies (Whitney et Delforge, 2014).

Enfin, dresser un catalogue du matériel et y adjoindre une bonne gestion, permettrait de réduire et d'anticiper les maintenances et conserver un niveau de performances technique et énergétique (Acton *et al.*, 2017).

L'objectif de ces actions est d'atteindre une meilleure efficacité du data center qui pourrait se résumer sous la formule « mieux consommer ». Mais l'option « ne consommer que ce qui est nécessaire », menée par la sobriété énergétique est aussi une voie à suivre pour limiter les impacts énergétiques des centres de données.

Virtualisation

La virtualisation est devenue une stratégie de premier ordre pour répondre aux besoins d'un business en expansion. Elle consiste à utiliser un serveur physique et le faire devenir virtuel. F. Gillard en décrit les principes et avantages de la technique : « *On met une couche informatique supplémentaire qui virtualise les serveurs. Un gros serveur virtuel équivalent à 10 serveurs physiques. Un serveur peut tomber en panne et le système est suffisamment intelligent pour rechercher de la ressource. La couche virtuelle permet d'exploiter les ressources, c'est un chef d'orchestre. On a tout informatisé* ». L'expert précise par la suite que la virtualisation peut s'appliquer à plusieurs domaines : serveur (CPU, unité de calcul), switch (transport des données informatiques), stockage (disque dur).

Au travers de la virtualisation, l'opérateur tire le meilleur parti de l'utilisation des ressources IT : en réduisant leur consommation énergétique, en gérant l'espace nécessaire et en optimisant le travail des équipements (Harmon et Auseklis, 2009 ; Santana, 2014). Par exemple, au lieu d'utiliser 6 serveurs et autant de fois leur énergie, la couche virtuelle permettrait d'orchestrer leur fonctionnement avec parcimonie. Cela offre la possibilité de regrouper sur une seule unité, le contenu de plusieurs appareils sous-utilisés et de mettre les autres en veille. L'avantage premier de cette technique est une réduction du nombre de serveurs, ce qui de fil en aiguille, réduit les coûts globaux y compris ceux du refroidissement. À son tour, cette réduction de consommation d'énergie induit la diminution des émissions de GES. À ce propos, la firme

⁴ Les serveurs zombies ou comateux, sont des serveurs physiques maintenus en service alors qu'ils ne sont plus actifs. Ils continuent ainsi à consommer des ressources mais n'ont aucune fin utile.

VWware Inc. estime que l'utilisation de son programme de virtualisation a évité l'émission de 67 millions de tonnes de CO₂ en 2015 via les économies énergétiques (Gillen et Vela, 2016).

Parmi les recommandations du Code de Conduite européen figure le recours à la virtualisation des serveurs (European Commission et Joint Research Center, 2016).

Modularité

Les data centers sont conçus afin d'accueillir un certain nombre de machines sur une surface déterminée et pour une longue durée. Mais en réalité, il y a des changements permanents avec l'installation de nouveaux équipements, les reconfigurations, le retrait de plus anciens ou défaillants (Kant, 2009).

Afin d'adapter la capacité des data centers à la demande, ces derniers se développent de plus en plus de manières modulaires. Désormais, on préfère construire en fractionnant l'aire des salles (ex : 4x500 m² au lieu d'une salle unique de 2000 m²). Cette conception de l'espace appelle une meilleure gestion, car les différentes tranches ne seront pas utilisées en même temps, mais au fur et à mesure du remplissage du data center. Le principe est simple: il consiste à mettre de plus petites unités et de les multiplier de façon à ce qu'un module supplémentaire soit ajouté lorsque le premier atteint une capacité donnée (Syntec Numérique, 2011). La mise en place de modules répliquables facilite ainsi l'évolution du centre en adaptant l'activité de l'équipement non-IT et la consommation du site à l'utilisation des ressources informatiques.

La modularité doit être incluse dès la conception du bâtiment, tout autant que l'aménagement des équipements informatiques.

Comme recommandé par la Commission Européenne dans le Code de Conduite, la conception du bâtiment doit intégrer de la modularité de façon à prévoir l'expansion progressive des équipements et permettre à l'infrastructure de s'aligner sur les besoins et, ainsi, parvenir à une meilleure efficacité. Par exemple, l'utilisation d'unité UPS modulable réduit l'usage et la perte d'énergie des équipements non utilisés et non raccordés sur le réseau électrique (Acton *et al.*, 2017).

Énergie renouvelable

Utiliser des sources d'énergie renouvelable (SER) pour couvrir une part de la consommation électrique des data centers est une bonne idée, surtout lorsqu'il s'agit de diminuer les émissions de CO₂. Actuellement, les sources les plus mobilisées sont le solaire et l'éolien. D'autres processus ad hoc voient le jour, tel que la géothermie ou la biomasse (cf. sous-chapitre Récupération de la chaleur). Concernant l'enquête exploratoire, 19 compagnies s'engagent envers des énergies plus propres. La source privilégiée est le solaire pour 11 d'entre elles, vient ensuite l'éolien. L'hydroélectricité est aussi une source favorisée par les opérateurs malgré le stress environnemental que cela peut causer localement. D'autres sources sont aussi utilisées mais à moindre échelle, telle que la biomasse (*Vineyard Data Center Park*) et la géothermie (*Verne Global*).

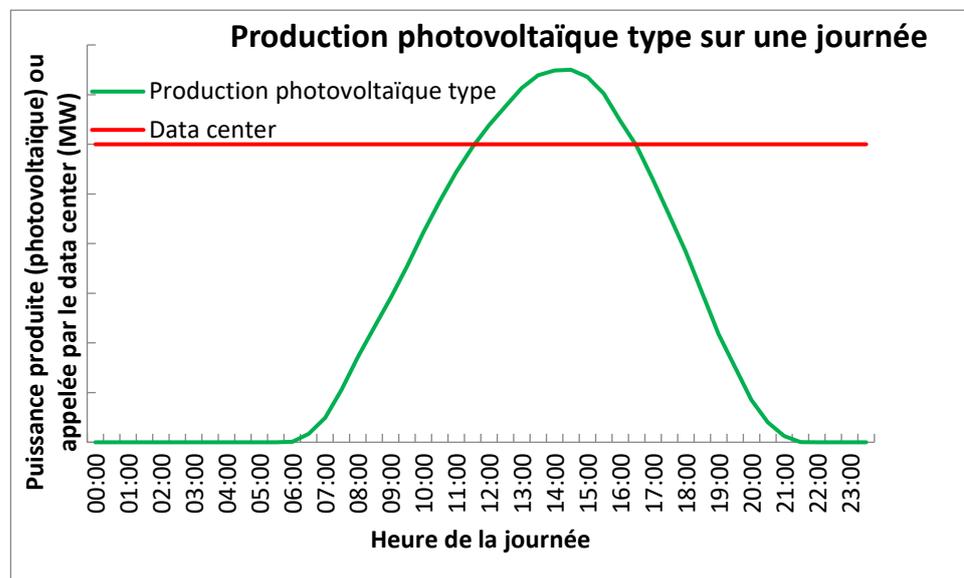


Figure 10 Production photovoltaïque type sur une journée et consommation d'un centre de donnée

Le problème de certaines des SER reste leur intermittence, alors qu'un data center doit être fourni 24/7 (Capozzoli et Primiceri, 2015). La consommation d'un data center est relativement stable, comme représentée en rouge sur la Figure 10. Par contre, elle se marie assez mal à la

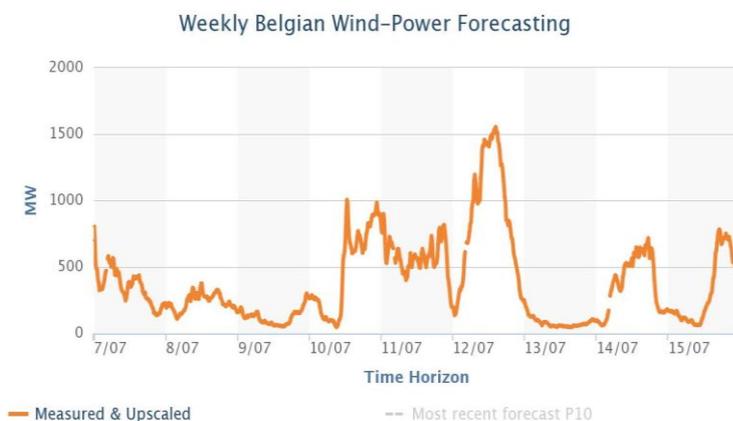


Figure 11 Production d'énergie éolienne belge sur la période du 07/07/2017 au 15/07/2017 inclus. Source Elia, 2017

production, très variable, des énergies renouvelables, telle que l'énergie photovoltaïque, représentée en vert. Le graphique illustre assez bien les alternances de la production en fonction du jour et de la nuit. De façon similaire, l'éolien fluctue en fonction des conditions externes. La Figure 11 témoigne de cette instabilité au cours d'une semaine.

À l'alternance du renouvelable, se greffe également le problème des grandes puissances requises par certains centres. À ce propos, F. Gillard exprime sa perplexité : « *Dans le renouvelable, cela veut dire qu'il faut avoir un parc solaire de milliers de capteurs [...]. La nuit ça ne marche pas, sauf si les capteurs photovoltaïques viennent alimenter des batteries [...]. L'Éolien peut-être qu'il tourne la nuit, mais il n'est pas garanti tout le temps. Comment faire pour qu'ils fonctionnent, il faut surdimensionner. Or l'énergie est difficilement stockable. [...]* La marée motrice, ça, c'est un flux continu, mais développé à petite échelle, et on n'aime pas trop mettre les data centers près dans la mer. »

Une distinction est à faire selon que le gestionnaire du data center choisit de produire sa propre énergie renouvelable ou s'il choisit de l'acheter sur le marché auprès d'un tiers (Oró *et al.*, 2015). Une production sur site propre n'est pas toujours envisageable à cause de paramètres, tels que la situation géographique, les ressources humaines, les taxes, etc. Dès lors, si les conditions ne s'y prêtent pas, une production hors site est à envisager ou l'achat d'énergie renouvelable auprès d'un producteur tiers, afin d'obtenir des certificats.

Greenpeace remarque une priorisation des sources d'énergies renouvelables dans les compagnies internet les plus importantes (Cook, G et Pomerantz, 2015). Google fut le premier à s'être engagé envers du 100% renouvelable et a, depuis, été rejoint par près d'une vingtaine de compagnies opératrice Selon l'association. Aujourd'hui, la course à un internet basé sur le renouvelable est menée par Facebook, Apple, Google. Toujours, selon le rapport de l'association, cet engouement est motivé par trois raisons. Premièrement, une demande de la part des clients se sentant concernés par des objectifs carbone ou renouvelable. Ensuite, la compétitivité des prix de l'énergie renouvelable attire de plus en plus les opérateurs. Enfin, la prise de conscience, parmi clients et salariés au sujet du changement du climatique, pousse les compagnies de l'IT à se démarquer en associant le nom de leurs entreprises avec des sources d'énergie renouvelable.

Toutefois, il faut rester vigilant par rapport aux déclarations des opérateurs. Certains annoncent un engagement manifeste, mais passés à la loupe, les chiffres perdent de leur couleur verte. Certains raccourcis/détournements sont vite pris. Par exemple, aux États-Unis, les *Renewable Energy Credits* (REC) représentent seulement les droits de propriété. Lors de l'achat d'un REC, l'électricité et l'assurance de la source sont séparées, c'est-à-dire que l'opérateur achète son électricité à son fournisseur habituel et achète le certificat REC à un autre vendeur. Le projet renouvelable et le client ne sont donc pas obligatoirement dans le même grid. En pratique, un REC basé sur de l'éolien en Iowa peut être utilisé pour se proclamer « vert » en Virginie. Or, c'est cet État, réputé pour sa production d'énergétique forte en carbone, qui va produire le courant supplémentaire pour le data center (Cook, Gary, 2012).

Si, dans certains marchés le renouvelable a progressé, l'implantation massive de centre dans des régions sans accès (ou presque) à une énergie verte augmente, tout autant que la consommation de charbon et de gaz naturel. Le faible taux de pénétration du renouvelable est aussi au cœur des préoccupations de Greenpeace, en particulier pour le marché d'Asie de l'Est où l'expansion d'internet sera probablement soutenue par une énergie fortement émettrice de GES. Cependant, en Corée notamment, des compagnies, telles que Samsung et Kakao, font pression pour avoir accès à des RES (Cook, G et Pomerantz, 2015).

Localisation

La sélection de l'emplacement d'un data center est motivée par des critères économiques (prix du terrain, coût et approvisionnement de l'électricité ...), géographiques (températures moyennes, sources d'énergie locale, phénomènes météorologiques ...) et humains (main d'œuvre ...). Le choix du lieu d'implantation aura également un impact sur le temps de réponse des services internet, ainsi que sur le coût des infrastructures (Ounifi *et al.*, 2015 ; Syntec Numérique, 2011). Idéalement, la position sera peu soumise aux catastrophes naturelles. Ces divers critères influencent le TCO⁵.

D'un point de vue extérieur, on peut considérer que la localisation a également des enjeux énergétiques, climatiques et environnementaux. En effet, comme évoqué précédemment, le choix des méthodes de refroidissement sera influencé par les températures extérieures, mais aussi par les commodités disponibles à proximité (canal, cours d'eau, lacs, mer) (Rong *et al.*, 2016). L'utilisation du *free cooling* et du *free chilling* permettent des économies d'énergie et de CO₂. Cela explique également la préférence actuelle des centres de données pour les régions nordiques à l'image du data center de Facebook à Luleå, Suède (environ 110m au sud du cercle arctique).

⁵ Total Cost of Ownership, en français Coût total de possession, est le coût global d'un bien tout au long de son cycle de vie. Il incorpore les coûts directs (matériels, équipements IT, infrastructures réseaux, etc. ou logiciels tels que le coût des licences) ainsi que les coûts indirects (maintenance, support technique, frais récurrents (consommables, électricité, loyer, etc.)).

Récupération de la chaleur

Malgré l'optimisation des consommations énergétiques ou l'usage d'énergie renouvelable, un data center émet toujours de la chaleur. Or, l'objectif même du refroidissement est d'extraire cette chaleur de l'environnement interne et de l'emmener vers l'extérieur. La capture et la réutilisation de cette chaleur perdue peuvent procurer une économie d'énergie et, ainsi, réduire les émissions des CO₂ (Capozzoli et Primiceri, 2015).

Cette valorisation peut se faire, par exemple, au travers de réseaux de chaleur locaux. Facile et ne demandant qu'une basse qualité de chaleur, sa réutilisation dans le système de chauffage du bâtiment est assez courante (*Ibid.*) Plusieurs articles de journaux font état de cette application pour le chauffage d'un bâtiment, une piscine ou un arboretum (Bouygues Construction, 2010 ; Oró *et al.*, 2015 ; Sulmonz, 2017). La société française *Stimergy* en a fait le cœur de son activité en se spécialisant dans les « chaudières numériques » c'est-à-dire un système de récupération de chaleur liquide servant à préchauffer l'eau sanitaire des bâtiments résidentiels collectifs ou tertiaires.

La récupération et la réutilisation de la chaleur émise par les serveurs sont possibles et peuvent mener à plus d'efficacité (Ebrahimi *et al.*, 2014). Deux voies sont possibles en matière de réutilisation : l'eau ou l'air (cf. Tableau 7). L'avantage de l'air est qu'il est omniprésent, gratuit et relativement aisé à déplacer. Toutefois, la convection de l'air s'avère moins efficace par rapport à celle de l'eau.

Cooling system	Cooling medium	Waste heat source	Temperature range (°C)	Recovery possible?
Remote air cooling	Air	Air	25–35	Yes
		Chilled water	10–20	Yes
Local air cooling	Air	Air	25–35	No
		Chilled water	10–20	Yes
Hybrid liquid/air cooling	30–40% Air	Air	25–35	Possibly
	60–70% Liquid	Liquid	50–60	Yes
All liquid cooling	Liquid	Liquid	50–60	Yes

Tableau 7 Températures moyennes et récupérations potentielles de la chaleur évacuée des data centers.
Extrait de Davies *et al.*, 2016.

Malgré la quantité, la chaleur récupérée est généralement de mauvaise qualité, ce qui peut freiner la mise en œuvre d'un système de récupération (*Ibid.*). En effet, la température de capture, conditionnée par les températures IT, reste souvent comprise entre 30 et 40°C (Capozzoli et Primiceri, 2015). Les réseaux de chauffage urbain sont une manière de valoriser la chaleur des centres, mais requièrent une température atteignant au minimum 70°C. Seulement, comme l'illustre la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, quel que soit le système de refroidissement, l'appui d'une pompe à chaleur est nécessaire pour atteindre la température appropriée (Davies *et al.*, 2016).

Une autre limite du système de réutilisation de la chaleur est la distance. La circulation de la chaleur sous forme d'air chaud ou d'eau chaude se fait respectivement au moyen de ventilateurs ou de pompes. Or, comme le précise F. Gillard « *tout réseau aéraulique ou hydraulique contient des pertes de charge, des frottements qui font que la pompe doit pousser l'eau et vaincre la perte de charge.* ». Assez logiquement, plus la distance entre la source d'émission et l'utilisateur est grande, plus ces pertes augmenteront. Pour contrecarrer ces dégradations, l'expert précise : « *je suis obligé de mettre de plus en plus gros tuyaux, et de nouveau des CAPEX⁶. Il y a des distances limites : 10 m pour l'air, 100m pour l'eau mais on ne sera jamais plus loin que 100m et 1km respectivement. Au-delà, c'est trop.* ». D'un point de vue énergétique, l'éloignement n'est pas plus rentable, puisqu'il faut ajouter de quoi faire fonctionner les pompes ou les ventilateurs. Il faut donc se demander si les coûts supplémentaires ne contrebalanceraient pas les bénéfices de la réutilisation. En outre, l'ajout de systèmes supplémentaires peut être source de pannes.

Il ne faut surtout pas oublier que rares sont les réutilisations possibles en périodes estivales où les températures atteignent leurs maximas. Dans le cas du chauffage urbain, il paraît inconcevable de continuer son fonctionnement si la température extérieure dépasse celle de confort. Seul un environnement devant être maintenu à une température constante élevée pourra bénéficier du système de récupération toute l'année. Si la chaleur ne peut pas être évacuée, il faut donc la rejeter ailleurs, ce qui est une source de CAPEX supplémentaire sous la forme d'installations de refroidissement.

Plus anecdotique et encore à l'étude, un dernier moyen de réutiliser la chaleur commence à s'étendre dans les data centers : la biomasse. Au Colorado, Vineyard Data Center Park prévoit d'alimenter 50MW d'infrastructure via la biomasse extraite des déchets municipaux et des biosolides du traitement des eaux (Pouchet, 2011). HP Lab a imaginé un système où le fumier de 10 000 vaches laitières pourrait subvenir aux besoins du data center et de la ferme. On assisterait donc à une sorte de colocation entre les deux bâtiments, l'un dépendant de l'autre (Sharma, R. *et al.*, 2011).

Dans les deux cas, cette biomasse nécessite un apport calorifique, soit en vue du séchage de la matière première, soit pour préchauffage de la digestion anaérobique. L'avantage est double, d'une part, la chaleur du data center est réutilisée, d'autre part, de l'énergie renouvelable est produite et injectée dans le centre. Mais une fois encore, des températures de rejets avoisinant les 60°C sont sollicitées (Ebrahimi *et al.*, 2014).

⁶ CAPEX : capital expenditure , dépenses d'investissement en français.

Facteur humain

On peut considérer qu'il existe trois d'approches en qui concerne l'amélioration des impacts des data centers. Premièrement, le levier physique englobant le choix des équipements a déjà été à plusieurs fois démontré. La deuxième approche est celle de la « gouvernance » c'est-à-dire développer un système de management se basant sur une approche *plan-do-act-check*. Cette approche facilite l'intégration des enjeux environnementaux et énergétiques dans les priorités de l'entreprise, mais permet également de sensibiliser les agents. Les indicateurs évoqués précédemment pourraient servir de tremplin à cette approche. Enfin, la dernière facette qui n'a jusqu'ici pas été développée : le facteur humain. D'ailleurs, cet aspect, rarement abordé dans la littérature, n'est apparu que lors des interviews. Le facteur humain pourrait être scindé en deux axes : d'une part, la gestion globale du data center et les actions propres à l'infrastructure ; d'autre part le monde extérieur en tant qu'utilisateur (cf. sous-chapitre Usages actuels).

Pour F. Gillard, la gestion globale du centre doit inclure tous les niveaux/phases du centre, de l'IT à la gestion, en passant par la conception. En ce qui concerne l'IT, il faut avant tout une utilisation rationnelle des équipements et du bon sens. C'est-à-dire, que des pratiques, telles que la virtualisation, représentent un pas en avant, mais il faut aussi penser plus loin que la solution « logicielle ».

Il faut aussi souligner la peur du risque qui est un facteur handicapant pour une bonne gestion. Cette aversion empêche les IT Manager de déclasser des serveurs, par crainte d'impacter une application ou un service qui potentiellement serait encore occasionnellement actif. Les administrateurs craignent également de perdre leur emploi pour avoir interféré avec une fonction commerciale, mais rarement pour avoir gardé des serveurs comateux actifs (Whitney et Delforge, 2014).

Les raisons invoquées pour ne pas éteindre ces machines sont la crainte d'endommager le matériel, d'encourir des réparations nécessitant un arrêt, de perdre des données et une détérioration du service client. Or, l'évolution des techniques et notamment l'usage de SSD Hardisk ont fortement amoindri ce genre de risque. Une réduction du pourcentage des serveurs peu ou partiellement utilisés influencerait positivement la consommation globale d'énergie. D'une certaine façon, on pourrait « mesurer » cette aversion du risque en fonction du pourcentage de machines qu'on accepte de décommissionner (Fernández-Montes *et al.*, 2015).

Cette même frayeur incite à construire des sites en fonction du pire scénario possible ; car c'est la fiabilité qui est préférée à l'efficacité énergétique. Ce qui entraîne également un suréquipement poussé par un besoin de sécurité. La même idée s'applique au parc informatique

qui est surdimensionné en froid et en énergie. En dédoublant, on puise non seulement dans de nombreuses ressources pour la fabrication, mais on laisse des équipements allumés/en veille, et donc consommant de l'énergie, sans qu'ils soient utiles (Oró *et al.*, 2015). D'expérience, F. Gillard dénonce aussi l'incompétence de certains membres du personnel, plutôt bien placés dans la hiérarchie, qui les poussent, une fois encore, à prendre toutes ces précautions.

Une bonne gestion implique également une remise en question constante des actions, mais également une vue globale telle qu'un tableau de bord des différents aspects du centre.

Application : la rénovation du data center de l'ULB

La section suivante se propose comme un exercice d'application théorique des pratiques décrites ci-dessus. L'idée sous-jacente serait d'envisager si les concepts développés pourraient s'appliquer (en théorie) au cas de l'ULB qui souhaite rénover son centre de données. Dans cet objectif, un entretien a été effectué avec Mme Karin Doguet, Directrice Informatique – CIO du centre informatique de l'ULB, dans le cadre de la rénovation du data center. Les propositions faites se veulent être des pistes exploratoires qui, pour une application concrète, devraient être soumises à des professionnels, tant sur le plan technique que financier.

Le centre de données « ulbiste » abrite l'informatique « de base », c'est-à-dire les services à l'attention des étudiants, la comptabilité, l'administration, etc., mais également le centre de calcul scientifique, qui représente la plus grosse partie des installations. Ce dernier, en commun avec la VUB, est une plateforme, « *un monstre de calcul* » dont la puissance de calcul est estimée à 70 gigaflops, consommant énormément d'énergie et par extension de refroidissement.

Le bâtiment accueillant les infrastructures est ancien (une quarantaine d'années) et ne correspond plus aux normes actuelles, tant du point de vue architectural que conceptuel. À ce sujet, Mme Doguet déclare : « *d'un point de vue purement informatique, c'est carrément une hérésie ! [...] Et comme cela était conçu selon les concepts du temps jadis, et bien forcément on cumule tous les défauts possibles en matière environnementale.* ». Ensuite, le directeur des infrastructures pointe du doigt le montant élevé de la facture électrique du service informatique. Enfin, la salle des machines commençant à atteindre un taux de remplissage maximal, pousse à envisager une rénovation du centre de données. Cette modernisation gommerait dans la foulée les défauts du passé en termes d'énergie et de gestion de la chaleur produite. Par ailleurs, le projet devrait tendre vers quelque chose d'innovant afin de pouvoir éventuellement appeler des subsides extérieurs. L'intention est de viser une sorte de « *passivité énergétique [...]. On a tout intérêt à bien maîtriser ce genre de coûts importants. Si on les réduisait, on pourrait faire*

d'autres choses ». Au vu de la puissance de calcul disponible s'ajoute un nouveau souhait : rendre cette puissance accessible afin que la communauté extérieure puisse à son tour bénéficier des performances vacantes, « *si on a de la capacité de calcul disponible, la louer à petit prix pour des initiatives équivalentes qui permettent de mieux régler l'éclairage dans la rue, smart cities, objets connectés, que tout le monde soit un peu plus vert dans l'histoire* ».

Au stade actuel des discussions, le déménagement vers un nouvel endroit peut être envisagé. Cette solution simplifierait le processus puisque la construction d'un nouvel espace permet de se doter des meilleures technologies et techniques disponibles. De plus, comme décrit précédemment, le choix de la localisation sera crucial, car il facilite la mise en place de certaines bonnes pratiques. À l'évidence, l'espace actuel et les possibilités sont assez limités sur le campus du Solbosch, contrairement à ceux de la Plaine ou Gosselies. Cependant, le déménagement requiert des investissements financiers importants. Ajoutons également que le partenariat avec la VUB rend le choix de la localisation plus sensible pour des raisons de politiques internes.

Qui plus est la possibilité d'externaliser la gestion n'a pas été retenue en raison de contrainte budgétaire ainsi qu'un rapport qualité-prix jugé satisfaisant au sein de l'ULB. Pourtant, Mme Doguet juge qu'un centre idéal « *serait virtuel, plus physiquement ici, parce que justement c'est dans les grands data centers que vous pouvez implanter mieux et d'une pierre deux coups les améliorations qui font que la solution serait écologiquement acceptable[...] si effectivement ces choses-là sont faites auprès de fournisseurs qui s'engagent à le faire vraiment, la solution est clé sur porte et l'objectif est atteint. Certains prestataires extérieurs le font très bien et depuis plusieurs années. C'est la meilleure manière d'atteindre la qualité de cette empreinte écologique* ». Obtenir un parc plus important pourrait passer par la mutualisation entre universités. La directrice du centre informatique déplore que cette idée soit inenvisageable « *(mais) on est compétiteur, alors qu'on fait tout de même la chose dans les universités : la gestion des étudiants, l'administratif, le calcul scientifique* ».

En supposant que le centre de données reste à son emplacement actuel sur le campus du Solbosch, certaines limites apparaissent d'ores et déjà quant au choix des bonnes pratiques possibles à mettre en œuvre.

Un premier geste à adopter concerne les équipements IT. La directrice du centre informatique affirme qu'« *actuellement, on a toujours tendance, nous, à essayer de laisser vivre notre matériel le plus longtemps possible, mais c'est une mauvaise idée pour l'environnement* ». Il est vrai que les machines plus anciennes ont tendance à se montrer plus énergivores que les technologies actuelles. Inversement, un remplacement « trop » fréquent peut poser la question

de la multiplication des équipements et de leur fin de vie. Le renouvellement des machines appelle à la fabrication de nouveaux dispositifs et une intensification de l'usage des ressources. En outre, qu'advierait-il des appareils usagés ? Seraient-ils reconvertis vers un autre usage, seraient-ils mis au rebus ou alors dirigés vers un centre de recyclage. Parallèlement, ça serait également une opportunité d'opter pour du matériel « plus respectueux des ressources », cela pourrait faire l'objet d'un critère lors de la sélection des achats.

En ce qui concerne les indicateurs, on repart d'une page blanche puisqu'actuellement la performance est jugée sur « *les consommations électriques, l'eau et autres fluides. On n'a pas quelque chose de sophistiqué* ». L'intégration du PUE permettrait d'avoir une perception globale de l'efficacité énergétique du centre. En cas d'un dysfonctionnement dans l'infrastructure, une valeur anormale de l'indicateur serait un signal d'alarme à condition qu'un contrôle régulier soit mis en place. En l'état, la simple consommation électrique ne suffit pas à calculer le PUE en entier, mais pourrait servir à déterminer la consommation totale d'énergie requise par l'ensemble de l'infrastructure. Actuellement, le bâtiment O héberge le centre calcul ainsi que la cellule réseau et la cellule web, il faudra en tenir compte en définissant les limites de l'indicateur. Si on considère que le bâtiment est défini comme ayant un usage mixte (IT+ non IT), des mesures supplémentaires devront être prises ou limitées à certaines zones. Des exceptions seront applicables selon les recommandations du Green Grid.

Pour obtenir le dénominateur du ratio, il convient d'être méthodique. Se contenter de multiplier la consommation théorique d'un serveur par le nombre d'équipements, amplifie les marges d'erreur. En agissant de la sorte, on obtient un PUE non représentatif et très approximatif. Des prises de mesures cohérentes sur tous les équipements IT fourniront des données exactes pour le calcul (cf. Power Usage Effectiveness). Naturellement, afin d'obtenir un PUE fiable, il est nécessaire d'intégrer des instruments de mesure précis aux bons endroits, et ce dès la phase d'élaboration du projet. Selon les choix du design, le WUE pourrait également être utilisé ainsi que le CUE pour obtenir une indication générale de la pression environnementale qu'exercerait le centre. Dans la configuration existante, la mise en place d'appareils de mesures ne se fera que moyennant des coupures de système. L'équipement et l'installation requièrent un engagement financier qu'il serait bon de planifier au moment de la rénovation.

Concernant le mix énergétique utilisé et ses émissions de GES associées, l'énergie actuellement fournie est loin d'être verte. Pour augmenter la part d'énergie moins émettrice de CO₂, un accord devrait être passé avec le fournisseur. Au vu de la situation présente, il serait également difficilement envisageable que le centre puisse fonctionner uniquement sur base d'une énergie renouvelable produite localement. En effet, le campus du Solbosch n'est pas un emplacement propice pour une éolienne ou de la biomasse. Si la mise en place de panneaux photovoltaïques

est possible sur les toits des bâtiments, ils seraient sans doute insuffisants pour couvrir les besoins énergétiques du data center. De plus, le centre devant être disponible à tout moment du jour mais aussi de la nuit, il faudrait soit des panneaux photovoltaïques suffisamment adaptés afin de charger une batterie assurant la consommation nocturne, soit repasser sur l'énergie du grid durant cette période.

À propos du refroidissement, si le confinement des allées chaudes ou froides n'est pas encore en application, ce premier geste pourrait s'avérer utile, car il permet, dans un premier temps, de réduire les courts-circuits d'air et d'optimiser le refroidissement. La prise en compte des recommandations de l'ASHRAE, en fonction du matériel déjà installé, autoriserait d'augmenter éventuellement le niveau de température tolérée dans la salle IT et ainsi réduire les besoins en refroidissement.

Ensuite, on pourrait envisager d'installer un système de free cooling. Selon les cartes publiées par le Green Grid (Harvey, s.d.), le climat belge permettrait potentiellement sous des conditions idéales environ 8000 heures annuelles de free cooling soit 91% de l'année. Étant situé dans la capitale, le data center pourrait toutefois être soumis à un effet d'îlot de chaleur urbain⁷, mais également à la pollution atmosphérique. En conséquence, il faudra investir dans un système de traitement de l'air adapté, ou bien opter pour du free chilling. Bien que ce dernier représente une installation et une étape supplémentaire, par conséquent des pertes, il pourrait contourner les restrictions de qualité d'air. Durant l'entretien mené avec F. Gillard, l'existence d'une sorte de machine froid hybride a été mentionnée. Cette dernière pourrait être avantageuse dans le cas présent, puisque l'unité de production du froid intègre elle-même les principes du free cooling. De manière réductrice, lorsque la température extérieure est inférieure à une valeur donnée, au lieu de faire tourner le froid mécanique, on fait tourner le même ventilateur pour faire passer l'air frais extérieur sur une batterie supplémentaire. On a simplement dévié l'eau dans la machine froide.

En posant comme hypothèse que la température souhaitée au niveau des serveurs ne dépasse pas 25°C, le free cooling serait a priori envisageable dès l'instant où la température extérieure serait inférieure à cette valeur. Or, selon les données de l'IRM (cf. Tableau 8) seulement 28,8 jours (en moyenne) ne correspondent pas à ce critère soit 8% de l'année. De même, si on descend la limite à 20°C, l'impossibilité de recourir au free cooling s'élève à 90,1 jours (33% de l'année) dans une période de mars à octobre. Les périodes estivales étant défavorables à l'emploi de cette technique, il faudra donc nécessairement prévoir un système de

⁷ Le phénomène d'îlot de chaleur urbain signifie que la température de l'air est plus élevée dans les villes que dans les zones rurales avoisinantes. Une étude a démontré l'existence de cette manifestation en région bruxelloise (Hamdi et Van de Vyver, 2011).

refroidissement distinct. Somme toute, l'intégration d'un système de refroidissement intégrant de l'air frais extérieur semble être un concept profitable pour la rénovation du centre de données de l'ULB.

	année	janv.	févr.	mars	avr.	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.
Température moyenne (°C)	10.3	3.1	3.4	6.4	9.4	13.4	16.1	18.3	18.1	14.9	11.0	6.7	3.7
Température maximale moyenne (°C)	14.3	5.7	6.6	10.4	14.1	18.1	20.7	23.1	22.8	19.3	14.9	9.6	6.1
Température minimale moyenne (°C)	6.9	0.6	0.5	3.0	5.2	9.1	11.8	13.9	13.4	10.8	7.7	4.0	1.4
Degrés-jours 15/15 (°C) ⁽¹⁾	1964.4	361.9	320.1	258.1	169.1	73.8	24.1	3.9	4.3	34.8	125.1	245.4	343.7
Jours de printemps ⁽²⁾	90.1	0	0	0.4	3.4	10.5	16.0	23.7	23.4	10.5	2.3	0	0
Jours d'été ⁽³⁾	28.8	0	0	0	0.4	2.7	5.5	9.9	8.0	2.1	0.1	0	0
Jours de chaleur ⁽⁴⁾	4.3	0	0	0	0	0.2	0.5	2.0	1.7	0	0	0	0
Jours d'hiver ⁽⁵⁾	7.5	2.9	2.0	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0.4	1.9
Jours de gel ⁽⁶⁾	47.7	12.0	11.5	6.5	1.4	0.1	0	0	0	0	0.6	4.7	10.9

(1) **Degrés-jours 15/15:** Cumul moyen de la différence entre un seuil de 15°C et la température journalière moyenne lorsque celle-ci est inférieure à 15°C.

(2) **Jours de printemps:** Nombre moyen de jours où la température maximale égale ou dépasse 20°C.

(3) **Jours d'été:** Nombre moyen de jours où la température maximale égale ou dépasse 25°C.

(4) **Jours de chaleur:** Nombre moyen de jours où la température maximale égale ou dépasse 30°C.

(5) **Jours d'hiver:** Nombre moyen de jours où la température maximale est inférieure à 0°C.

(6) **Jours de gel:** Nombre moyen de jours où la température minimale est inférieure à 0°C.

Tableau 8 Statistiques climatiques des communes belges. Station Ixelles INS21009, données couvrant la période de référence 1981-2010. Extrait de IRM, s.d. .

Enfin, vis-à-vis de la réutilisation de la chaleur, il convient d'abord d'estimer l'intervalle de température récupérable soit sous forme d'air chaud soit d'eau chaude. Le résultat limitera les solutions de réutilisation applicables. Par exemple, avec des serveurs à 40°C, on ne parviendra jamais à chauffer de l'eau à 80°C.

Ensuite, la source d'utilisation de chaleur doit être située à proximité du data center. Au plus loin on transporte la chaleur, au plus il y a des pertes de rendements à compenser par l'augmentation de puissance de la pompe. Dans le cas présent, la chaleur pourrait éventuellement resservir dans les systèmes de chauffages de bâtiments avoisinants, mais cela n'est peut-être pas des plus valorisant puisqu'il y a déjà un système centralisé de chauffage et qu'il n'y a, a priori, pas de besoin en eau chaude sanitaire. Par contre, dans un rayon de moins de 100m se trouvent la salle de sport ainsi que les serres du Service Botanique. Dans cette perspective, la récupération pourrait s'intégrer à la salle de sport sous forme de chauffage de la salle principale et des locaux adjacents ou d'eau chaude sanitaire. Durant l'été, les salles ne nécessiteraient pas de chauffage, mais les douches seraient toujours opérationnelles. Dans l'optique des serres, la proximité est un avantage majeur. De plus, cela garantirait une température minimum constante durant toute l'année et d'imaginer la possibilité d'une serre tropicale où la température avoisinerait les 18°C minimums voir plus selon les espèces sélectionnées. Par ailleurs, ces deux options possèdent également un dernier atout : la visibilité. Il est concevable de mettre en avant le procédé en affichant volontairement une partie de la

canalisation du réseau. Un tuyau coloré en vert rejetant de la chaleur dans la salle de sport ou dans les serres avec une référence vantant un data center vert. Mme Doguet précisait à ce sujet que « *l'informatique administrative est moins connue. On fait peu de pub, on est assez caché. C'est un des aspects avec lequel on pourrait ouvrir nos activités à des réflexions et publicités extérieures qui permettrait de faire passer de nouvelles idées plus facilement dans les conseils de décisions, administrations et etc.* ».

En chauffant directement la salle de sport ou les serres, on pourrait réutiliser la chaleur des serveurs sans devoir réaliser un investissement trop important, car le système n'aurait besoin que de pousser l'air. De cette façon, quelques ventilateurs suffiraient pour vaincre la pression entre les deux systèmes. Cette solution s'avérerait encore plus commode particulièrement en hiver (cf **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Cependant, cette saison est également le moment propice au free cooling/free chilling. Il est donc nécessaire de poser la question de l'utilité de posséder les deux systèmes, puisqu'en obtenant un refroidissement des plus optimal en hiver, la chaleur rejetée diminue. Par conséquent, la contribution du centre de données au chauffage de la salle s'amointrit.

Évidemment, ces propositions seront déterminées par les besoins des usagers potentiels. Les serres ont-elles besoin d'être exploitées sous cette chaleur ? Le hall sportif est-il assez chaud pour permettre une activité physique normale sans addition de chauffage ? Cette réflexion doit donner lieu à une concertation avec les acteurs extérieurs.

En conclusion, les possibilités de transformations évoquées peuvent, pour la plupart, s'appliquer théoriquement au centre de données de l'ULB. Mis à part une source locale d'énergie renouvelable, des meilleures pratiques en termes d'IT, de refroidissement et de récupération de la chaleur sont concevables. Cependant, la concrétisation de ces solutions devra être analysée par un expert au sujet de la faisabilité technique, mais devra également être soumise en fonction des disponibilités budgétaires. Certes, un certain temps sera nécessaire avant de constater le retour sur investissement de la rénovation du data center mais les gains énergétiques effectués se reflèteront à terme sur la facture. Ces bénéfices pourront alors alimenter un autre budget. De plus, la modernisation du centre devrait le placer dans une vision à plus long terme qui envisagerait des composants « intelligents » permettant de piloter le réseau ainsi que la gestion de bâtiments.

Conclusion

Nous avons dressé un état des lieux des data centers en passant en revue leur infrastructure, leurs impacts, les divers indicateurs et pointé diverses bonnes pratiques au secteur. De par leur activité, les data centers sont générateurs d'impacts environnementaux, climatiques et énergétiques. Le secteur doit faire face à ces défis et y réagir, mais aussi anticiper car les tendances normatives annoncées pour le futur sont contraignantes pour la pérennité du secteur. Il semble que les solutions mises en œuvre ne soient pas, de prime abord, menées par l'envie de prendre directement à bras le corps ces enjeux, mais plutôt par des aspects économiques. Il existe pourtant des réponses.

En ce qui concerne l'approvisionnement énergétique des centres, la facture électrique sera toujours importante. Cependant, une bonne gestion des demandes peut réduire ces frais mais aussi la consommation. Cela passe notamment via l'usage de l'indicateur PUE. Bien que sa valeur soit influencée par des facteurs externes, on retiendra de ce ratio, la vision globale qu'il nous donne sur le centre. Le dénominateur peut être minimisé en favorisant un équipement IT plus efficace mais également en ayant recours à la virtualisation. Quant au numérateur, il est aussi améliorable. Bien que les équipements non-IT consomment toujours une certaine quantité d'énergie, il est possible d'optimiser le centre afin de limiter ces « pertes ». Le refroidissement est la partie non-IT la plus importante, que ce soit en termes de consommation ou en termes de nécessité. Si la révision du refroidissement n'est pas toujours possible financièrement ou logistiquement ; le confinement des allées est une manière moins dispendieuse de tirer le meilleur parti de la situation. Comme expliqué, les différentes infrastructures influent les unes sur les autres. Parallèlement, une optimisation du système de refroidissement ou de l'équipement IT améliore l'efficacité énergétique du data center. De plus, un data center, comme n'importe quel bâtiment, est consommateur d'énergie dès sa construction. A priori, en considérant toute la durée de vie d'un centre, l'énergie grise contenue dans les matériaux, comme le ciment, ne détrônerait pas l'énergie consommée lors de la phase opérationnelle. Toutefois, les équipements IT utilisent également beaucoup d'énergie pour leur fabrication et transport. Leur renouvellement pèse également dans la balance, si on estime qu'un serveur a une durée de vie de 3 à 5 ans.

La consommation énergétique est une chose, mais il ne faut pas non plus oublier l'origine de sa production. La production d'énergie est fortement liée au contexte local (malgré certains accords). Les émissions GES en particulier de CO₂ sont importantes dans un contexte de lutte contre le changement climatique. La production d'énergie renouvelable sur le site des data

centers s'avère plus avantageuse pour les opérateurs que l'achat auprès de producteurs tiers. De plus cela offre une plus grande part de renouvelable à l'échelle locale. Malheureusement, cette solution n'est pas toujours techniquement possible. Si l'énergie renouvelable a des avantages, elle possède aussi ses inconvénients. Certaines sources ne peuvent approvisionner en permanence, car elles sont soumises à alternance jour/nuit ou aux conditions météorologiques. En surdimensionnant ces installations de production, il est possible d'utiliser la production excédentaire pour recharger des batteries, mais dans ce cas, la rentabilité du système doit être réévaluée. Il est probable que seuls des grands opérateurs puissent recourir à ce type de solution et être relativement autonomes par rapport au grid. L'indicateur CUE, peut aider les centres à adopter une approche intégrée concernant leurs émissions de CO₂ /kWh. Seulement, il n'est qu'une facette de la problématique puisqu'il ne prend pas en compte le cycle de vie du data center et des équipements. Un bilan des GES livre déjà une idée plus précise des émissions globales des centres de données, même s'il reste différent d'une analyse de cycle de vie. Ce bilan permet de discerner les principaux postes d'émissions en prenant en compte autant les émissions directes qu'indirectes. Par exemple, il inclut les rejets liés au transport qui n'apparaissent pas en analysant simplement le CUE.

Le stress environnemental causé par les centres n'est pas l'aspect le plus évident aux yeux des opérateurs. Pourtant, certains d'entre eux commencent à intégrer divers aspects comme la gestion de l'eau. Incarnée dans le WUE, l'utilisation de l'eau sera plus ou moins forte d'un centre à l'autre. La consommation d'eau en vue de la production électrique n'est pas à proprement parler le « souci direct » des opérateurs. Mais, dans les régions où la sécheresse se fait ressentir, c'est un point à ne pas négliger.

Les problématiques liées à l'utilisation des ressources entrant dans la composition des équipements n'ont pas été abordées car il est difficile pour les opérateurs de contrôler directement cet aspect. Toutefois, exiger pour tout achat, une fiche signalétique du produit renseignant une évaluation environnementale, représente un pas dans la bonne direction. Cette démarche participe aussi à l'effort de conscientisation des impacts environnementaux auprès de fabricants, mais peut également être intégrée dans un cahier des charges. De plus, des actions peuvent être menées comme l'achat responsable d'équipements, le recyclage, la substitution et la réduction des besoins en ressource.

Les indicateurs proposés dans ce mémoire sont des pistes à explorer quant à une vision intégrée des impacts des data centers. Ensemble, ils constituent un tour d'horizon quasi global. Cependant, ils possèdent chacun leurs limites. Le PUE semble avoir été largement adopté par le secteur, à l'inverse du CUE et WUE comme le montre l'enquête exploratoire. Peut-être que ces derniers sont aussi utilisés, mais en tout cas, ils ne sont pas rendus publics.

L'enquête exploratoire a été marquée par un manque de transparence des opérateurs. L'échantillon proposé n'est pas des plus représentatif au niveau de la localisation, la difficulté fut pour l'Asie, le manque d'interlocuteurs et les informations limitées sur les versions anglaises des sites internet. Une dernière complication est la rapidité de mutation du secteur. Par exemple, Jones *et al.* (2013) citaient l'exemple de *Telecity*, opérateur anglais assez exemplaire. Entre-temps, celui-ci a été racheté par *Equinix* et de ce fait les caractéristiques communiquées pour le premier ne sont plus disponibles.

Passé cette difficulté, lors de l'analyse de données, il a également fallu prendre en compte l'aspect commercial des données fournies et le potentiel greenwashing. Par exemple, certaines sociétés annoncent un engagement pour de l'énergie 100% renouvelable. Cela ne signifie pas pour autant que ladite société le soit déjà à 100%, ni qu'elle soit autonome par rapport aux sources d'énergies fossiles. Ce chiffre est juste un engagement. Au contraire, toutes ne précisent pas si leur énergie provient de REC ou autres contrats d'achat. D'ailleurs, certaines jouent avec les mots : énergie renouvelable, propre, verte, carbon neutral. La définition n'est pas pareille pour chaque opérateur. *DataGryd* met en avant sous la rubrique impact environnementale, son « *incredible power generation and access to broadband data networks coupled with a microgrid power plant that uses cogeneration technology to reduce operating costs to users* »(DataGryd, s.d.). Ce que la société ne précise pas dans la continuité de son paragraphe, c'est que leur source d'énergie est du gaz naturel. À l'inverse, d'autres sociétés sont limpides par rapport à leur engagement. Par exemple, Facebook indique clairement son plaidoyer pour un approvisionnement 100% renouvelable, mais précise également qu'en 2016, seulement 43% étaient atteints. Il en va de même pour Google, qui mentionne clairement sa position : « *Nous achetons de l'énergie propre au moyen de contrats de rachat d'énergie, car ces derniers financent de nouvelles énergies propres dès aujourd'hui. Ils favorisent également le développement à long terme de l'industrie des énergies renouvelables.* » (Google, 2017a) .

Le PUE est un autre exemple où chaque mot compte. Les valeurs annoncées sont parfois juste sorties de leurs contextes. Mais, certains opérateurs prennent tout de même des précautions. Ils détaillent alors si la valeur est celle calculée en phase design, si elle est un objectif ou bien une valeur opérationnelle. *Equinix* va même plus loin, en précisant que pour ses anciens centres, le PUE est calculé sur un niveau 1 et un niveau 3 pour les plus récents.

Sur les 100 sociétés sondées, seulement la moitié mettent plus ou moins en avant des aspects d'efficacité énergétique, d'émissions de CO₂, d'énergie renouvelable, de bonnes pratiques... On ne peut donc pas conclure que les pressions soient si importantes au point d'imposer au secteur un changement à 180° degrés. L'autre moitié est composée soit de sociétés ne détaillant pas ce genre d'information, soit que les seules informations concernant leurs centres sont des

articles de presse. Aucun lien n'a pu être fait entre la « tendance verte » de certains opérateurs et leur chiffre d'affaires, leur localisation ou encore le type de produits proposés. Par contre, le fait qu'aucune information ne soit mentionnée ne signifie pas pour autant que les centres ne sont pas sensibilisés. Au contraire, certains participent au Code de Conduite européen ou ont reçu la certification LEED. Or, l'obtention de ces derniers est liée au respect de certains critères minimums de bonnes pratiques. Dans le cas du LEED, des points sont attribués sur le critère « eau », le centre doit donc présenter un niveau de conformité quant à cette matière sous peine de ne pas recevoir la certification. Pour autant, il n'y aura pas toujours mention de l'eau sur le site web des opérateurs certifiés.

En conclusion, il existe deux façons de parvenir à un data center plus respectueux de l'environnement : intégrer des éléments « verts » lors de la phase d'élaboration et construction du data center, et « verdir » leur opérationnalisation. Ces deux chemins ne sont pas exclusifs. Au contraire, une gestion intégrée du centre implique la complémentarité de ces deux voies. Cela ne doit pas pour autant empêcher de mener une réflexion par rapport à nos besoins en données. Actuellement, on ne peut affirmer que les utilisateurs soient conscients des mécanismes fonctionnant en arrière-plan de chaque échange de données. Bien que les grands opérateurs comme Facebook et Google fassent la promotion de leurs infrastructures plus « vertes », et que Greenpeace publie régulièrement à ce sujet, les data centers sont peu connus du grand public. Il faut conscientiser les utilisateurs par rapport aux impacts de leurs pratiques habituelles.

Pour terminer, il faut également s'interroger sur les tendances futures. L'usage de ces services augmente rapidement et, malgré des efforts en termes d'efficacité énergétique, la consommation mondiale d'énergie des data centers continuera d'augmenter. Grâce aux progrès technologiques, il devient possible de construire des serveurs de plus grande capacité et de plus en plus petits, mais si cette miniaturisation entraîne des gains de place, le dégagement calorifique de chaque serveur est démultiplié.

Une première étude datant de 2013 s'était concentrée sur la vision développée par les sociétés opératrices anglaises (Jones *et al.*, 2013). À l'époque, les résultats ont montré que les informations publiées par les compagnies sont très limitées en particulier celles concernant un quelconque programme de développement durable. Si les données recueillies se concentraient principalement sur l'environnement, les auteurs remarquaient qu'elles étaient peu spécifiques et faisaient peu état des émissions de CO₂, de l'utilisation l'eau, de la gestion des déchets ou encore d'un usage durable des ressources. On pourrait espérer que 4 ans plus tard, les pratiques aient évolué puisque le *business as usual* est reconnu pour être non durable. Or, l'enquête exploratoire arrive à des conclusions similaires à celles de Jones et ses co-auteurs. L'accès aux

informations est toujours limité. Bien que certains opérateurs soient plus loquaces par rapport à leur impact énergétique et climatique, le stress environnemental est encore négligé. À première vue, il ne semble pas que ces quatre dernières années furent porteuses d'un nouveau souffle.

Puisque la révolution digitale coïncide avec l'intérêt grandissant pour les causes climatiques et environnementales (Horner, N. C. *et al.*, 2016), La synergie entre les deux domaines pourrait avoir des effets positifs avec l'émergence d'une réflexion autour du *green IT*. Il serait intéressant de se questionner quant à la place des data centers dans cette dynamique. Il semblerait que le monde de l'IT ait été secoué par plusieurs vagues. La première, le *green computing*, est principalement axé sur l'utilisation de l'énergie par les équipements techniques et la diminution de l'empreinte carbone. L'attention était alors centrée sur la diminution des coûts sans engager le client. Alors que la deuxième vague, *sustainable IT*, tente de dépasser la simple utilisation de l'électricité (Harmon et Auseklis, 2009). Cette nouvelle étape vise une approche compréhensive, portant au-delà des considérations actuelles. Dans le cadre de ce mémoire, les data centers examinés semblent, pour la plupart, restés bloqués à la première vague. Désormais, il faudrait voir si les opérateurs arrivent à sortir du carcan de l'efficacité énergétique pour implanter dans leurs entreprises des pratiques de développement durable visant tout aussi bien l'entreprise que l'extérieur. Le cas échéant, il serait intéressant de comprendre les raisons de ce blocage mais aussi les solutions pouvant y être apportées.

Glossaire

ADEME	Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AHU	Air Handling Unit
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
AWS	Amazon Web Service
CAPEX	CAPital EXpenditure
CRAC	Computer Room Air Conditioning
CEF	Facteur d'émission de carbone
CEN	Comité Européen de Normalisation
CENELEC	Comité Européen de Normalisation en Electronique et en Electrotechnique
CIO	Chief Information Officer
CO ₂ eq.	Équivalent CO ₂
CPU	Central Processing Unit
CUE	Carbon Usage Effectivness
DEEE	Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques
EPA	Environmental Protection Agency
ETSI	European Telecommunication Standards Institute
GES	Gaz à effet de serre
HPC	High Performance Cluster
IoT	Internet of Things
IT	Information Technologie
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
PDU	Power Distribution Unit
PUE	Power Usa Effectivness
Rack	Baie
REC	Renewable Energy Credits
SER	Source d'Energie Renouvelable
TCO	Total Cost of Ownership
TIC	Technologie de l'Information et de la Communication
TRE	Taux de Retour Energétique
ULB	Université Libre de Bruxelles
UPS	Uninturptibble Power Supplies
VUB	Vrije Universiteit Brussel
WUE	Water Usage Effectivness

Bibliographie

- alifActon, M., Bertoldi, P., Booth, J., et al. (2017). *2017 Best Practice Guidelines for the EU Code of Conduct on Data Centre Energy Efficiency – Version 8.1.0* (JRC technical report No. EUR 28426 EN). Joint Research Center.
- ADEME. (2012). *Réalisation d'un bilan de gaz à effet de serre* (Guide sectoriel 2012).
- ADEME. (2014). Internet, courriels : réduire les impacts.
- ADEME. (2017). La Face Cachée du Numérique.
- Alliance Green IT, France Datacenter et Gimélec. (2016). *Les indicateurs de performance énergétique et environnementale des data centers* (Livre Blanc) (p. 75).
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc (dir.). (2011). *2011 Thermal Guidelines for Data Processing Environments - Expanded Data Center Classes and Usage Guidance. White Paper*, 45.
- Arregoces, M. et Portolani, M. (2004). *Data center fundamentals*. Indianapolis, Ind : Cisco Press.
- Avelar, V., Azevedo, D., French, A., et al. (2012). PUE: a comprehensive examination of the metric. *White paper*, 49.
- Azevedo, D., Belady, C. et Pouchet, J. (2011). Water Usage Effectiveness (WUETM): A Green Grid Data Center Sustainability Metric. *White paper*, 35, 12.
- Barbier, A., Thoraval, G. et Arnould, F. (2016). L'Efficacité Energétique dans les Data Centers Etude gisement du parc français. ENR'Cert.
- Belady, C. (dir.). (2008). GREEN GRID DATA CENTER POWER EFFICIENCY METRICS: PUE AND DCIE. *White Paper*, 6, 15.
- Belady, D. (2010). Carbon usage effectiveness (CUE): a Green Grid data center sustainability metric. *White Paper*, 32, 8.
- Berners-Lee, M. et Clark, D. (2010, 21 octobre). What's the carbon footprint of ... email? *The Guardian*. Récupéré de <https://www.theguardian.com/environment/green-living-blog/2010/oct/21/carbon-footprint-email>
- Bihouix, P. et Guillebon, B. de. (2010). *Quel futur pour les métaux?: raréfaction des métaux: un nouveau défi pour la société*. Les Ulis : EDP sciences.
- Blackburn, M. (dir.). (2010). The Green Grid Data Center Compute Efficiency Metric DCcE. *White Paper*, 34, 15.
- Boisseau, A. (2012). Un nouveau centre de calcul à l'EPFL. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Botella, D., Guy, P., Labaume, T., et al. (2015). Baromètre des pratiques Green IT des entreprises en France.
- Boucheix, F., Jegou, A. et Christin, C. (2011). Etude d'un Data Center en Phase d'Exécution.
- Bouygues Construction. (2010). *Un laboratoire du high-tech vert créé par TelecityGroup et ETDE. Bouygues Construction*. Récupéré le 30 juillet 2017 de <http://blog.bouygues-construction.com/construire-durablement/un-laboratoire-du-high-tech-vert-cree-par-telecitygroup-et-etde/>
- Brady, G. A., Kapur, N., Summers, J. L., et al. (2013). A case study and critical assessment in calculating power usage effectiveness for a data centre. *Energy Conversion and Management*, 76, 155-161. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.035>
- Breuil, H., Burette, G. et Flüry-Hérard, B. (2008). *Rapport Tic et Développement Durable* (No. 005815-01). Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire.

- Brown, R. (2008). Report to congress on server and data center energy efficiency: Public law 109-431. *Lawrence Berkeley National Laboratory*.
- Bruxelles Environnement. (2014, 13 novembre). *Emissions de gaz à effet de serre*. Bruxelles Environnement. Récupéré le 13 juillet 2017 de <http://www.environnement.brussels/etat-de-lenvironnement/synthese-2011-2012/climat/emissions-de-gaz-effet-de-serre>
- Buyya, R., Beloglazov, A. et Abawajy, J. (2010). Energy-Efficient Management of Data Center Resources for Cloud Computing: A Vision, Architectural Elements, and Open Challenges. Communication présentée à 2010 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications, Las Vegas, USA.
- California Department of Water Resources. (2015). California's most significant droughts: Comparing historical and recent conditions. Récupéré de <http://www.water.ca.gov>
- Callou, G. (2013). *Assessment to support the planning of sustainable data centers with high availability*. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brésil. Récupéré de <http://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/12262>
- Callou, G., Ferreira, J., Maciel, P., et al. (2014). An Integrated Modeling Approach to Evaluate and Optimize Data Center Sustainability, Dependability and Cost. *Energies*, 7(1), 238-277. <https://doi.org/10.3390/en7010238>
- Capozzoli, A. et Primiceri, G. (2015). Cooling Systems in Data Centers: State of Art and Emerging Technologies. *Energy Procedia*, 83, 484-493. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.168>
- Carr, R. (2015). Data Center Owners, Developers Adopt Green Methods. *National Real Estate Investor*. Récupéré de <http://search.proquest.com.ezproxy.ulb.ac.be/docview/1680117010/citation/8F8DCAF746E4759PQ/1>
- CEN/CENELEC/ETSI Coordination Group on Green Data Centres. (2015). *Review of standardisation activities Energy Management and Environmental Viability of Data Centres (2 nd edition)*.
- CEN/CENELEC/ETSI Coordination Group on Green Data Centres. (2016). *Standardisation landscape for the energy management and environmental viability of data centres (3 rd Edition)*.
- CENELEC. (s.d.). *Project : EN 50600-2-5:2016. CLC/TC 215 Electrotechnical aspects of telecommunication equipment*. Récupéré le 28 juillet 2017 de https://www.cenelec.eu/dyn/www/f?p=104:110:1138891903636201:::FSP_ORG_ID,FSP_PROJECT,FSP_LANG_ID:1258297,56390,25
- Chopiton, A. (2015). *Les Green Datacenters: Réalité, Utopie ou Affichage?* (Synthèse du Projet de Fin d' Etudes). Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg.
- CISCO. (2017). Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2016–2021. CISCO Public.
- Climate Savers Computing sm. (s.d.). Considerations for Selecting Power Supplies for Networking Equipment and Evaluating Power Conversion Efficiency.
- Collins, J. (2012). *Understanding Data Center Sustainability*. *Environmental Leader*. News and Best Practices for Commercial & Industrial Environmental Professionals. Récupéré le 22 juillet 2016 de <http://www.environmentalleader.com/2012/04/24/understanding-data-center-sustainability/>
- Conseil Supérieur de l'Audiovisuel. (2016). *Netflix : Résultats annuels 2015 et perspectives 2016*. Récupéré le 6 août 2017 de <http://www.csa.fr/Etudes-et-publications/Les-etudes-thematiques-et-les-etudes-d-impact/Les-etudes-du-CSA/Netflix-resultats-annuels-et-perspectives-2016>
- Cook, G et Pomerantz, D. (2015). *Clicking Clean: A Guide to Building the Green Internet*. Greenpeace Inc.

- Cook, Gary. (2012). *How Clean Is Your Cloud ?* (No. JN 417). Greenpeace International.
- Cook, Gary, Lee, J., Tsai, T., et al. (2017). Clicking Clean : Who Is Winning The Race To Build A Green Internet ? Greenpeace Inc.
- Daim, T., Henretig, J., Krampits, M., et al. (2009). Data center metrics: An energy efficiency model for information technology managers. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 20(6), 712-731. <https://doi.org/10.1108/14777830910990870>
- Data Center Frontier. (2016). Silicon Valley Data Center Market.
- Data Center Knowledge. (2014, 13 avril). *World's Largest Data Center: 350 E. Cermak*. *Data Center Knowledge*. Récupéré le 13 juillet 2017 de <http://www.datacenterknowledge.com/special-report-the-worlds-largest-data-centers/worlds-largest-data-center-350-e-cermak/>
- DataGryd. (s.d.). *The Data Center -The Environmental Impact*. Récupéré le 6 août 2017 de <http://datagryd.squarespace.com/datacenter>
- Davies, G. F., Maidment, G. G. et Tozer, R. M. (2016). Using data centres for combined heating and cooling: An investigation for London. *Applied Thermal Engineering*, 94, 296-304. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.111>
- Durant, J. (2017, 29 mai). *Schaerbeek: la chaleur provoque une panne informatique au service population*. *RTBF Info*. Récupéré le 13 juillet 2017 de https://www.rtbf.be/info/regions/bruxelles/detail_schaerbeek-la-chaleur-provoque-une-panne-informatique-au-service-population?id=9619598
- Ebrahimi, K., Jones, G. F. et Fleischer, A. S. (2014). A Review of Data Center Cooling Technology, Operating Conditions and the Corresponding Low-grade Waste Heat Recovery Opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 622-638. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.007>
- Elia. (2017). *Données de production éolienne*. Elia. Récupéré le 31 juillet 2017 de <http://www.elia.be/fr/grid-data/production/production-eolienne>
- European Commission DG INFSO. (2008). *Impacts of Information and Communication* (No. Tender No. CPP 16A-2007 / 2007/S 68-082361).
- European Commission et Joint Research Center. (2016). *2016 Best Practice Guidelines for the EU Code of Conduct on Data Centre Energy Efficiency* (JRC technical report No. Version 7.1.2).
- European Energy Efficiency Platform (E3P), T. (2017, 26 avril). *CoC DC Partners*. *CoC DC Partners*. Text. Récupéré le 15 juillet 2017 de <https://e3p.jrc.ec.europa.eu/coc-dc-partners>
- Facebook Inc. (2016). *Our Footprint*. *Facebook Sustainability*. Récupéré le 5 août 2017 de <http://sustainability.fb.com/our-footprint/>
- Fernández-Montes, A., Fernández-Cerero, D., González-Abril, L., et al. (2015). Energy wasting at internet data centers due to fear. *Pattern Recognition Letters*, 67, 59-65. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2015.06.018>
- Flipo, F. (2014). Expansion des technologies de l'information et de la communication : vers l'abîme ? *Mouvements*, 79(3), 115. <https://doi.org/10.3917/mouv.079.0115>
- Gillen, A. et Vela, J. (2016). *Green IT: Virtualization Delivers Energy and Carbon Emissions Reductions* (No. IDC #US41694616). International Data Corporation (IDC).
- Global e-Sustainability Initiative. (2012). GeSI SMARTer 2020.
- Global e-Sustainability Initiative. (2015). GeSI SMARTer 2030 ICT Solutions for 21st Century Challenges.
- Google. (2009, 27 janvier). More computing, less power. *Official Google Blog*: Récupéré de <https://googleblog.blogspot.be/2009/01/more-computing-less-power.html>
- Google. (2017a). *Énergies renouvelables*. *Google Centres de données*. Récupéré le 5 août 2017 de <https://www.google.com/about/datacenters/renewable/index.html>

- Google. (2017b). *Hamina, Finland. Google Data Centers*. Récupéré le 28 juillet 2017 de <https://www.google.com/about/datacenters/inside/locations/hamina/>
- Greenpeace International. (2011). *How dirty is your data? A Look at the Energy Choices That Power Cloud Computing*. Greenpeace International.
- Hall, C. A. S., Lambert, J. G. et Balogh, S. B. (2014). EROI of different fuels and the implications for society. *Energy Policy*, 64, 141-152. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.049>
- Hamdi, R. et Van de Vyver, H. (2011). Estimating urban heat island effects on near-surface air temperature records of Uccle (Brussels, Belgium): an observational and modeling study. *Advances in Science and Research*, 6, 27-34. <https://doi.org/10.5194/asr-6-27-2011>
- Hardin, E., AghaKouchak, A., Qomi, M. J. A., et al. (2017). California drought increases CO2 footprint of energy. *Sustainable Cities and Society*, 28, 450-452. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.09.004>
- Harmon, R. R. et Auseklis, N. (2009). Sustainable IT services: Assessing the impact of green computing practices. Dans *Management of Engineering & Technology, 2009. PICMET 2009. Portland International Conference on* (p. 1707–1717). IEEE. Récupéré de <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5261969/>
- Harvey, T. (s.d.). Updated Air-Side Free Cooling Maps: The Impact of ASHRAE 2011 Allowable Ranges.
- Hayes, J. (2011, 13 septembre). Data centres - the next big challenges - E & T Magazine. *Engineering and Technology Magazine [en ligne]*, 6(9). Récupéré de <http://eandt.theiet.org/magazine/2011/09/data-centres-the-next-big-challenges.cfm>
- Horner, N. et Azevedo, I. (2016). Power usage effectiveness in data centers: overloaded and underachieving. *The Electricity Journal*, 29(4), 61-69. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2016.04.011>
- Horner, N. C., Shehabi, A. et Azevedo, I. L. (2016). Known unknowns: indirect energy effects of information and communication technology. *Environmental Research Letters*, 11(10), 103001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/10/103001>
- Howard, A. J. et Henretig, J. (2012). Addressing data center efficiency: lessons learned from process evaluations of utility energy efficiency programs. *Energy Efficiency*, 5(1), 137-148. <https://doi.org/10.1007/s12053-011-9128-4>
- IRM. (s.d.). Statistiques climatiques des communes belges. Ixells (INS21009). Récupéré de https://www.meteo.be/resources/climateCity/pdf/climate_INS21009_IXELLES_fr.pdf
- Jones, P., Hillier, D., Comfort, D., et al. (2013). Towards sustainable data centre operations in the UK. *Journal of Property Investment & Finance*, 31(1), 89-100. <https://doi.org/10.1108/14635781311292999>
- Kant, K. (2009). Data center evolution. *Computer Networks*, 53(17), 2939-2965. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2009.10.004>
- Klubeck, M. (2011). *Metrics: how to improve key business results*. [Berkeley, CA] : New York : Apress ; Distributed by Springer Science+Business Media.
- Laurent, A. (2017, 1 mars). *Les serveurs d'Amazon plantent, et c'est tout Internet qui flanche. RTBF Tendance*. Récupéré le 13 juillet 2017 de https://www.rtf.be/tendance/techno/detail_les-serveurs-d-amazon-plantent-et-c-est-tout-internet-qui-flanche?id=9542514
- Le Guern, Y. et Farrant, L. (2011, juillet). Analyse comparée des impacts environnementaux de la communication par voie électronique Volet requête web: Synthèse. ADEME. Récupéré de http://ademe.typepad.fr/files/acv_ntic_synthese_cle_usb.pdf
- Li, L., Zheng, W., Wang, X., et al. (2016). Data center power minimization with placement optimization of liquid-cooled servers and free air cooling. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 11, 3-15. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2016.02.001>

- Malmodin, J., Moberg, Å., Lundén, D., et al. (2010). Greenhouse Gas Emissions and Operational Electricity Use in the ICT and Entertainment & Media Sectors. *Journal of Industrial Ecology*, 14(5), 770-790. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2010.00278.x>
- Marty, G. et Lohier, F. (2012). Greenpeace chasse le nuage (informatique). *BE Etats-Unis*, (289). Récupéré de <http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/69985.htm>
- Marwah, M., Maciel, P., Shah, A., et al. (2010). Quantifying the sustainability impact of data center availability. *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, 37(4), 64–68.
- McAfee et ICF. (2009). *The Carbon Footprint of Email Spam Report* (p. 28).
- Miller, R. (2011a, juin). *A Look Inside Amazon's Data Centers | Data Center Knowledge. Data Center Knowledge*. Récupéré le 22 juillet 2016 de <http://www.datacenterknowledge.com/archives/2011/06/09/a-look-inside-amazons-data-centers/>
- Miller, R. (2011b, 14 décembre). *How Many Data Centers? Emerson Says 500,000. Data Center Knowledge*. Récupéré le 22 juillet 2016 de <http://www.datacenterknowledge.com/archives/2011/12/14/how-many-data-centers-emerson-says-500000/>
- Mingay, S. (2007). Green IT: the new industry shock wave. *Gartner RAS Research Note G, G00153703*, 7.
- Mining, Minerals, and Sustainable Development Project (dir.). (2002). *Breaking new ground: mining, minerals, and sustainable development: the report of the MMSD project*. London ; Sterling, VA : Earthscan Publications.
- Moss, S. et Smolaks, M. (2017). Amazon Web Services US-East-1 goes down. *DatacenterDynamics*. Récupéré de <http://www.datacenterdynamics.com/content-tracks/colo-cloud/amazon-web-services-us-east-1-goes-down/97892.fullarticle>
- Newcombe, L. (2008). *Data Centre Energy Efficiency Metrics Existing and Proposed Metrics to Provide Effective Understanding and Reporting of Data Centre Energy* (p. 54). BCS Data Centre Specialist Group.
- Newcombe, L., Acton, M., Booth, J., et al. (2012). *Guide des Bonnes Pratiques 2012. Pour le Code de Conduite Européen pour l'Efficiéce Energétique des Centres de Données* (p. 65). Groupement de Service (G.D.S.) EcoInfo.
- Oró, E., Depoorter, V., Garcia, A., et al. (2015). Energy efficiency and renewable energy integration in data centres. Strategies and modelling review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 429-445. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.035>
- Ounifi, H. A., Ouhimmou, M., Paquet, M., et al. (2015). *Data centre localization for Internet services*. Québec, Canada : Congrès International de Génie Civil. Récupéré de http://www.simagi.polymtl.ca/congresgi/cigi2015/Articles/CIGI_2015_submission_119.pdf
- Patterson, M. (2012). Energy Efficiency Metrics. Dans *Energy Efficient Thermal Management of Data Centers*. Boston, MA : Springer US. Récupéré de <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4419-7124-1>
- Pouchet, J. (2011, 28 juillet). Biomass-Powered Data Centers: Next Step for Green IT? - Environmental Leader. *Envrionmental Leader*. en ligne. Récupéré de <https://www.environmentalleader.com/2011/07/biomass-powered-data-centers-next-step-for-green-it/>
- Pramod, K. et Yogendra, J. (2012). Fundamentals of Data Center Airflow Management. Dans *Energy Efficient Thermal Management of Data Centers*. Boston, MA : Springer US. Récupéré de <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4419-7124-1>
- Ristic, B., Madani, K. et Makuch, Z. (2015). The Water Footprint of Data Centers. *Sustainability*, 7, 11260-11284. <https://doi.org/10.3390/su70811260>

- Rong, H., Zhang, H., Xiao, S., et al. (2016). Optimizing energy consumption for data centers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 674-691. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.283>
- Rouse, M. (2010, août). *Defintion data center*. *Search Data Center*. Récupéré le 22 juillet 2016 de <http://searchdatacenter.techtarget.com/definition/data-center>
- Samarasekera, R. (2017, 3 juin). *LEED credits, prerequisites and points: How are they different?* *US Green Building Council - LEED*. Récupéré le 5 août 2017 de <http://www.usgbc.org/articles/whats-difference-between-leed-credit-leed-prerequisite-and-leed-point>
- Santana, G. A. (2014). *Data Center Virtualization Fundamentals*. Indianapolis, IN : Cisco Press.
- Schmidt, R., Beaty, D. et Dietrich, J. (2007). Increasing energy efficiency in data centers. *ASHRAE Journal*, 49(12), 18.
- Shah, A., Carey, V., Bash, C., et al. (2012). Exergy Analysis of Data Center Thermal Management Systems. Dans *Energy Efficient Thermal Management of Data Centers*. Boston, MA : Springer US. Récupéré de <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4419-7124-1>
- Sharma, M., Arunachalam, K. et Sharma, M. (2015). Analyzing the Data Center Efficiency by Using PUE to Make Data Centers More Energy Efficient by Reducing the Electrical Consumption and Exploring New Strategies. *Procedia Computer Science*, 48, 142-148. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.04.163>
- Sharma, R., Christian, T., Arlitt, M., et al. (2011). Design of farm waste-driven supply side infrastructure for data centers. *HP Laboratories Technical Report*, (14).
- Shehabi, A., Smith, S., Sartor, D., et al. (2016). *United States Data Center Energy Usage Report* (No. LBNL-1005775) (p. 67). Berley, Californie USA : Laurence Berkely National Laboratory.
- Smolaks, M. (2015). *AWS suffers a five-hour outage in the US*. *DatacenterDynamics*. Récupéré le 13 juillet 2017 de <http://www.datacenterdynamics.com/content-tracks/cloud/aws-suffers-a-five-hour-outage-in-the-us/94841.fullarticle>
- Song, Z., Zhang, X. et Eriksson, C. (2015). Data Center Energy and Cost Saving Evaluation. *Energy Procedia*, 75, 1255-1260. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.178>
- Sulmonz, R. (2017, 4 novembre). La piscine de la Butte aux Cailles à Paris chauffée par des ordinateurs. *RTL.fr*. Récupéré de <http://www.rtl.fr/actu/societe-faits-divers/paris-la-piscine-de-la-butte-aux-cailles-chauffee-par-des-ordinateurs-7788067267>
- Syntec Numérique. (2011). *Datacenters et Développement: Durable État de l'art et perspectives* (Livre vert No. 6).
- The Green Grid. (2015). *Industry First: a Self-help Tool to Measure Data Center Energy Efficiency*. Récupéré de <http://www.thegreengrid.org/en/Global/Content/Tools/PUEInfographic>
- The Radicati Group. (2016, mars). Email Statistics Report, 2016-2020 Executive Summary. THE RADICATI GROUP, INC.
- Turner, W. P., Seader, J. H. et Brill, K. G. (2006). Tier Classification Define Site Infrastructure Performance, 17.
- Uchechukwu, A., Keqiu, L. et Yanming, S. (2014). Energy Consumption in Cloud Computing Data Centers. *International Journal of Cloud Computing and Services Science*, 3(3), 145-162.
- US Energy Information Administration. (2015). Primary Energy Production Estimates in Trillion Btu. Récupéré de https://www.eia.gov/state/seds/sep_prod/pdf/PT2_US.pdf

- U.S. Energy Information Administration. (2017). Average Tested Heat Rates by Prime Mover and Energy Source. Récupéré de https://www.eia.gov/electricity/annual/html/epa_08_02.html
- van Bussel, G.-J., Smit, N. et van de Pas, J. (2015). Digital archiving, green IT and environment. Deleting data to manage critical effects of the data deluge. *Electronic Journal Information Systems Evaluation Volume*, 18(2). Récupéré de <http://www.vbds.nl/wp-content/uploads/2015/09/Green-Archiving.pdf>
- vom Brocke, J., Seidel, S. et Recker, J. (2012). *Green Business Process Management*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg. Récupéré de <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-27488-6>
- Wang, L. et Khan, S. (2013). Review of Performance Metrics for Green Data Centers: a Taxonomy Study. *The Journal of Supercomputing*, 63(3), 639-656. <https://doi.org/10.1007/s11227-011-0704-3>
- Whitney, J. et Delforge, P. (2014). *Data Center Efficiency Assessment* (Issue Paper No. IP:14-08-A). Natural Resources Defense Council. Récupéré de <https://www.nrdc.org/sites/default/files/data-center-efficiency-assessment-IP.pdf>
- Xu, T. T. et Greenberg, S. E. (2007). *Data Center Energy Benchmarking: Part 1-5* (No. LBNL-62716). Lawrence Berkely National Laboratory.
- Yogendra, J. et Pramod, K. (2012). Introduction to Data Center Energy Flow and Thermal Management. Dans *Energy Efficient Thermal Management of Data Centers*. Boston, MA : Springer US. Récupéré de <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4419-7124-1>
- Yuventi, J. et Mehdizadeh, R. (2013). A critical analysis of Power Usage Effectiveness and its use in communicating data center energy consumption. *Energy and Buildings*, 64, 90-94. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.04.015>

Annexes

Annexe 1

La chaîne énergétique proposée sur base d'un croisement de source reste une estimation réalisée afin de donner une idée générale.

Le calcul de la chaîne énergétique se base sur les hypothèses suivantes :

- 70 TWh sont consommés par les data centers aux États-Unis pendant l'année 2014 (cf. Tableau 4 Consommations électriques des centres de données) ;
- L'électricité nécessaire est produite exclusivement par des centrales thermiques à charbon. En effet, ce dernier est un des secteurs historiques dominants de la production électrique aux États-Unis. En 2014, 23,06% de la production d'énergie primaire était faite à partir de la combustion du charbon (US Energy Information Administration, 2015) ;
- Le charbon provient exclusivement des États-Unis ;
- Le centre est raccordé au grid au niveau des lignes basse tensions. Les pertes sur les lignes à haute et basse tension ont été approximées à 3% et 5% respectivement.
- L'estimation du TRE pour le charbon est de 60 (Hall *et al.*, 2014) ;
- Le rendement de la centrale thermique au charbon est calculé sur base 10 080 BTU (U.S. Energy Information Administration, 2017)

Nous arrivons donc à ~226 TWh (~ 27,7 millions de tonnes de charbon) nécessaires pour alimenter l'ensemble des data centers américains sur une durée d'un an. Le rendement global de cette chaîne énergétique est de ~31%.

La plus grosse perte d'énergie se situe au niveau de la centrale à charbon, avec un rendement de conversion d'environ 4%.

Annexe 2

IT Equipment	
Compute Devices	Servers
Network Devices	Switches
	Routers
IT Support Systems	Printers
	PCs/workstations
	Remote management (KVM, consoles, etc.)
Miscellaneous Devices	Security encryption, appliances, etc.
Storage	Storage devices – switches, storage arrays, NAS systems
	Backup devices – media, libraries, virtual media libraries
Telecommunications	All telco (telecommunications company) devices

Liste et répartition des éléments pris en compte lors du calcul du PUE.
Extrait de Avelar *et al.*, 2012.

Facility Equipment	
Power	Automatic transfer switches (ATS)
	Switchgear
	UPS
	DC batteries/rectifiers (non UPS – telco nodes)
	Generators
	Static transfer switches (STS)
	Transformers (step down)
	Power distribution units (PDUs)
	Rack distribution units (RDUs)
	Breaker panels
Distribution wiring	
Lighting	
Heating Ventilation and Air Conditioning (HVAC)	Cooling towers
	Condensers and condenser water pumps
	Chillers
	Chilled water pumps
	Water treatment systems
	Well pumps
	Computer room air conditioners (CRACs)
	Computer room air handlers (CRAHs)
	Dry coolers
	Air compressors
	Supply fans
	Return fans
	Air economizers
	Water-side economizers
	Dehumidifiers
	Humidifiers
	Heaters
	In-row and in-rack cooling solutions
	Condensate pumps
	Physical Security
Water detection	
Physical security servers/devices	
Building Management System and Controls	Servers/devices used to control/manage the data center
	Probes/sensors
	Plant controls

Annexe 3

Sur son site internet⁸, le Green Grid donne accès à un calculateur sur lequel l'utilisateur estime les gains énergétiques et financiers potentiels sur base des données remplies dans le formulaire.

Pour cet exemple, Bruxelles est choisi comme lieu de référence, avec une température extérieure maximum de 27°C, un PUE de 1,5 (considéré comme une valeur « moyenne » mais pas vraiment bonne) et un prix du kWh (industriel) de 0,085€⁹. Les autres variables climatiques ou techniques, telles que les températures, le point de rosée, le taux d'humidité, température de refroidissement cible, ... n'ont pas été modifiées. Le résultat affiche la possibilité d'utiliser le free cooling durant 8 192 heures (341 jours) et le free chilling durant 4 871 heures (203 jours). Ce cas purement théorique nous montre que le free cooling est une possibilité exploitable dans notre pays. Évidemment, ceci n'est qu'une estimation, mais la méthode de calcul annoncée est en ligne avec celle recommandée par l'ASHRAE

The screenshot shows the 'Free-Cooling Estimated Savings' calculator interface. The browser address bar shows the URL: cooling.thegreengrid.org/EUROPE/WEB_APP/calc_index_EU.html. The page header includes the Green Grid logo and the title 'Free-Cooling Estimated Savings'. The form is set for 'BELGIUM' and 'Brussels, EBBR'. The temperature unit is set to 'CELSIUS'. The 'ALLOW MIXING OF SUPPLY AND RETURN AIR' and 'ALLOW HUMIDIFICATION' checkboxes are checked. The 'MAX LIMIT' and 'MIN LIMIT' sections show various temperature and humidity thresholds. The 'DATA CENTER IT POWER (kW)' is 1000, 'POWER USAGE EFFECTIVENESS (PUE)' is 1.5, and 'TOTAL FACILITY POWER (kW)' is 1500. The 'OVERHEAD POWER (kW)' is 500. The 'PERCENT OF OVERHEAD POWER FOR COOLING SYSTEM (%)' is 80, resulting in 400 kW. The 'PERCENT OF COOLING SYSTEM POWER FOR CHILLER (%)' is 40, resulting in 160 kW. The 'PERCENT OF COOLING SYSTEM POWER FOR TOWER (%)' is 40, resulting in 160 kW. The 'PERCENT OF COOLING SYSTEM POWER FOR PUMPS/FANS (%)' is 20, resulting in 80 kW. The 'PERCENT OF OVERHEAD POWER FOR POWER LOSSES and LIGHTING (%)' is 20, resulting in 80 kW. The 'ELECTRIC COST (€ per kWh)' is 0.085. The 'HOURS MEETING CRITERIA FOR FREE-AIR COOLING' is 8192, and the 'ESTIMATED SAVINGS USING FREE-AIR COOLING' is €160,000. The 'HOURS MEETING CRITERIA FOR WATER SIDE ECONOMIZER' is 4871, and the 'ESTIMATED SAVINGS USING WATER SIDE ECONOMIZER' is €99,000. The page footer includes the Green Grid logo and the WeatherBank, Inc. logo.

Figure 12 Simulation des gains potentiels du free cooling

⁸ http://cooling.thegreengrid.org/EUROPE/WEB_APP/calc_index_EU.html

⁹ sur base de valeur d' Eurostat