



UCLouvain

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE LOUVAIN

**Modélisation de la consommation
énergétique de l'Internet selon
une approche ascendante**

Auteur :

Baudoin Sylvain

Promoteur :

Bol David

Jury :

Jacques Laurent

Meessen Jérôme

*Mémoire présenté en vue de l'obtention
du grade d'ingénieur civil électro-mécanicien (orientation énergie)*

29 août 2013

Abstract

Avec les enjeux climatiques et énergétiques actuels, il est devenu primordial d'étudier l'impact environnemental de nos actions au sein des différents secteurs de la société, notamment celui des technologies de l'information et de la communication. D'une part, celles-ci ont un grand potentiel pour diminuer l'empreinte écologique dans d'autres secteurs - dématérialisation, gestion dynamique de l'énergie, etc. D'autre part, le trafic Internet ne cesse de croître et son impact devient de plus en plus conséquent, principalement à cause de la consommation électrique en phase d'utilisation de ses éléments et des émissions de gaz à effets de serre associées. Il convient donc d'analyser l'impact énergétique des technologies de l'information et de la communication (TIC), de voir comment celui-ci va évoluer au cours de temps et quelles seront les stratégies à mettre en place pour limiter leur consommation.

Dans la présente étude, nous estimons la consommation énergétique de l'Internet selon une approche "ascendante". Celle-ci consiste à analyser chaque élément du réseau et à définir leur consommation en joules par mégabit transmis [J/Mb]. La consommation énergétique mondiale est ensuite déterminée grâce à des estimations du trafic Internet.

D'après notre modèle, il ressort que la consommation électrique de l'Internet résidentiel en phase d'utilisation s'élève à 530 PJ ($1PJ = 10^{15}J$), ce qui équivaut à 2,5% de la consommation d'électricité mondiale. En 2017, cette proportion atteindra 3,6%. La consommation des terminaux n'est pas comptabilisée dans cette valeur. Il s'agit donc uniquement de l'énergie dépensée dans l'accès au réseau, dans le réseau central (*backbone*) et dans les centres de données. Au cours du temps, les dépenses énergétiques dans le réseau d'accès vont s'accroître, principalement à cause du développement de l'accès mobile. Les dépenses dans celui-ci seront majoritairement dues aux pertes dans les amplificateurs de signaux des stations de base. Augmenter le débit du trafic mobile tout en conservant des puissances de signal sous une certaine limite s'avère donc être un enjeu crucial pour les années futures.

Abstract

Because of actual climate change issues, it has become essential to investigate environmental impact of each sector of society, including the sector of information and communication technologies (ICT). On the one hand, these technologies have great potential to lower ecological footprint in other sectors - dematerialization, dynamic energy management, . . . On the other hand, Internet traffic is constantly increasing and its footprint is becoming more and more substantial, mainly because of the greenhouse gas emissions related to use-phase electricity consumption of its elements. It is therefore important to analyze energy impact of ICTs, predict how it is going to evolve over time and what will be the strategies to implement in order to reduce their energy consumption.

In the present study, we use a bottom-up approach to estimate Internet energy consumption. It consists in analyzing each network element in order to define their efficiency in joules per transmitted megabit [J/Mb]. World energy consumption is then deduced based on Internet traffic estimations.

Our model indicates that energy consumption of use-phase residential Internet reaches 530 PJ ($1 \text{ PJ} = 10^{15} \text{ J}$), which is equivalent to 2,5% of world electricity consumption. It will reach 3,6% in 2017. Terminals energy consumption is not taken into account. It is thus energy only used for network access, central network (backbone) and data centers. Energy consumption in network access will increase over time, mainly because of the development of mobile access. This consumption will be mainly due to power losses in base-station signal amplifiers. Rising data rate of mobile traffic while keeping signal powers below a certain limit appears thus to be a crucial issue for coming years.

Remerciements

J'aimerais remercier mon promoteur, Professeur David Bol, pour son soutien, sa patience et la liberté qu'il m'a accordé dans l'orientation de ce travail. Merci également au Professeur Jérôme Louveaux pour sa disponibilité et pour avoir pris le temps de répondre à mes questions.

Mes remerciements vont aussi à tous mes amis qui m'ont accompagné dans la rédaction de ce mémoire, tout particulièrement à Thomas, Jérôme et Yannick. Merci également à Clément pour ses explications précieuses en télécommunication et à Louise pour son enthousiasme, son esprit et sa franchise, sans qui la réalisation de ce travail n'aurait pas été aussi enrichissante.

Pour finir, un grand merci à ma famille pour leurs encouragements et leur soutien inconditionnel. Merci tout spécialement à ma sœur Noémie pour la relecture de ce rapport et à mon frère jumeau Gilles pour son partage, ses réflexions éclairées et nos discussions animées qui m'ont permis d'orienter mon travail.

Table des matières

Abstract	iii
Abstract	v
Remerciements	vii
Abréviations	xi
Symboles	xiii
1 Introduction	1
2 Mise en contexte et état de l'art	3
2.1 Contexte énergétique et environnemental	3
2.2 Etat de l'art de l'impact environnemental global de l'Internet	6
2.3 Effet de substitution et effet rebond	9
2.4 Définitions et unités	11
2.4.1 TIC et Internet : définitions	12
2.4.2 Outil d'analyse : ACV	13
2.4.3 Grandeurs physiques	15
3 Modèle et consommation énergétique des éléments de l'Internet	17
3.1 Modèle du réseau	18
3.2 Semi-conducteurs	19
3.2.1 Consommation énergétique sur l'ensemble du cycle de vie	20
3.2.2 Evolution dans le temps de la consommation lors de la phase d'utilisation	23
3.3 Centres de données	25
3.3.1 Structure	25
3.3.2 Consommation énergétique lors de la phase d'utilisation	27
3.3.3 Consommation énergétique lors de la phase de production et de fin de vie	29
3.3.4 Modélisation	30
3.3.5 Améliorations potentielles	31
3.3.5.1 Proportionnalité	31
3.3.5.2 Efficience énergétique	36

3.3.5.3	Changements structurels	39
3.3.6	Synthèse et projections	40
3.4	Réseau central	43
3.4.1	Consommation énergétique lors de la phase d'utilisation des éléments du réseau	43
3.4.2	Consommation énergétique lors de la phase de production et de fin de vie des éléments du réseau	44
3.4.3	Modèle de la consommation énergétique du réseau central	45
3.4.4	Améliorations potentielles de l'efficacité énergétique	50
3.5	Accès au réseau	51
3.5.1	Accès fixe	52
3.5.1.1	Consommation énergétique lors de la phase d'utilisation	52
3.5.1.2	Consommation énergétique lors de la phase de production et de fin de vie	52
3.5.1.3	Modèle de la consommation énergétique	53
3.5.1.4	Améliorations potentielles de l'efficacité énergétique	54
3.5.2	Accès fixe et Wi-Fi	56
3.5.2.1	Structure d'un point d'accès Wi-Fi	56
3.5.2.2	Consommation énergétique lors de la phase d'utilisation	57
3.5.2.3	Consommation énergétique lors de la phase de production et de fin de vie	58
3.5.2.4	Modèle de la puissance du signal transmis	59
3.5.2.5	Améliorations potentielles de l'efficacité énergétique	62
3.5.3	Accès mobile	64
3.5.3.1	Consommation énergétique lors de la phase d'utilisation	64
3.5.3.2	Consommation énergétique lors de la phase de production et de fin de vie	66
3.5.3.3	Modèle de la puissance du signal transmis	67
3.5.3.4	Modèle d'une station de base	67
3.5.3.5	Améliorations potentielles de l'efficacité énergétique	70
3.6	Terminaux	74
3.7	Synthèse	75
4	Consommation énergétique l'Internet	81
4.1	Répartition et évolution du trafic global	81
4.2	Consommation énergétique globale	84
5	Conclusion	89

Abréviations

3G	3ème génération de communications mobiles (norme UMTS)
4G	4ème génération de communications mobiles (norme LTE)
ACV	Analyse du Cycle de Vie
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CO₂e	Carbon dioxyde equivalent
CPU	Central Processing Unit
BS	Base Station
DBA	Dynamic Bandwidth Allocation
DC	Datacenter
DR	Data Rate
DSL	Digital Subscriber Line
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
DSP	Digital Signal Processing
EARTH	Energy Aware Radio and Network Technologies
GES	Gaz à effet de serre
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
IOPS	Input/Output Operations Per Second
IP	Internet Protocol
FP	Facteur de Proportionnalité
IoT	Internet of Things
IT	Information Technology
LCD	Liquid Crystal Display
LTE	Long-Term Evolution
M2M	Machine to Machine
MAC	Media Access Control
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MIPS	Million d'Instructions Par Seconde
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Economiques

OLA	Optical Line Amplifier
OLT	Optical Line Terminal
OPS	Operations Per Second
ONU	Optical Network Unit
OSI	Open Systems Interconnection
OTN	Optical Transport Network
P2P	Peer-to-peer
PA	Point d'accès
PB	Petabyte
PDU	Power Distribution Unit
PEF	Primary Energy Factor
PFC	Perfluorocarbure
PL	Path Loss
PRG	Pouvoir de réchauffement global
PSU	Power Supply Unit
PUE	Power Usage Effectiveness
SISO	Single Input Single Output
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SSD	Solid-State Drive
TCAM	Taux de Croissance Annuel Moyen
TDD	Time Division Duplex
TIC	Technologies de l'Information et de la Communication
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UPS	Uninterruptible Power Supply
VDSL	Very high bit-rate DSL
VoD	Video on demand
WCDMA	Wideband-Code Division Multiple Access
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WSN	Wireless Sensor Network

Symboles

C_{eth}	Capacité des ports Ethernet	[Mbps]
C_{IP}	Capacité des routeurs IP	[Mbps]
C_{node}	Capacité totale d'un nœud du réseau	[Mbps]
C_{ola}	Capacité d'un amplificateur de ligne	[Mbps]
C_{OTN}	Capacité des ports OTN	[Mbps]
C_{optsw}	Capacité des commutateurs optiques	[Mbps]
C_{re}	Capacité d'un régénérateur	[Mbps]
C_{trans}	Capacité des transpondeurs	[Mbps]
DR	Débit de données	[Mbps]
E_{access}	Consommation énergétique de l'accès au réseau	[J/Mb]
$E_{backbone}$	Consommation énergétique du réseau central	[J/Mb]
E_{BS}	Consommation énergétique d'une station de base	[J/Mb]
E_{DC}	Consommation énergétique des centres de données	[J/Mb]
E_{fixe}	Consommation énergétique de l'accès fixe	[J/Mb]
$E_{Internet}$	Consommation énergétique sur l'ensemble de l'Internet	[J/Mb]
$E_{PAwi-fi}$	Consommation énergétique d'un point d'accès Wi-Fi	[J/Mb]
$E_{terminal}$	Consommation énergétique des terminaux	[J/Mb]
E_{wi-fi}	Consommation énergétique d'un accès via Wi-Fi	[J/Mb]
η_{alim}	Rendement du système de refroidissement	[/]
η_{PDU}	Rendement du PDU d'un DC	[/]
η_{SG}	Rendement des transformateurs d'un DC	[/]
η_{UPS}	Rendement de l'UPS d'un DC	[/]
η_{pr}	Facteur de protection du réseau	[/]
L_{ampli}	Longueur entre deux amplificateurs sur une ligne	[km]
L_{line}	Longueur d'une ligne entre deux nœuds du réseau	[km]
L_{regen}	Longueur entre deux régénérateurs sur une ligne	[km]
N_{hop}	Nombre de liaisons traversées au sein du réseau	[km]
P_{alim}	Puissance de l'alimentation	[W]

P_{ampli}	Puissance des amplificateurs	[W]
$P_{backbone}$	Puissance du réseau central	[W]
P_{cool}	Puissance du système de refroidissement	[W]
P_{DC}	Puissance d'un centre de données	[W]
P_{DSLAM}	Puissance d'un DSLAM	[W]
P_{eth}	Puissance des ports Ethernet	[W]
P_{IP}	Puissance des routeurs IP	[W]
P_{IT}	Puissance des appareils IT d'un DC	[W]
P_{line}	Puissance d'une ligne du réseau (amplification)	[W]
P_{modem}	Puissance d'un modem	[W]
$P_{network}$	Puissance du réseau d'un DC	[W]
P_{node}	Puissance d'un nœud du réseau	[W]
P_{ola}	Puissance d'un amplificateur de ligne	[W]
P_{OTN}	Puissance des ports OTN	[W]
P_{optsw}	Puissance des commutateurs optiques	[W]
P_{out}	Puissance du signal à la sortie de l'amplificateur d'une BS	[W]
P_{PAavg}	Puissance moyenne d'un PA Wi-Fi	[W]
P_{PAidle}	Puissance moyenne d'un PA Wi-Fi en veille	[W]
P_{PAmax}	Puissance moyenne d'un PA Wi-Fi en pleine charge	[W]
P_{proc}	Puissance du DSP d'une BS	[W]
P_{regen}	Puissance des régénérateurs de signaux sur une ligne	[W]
P_{re}	Puissance d'un régénérateur	[W]
P_{server}	Puissance des serveurs d'un DC	[W]
$P_{storage}$	Puissance du système de stockage d'un DC	[W]
P_t	Puissance du signal transmis d'une BS	[W]
P_{trans}	Puissance des transpondeurs	[W]
P_{transc}	Puissance du transceiver d'une BS	[W]
Φ_{cool}	Facteur de refroidissement	[/]

Chapitre 1

Introduction

En 2050, la planète Terre sera peuplée de 9,2 milliards d'humains [1]. Cette augmentation de la population accompagnée d'une croissance de la consommation de biens par habitant fait entrapercevoir les limites de la biosphère [2]. Dès lors, il est devenu primordial d'étudier l'impact environnemental de notre mode de vie au sein des différents secteurs de la société, y compris celui des technologies de l'information et de la communication (TIC). D'une part, celles-ci ont un grand potentiel pour diminuer les effets sur l'environnement dans d'autres secteurs - dématérialisation, gestion dynamique de l'énergie, etc. [3]. D'autre part, le trafic Internet ne cesse de croître. Celui-ci est accompagné d'une hausse du nombre de serveurs [4] et de terminaux - ordinateurs portables, smartphones, tablettes, etc. Leur impact devient de plus en plus conséquent, principalement à cause de leur consommation électrique en phase d'utilisation et des émissions de gaz à effets de serre (GES) associées.

Plusieurs analyses ont déjà été réalisées afin d'estimer et de prédire les émissions de GES des TIC ou de l'Internet. Ces études ont une approche "descendante". C'est-à-dire que la consommation énergétique globale est calculée grâce à une estimation du nombre d'un certain type de dispositifs et de sa consommation énergétique typique. Bien souvent, les prédictions de la consommation sont réalisées selon un scénario *business as usual* et ne tiennent pas compte de l'évolution des requêtes Internet et des limites d'efficacité potentielles de certains éléments du réseau.

Dans la présente étude, nous avons adopté une approche "ascendante". Celle-ci consiste à analyser chaque élément du réseau est de définir leur efficacité en joules par mégabit transmis [J/Mb] et les limites auxquelles ils pourraient être confrontés. La consommation énergétique mondiale est ensuite déterminée grâce à des estimations du trafic Internet. Cette approche est complémentaire à celle des études recensées dans la littérature. En effet, les sources d'erreur ne sont pas dues aux mêmes hypothèses, ce qui permet de confronter les différents résultats. En plus de l'estimation de l'efficacité des éléments du réseau, une attention particulière sera apportée aux techniques et technologies à mettre en place pour diminuer la consommation énergétique. Celles-ci seront classées en trois catégories afin de

différencier celles qui permettent d'augmenter l'efficacité à pleine charge, la proportionnalité entre consommation énergétique et débit de données et les techniques qui demandent une modification structurelle de l'élément considéré ou du réseau en général. Les éléments du réseau seront dès que possible modélisés pour permettre de discuter les gains réalisés grâce aux améliorations potentielles et des limites auxquelles nous risquons d'être confrontés dans les années à venir. Les données de consommation seront tirées d'analyses de cycle de vie (ACV), de mesures expérimentales, de datasheets et d'articles de la littérature scientifique. Ces données seront à chaque fois discutées et comparées. La part de l'énergie dédiée aux phases de production et de fin de vie sera également estimée grâce à un recoupement d'ACV. Le champ de cette étude sera la consommation énergétique de l'Internet. Il est cependant important de considérer tous les impacts environnementaux lorsqu'il est question de choisir une technologie par rapport à une autre.

D'après notre modèle, il ressort que la consommation électrique de l'Internet résidentiel en phase d'utilisation s'élève à 530 PJ ($PJ = 10^{15} J$), ce qui équivaut à 2,5% de la consommation globale d'électricité. En 2017, cette proportion atteindra 3,6%. La consommation des terminaux n'est pas comptabilisée dans cette valeur. Il s'agit donc uniquement de l'énergie dépensée dans l'accès au réseau, dans le réseau central (*backbone*) et dans les centres de données. Au cours du temps, les dépenses énergétiques dans le réseau d'accès vont s'accroître, principalement à cause du développement de l'accès mobile. Les dépenses dans celui-ci seront majoritairement dues aux pertes dans les amplificateurs de signaux des stations de base. Augmenter le débit du trafic mobile tout en conservant des puissances de signal sous une certaine limite s'avère donc être un enjeu crucial pour les années futures.

Ce rapport sera structuré de la façon suivante : premièrement, dans le Chapitre 2, une mise en contexte de la situation environnementale et énergétique globale sera présentée. Ensuite, des résultats de la littérature sur la consommation globale des TIC et de l'Internet seront comparés et critiqués. Cette discussion permettra de faire ressortir quelques définitions et unités importantes à considérer dans ce genre d'étude. Dans le Chapitre 3, la consommation des éléments de l'Internet sera modélisée et estimée. Le réseau sera divisé en 4 sections : les centres de données, le réseau central, l'accès et les terminaux. Ces derniers ne seront pas étudiés de manière approfondie contrairement aux autres sections. Grâce à ces résultats, la consommation énergétique globale de l'Internet sera estimée dans le Chapitre 4. Finalement, nous concluons cette étude.

Chapitre 2

Mise en contexte et état de l'art

Dans un premier temps, le contexte énergétique et environnemental mondial sera abordé. Ensuite, quatre études globales de l'impact environnemental de l'Internet et des TIC seront présentées, comparées et critiquées. Dans la section suivante, le potentiel d'économie d'énergie réalisée grâce aux TIC sera discuté. Finalement, à la lumière des critiques des études existantes, quelques définitions, conversions d'unités et bonnes pratiques seront présentées.

2.1 Contexte énergétique et environnemental

L'analyse de la consommation énergétique des TIC est, d'une part, un enjeu technologique et financier pour les industriels et, d'autre part, un enjeu environnemental et économique qui s'inscrit dans la problématique globale des changements climatiques et de la finitude des ressources d'énergies fossiles.

Enjeux technologique et financier

La première raison pour laquelle des dispositifs basse consommation ont été élaborés est l'émergence de l'électronique mobile [5]. La contrainte de l'autonomie a poussé les constructeurs à concevoir des appareils de moins en moins énergivores en phase d'utilisation. Ensuite, l'explosion du nombre de données traitées sur Internet a entraîné une forte croissance du nombre de centres de données. Ceux-ci sont gourmands en énergie et donc coûteux en phase d'utilisation [6]. C'est pourquoi de nombreuses recherches ont été menées depuis le milieu des années 2000 pour augmenter leur efficacité énergétique.

Enjeux environnemental et économique

A côté de ces considérations financières et technologiques, les TIC s'inscrivent

également dans le contexte énergétique et climatique global :

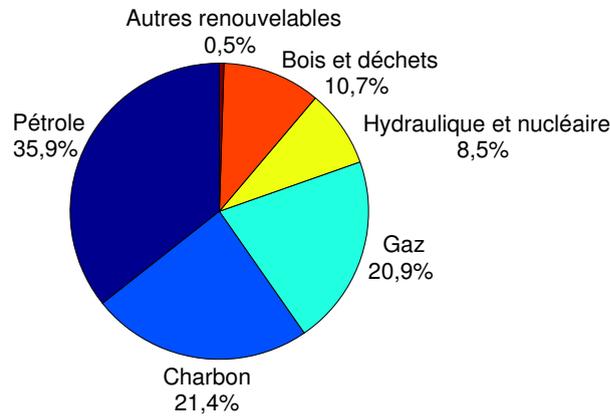


FIGURE 2.1: Utilisation mondiale d'énergie primaire (2010) [7]

La situation énergétique mondiale est décrite dans la Figure 2.1 : plus de 80% de l'énergie primaire provient des énergies fossiles [7]. Or, sous l'hypothèse d'une extraction constante, les réserves connues de pétrole, gaz et charbon s'épuiseraient en 45, 68 et 190 ans respectivement [7]. Ces réserves peuvent paraître suffisamment larges pour entamer une conversion énergétique en douceur de notre société. Le problème est que l'extraction des ressources fossiles ne va pas rester constante : elle va continuer à croître jusqu'au moment où la ressource sera devenue trop difficile à extraire - car rare - pour répondre à la demande. Elle va alors décroître jusqu'à épuisement des stocks. Si aucun substitut n'est trouvé, l'approvisionnement en énergie va diminuer et impacter toute l'économie. La question est donc de savoir quand va-t-on atteindre ce pic de production et serons-nous en mesure d'adapter notre économie en conséquent ? Selon plusieurs organisations, le pic pétrolier devrait se produire entre 2010 et 2020 et le pic gazier quelques années plus tard comme illustré à la Figure 2.2 [8].

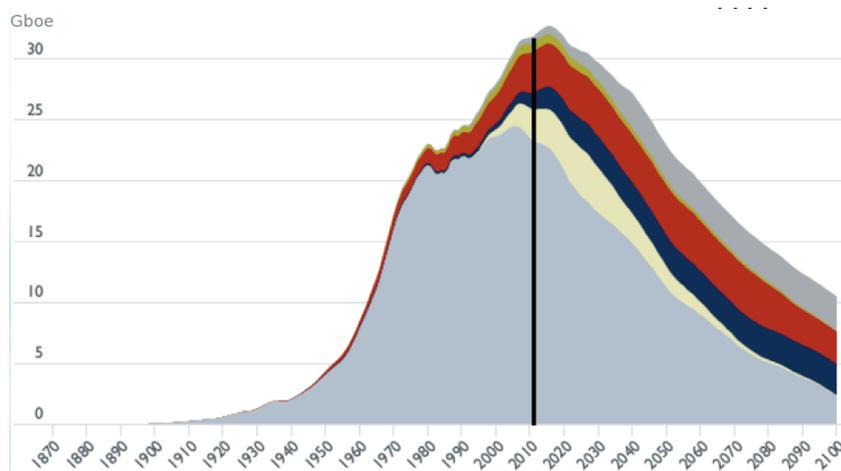


FIGURE 2.2: Evolution de l'extraction du pétrole au cours du temps [8]

En plus de la problématique énergétique, l'humanité fait face à un autre problème majeur : le réchauffement climatique provoqué par les émissions de gaz à effet de serre (GES). Le GES le plus répandu est le CO_2 et les émissions dues à l'activité humaine proviennent en grande partie de la combustion des énergies fossiles. Il existe d'autres GES présents en beaucoup plus petite quantité mais ayant un pouvoir de réchauffement global (PRG) beaucoup plus important que le CO_2 , c'est nommant le cas des perfluorocarbures relâchés dans l'atmosphère lors de la phase de production des circuits intégrés [9]. Si rien n'est fait dans les années à venir pour diminuer drastiquement les émissions de GES, la température moyenne terrestre pourrait augmenter de $6^\circ C$ en 2100 par rapport à celle de 1990 (voir Figure 2.3) [10].

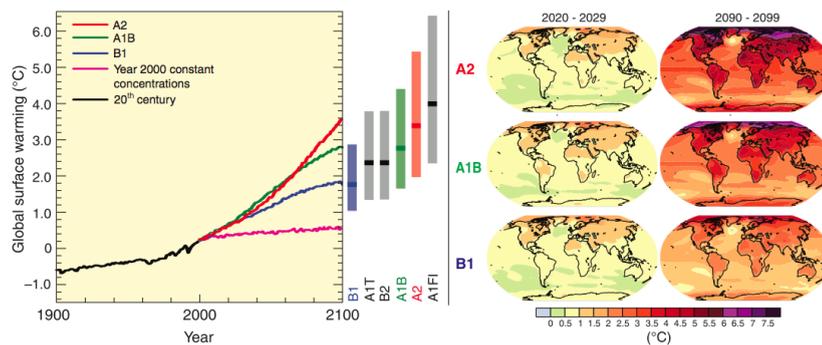


FIGURE 2.3: Différents scénarios de l'évolution de la température terrestre moyenne [10]

Que ce soit pour réduire notre dépendance aux énergies fossiles ou pour diminuer les émissions de GES, les TIC ont une place prépondérante : d'une part car le nombre d'abonnés à l'Internet et le nombre de données traitées continue à croître [11], ce qui provoque une consommation énergétique toujours plus importante. Réaliser des dispositifs et des systèmes plus efficaces est donc une nécessité pour permettre la croissance des TIC tout en restant dans les limites énergétiques imposées par notre planète. D'autre part, les TIC ont un rôle à jouer pour diminuer la consommation énergétique dans d'autres domaines tels que le transport ou la gestion intelligente du réseau d'électricité (*Smart Grid*).

Finalement, en plus des impacts énergétiques et climatiques, les TIC ont d'autres effets majeurs sur l'environnement tels que la pollution due aux métaux lourds lorsque les appareils sont envoyés à la décharge sans phase de recyclage. De nombreux métaux rares comme le cuivre sont utilisés dans l'industrie de l'électronique, ce qui induit également un risque de pénurie et d'instabilité politique. Bien que, dans la suite de ce rapport, seuls les impacts énergétiques - et indirectement climatiques - seront analysés, il ne faut pas perdre de vue que les choix pour une certaine technologie ou un matériau spécifique doivent être faits en connaissance de l'ensemble des impacts sur l'environnement et pas uniquement sur des considérations énergétiques ou de performance.

2.2 Etat de l'art de l'impact environnemental global de l'Internet

Dans cette section, l'état de l'art des études de l'impact environnemental global des TIC sera présenté. Deux d'entre elles expriment leurs résultats en CO_2e tandis que les deux autres les donnent en GW . Une des études analyse plus spécifiquement l'Internet alors que les autres étudient l'impact des TIC en général, bien que la définition de TIC ne soit pas identique dans chaque étude. Il est à noter que d'autres études sur l'impact environnemental des TIC existent mais ne sont pas globales ou ne considèrent que certains dispositifs. Citons à titre indicatif l'étude [12] qui analyse l'impact énergétique mondial des centres de données, l'étude [13] qui estime l'empreinte carbone des TIC en Europe ou encore [14] qui évalue la consommation énergétique du réseau de télécommunication et des centres de données en Europe. Ces études ne seront pas discutées dans ce rapport.

Cette section sera structurée de la façon suivante : premièrement, les résultats globaux seront présentés, ensuite la répartition en sous-secteur sera analysée et discutée et, finalement, les projections de deux études à l'horizon 2020 seront comparées. Plusieurs critiques seront émises tout au long de cet état de l'art et seront discutées plus en détail dans la Section 2.4.

Résultat global

C'est en 2007 que l'entreprise Gartner évalue pour la première fois l'impact environnemental des TIC. Ceux-ci seraient responsables de 2% des émissions globales de CO_2 , ce qui équivaut aux émissions dues à l'ensemble de l'aviation civile [15]. En 2011, le rapport SMART 2020 de McKinsey & Company tire des conclusions similaires [3].

L'étude [16] réalisée en 2008 estime la consommation électrique des TIC lors de la phase d'utilisation à 168 GW, ce qui correspond à plus de 8% de la consommation électrique globale et à 2,6% de la consommation d'énergie primaire mondiale.

Finalement, en 2011, l'étude [17] estime que la consommation de l'Internet lors de la phase de production et d'utilisation est située dans une fourchette de 170 à 307 GW. Les résultats de ces 4 études sont repris dans le tableau 2.1.

TABLE 2.1: Tableau récapitulatif des études globales

Source	Champ de l'étude	Frontières du système	Résultats
Gartner (2007) [15]	TIC	Utilisation et production	2% du CO_2 global
McKinsey (2008) [3]	TIC	Utilisation et production	830 $MtCO_2e$
Pickavet (2008) [16]	TIC	Utilisation	168 GW
Raghavan (2011) [17]	Internet	Utilisation et production	170-307 GW

Répartition en sous-secteurs

La répartition des impacts environnementaux en fonction de la catégorie du dispositif est représentée à la Figure 2.4. Cette répartition est exprimée en $MtCO_2e$ pour les graphes a et b, et en MW pour les graphes c et d. Les sous-secteurs étudiés sont les centres de données (DC), les ordinateurs (PC), les dispositifs du réseau et une catégorie "autre" qui reprend les imprimantes et autres TIC variants d'une étude à l'autre. Plusieurs observations peuvent être faites à partir des graphiques de la Figure 2.4 :

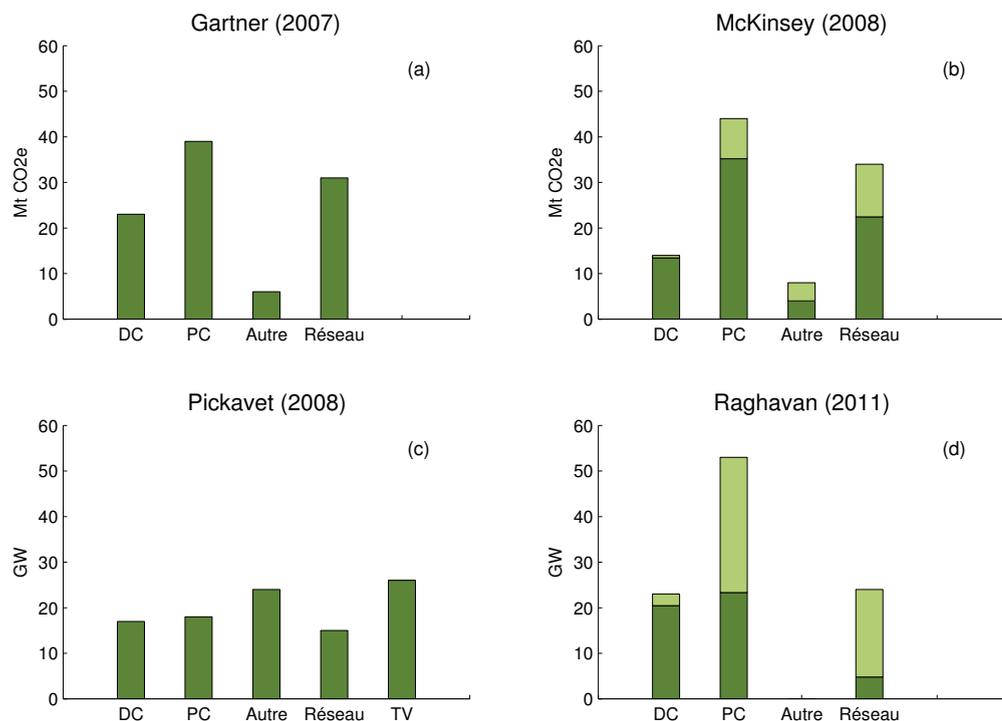


FIGURE 2.4: Pourcentage de l'impact environnemental attribué à chaque catégorie du système étudié. Les bandes claires sur les deux graphiques de droite correspondent à l'énergie dépensée lors de la production des dispositifs.

- Selon les trois études concernant les phases d'utilisation et de production (a,b,d), la catégorie PC -incluant les ordinateurs portables et de bureaux ainsi que les écrans- est le poste le plus significatif suivi par les dispositifs du réseau et les centres de données. Il est à noter que l'étude [15] ne donne pas la distinction entre énergie dépensée lors de la production et de l'utilisation, c'est pourquoi cette répartition n'est pas illustrée dans le graphe (a).
- Il y a une différence significative entre la proportion d'énergie imputable à la phase de production de l'étude de McKinsey et celle de Raghavan. Selon McKinsey, seulement 22% des émissions de CO_2e provient de la phase de production tandis que, selon Raghavan, 52% de l'énergie consommée et dû à la production

des composants. Plusieurs causes peuvent être à l'origine de cet écart : premièrement, les émissions de CO_2e varient selon la source d'énergie. Deuxièmement, lors de la phase de production, des gaz à effet de serre sont relâchés dans l'atmosphère tels que les perfluorocarbure (PFC). Ces gaz sont indépendants de l'énergie consommée et peuvent donc alourdir le bilan CO_2e de la phase de production par rapport à une étude se focalisant uniquement sur l'énergie. Dans notre cas, ce phénomène devrait donc adoucir l'écart entre les études, ce n'est donc pas la raison pour laquelle la phase de production de l'étude énergétique a un impact plus important que celle évaluant l'empreinte carbone. Troisièmement, cette différence peut provenir des hypothèses de départ sur le temps de vie et la consommation moyenne des appareils. Finalement, la raison majeure de cet écart pourrait découler de la confusion entre les unités d'énergie : Raghavan aurait comparé de l'énergie primaire pour la phase de production avec de l'énergie électrique pour la phase d'utilisation. En effectuant la conversion, nous arrivons à 29% de l'énergie primaire imputable à la phase de production. Cette valeur est plus en accord avec les résultats de l'étude de McKinsey.

- Les résultats concernant la phase d'utilisation - bande foncée de b, c et d - divergent d'une étude à l'autre : selon McKinsey, les ordinateurs et moniteurs émettent 2,6 fois plus de CO_2e que les centres de données lors de la phase d'utilisation alors que, selon Pickavet et Raghavan, la consommation énergétique globale de ces deux catégories est presque équivalente. Cette forte différence peut provenir des hypothèses sur la fréquence d'utilisation des appareils ainsi que sur leur consommation en mode veille et actif. Le rapport entre la consommation des centres de données et celle des éléments du réseau varie également fortement suivant l'étude : de 0,6 pour McKinsey jusqu'à 4,27 pour Raghavan. La cause de cet écart peut provenir d'un inventaire du réseau différent et des hypothèses sur la consommation moyenne des dispositifs.
- Bien que les études de McKinsey (b) et Pickavet (c) estiment l'impact environnemental des TIC, leur champ d'étude n'est pas identique, ce qui a des conséquences directes sur les résultats et sur leur interprétation. Par exemple, Pickavet prend en considération les téléviseurs, les équipements audio et les consoles de jeu. Le rapport entre consommation lors de l'utilisation des terminaux et celle des éléments du réseau est alors de 2,1. Ce rapport ne vaut que 1,1 pour McKinsey qui ne tient pas compte des appareils cités précédemment. Dès lors, la conclusion de la première étude serait que l'impact du réseau est deux fois plus faible que celui des terminaux alors que celle de la deuxième serait que la consommation des TIC en phase d'utilisation est équitablement répartie entre les terminaux et les éléments du réseau.

Projection à l'horizon 2020

Selon [3], les émissions de CO_2 dues aux TIC seront 1,7 fois plus élevées en 2020 par rapport à 2007, ce qui correspondra à 2,6% des émissions globales. D'après

[16], la consommation électrique des TIC va être multipliée par 2,8 sur le même laps de temps, ce qui correspondra à 14% de la consommation électrique mondiale.

Pour ce qui est de l'évolution de la répartition en sous-secteurs au cours du temps, ces deux études ont des résultats différents : d'un côté, McKinsey estime que l'impact des ordinateurs et des périphériques représentera une part plus importante des émissions globale des TIC en 2020 par rapport à aujourd'hui. La part dédiée aux infrastructures de télécommunication sera moins conséquente et celle des centres de données augmentera sensiblement. D'un autre côté, Pickavet estime que la consommation de l'ensemble des centres de données et de l'infrastructure du réseau augmentera plus par rapport à celle des ordinateurs et des périphériques de 2008 à 2020. Cette différence s'explique par le fait que l'évolution des technologies est très incertaine et qu'il est difficile d'estimer la consommation des dispositifs électroniques en 2020. L'estimation de croissance du nombre d'appareils au niveau mondial est également une source d'incertitude.

2.3 Effet de substitution et effet rebond

Après avoir estimé l'empreinte écologique des TIC, il est intéressant d'étudier les réductions que ceux-ci pourraient engendrer sur les émissions de CO_2 globales de l'humanité. En effet, si par exemple l'impact des TIC augmente à cause de la hausse du trafic sur le réseau due à une augmentation du téléchargement de e-books en ligne, l'impact global pourrait baisser grâce à la diminution du nombre de livres et donc à la réduction de l'énergie consommée pour la fabrication de papier, l'impression du livre, son transport, etc. Nous appellerons ce phénomène l'effet de substitution. Cet effet consiste à utiliser un produit à la place d'un autre qui remplit la même unité fonctionnelle (voir 2.4) et qui a un impact environnemental moindre. Rappelons que, dans cette étude, nous nous focalisons uniquement sur l'impact énergétique et, indirectement, climatique mais qu'il est indispensable de considérer tous les impacts environnementaux pour comparer deux produits.

Le rapport *SMART 2020* de McKinsey [3] fait référence dans l'estimation du potentiel des TIC à réduire les émissions de CO_2 globales et est cité dans de nombreux articles scientifiques abordant l'efficacité énergétique du réseau Internet tels que [18], [19] et [20]. La conclusion de cette étude est que le potentiel de diminution des émissions de CO_2 des TIC à l'horizon 2020 (7,8 $GtCO_2e$) est 5 fois plus important que leurs émissions directes - discutées à la section précédente - (1,4 $GtCO_2e$) et qu'il équivaut à 15% des émissions globales prédites en 2020. Les plus grandes opportunités de diminution seront dues à une gestion intelligente des moteurs, de la logistique, des bâtiments et du réseau de distribution du réseau électrique à l'aide des TIC. C'est maintenant aux décideurs politiques, aux industriels et au secteur des TIC de mettre tout en œuvre pour que ce potentiel soit réalisé.

Une interprétation rapide de ces résultats pourrait être que bien que les TIC vont continuer à se développer dans les années à venir - augmentation du trafic sur le réseau, du nombre de centres de données, de smartphones, de tablettes, etc. - et

que leur empreinte carbone va être multipliée par 1,7 de 2007 à 2020, cette hausse est faible par rapport aux économies d'énergie qui vont être réalisées grâce à ce développement. Cette interprétation est cependant erronée. De même, comparer les améliorations potentielles des TIC avec leur impact direct - ce qui a été réalisé dans le rapport *SMART 2020* - n'est en réalité pas pertinent et ce pour plusieurs raisons :

- Premièrement, la plupart des économies potentielles présentées ne sont en réalité pas causées par l'évolution de l'empreinte carbone des TIC calculée dans ce rapport. En effet, alors que l'évolution de l'empreinte carbone des TIC est due à l'augmentation du nombre d'utilisateurs - et donc au nombre d'ordinateurs, d'appareils mobiles, de centres de données, de bornes d'accès - et à la hausse de trafic sur le réseau, le potentiel de diminution de l'empreinte carbone est dû à plus de 80% à des dispositifs ne rentrant pas dans ces catégories tels que l'optimisation de la vitesse des moteurs ou la réduction des pertes sur le réseau électrique. Les seules diminutions de rejet de CO_2 liées à l'augmentation de l'impact direct des TIC sont celles dues à la dématérialisation - moins de DVD, de papier, de transports grâce aux vidéoconférences, au travail à domicile, au e-commerce, etc. Ces pratiques ne représentent que 10% des diminutions totales potentielles (7,8 $GtCO_2e$).
- Une remarque supplémentaire sur ce genre d'études est qu'elles ne comparent pas des unités fonctionnelles similaires, c'est-à-dire que les fonctions réalisées sont parfois fort différentes. Dans le cas de la dématérialisation liée à la substitution d'un DVD par la visualisation d'un film en ligne, l'unité fonctionnelle est identique : regarder un film. L'utilisateur aura même tendance à préférer la deuxième solution car cela lui évite de se déplacer. Le potentiel de diminution des émissions de CO_2 est dans ce cas possible sans altérer l'utilité - ou le niveau de vie - d'un individu. Par contre, pour la dématérialisation liée au travail à domicile par exemple, la question est plus complexe. Si l'unité fonctionnelle est simplement de travailler X heures par jours sur un ordinateur, alors la comparaison entre travail à domicile et travail au bureau est envisageable. Cependant, cette unité fonctionnelle ne tient pas compte de l'importance des contacts informels au sein de l'entreprise qui ont un impact direct sur l'individu et le travail qu'il réalise. Dans ce cas, le potentiel de diminution des émissions de CO_2 existe mais cette technique aura un impact sur l'utilité de l'individu.
- Finalement, une critique de l'étude *SMART 2020* est qu'ils estiment l'impact direct des TIC selon un scénario *business as usual* et le comparent ensuite aux réductions d'émissions de CO_2 réalisables dans différents secteurs grâce à la mise en place de nouvelles technologies (par exemple la domotique dans les bâtiments ou la gestion du réseau électrique). Cette approche n'est pas rigoureuse car elle ne tient pas compte de l'augmentation des émissions de CO_2 liée à l'installation de ces nouveaux dispositifs. Il serait par exemple intéressant de comparer l'énergie dépensée pour la production des capteurs et des systèmes de gestion de l'énergie au sein d'un bâtiment par rapport aux gains réalisés en phase d'utilisation.

En plus de toutes ces critiques, il faut tenir compte de l'effet rebond, c'est-à-dire l'augmentation de la consommation d'un produit liée à la réduction des limites à l'utilisation de celui-ci. Par exemple, les individus vont avoir tendance à regarder plus de films grâce au téléchargement en ligne que lorsqu'ils devaient se déplacer pour aller acheter un DVD. Cette augmentation va induire un trafic plus élevé sur le réseau et une utilisation plus fréquente de l'écran, ce qui implique une consommation énergétique plus importante. Un autre exemple d'effet rebond, décrit dans [21], concerne le remplacement des écrans à tubes cathodiques par les écrans à cristaux liquides (LCD) : ce dernier est moins encombrant et consomme moins, il a donc été possible de réaliser des écrans plus larges. Les offres commerciales ont alors modifié les "besoins" des consommateurs qui ont achetés des écrans plus larges. Au final, le gain énergétique est nul car un écran LCD de 24 pouces consomme autant qu'un à tubes cathodiques de 17 pouces. Plus spécifiquement, au niveau du réseau de télécommunication, bien que le nombre de watts par Mbps diminue, la consommation énergétique du réseau continue à augmenter. Ceci est dû au fait que l'efficacité énergétique est actuellement couplée à l'évolution des technologies (voir Section 3.2) et à l'augmentation de la vitesse de transfert des données sur le réseau. Plus la vitesse de transfert est importante et plus les individus utilisent des applications nécessitant un débit de données plus important.

Finalement, affirmer que le potentiel de diminution des émissions de CO_2 réalisable à l'aide de technologies utilisant les TIC équivaudra à 15% des émissions globales en 2020 n'est pas très pertinent car, en réalité, une grande partie des émissions actuelles sont indirectement dues aux TIC. En effet, selon [22], un tiers de la croissance économique dans les pays de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) entre 1970 et 1990 est due à l'accès au réseau de télécommunication, ce qui a permis de diminuer le coût des transactions et d'aider les firmes à accéder à de nouveaux marchés, ce qui a facilité la mondialisation de l'économie. Et puisque croissance économique et consommation d'énergie sont intimement liés [23], les TIC sont indirectement responsables d'une partie de la consommation énergétique actuelle mondiale et des rejets de CO_2 dans l'atmosphère.

2.4 Définitions et unités

Comme nous l'avons observé dans les sections précédentes, les résultats sont parfois fort différents d'une étude à l'autre et il est difficile de tirer un constat clair sur l'impact réel des TIC et de l'importance de chacun de ses sous-secteurs. La cause de ces divergences peut provenir :

- d'une définition différente des TIC ou de l'omission de certains dispositifs du réseau dans l'inventaire de l'étude
- de frontières du système mal définies : il est rarement précisé de quoi tient compte la phase de production des dispositifs (transport, extraction des matières premières, etc.)
- d'erreur de conversion lorsque différentes unités d'énergie sont manipulées.

Pour palier à ces manques et pour obtenir une analyse la plus conforme et la plus transparente possible, la définition de TIC et de l'Internet sera d'abord discutée. Deuxièmement, l'outil d'analyse de cycle de vie (ACV) qui permet d'estimer les impacts environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie d'un produit en suivant des normes prédéfinies sera expliqué et discuté. Finalement, les facteurs de conversion des unités d'énergie employées dans ce genre d'étude seront présentés.

2.4.1 TIC et Internet : définitions

Les TIC et l'Internet sont deux notions relativement vagues et leur définition varie d'une étude à l'autre comme cela a été discuté dans la Section 2.2, ce qui peut déboucher sur des conclusions divergentes. Il est donc essentiel de consulter l'inventaire d'une étude avant d'utiliser ses résultats. En règle générale, les études concernant les TIC considèrent l'ensemble du réseau, les centres de données, les ordinateurs, les appareils mobiles et les télévisions. Certaines études tiennent également compte des consoles de jeux vidéos. Les communications satellites sont rarement étudiées.

Définir la consommation énergétique de l'Internet est encore plus complexe car un même appareil peut être utilisé pour supporter une application Internet mais également un autre moyen de communication. C'est par exemple le cas de stations de base qui sont utilisées par les appareils mobiles pour des appels téléphoniques mais également pour accéder à l'Internet.

Dans cette étude, nous tiendrons compte des centres de données, du réseau central, de l'accès au réseau et des terminaux (ordinateurs ou smartphones). L'étude sera "ascendante", c'est-à-dire qu'une consommation en J/Mb sera allouée à chaque partie de l'Internet. La consommation globale sera ensuite déduite à l'aide de données mondiales de trafic Internet. Il ne sera donc pas nécessaire de définir un "poids" correspondant au pourcentage dédié à l'Internet à chaque élément du réseau, ce qui est le cas pour les études "descendantes" qui estiment la consommation énergétique globale de l'Internet à partir du nombre d'appareils et de leur consommation moyenne.

Dans la suite de ce rapport, nous ferons également référence au *cloud computing* qui consiste à utiliser les aptitudes de systèmes informatiques qui sont basés sur les nuages (*cloud*), c'est-à-dire qui sont installés dans des centres de données et qui sont accessibles via le réseau Internet. En d'autres mots, les applications ou les données ne sont plus entreposées sur la machine de l'utilisateur mais sur des serveurs accessibles via le réseau. D'un côté, cette nouvelle tendance permet de consommer moins d'énergie sur les terminaux car ce ne sont pas eux qui font tourner l'application. De l'autre, cela nécessite une plus grande capacité installée de serveurs et un trafic sur le réseau plus important. Cette pratique induit donc une délocalisation des dépenses énergétiques des terminaux vers le réseau.

2.4.2 Outil d'analyse : ACV

Présentation

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) consiste à évaluer les impacts environnementaux d'un produit sur l'ensemble de son cycle de vie. Celui-ci est schématisé à la Figure 2.5 [24]. Il y a 4 phases principales :

1. La production des matières premières à partir des ressources naturelles.
2. La fabrication du produit
3. L'utilisation : principalement l'électricité.
4. L'élimination : les composants du produits peuvent alors être brûlés, recyclés, réutilisés ou renouvelés.

A ces 4 phases, il faut également ajouter le transport qui permet d'acheminer les matériaux d'un site à un autre. Dans la suite de ce rapport les phases 1 et 2 ainsi que le transport seront rassemblés sous l'appellation "production", la phase 3 sera nommée "utilisation" et la phase 4 "fin de vie".

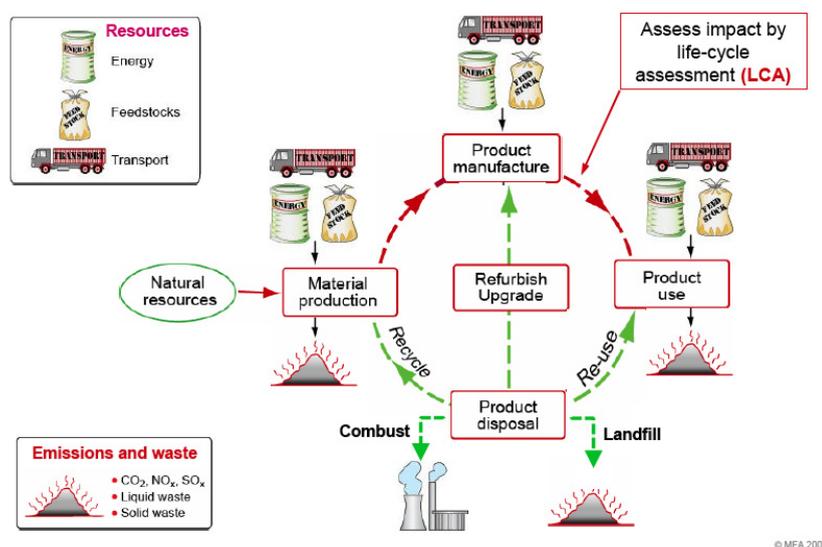


FIGURE 2.5: Cycle de vie d'un produit [24]

Norme internationale

Une ACV doit suivre la norme internationale ISO 14040 : 2006 [25] qui spécifie les principes et le cadre. L'analyse doit se faire en 4 étapes présentées dans la Figure 2.6 [24] :

1. La définition de l'objectif et du champ de l'étude : durant cette étape, l'unité fonctionnelle est définie, elle quantifie la fonction d'un produit et permet de le comparer avec un autre ayant une unité fonctionnelle similaire. Les frontières du systèmes sont également établies : quelles phases du cycle de vie sont étudiées et à quel degré. Par exemple, est-ce que la fabrication du

bulldozer utilisé dans une mine de silice sera pris en compte dans l'ACV d'un circuit intégré ?

2. L'inventaire de cycle de vie consiste à recenser et à quantifier les flux de matière et d'énergie entrant et sortant du système étudié.
3. L'évaluation de l'impact de cycle de vie permet de traduire les résultats obtenus au cours de l'inventaire en impacts environnementaux. Par exemple : épuisement des ressources, impact sur la santé humaine, utilisation des terres, changements climatiques...
4. L'interprétation du cycle de vie permet de tirer des conclusions de l'évaluation des impacts et de présenter les limites de l'étude. Elle consiste également à identifier et évaluer les pistes d'amélioration de la charge environnementale.

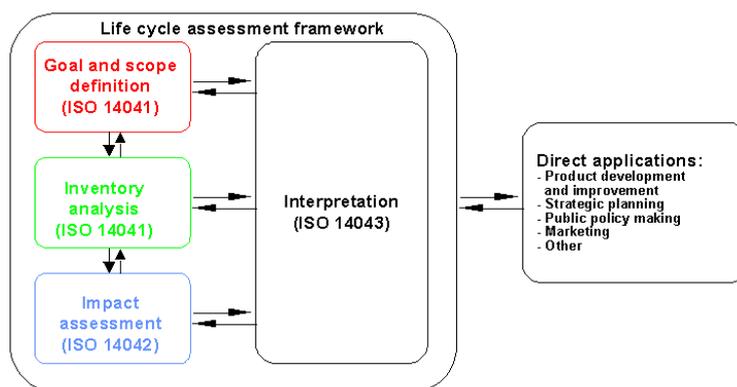


FIGURE 2.6: Etapes du processus d'analyse du cycle de vie (ISO14040) [24]

Limites de l'ACV

Bien que l'ACV soit un outil rigoureux pour estimer et comparer l'impact environnemental d'un produit, il souffre de quelques limitations, principalement dans le domaine de l'électronique et des télécommunications :

- manque de données pour la phase de production. Le nombre de sous-traitants est souvent important, il est donc difficile de connaître la consommation de toute la chaîne de production. De plus les données de consommations sont souvent gardées confidentielles par les industriels.
- les données de consommation varient en fonction de la technologie. Celle-ci évoluant relativement vite en électronique, une étude devient donc vite obsolète.
- estimer la consommation énergétique en phase d'utilisation du réseau de télécommunication est complexe car sa consommation est dynamique et les interactions se font au niveau planétaire.
- les résultats en phase d'utilisation dépendent des hypothèses d'utilisation, de fonctionnement (modes), de la puissance moyenne estimée et du taux de conversion énergie primaire/énergie finale.

Par conséquent, il est "facile" pour un fabricant de communiquer des "bons" chiffres en jouant sur les hypothèses de départ (unité fonctionnelle, les frontières de l'étude, zone géographique considérée), la méthode utilisée (critère unique ou pas) et la

qualité et fiabilité des données. Il s'agit donc de rester critique vis-à-vis de ce genre d'études.

Dans la suite de cette étude, nous utiliserons des résultats d'analyses de cycle de vie pour estimer l'impact de la phase de production par rapport à celle d'utilisation. Une attention particulière sera apportée à la confrontation des résultats et à l'utilisation des données les plus récentes. Seul le critère énergétique sera analysé, il faudra donc rester conscient lors des conclusions qu'une solution qui paraît meilleure d'un point de vue énergétique pourrait s'avérer néfaste suivant un autre critère - épuisement des ressources, acidification, impact sur la santé humaine, etc.

2.4.3 Grandeurs physiques

Les résultats des études sur la consommation énergétique de l'Internet et des TIC peuvent être présentés à l'aide de 3 grandeurs physiques différentes :

1. L'énergie consommée sur une période de temps en Kilowatt-heure [kWh] ou en mégajoule [MJ]
2. La puissance moyenne sur une période de temps en Kilowatt [kW]
3. L'émission de gaz à effet de serre en tonne de CO_2 équivalent [tCO_2e]

Les facteurs de conversion sont présentés ci-dessous :

$$E[kWh] = \frac{1}{3,6} \cdot E[MJ] \quad (2.1)$$

$$= 365 \cdot 24 \cdot P[kW] \quad (2.2)$$

$$= \frac{10^6}{\alpha_{CO_2}} \cdot CO_2[tCO_2e] \quad (2.3)$$

où α_{CO_2} correspond aux émissions de CO_2 par kWh d'électricité produit [gCO_2/kWh] et donc différentes valeurs sont données dans le tableau 2.2 [26]. Celles-ci varient d'une région à l'autre en fonction des moyens de production. Par exemple, en France, plus de 80% de l'électricité provient de l'énergie nucléaire, faible émettrice de CO_2 tandis qu'en Chine, 80% de l'électricité provient de la combustion d'énergie fossile - principalement de charbon. C'est pourquoi un kWh électrique produit en Chine émet 10 fois plus de CO_2 dans l'atmosphère qu'un kWh français. Il est à noter que les valeurs présentées dans le tableau 2.2 dépendent des hypothèses mises en place et peuvent varier significativement d'une base de donnée à l'autre, ce qui augmente encore l'incertitude sur les résultats. De plus ces valeurs correspondent uniquement à la production d'électricité et ne sont donc pas valables pour déduire l'énergie consommée du CO_2e lors de la phase de production. En effet, lors de cette phase, d'une part, du combustible est directement utilisé sous forme de chaleur pour transformer les matériaux et, d'autre part, des gaz à effet de serre sont émis lors du processus de production tels que les perfluorocarbures (PFC) qui

TABLE 2.2: Emission de CO_2 par kWh d'électricité (2010)

Région	α_{CO_2} [gCO_2/kWh]
France	79
Belgique	220
Europe des 27	429
Etats-Unis	522
Chine	766
Monde	565

ont un potentiel de réchauffement climatique 7600 fois supérieur à celui du CO_2 .

Il faut également faire la distinction entre énergie primaire et énergie finale : l'énergie primaire est l'énergie présente dans la nature sous forme de bois, charbon, pétrole, uranium, etc. Tandis que l'énergie finale est l'énergie disponible pour le consommateur telle que l'essence ou l'électricité.

Dans la plupart des ACV, la consommation est exprimée en énergie primaire alors que les études concernant uniquement la phase d'utilisation travaillent en énergie finale, c'est-à-dire en énergie électrique consommée aux bornes de l'appareil. La relation entre énergie primaire et finale est caractérisée par le *Primary Energy Factor* (PEF) qui prend en compte l'extraction du combustible, son transport, sa transformation en vecteur énergétique et le transport de celui-ci jusqu'à l'utilisateur final. Le PEF varie également d'une région à l'autre. Celui-ci vaut approximativement 2,6 pour l'électricité disponible en Europe [27] et 3,3 pour l'électricité produite aux Etats-Unis [9]. Il y a également une incertitude sur cette valeur car elle dépend des éléments pris en considération lors de son calcul.

Chapitre 3

Modèle et consommation énergétique des éléments de l'Internet

Le réseau de communication est complexe et les données s'y rapportant sont dans la plupart des cas confidentielles. De plus, les mesures de consommation énergétique en utilisation réelle sont rares et, quand elles existent, ne sont pas toujours pertinentes car elles ne sont pas associées à des mesures de débit de données ou de capacité de calcul dans le cas des centres de données. Par conséquent, pour estimer et modéliser la consommation énergétique de l'Internet, plusieurs hypothèses et approximations seront réalisées d'une part sur la structure du réseau et, d'autre part, sur la consommation énergétique des éléments qui le constituent. Pour obtenir des résultats les plus représentatifs, une attention particulière sera apportée à la confrontation des sources et à l'utilisation des données de consommation les plus récentes. En effet, les technologies et les pratiques évoluant rapidement, l'utilisation de données datant de plusieurs années peut mener à des conclusions erronées.

Les améliorations potentielles futures des éléments du réseau seront également étudiées en détail. Cela permettra d'identifier quelles parties du réseau ont déjà été optimisées et lesquelles ont le plus grand potentiel d'amélioration. Cette approche mettra également en évidence les principales limites d'efficacité énergétique sur l'ensemble du réseau auxquelles nous serons confrontés dans quelques années. Finalement, cela permettra de déterminer quels genres d'améliorations sont à privilégier et dans lesquelles il serait pertinent d'investir en priorité. Pour ce faire, elles seront classées en trois catégories :

1. *Proportionnalité* : techniques et technologies qui permettent d'avoir une consommation énergétique qui varie proportionnellement avec la charge ou le débit de données
2. *Efficacité* : technologies qui permettent de réaliser la même fonction avec moins d'énergie
3. *Changements structurels* : changements au niveau de la structure du réseau et pas au niveau d'un seul élément.

Dans la mesure du possible, la consommation énergétique des éléments du réseau sera également modélisée pour étudier le potentiel d'efficacité énergétique.

Plus précisément, le chapitre sera construit de la manière suivante : premièrement, le modèle du réseau sera présenté. Ensuite, une section sera consacrée à la consommation énergétique des semi-conducteurs. Les résultats de cette section seront utilisés par la suite pour étudier les améliorations potentielles d'efficacité. Finalement, la modélisation, la consommation et les pistes d'amélioration énergétiques des éléments du réseau seront étudiées dans des sections distinctes.

3.1 Modèle du réseau

Le modèle du réseau Internet que nous considérons est schématisé à la Figure 3.1. Il est divisé en 4 sections :

1. les centres de données : cette section tient compte des centres de données à proprement parler ainsi que du réseau pour y accéder.
2. le réseau central (*backbone*) qui relie les différents réseaux d'accès entre eux. Il utilise les technologies les plus rapides et une large bande passante sur de grandes distances. Il est principalement constitué de *switchs* (commutateurs) et de routeurs reliés entre eux par des lignes de fibre optique.
3. le réseau d'accès : contrairement au réseau central, les réseaux d'accès sont organisés en arborescence : tous les utilisateurs sont connectés à un nœud central. Trois cas de figures sont étudiés : accès directement via câble (DSL), accès par câble suivi d'une connexion Wi-Fi et accès via le réseau mobile (station de base).
4. les terminaux : 3 catégories de terminaux sont comparées : les ordinateurs fixes, les ordinateurs portables et les smartphones. Contrairement aux autres éléments du réseau, les terminaux ne seront pas étudiés en détail dans ce travail : seule leur consommation en phase de production, d'utilisation et de fin de vie sera estimée, les améliorations potentielles d'efficacité énergétique ne seront pas abordées.

La consommation énergétique de l'Internet est la somme des dépenses énergétiques de chacune de ces sections et est donnée par :

$$E_{Internet} = E_{DC} + E_{backbone} + E_{access} + E_{terminal} \quad (3.1)$$

où E_{DC} , $E_{backbone}$, E_{access} , $E_{terminal}$ sont l'énergie dépensée pour effectuer une certaine tâche (par exemple, la visualisation d'une vidéo en streaming) dans les centres de données, le réseau central, l'accès au réseau et le terminal, respectivement. A ces différentes sections de l'Internet, il faudrait ajouter les réseaux de capteurs sans fil (WSN) qui sont en pleine expansion avec l'avènement de l'*Internet of Things* (IoT). La consommation en phase d'utilisation des WSN est faible par rapport à l'énergie dépensée pour leur fabrication [28]. Avec la croissance exponentielle de

leur nombre prédite dans les années futures, leur impact énergétique pourrait devenir significatif par rapport au reste du réseau Internet. Bien que cette question soit pertinente, elle sort du cadre de ce travail.

Il est à noter que, dans la nomenclature, les énergies E_x sont exprimées en J dépensé par Mb transmis. Dans le Chapitre 4, l'énergie sera exprimée en J par tâche réalisée - qui correspond à un certain nombre de Mb. Il convient également de mentionner que les unités $[J/Mb]$ et $[W/Mbps]$ sont équivalentes et correspondent toutes deux à des unités d'énergie.

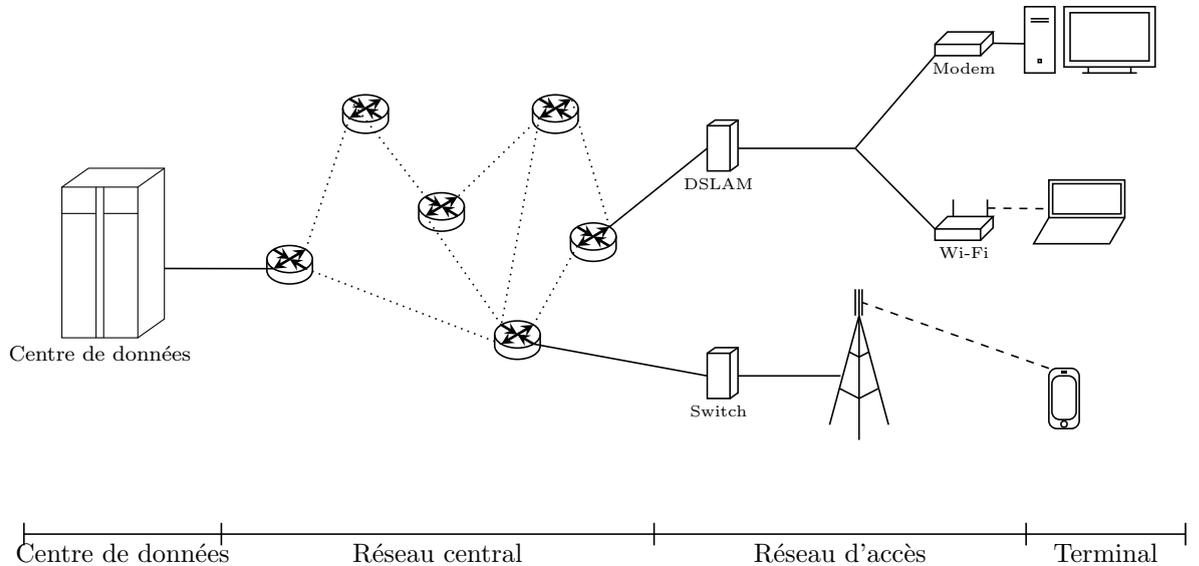


FIGURE 3.1: Modèle simplifié du réseau Internet

3.2 Semi-conducteurs

Les améliorations de l'efficacité énergétique des TIC peuvent être réalisées à différents niveaux de conception. Ceux-ci sont schématisés à la Figure 3.2 pour le cas particulier d'un centre de données. Les deux premiers niveaux (semi-conducteurs et processeurs) sont présents dans tous les éléments du réseau : routage, *digital signal processing* (DSP), terminaux, etc. L'évolution de leur consommation énergétique a donc un impact direct sur la consommation de l'ensemble de l'Internet. La tendance de cette évolution sera donc discutée en détail dans cette section. Les améliorations des autres niveaux seront présentées dans des sections distinctes pour chaque partie du réseau Internet. Il est à noter que tous les éléments d'un centre de données ne sont pas représentés à la Figure 3.2, ceux-ci seront étudiés dans la Section 3.3.

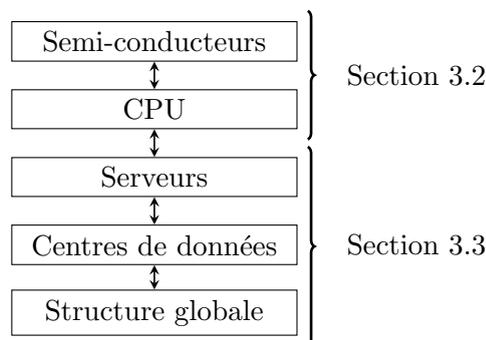


FIGURE 3.2: Différents niveaux de conception à partir desquels l'efficacité énergétique des centres de données peut être améliorée

3.2.1 Consommation énergétique sur l'ensemble du cycle de vie

Une analyse de cycle de vie des semi-conducteurs (CMOS) a été réalisée dans [9]. Les résultats de cette étude pour un processeur sont présentés à la Figure 3.3. Celle-ci donne la consommation d'énergie par puissance de calcul, exprimée en millions de transistors par circuit intégré. Bien que la relation entre puissance de calcul et nombre de transistors n'est pas nécessairement proportionnelle, le nombre de transistors reste un bon indicateur pour caractériser l'évolution de la puissance de calcul. En réalité, celle-ci dépend du nombre de transistors, de l'architecture, du jeu d'instructions, de la taille de la mémoire cache, de la vitesse de la mémoire et de la vitesse d'horloge. Une unité plus représentative serait le taux d'instruction effectué exprimé en million d'instructions par seconde (MIPS) mais celui-ci est encore trop dépendant de la séquence d'instructions utilisée pour le définir. Huit technologies ont été analysées s'étalant sur une période de 18 années : du nœud de 350 nm (1995) au nœud de 32 nm (2013). Comme représenté à la Figure 3.3, la phase d'utilisation est dominante et cette tendance s'est amplifiée au cours du temps. Elle contribuait pour environ 40% du cycle de vie en 1995 alors qu'elle est supérieure à 95% en 2013. La fabrication des semi-conducteurs est l'étape la plus énergivore de la phase de fabrication/production.

Bien que l'énergie par puissance de calcul ait diminué, l'énergie du cycle de vie par circuit intégré a augmenté au cours du temps comme représenté à la Figure 3.4. Cette tendance est principalement causée par l'augmentation de la puissance (en Watt) par circuit-intégré lors de la phase d'utilisation. Elle est également due à l'allongement des procédés de fabrication et l'expansion de l'infrastructure de fabrication. Les dispositifs sont en effet de plus en plus complexes, ce qui augmente le nombre d'étapes de fabrication.

Les hypothèses d'utilisation de cette étude correspondent à l'utilisation typique d'un processeur d'un centre de données (durée de vie de 18 mois, utilisé 95% du temps à un taux d'activité de 30%) ou d'un ordinateur personnel (durée de vie de 3 ans, utilisé 8h par jours, 5 jours par semaine et 50 semaines par an à un taux d'activité de 17%). Les résultats présentés ci-dessus dépendent fortement de ces hypothèses et par conséquent de l'application des processeurs. Comme démontré

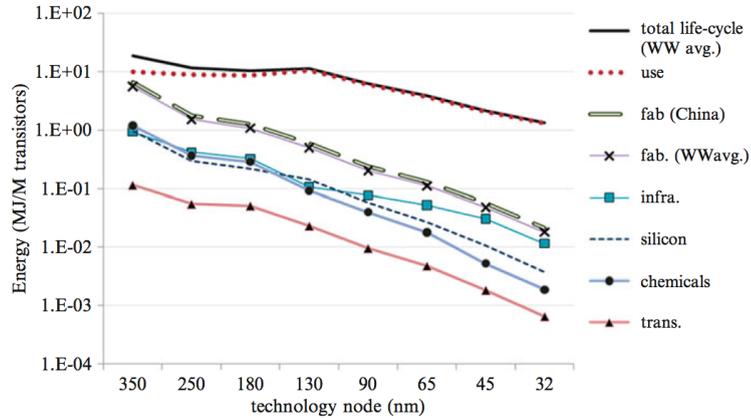


FIGURE 3.3: Consommation énergétique sur l'ensemble du cycle de vie d'un CPU par puissance de calcul [9]

dans [28], alors que la phase d'utilisation domine pour des processeurs à haute performance, la phase de production domine pour des applications de très faible consommation (WSN).

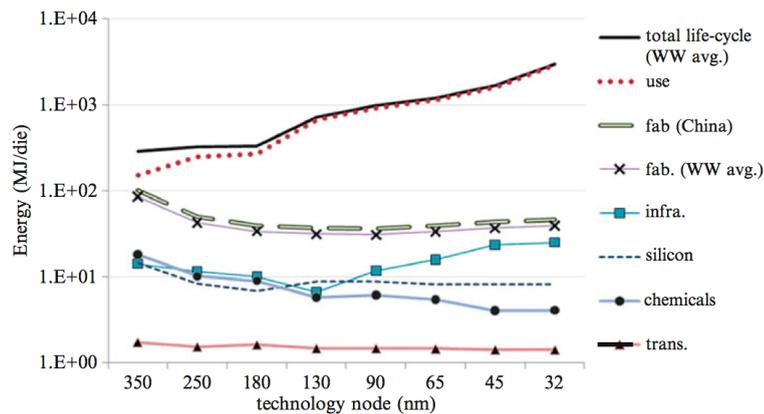


FIGURE 3.4: Consommation énergétique sur l'ensemble du cycle de vie d'un CPU par circuit intégré [9]

Les résultats de la même étude pour la mémoire DRAM sont présentés à la Figure 3.5 en énergie consommée par capacité de mémoire OS. Cinq technologies sont analysés sur une période allant de 1997 à 2008. Dans ce cas-ci, l'énergie dépensée lors de la phase d'utilisation ne domine pas le cycle de vie et est du même ordre de grandeur que l'énergie consommée par la phase de production. Cependant, la proportion de l'énergie de la phase d'utilisation a tendance à augmenter au cours du temps. Bien que l'impact énergétique par GB de mémoire a tendance à diminuer, la consommation associée à la mémoire requise par un système d'exploitation typique augmente. Cette tendance dépend fortement de l'efficacité des logiciels qui déterminent la fréquence des accès à la mémoire.

Une étude similaire a été réalisée dans [29] et concluait que 15,6kWh sont nécessaires pour la production et l'utilisation d'un 32MB DRAM (600nm) d'un poids de 2g. La répartition de cette énergie est donnée à la Figure 3.6. Bien que les

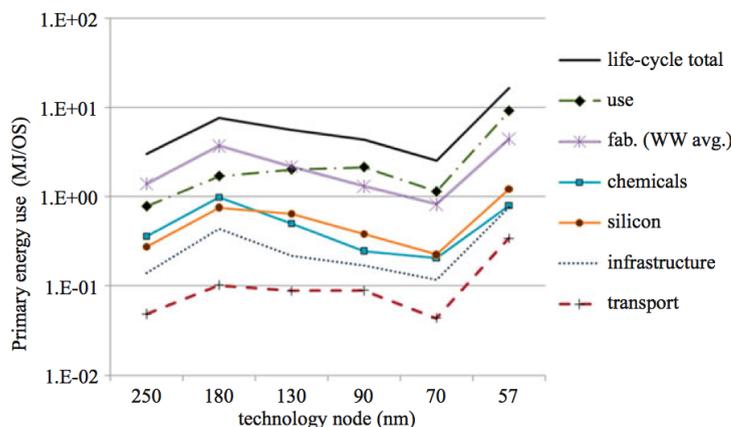


FIGURE 3.5: Energie primaire consommée par capacité de mémoire OS pour 5 technologies de nœuds [9]

hypothèses et l'unité fonctionnelle des études [9] et [29] soient différentes, les répartitions d'énergie des différentes phases du cycle de vie sont du même ordre de grandeur.

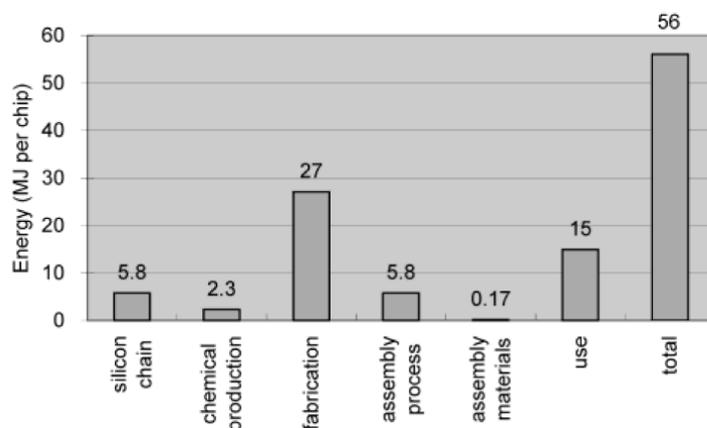


FIGURE 3.6: Energie primaire utilisée lors de la production et de l'utilisation d'un 32MB DRAM chip [29]

Il est à noter que les résultats de ces études dépendent fort des hypothèses d'utilisation et que les conclusions sur l'importance d'une phase par rapport à une autre doivent toujours être discutées. Par exemple, dans l'étude 3.6, la phase d'utilisation a été estimée à 4,17kWh. Cela correspond à un *chip* d'une puissance de 0,32 W utilisé pendant 4 ans à une fréquence de 3 heures par jour avec un PEF égal à 3. Cependant, pour un *chip* de 0,3 W utilisé pendant 4 ans à une fréquence de 2 heures par jour -données mentionnées dans [30] pour le même dispositif- et avec un PEF égal à 2,6, l'énergie lors de la phase d'utilisation vaut 1,75kWh. Cette valeur vaut un peu plus du tiers de l'estimation précédente. L'énergie dépensée lors de la phase d'utilisation est alors équivalente à l'énergie nécessaire à la chaîne de production du silicium et au procédé d'assemblage. Dès lors, sous ces hypothèses, la conclusion de l'étude "La phase de production et d'utilisation sont les 2 facteurs dominants" n'est plus exacte. En toute généralité, il est donc préférable de comparer les ordres de grandeur des différentes phases du cycle de vie et de

discuter de l'incertitude des données.

3.2.2 Evolution dans le temps de la consommation lors de la phase d'utilisation

Au milieu des années 80, les transistors bipolaires ont été remplacés dans de nombreuses applications par les transistors CMOS dont la densité de puissance était moindre. Cependant, avec l'augmentation du nombre de transistors par circuit intégré, la densité de puissance redevient problématique (Figure 3.7) et de nouvelles stratégies sont à mettre en place pour améliorer l'efficacité énergétique des dispositifs [5]. Actuellement les *Central Processing Unit* (CPU) des ordinateurs, des serveurs est des appareils portables sont composés de transistors CMOS tandis que les bipolaires sont principalement utilisés dans les amplificateurs de puissance RF et les commutateurs.

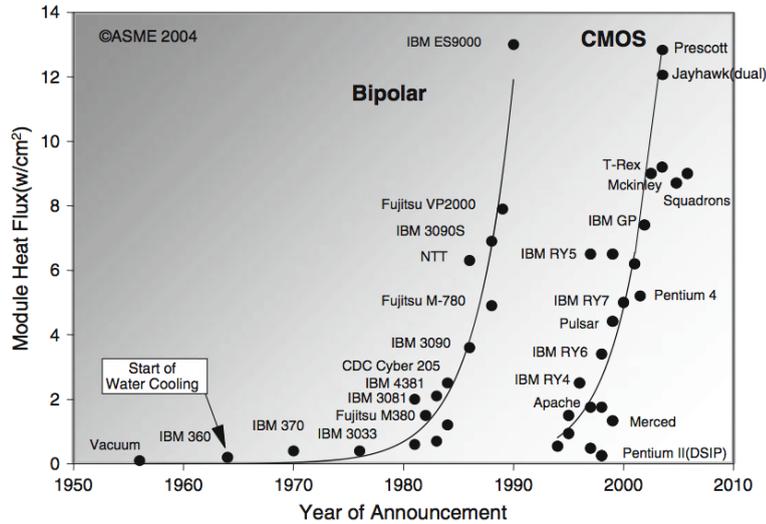


FIGURE 3.7: Evolution de la densité de puissance des transistors de technologie bipolaire et CMOS [5]

La question est de savoir quels facteurs influencent la puissance des dispositifs à base de semi-conducteurs et quelle sera sa tendance dans les années à venir ? La consommation d'un processeur est due, d'une part, à la puissance dynamique, c'est-à-dire à la puissance dépensée lorsque les transistors changent d'état et, d'autre part, à la puissance statique [5] :

$$P = P_{dyn} + P_{stat} \tag{3.2}$$

où la puissance dynamique peut être décrite par l'équation :

$$P_{dyn} = CV_{DD}^2 f \tag{3.3}$$

où C est la somme des capacités internes du processeur, V_{DD} la tension d'alimentation et f la fréquence d'horloge. L'évolution de ces différentes grandeurs peut être estimée à l'aide du facteur d'échelle technologique k . La capacité évolue linéairement avec k et jusqu'au milieu des années 90, la tension d'alimentation était fixée à 5V tandis que la fréquence d'horloge évoluait comme k^2 , ce qui permettait d'augmenter la puissance de calcul. La puissance dynamique évoluait donc comme k^3 . Ensuite la tension d'alimentation a été mise à l'échelle proportionnellement à la taille de la technologie, ce qui a permis de réduire la densité de puissance des transistors. A la même période, on ne pouvait plus augmenter la fréquence au même taux que précédemment à cause du courant de saturation, celle-ci évoluait alors comme $k^{1.7}$. Au final la puissance dynamique augmentait comme $k^{0.7}$. Actuellement, la fréquence d'horloge n'augmente presque plus, l'amélioration des performances se fait alors en augmentant le nombre de cœurs par processeur comme illustré à la Figure 3.8 [31].

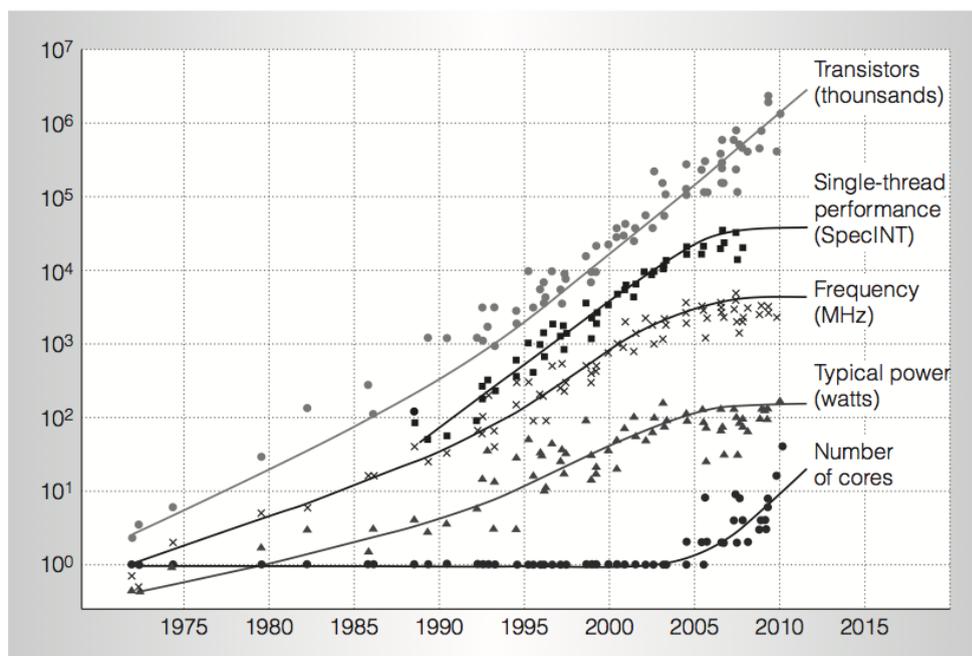


FIGURE 3.8: Tendence de l'évolution du nombre de transistors, de la fréquence d'horloge, du nombre de cœurs et des performances en *single-thread* des micro-processeurs des serveurs [31]

La tension d'alimentation a alors été diminuée jusqu'à aujourd'hui, ainsi que la tension de seuil des transistors V_{th} pour qu'un certain ratio entre ces deux valeurs soit maintenu. Il est alors apparu un nouveau problème : le courant de fuite lorsque la tension entre la source et la grille est mis à zéro évolue exponentiellement avec la réduction de V_{th} . La puissance statique P_{stat} négligeable jusqu'à présent est alors devenue significative. Ceci induit une limitation sur la réduction de V_{th} qui contraint la tension d'alimentation à rester au-dessus d'un certain plateau et limite les gains d'efficacité énergétique.

Pour augmenter la puissance de calcul tout en limitant la consommation énergétique, il faut donc actuellement optimiser les circuits, l'architecture et les algorithmes. Par exemple, à l'aide d'une gestion dynamique de la fréquence et de la tension en fonction de la charge, à l'aide de *power gating* en coupant le courant de fuite des blocs de circuit qui ne sont pas en cours d'utilisation ou en optimisant la topologie des circuits. Malgré ces améliorations, l'évolution perpétuelle de la puissance de calcul tout en gardant la consommation de puissance sous une certaine limite semble compromise sans l'avènement d'une nouvelle technologie ou de nouveaux paradigmes.

3.3 Centres de données

Historiquement, la consommation énergétique des centres de données n'était pas une priorité par rapport au souhait de robustesse et de fiabilité. Cependant, avec l'explosion du volume de données, leur coût énergétique est devenu significatif. Les industriels et chercheurs ont alors développé de nouvelles technologies et techniques de gestion des systèmes d'information moins gourmandes en énergie, notamment au niveau des infrastructures nécessaires à l'alimentation et au refroidissement des appareils électroniques. Dans cette section, les éléments d'un centre de données typique seront d'abord présentés. Ensuite, l'impact énergétique lors de la phase d'utilisation, de production et de fin de vie sera estimé. Finalement, la consommation sera modélisée pour ensuite étudier les pistes d'amélioration de l'efficacité énergétique.

3.3.1 Structure

Le schéma simplifié d'un centre de données est représenté à la Figure 3.9. La puissance est consommée par 3 blocs principaux : les appareils électroniques (P_{IT}), le système de refroidissement (P_{cool}) et le système d'alimentation électrique ($P_{DC} - P_{IT} - P_{cool}$). Dans ce diagramme, nous ne tenons pas compte de la puissance consommée par l'éclairage et par les systèmes auxiliaires nécessaires notamment à la sécurité du site. Il y a une dizaine d'années, ces dépenses pouvaient représenter quelques pourcents de la consommation énergétique globale d'un centre de données (tableau 3.1), cependant ces dépenses ont pu être facilement diminuées notamment en utilisant des ampoules moins énergivores et en arrêtant d'éclairer les salles de serveur 24 heures sur 24, ce qui était une pratique courante à l'époque.

Système d'alimentation

Le système d'alimentation est composé de :

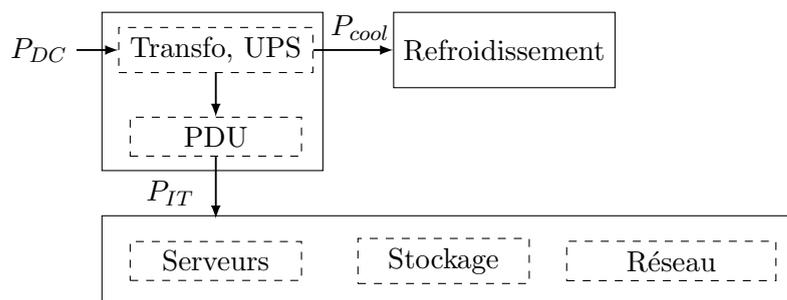


FIGURE 3.9: Diagramme simplifié d'un centre de données

- transformateurs et appareillages électriques (*switchgear*) permettant de connecter le centre de données au réseau électrique. Dans le cas de grands centres de données, ceux-ci sont directement reliés au réseau haute tension (60-400kV). Le rendement de conversion en basse tension est de l'ordre de 99%.
- *Uninterruptible power supply* (UPS) qui permet de fournir une alimentation électrique stable et sans coupure au matériel électronique. Ceci est généralement réalisé à l'aide d'une conversion du courant alternatif en courant continu et inversement (AC-DC-AC). L'UPS est également connecté à plusieurs générateurs diesel capables d'alimenter le centre de donnée en cas de coupure électrique sur le réseau.
- *Power Distribution Unit* (PDU) qui répartit la puissance dans les serveurs, les systèmes de stockages et les appareils du réseau.

Système de refroidissement

Le système de refroidissement permet d'évacuer la chaleur émise par les appareils électroniques pour éviter une hausse de la température et une détérioration du matériel. Il est également nécessaire de réguler le taux d'humidité de l'air ambiant. Les dépenses énergétiques liées à cette régulation sont souvent négligeable par rapport à celles du refroidissement. En règle générale, il est recommandé que l'aire ambiant ait une température comprise entre 18 et 27 °C et un taux d'humidité de 60% [32].

Les systèmes de refroidissement peuvent être de différents types. Ceux-ci seront discutés dans le Chapitre 3.3.5. Dans les centres de données traditionnels, l'air circule entre les *racks* (armoires de serveurs) et passe ensuite dans un échangeur de chaleur connecté à un climatiseur. Celui-ci est un cycle de réfrigération classique : à l'aide de compresseurs et de détendeurs, le fluide frigorigène transporte la chaleur de l'intérieur vers l'extérieur du bâtiment. La consommation dépend de la température extérieure : plus il fait chaud, plus il faudra d'énergie pour extraire la chaleur du centre de données. La consommation énergétique est principalement due au compresseur du climatiseur et aux ventilateurs utilisés pour faire circuler l'air entre les *racks* de serveurs.

Appareils électroniques

Les composants IT peuvent être classés en 3 catégories : les serveurs, le stockage de données et le réseau.

Les serveurs sont composés d'un système d'alimentation interne (PSU) qui convertit le courant AC en DC et à une tension de 12V, de ventilateurs, de processeurs (CPU) et de leur mémoire associée. Les serveurs sont superposés dans des *racks*, eux-même entreposés les uns à côté des autres dans de grandes salles climatisées.

Les espaces de stockage sont soit répartis à proximité de chaque serveur au sein des racks soit rassemblés et reliés aux serveurs par un réseau en fibre optique. Le stockage de données peut être réalisé grâce à des disques durs ou à des solid-state drives (SSD) (mémoire flash).

Le trafic au sein des centres de données est 4 fois plus important que le trafic entre ceux-ci et l'utilisateur [33]. Les différents serveurs sont reliés via un important réseau dont la topologie varie en fonction du service fourni par les serveurs. Le réseau est typiquement organisé en trois niveaux : il y a un switch par *rack*, lui même relié à des switches d'agrégation connectés à un routeur d'accès qui assure l'interface avec le réseau extérieur.

3.3.2 Consommation énergétique lors de la phase d'utilisation

La répartition des dépenses énergétiques mesurées sur différents sites est donnée dans le tableau 3.1. Les mesures réalisées de 2001 à 2003 proviennent de [34]. La troisième colonne donne la puissance totale tandis que les suivantes donnent la répartition en fonction des différentes parties du centre de données : les appareils électroniques (IT), le système de refroidissement (Cool), les transformateurs et UPS (UPS), le PDU et l'éclairage (Light).

La puissance des centres de données étudiés dans notre travail varie de 0,097 à 6 MW. Selon [35], deux tiers des sites ont une puissance inférieure à 1 MW et très peu ont une puissance supérieure à 30 MW. Dans la Section 3.3.5, nous étudierons les améliorations potentielles de l'efficacité énergétique. Certaines de ces techniques sont coûteuses. De plus, le rendement des systèmes d'alimentation et de refroidissement est souvent meilleur pour des puissances installées importantes. Les résultats de cette section ne seront donc réellement atteignables que pour les grands centres de donnée qui ne représentent qu'une faible part des installations. Cependant, avec l'avènement du *cloud computing*, les petites installations ont tendance à être abandonnées au profit de grands centres plus efficaces.

Il est à noter que les pourcentages dédiés aux appareils IT sont dans plusieurs cas surestimés car ils incorporent l'énergie dépensée dans le PDU. Par exemple, le rendement mesuré du PDU pour le centre de données *Gouvernement* (455kW)

est de 94,8%. Ce qui signifie que sur les 187 W dédiés à la partie IT, 10 sont en réalité perdus dans le PDU.

Parmi les mesures du tableau 3.1, la part de l'énergie réellement dédiée aux appareils électroniques (serveurs, stockage, réseau) ne représente que 30 à 68% de l'énergie totale. Le reste est consommé par le système d'alimentation, le système de refroidissement et l'éclairage. Pour définir la quantité d'énergie réellement utilisée par l'électronique par rapport à l'énergie totale, le *power usage effectiveness* (PUE) est souvent utilisé :

$$PUE = \frac{\text{Energie totale}}{\text{Energie consommée par les équipements IT}} \quad (3.4)$$

Pour des systèmes électroniques identiques, un centre de données avec un PUE plus faible consommera donc moins d'énergie. Pour les deux cas extrêmes du tableau 3.1, le PUE varie de 3,33 à 1,47. Selon une étude réalisée par l'Uptime institute en 2012, la moyenne globale des grands centres de données se situe entre 1,8 et 1,89 [36]. Tandis que la moyenne globale des centre de données de Google est de 1,12 [37]. Nous verrons dans la Section 3.3.5 les techniques qui permettent d'atteindre un PUE aussi faible.

TABLE 3.1: Répartition de la consommation énergétique d'un centre de données

Utilité	Date	P [kW]	IT [%]	Cool [%]	UPS [%]	PDU [%]	Light [%]
Colocation	2001	2990	51	33	14		2
Colocation	2001	4000	51	31	13		4
Colocation	2001	1760	59	30	9		2
Stockage de données	2002	155	59	35	5		1
Gouvernement	2003	97	33	50	9		8
Calcul scientifique	2003	836	68	30			2
Finance	2003	1395	47	37	12		4
Télécom	2003	1281	38	54	6		2
Gouvernement	2003	455	41	46	7		6
Salle de calculs	2003	4785	51	42	5		2
France Télécom [14]	2006	6000	39	27	18	13	3
DC typique [35]	2009		30	42	19	5	1
DC typique [38]	2009		61	30	6	2	1

Bien que les données du tableau 3.1 permettent de visualiser la répartition des dépenses énergétiques au sein des 3 grands blocs, elles ne donnent aucune information sur la répartition au sein des appareils électroniques. De plus, elles ne permettent pas de lier la consommation énergétique à une certaine tâche (capacité de calcul, de stockage, etc.). Ces informations nous seront utiles pas la suite pour estimer la répartition énergétique sur l'ensemble du réseau d'une requête Internet (vidéo en streaming, email, web, etc.).

Des données de consommation correspondant à certaines tâches ont été dévoilées par Google [39] et sont présentées dans la deuxième colonne du tableau 3.2.

Ces tâches sont une recherche Internet, la visualisation d'une vidéo en streaming pendant une minute et l'utilisation standard d'une boîte mail pendant un an. La troisième colonne a été calculée à partir du facteur de conversion du *monde* du tableau 2.2. La dernière colonne a été obtenue en divisant la troisième colonne par le PUE moyen des centres de données de Google.

TABLE 3.2: Données d'émissions de CO_2e de Google (première colonne)

	Empreinte carbone [gCO_2e]	Energie [kWh]	Energie IT [kWh]
Recherche Google	0,2	$300 \cdot 10^{-6}$	$268 \cdot 10^{-6}$
Youtube (1 min)	0,1	$150 \cdot 10^{-6}$	$134 \cdot 10^{-6}$
Gmail (1 an)	$1,2 \cdot 10^3$	1,8	1,6

La répartition des dépenses énergétiques au sein des appareils électroniques est difficile à estimer et dépend principalement de l'architecture du réseau, de la tâche à réaliser et des technologies employées. En effet, la proportion d'énergie dépensée par les CPU d'un centre de données dédié aux calculs sera différente que un dédié aux vidéos en streaming par exemple, nécessitant plus d'énergie pour l'accès au stockage de données.

Selon plusieurs études, la proportion de l'énergie dédiée au réseau varie entre 5% et 15% de l'électricité consommée par le matériel IT [38] [40] [41]. Selon [35] (2009), la répartition des appareils IT d'un centre de données typique est telle que présentée dans le tableau 3.3. Cette étude affirme également que, ces dernières années, l'amélioration de l'efficacité énergétique des CPU a été plus rapide que celle des disques et de la mémoire DRAM. Par manque de données sur la répartition énergétique au sein des appareils IT pour différentes catégories de centres de données, nous utiliserons les chiffres du tableau 3.3 pour analyser les améliorations potentielles de l'efficacité.

TABLE 3.3: Répartition de la puissance du matériel IT dans un centre de données

CPU	DRAM	Disques	Autre (serveurs)	Réseau
33 %	30 %	10 %	22 %	5 %

3.3.3 Consommation énergétique lors de la phase de production et de fin de vie

L'analyse du cycle de vie d'un *rack* de serveur a été réalisée dans [42]. Selon l'étude, 6360 kg de CO_2e sont émis par un rack sur l'ensemble de son cycle de vie. 90% de ces émissions est du à la phase d'utilisation. La phase de production ne représente que 10% de l'impact global alors que le recyclage de 75% du serveur permet de

diminuer l'empreinte carbone de 1%. La phase de production est dominée par la fabrication de la carte mère (incluant les processeurs), les disques durs, le châssis et les cartes réseau. Les hypothèses d'utilisation sont : une durée de vie de 4 ans, fonctionnement en permanence à une charge faible 50% du temps et en pleine charge également pendant 50% du temps. La phase d'utilisation est prépondérante pour les serveurs car ils fonctionnent en permanence à la différence d'un ordinateur personnel.

Une estimation de l'impact énergétique du cycle de vie d'un centre de base à été réalisée par [43]. Selon cette étude, l'énergie nécessaire à la phase de production d'un centre de données représente 24% de l'empreinte énergétique totale contre 51% le fonctionnement du IT et 25% pour l'alimentation électrique et le système de refroidissement. La phase de production est dominée par la fabrication des processeurs, de la mémoire, les circuits imprimés et le châssis. La phase de production semble être importante par rapport à celle de l'étude précédente. En effet, cette analyse ne tient compte que du matériel IT pour la phase de production, le rapport entre la phase de production et le fonctionnement du IT devrait alors être du même ordre de grandeur que dans [42] à la différence près qu'il faut tenir compte de la consommation du réseau au sein du centre de données. Les hypothèses étant floues, il est difficile d'expliquer la source de cette différence.

Enfin, une étude réalisée par l'industriel *NEC* donne le chiffre de 4% du CO_2e émis par la phase de production d'un centre de données. Ce résultat provient de [3]. Malheureusement, les détails de l'étude ne sont pas disponibles, il est donc impossible de critiquer cette valeur.

Dans la suite de cette étude, nous considérerons que la consommation énergétique de la phase de production d'un centre de données est de l'ordre de 10% de la phase d'utilisation. Cette valeur est approximative et devra être réévaluée à l'aide d'études ultérieures réalisant une ACV plus poussée tenant compte de l'énergie nécessaire à la fabrication du bâtiment, du système de refroidissement et du réseau au sein du centre de données.

3.3.4 Modélisation

Conformément au schéma de la figure 3.9, la puissance d'un centre de données peut être modélisée par l'équation :

$$P_{DC} = \frac{1}{\eta_{SG}} \cdot \frac{1}{\eta_{UPS}} \cdot \left(\frac{1}{\eta_{PDU}} + \Phi_{cool} \right) \cdot (P_{server} + P_{storage} + P_{network}) \quad (3.5)$$

où η_{SG} est le rendement des transformateurs connectés au réseau électrique (*switchgear*), η_{UPS} est le rendement de l'UPS, η_{PDU} le rendement du PDU, Φ_{cool} le facteur

de refroidissement, P_{server} la puissance des serveurs, $P_{storage}$ la puissance des appareils de stockage et $P_{network}$ la puissance du réseau interne au centre de données. Dans ce modèle, nous considérons que le système de refroidissement est alimenté par l'UPS car, lors d'une coupure du réseau électrique, celui-ci doit être directement alimenté par le générateur de secours. Cependant, une autre fonction de l'UPS est de fournir une alimentation stable au matériel électronique, ce qui n'est pas indispensable pour les appareils de refroidissement. Dans la pratique, ces deux alimentations sont donc souvent différenciées, ce qui n'a pas une grande influence sur la puissance totale du centre de données vu la valeur élevée de η_{UPS} . La puissance des appareils IT vaut :

$$P_{IT} = P_{server} + P_{storage} + P_{network} \quad (3.6)$$

La puissance du système de refroidissement est donnée par :

$$P_{cool} = \Phi_{cool} \cdot (P_{server} + P_{storage} + P_{network}) \quad (3.7)$$

Dans le cas où la puissance nécessaire à l'extraction de la chaleur des appareils IT n'est pas proportionnelle à leur puissance, ϕ_{cool} est une fonction de P_{IT} : $\phi_{cool}(P_{IT})$. La valeur de ϕ_{cool} dépend du système de refroidissement et sera discutée dans la section suivante.

La puissance dépensée au système d'alimentation, c'est-à-dire les pertes dans les transformateurs, l'UPS et le PDU, est donnée par :

$$P_{alim} = \left(\frac{1 - \eta_{PDU}}{\eta_{PDU}} + \frac{1 - \eta_{SG}\eta_{UPS}}{\eta_{SG}\eta_{UPS}} \cdot \left(\frac{1}{\eta_{PDU}} + \Phi_{cool} \right) \right) \cdot (P_{server} + P_{storage} + P_{network}) \quad (3.8)$$

3.3.5 Améliorations potentielles

Dans cette sous-section, les améliorations d'efficacité de l'infrastructure et du matériel IT d'un centre de données seront discutées selon leurs catégories présentées en début de chapitre. Certaines de ces techniques ont déjà été mises en place dans les centres récents ou rénovés. Nous n'insisterons pas sur la modélisation de ces améliorations mais discuterons des limites auxquelles nous risquons d'être confrontés.

3.3.5.1 Proportionnalité

Infrastructure

La première amélioration à réaliser est d'obtenir un système de refroidissement proportionnel à la charge des appareils IT, c'est-à-dire un Φ_{cool} indépendant de P_{IT} . Ceci n'est pas réalisable à 100% car il y a toujours des coûts fixes, la puissance des ventilateurs est proportionnelle au cube du débit volumique d'air à déplacer et la puissance des refroidisseurs est une fonction quadratique de la quantité de chaleur à extraire [38]. Cependant les coûts fixes sont généralement faibles, la puissance des ventilateurs est souvent négligeable par rapport à celle des refroidisseurs et la fonction quadratique des refroidisseurs peut être approximée par une fonction linéaire sur de petites plages d'utilisation. Cette proportionnalité peut être obtenue en réglant la vitesse des ventilateurs en fonction de la pression statique des conduites [44] et en faisant varier le rapport de compression du refroidisseur. La proportionnalité de différents systèmes de refroidissement typiques du constructeur *Schneider Electric* est présentée dans le Figure 3.10. Les 4 courbes correspondent à un climatiseur classique, à un système équipé de tours de refroidissement, à un site où les serveurs sont placés dans des containers et à une proportionnalité parfaite théorique. Ces courbes ont été obtenues en divisant la puissance pour différentes charges par la puissance maximale. Il est à noter que des courbes réelles peuvent être sous la courbe de proportionnalité parfaite en haute charge vu que la puissance des ventilateurs est proportionnelle au cube du débit volumique d'air. En basse charge, les coûts fixes pour faire tourner les ventilateurs et les refroidisseurs sont prépondérants. C'est le cas de la courbe Container. Il faut également souligner que les systèmes à tours de refroidissement et containers sont plus récents que le climatiseur classique, les améliorations de proportionnalités ne sont donc pas uniquement dues aux différences de techniques mais également au fait que des systèmes de gestion de la charge ont été mis en place pour les technologies les plus récentes.

Les dispositifs de conversion d'énergie électrique n'ont pas un rendement parfait et sont souvent dimensionnés pour une certaine charge. Ce rendement peut aller de 70 % en basse charge à plus de 90 % en haute charge. Un des moyens de rendre le système d'alimentation plus proportionnel est d'utiliser plusieurs sources d'énergie et de mettre des transformateurs en veille lorsque la charge est faible. Il est à noter que les systèmes d'alimentation récents ont un haut rendement sur une plus grande plage de charge comme représenté à la Figure 3.14.

IT

Le processeur est l'élément le plus énergivore du serveur. Comme expliqué dans 3.2, la consommation du CPU dépend de la tension et de la fréquence d'horloge. Un moyen d'économiser l'énergie est donc une gestion dynamique de ces deux variables. De grandes améliorations ont été réalisées ces dernières années par rapport à la proportionnalité des serveurs. L'évolution de la proportionnalité est illustrée à la Figure 3.11. Celle-ci représente le pourcentage de la puissance maximum d'un serveur en fonction du pourcentage de la charge maximum. Les différentes courbes correspondent aux moyennes des résultats de *benchmarks* réalisés au cours d'une année. Ces résultats ont été obtenus à l'aide du *benchmark SPECpower_ssj2008*

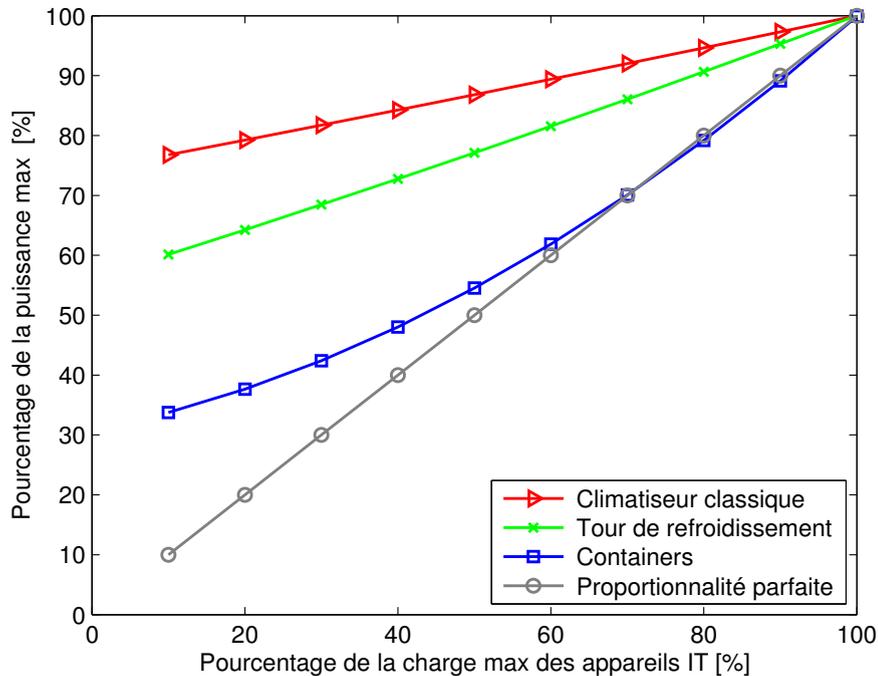


FIGURE 3.10: Proportionnalité du système de refroidissement

et sont disponibles sur [45]. Les résultats sont donnés en watts en fonction de la charge, exprimée en *Opérations Par Seconde Java* (ops). En moyenne, en 2007, la puissance d'un serveur utilisé à 10% de sa charge maximum équivalait à 67% de sa puissance maximum, alors qu'en 2012 cette puissance ne valait plus que 34% de la puissance maximum.

Pour caractériser la proportionnalité d'un serveur, nous utilisons le facteur de proportionnalité [46] :

$$FP = 1 - \frac{\text{Aire sous la courbe réelle} - \text{Aire sous la courbe théorique}}{\text{Aire sous la courbe théorique}} \quad (3.9)$$

où les aires sous les courbes correspondent aux intégrales de la puissance en fonction de la charge. La courbe théorique est représentée à la Figure 3.11 et correspond à la limite de proportionnalité, c'est-à-dire où les W/ops sont équivalents quelque soit la charge. Le facteur de proportionnalité FP vaut 0 lorsque la puissance reste constante en fonction de la charge et 1 dans le cas de la limite de proportionnalité. L'évolution du FP en fonction du temps est représenté à la Figure 3.12. Plusieurs serveurs atteignent des facteurs de proportionnalité supérieurs à 98%. Ceci est dû notamment à l'utilisation de plusieurs cœurs, ceux-ci peuvent être désactivés en cas de faible utilisation. De plus, les serveurs sont actuellement optimisés pour atteindre une efficacité énergétique optimale à 60-80% de la charge maximum et non à pleine charge. Il est à noter que bien que la proportionnalité ait évolué rapidement ces dernières années, celle-ci atteint presque 100% pour certains serveurs

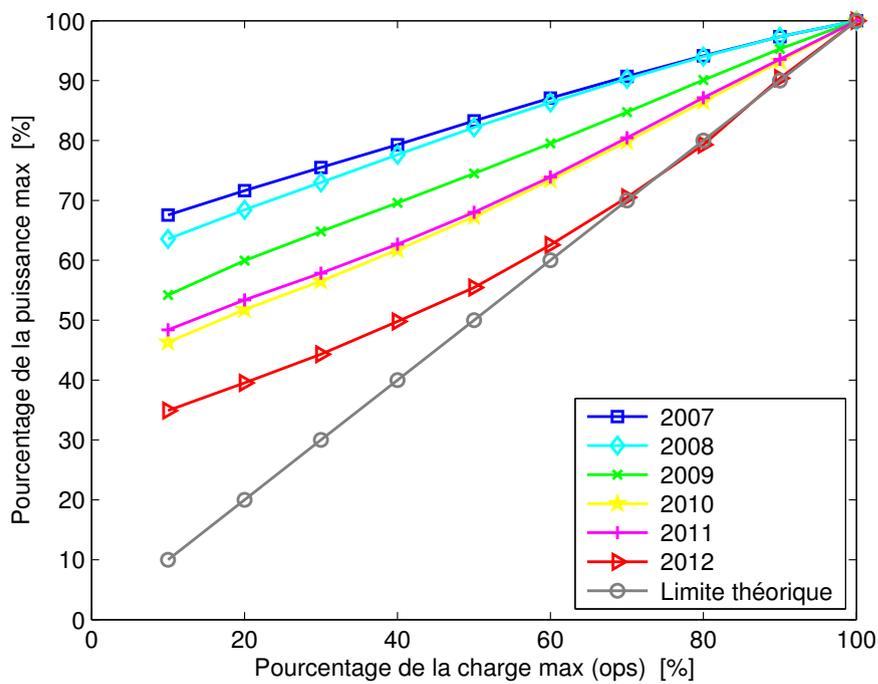


FIGURE 3.11: Proportionnalité moyenne par année des serveurs testés de 2007 à 2012

testés en 2013, ce qui signifie que le potentiel d'amélioration dans les années à venir est faible.

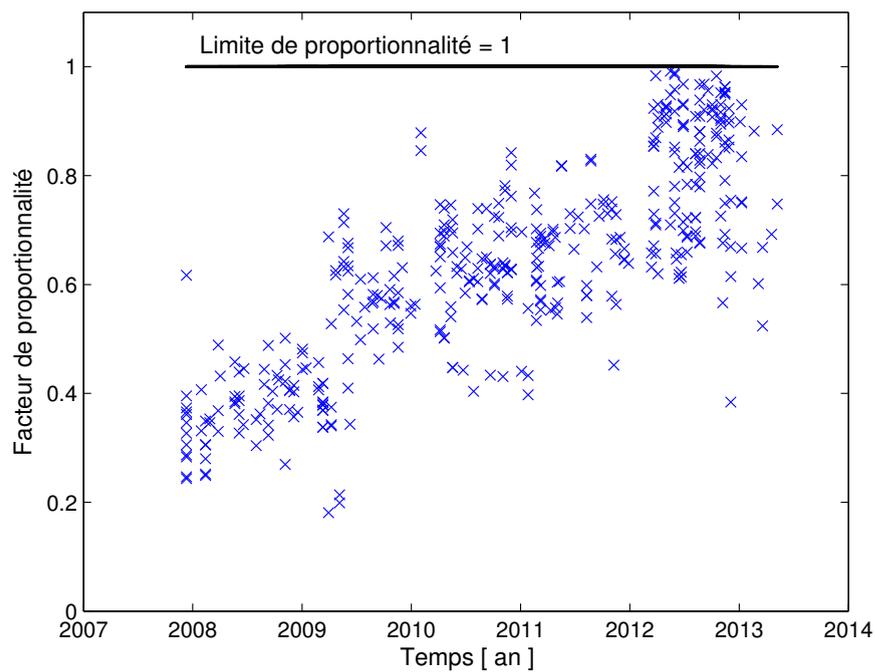


FIGURE 3.12: Evolution du facteur de proportionnalité de 2007 à 2012

Les appareils de stockage les plus employés sont les disques durs. Leur consommation est essentiellement due aux pièces mobiles telles que les moteurs et têtes de lecture. La principale technique pour diminuer cette consommation est de ralentir les plateaux après une certaine période d'inactivité. La puissance normalisée à la valeur maximale en fonction du pourcentage du *Input/Output Operations Per Second* (IOPS) maximum pour différents systèmes de stockage est donné à la Figure 3.13. Ces mesures ont été réalisées entre 2009 et 2011 et sont disponibles sur [47]. Les 4 systèmes présentés sont le *Xiotech Emprisetm 5000*, *Netapp FAS3270A*, *Seagate Savvio 10K.3* et le *IBM System Storage™ EXP 12S*. Les mesures de puissance des systèmes de stockage sont moins répandues que celles de serveurs, il est donc très difficile de faire ressortir une tendance de l'évolution de leur efficacité énergétique. Nous pouvons cependant conclure que la puissance en utilisation est presque constante pour tous les dispositifs à 50 ou à 80% des IOPS max. Une légère amélioration est observée pour le *HDD 2,5"* mais celle-ci reste minime. Une diminution de la vitesse de rotation en cas d'inactivité permet de diminuer considérablement la puissance (*HDD Eco*). Les SSD actuellement testés n'ont pas un meilleur taux de proportionnalité que les HDD. Cependant, leur potentiel d'amélioration est grand (pas de disque à faire tourner, technologie en plein développement) et il n'est pas à exclure que ces systèmes tendent à devenir proportionnels avec le temps.

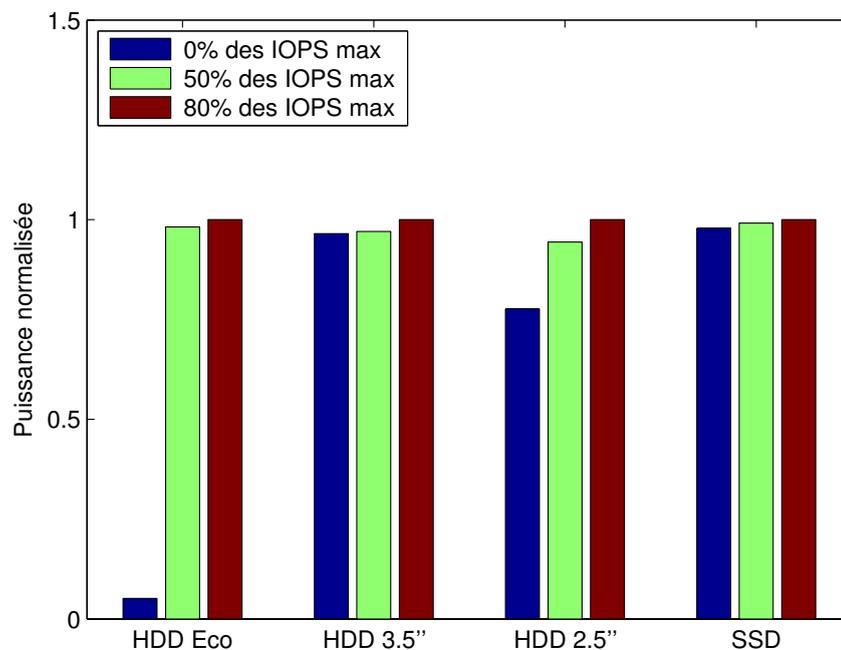


FIGURE 3.13: Puissance normalisée de systèmes de stockage en fonction du pourcentage du IOPS maximum

Pour améliorer la proportionnalité du réseau, une des stratégies consiste à mettre hors tension les composants inutilisés. Pour ce faire, il faut une meilleure gestion du trafic et adapter la topologie du réseau. Certaines de ces techniques sont décrites dans [41] et permettent d'approcher la proportionnalité. Par exemple avec une

topologie *fat-tree network* qui comporte un plus grand nombre de switches, ce qui augmente la possibilité de les mettre en veille. Cependant, dans ce type de réseau, la phase de production devient plus importante proportionnellement à la phase d'utilisation. Dans ce cas, il faudrait donc penser à une topologie qui utilise moins d'éléments par exemple avec de la redondance gérée en *software* à la place d'une redondance *hardware* [40].

3.3.5.2 Efficience énergétique

Infrastructure

Comme nous l'avons vu dans la Section 3.3.2, les systèmes de refroidissement classiques peuvent représenter plus de 50% de la consommation globale d'un centre de données. Pour diminuer leur consommation, il existe plusieurs méthodes : la première est de remplacer le système de climatisation par du *free cooling*. Il existe 3 techniques différentes de *free cooling*. La première consiste en un échange air/eau, l'eau est ensuite refroidie dans une tour de refroidissement. C'est ce système qui est employé par le centre de donnée de Google à Mons [48]. Pour des climats plus froids, un échange air/air peut être directement réalisé. Finalement, dans des cas particuliers d'humidité et de pression, l'air extérieur peut directement être utilisé pour refroidir l'installation. Le refroidissement peut passer en *free cooling* intégral si l'écart entre la température de retour de l'eau de refroidissement et la température ambiante est supérieur à environ 11 K. Dans le cas contraire, il faut utiliser un refroidisseur (*chiller*) muni d'un compresseur. Une élévation de la température intérieure des centres de données permet donc de recourir au *free cooling* plus souvent et donc de consommer moins d'énergie au *chiller*, très énergivore à cause du compresseur. Selon [49], le *free cooling* pourrait être utilisé en moyenne en Europe 70% de l'année si la température intérieure du centre de données est fixée à 27 °C.

Une autre méthode pour diminuer les dépenses dues au refroidissement est d'utiliser des containers : les racks de serveur sont placés dans des containers et le refroidissement se fait uniquement dans ceux-ci et plus dans l'ensemble de la pièce où se trouvent les serveurs. Cela permet de devoir transporter une moins grande quantité d'air et évite la recirculation, c'est à dire le fait que de l'air chaud extrait d'un rack ne recircule au sein d'un autre.

Une troisième méthode consiste à faire passer de l'eau froide directement le long des racks, cela permet d'augmenter la densité et l'efficacité du refroidissement mais il y a des risques de fuites. Selon les données du constructeur *Schneider Electric* [50], l'utilisation de tours de refroidissement et de containers permettrait de diminuer les dépenses énergétiques de refroidissement de plus de 70% par rapport à un système de climatisation classique.

Finalement, une méthode alternative consiste à utiliser la géothermie, c'est-à-dire pomper l'eau froide souterraine pour refroidir le centre de données. Cette technique est utilisée dans le centre de données *Datadock* [51] et selon [52], le gain d'efficacité du système de refroidissement pourrait être de 60% par rapport à un système

classique. Il est à noter que cette technique n'est pas exploitable partout et dépend du contexte hydrographique de la région.

En ce qui concerne l'augmentation de l'efficacité du système d'alimentation, il s'agit d'utiliser des transformateurs avec un rendement plus élevé. Le rendement de différents UPS en fonction de la charge est donné à la Figure 3.14. Le rendement des derniers systèmes (2012) est supérieur à 95% pour toutes les charges au dessus de 10% tandis que les systèmes typiques à double conversion AC ont un rendement n'excédant pas 88%.

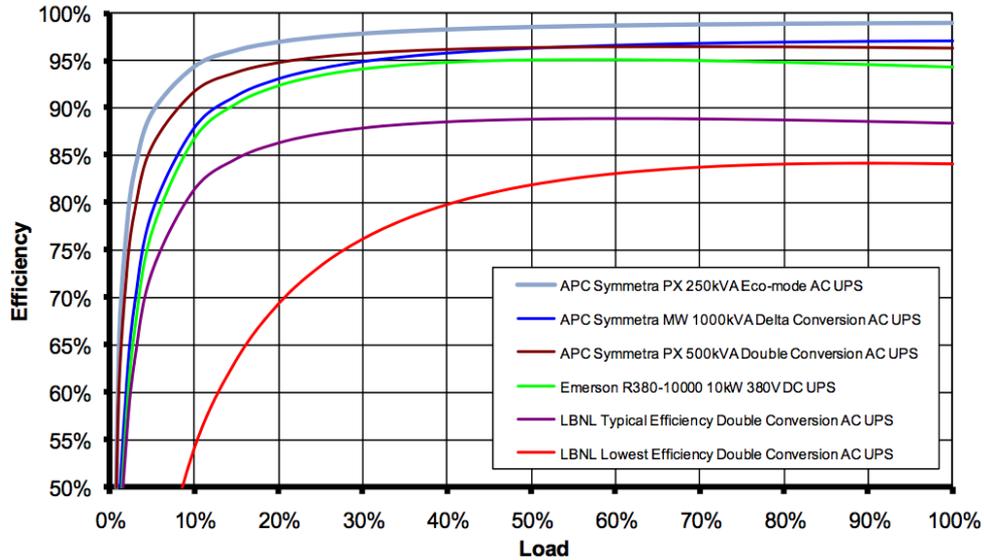


FIGURE 3.14: Rendement d'UPS AC et DC en fonction de la charge [53]

IT

L'amélioration de l'efficacité énergétique d'un serveur peut être réalisée en augmentant l'efficacité du PSU, des ventilateurs, des processeurs et de la mémoire. En 2005, l'efficacité moyenne des PSU était de 75% à une charge de 50% alors qu'en 2012, l'efficacité des PSU publiée par *Delta Electronics* était de 94% [54]. L'efficacité des processeurs et de la mémoire évolue comme présenté et expliqué au Chapitre 3.2. L'évolution de l'efficacité des serveurs de 2007 à 2013 est présentée à la Figure 3.15. L'efficacité est exprimée en W/ops et correspond à la pleine charge des serveurs testés selon le benchmark *SPECpower_ssj2008* [45]. Nous avons choisi d'utiliser l'efficacité en pleine charge pour bien distinguer l'augmentation de l'efficacité avec l'augmentation de la proportionnalité présentée ci-dessus. En effectuant une régression linéaire du premier ordre sur cette famille de mesures (en log) en fonction du temps, nous trouvons que la puissance par ops diminue en moyenne de 29% par an.

Il est intéressant de mettre cette valeur en perspective avec les résultats de la Section 3.2 : en effectuant une régression linéaire du premier ordre de l'énergie en phase d'utilisation des technologies correspondant à la période 2007-2013 (65-32nm) de

la Figure 3.3, nous obtenons que l'efficacité des processeurs en MJ par millions de transistors diminue en moyenne de 16% par an. Les données pour la mémoire ne couvrant la période que de 1997 à 2008, il est impossible de les comparer avec l'évolution des données en W/ops des serveurs. Comment expliquer la différence entre d'amélioration d'efficacité entre les serveurs (29%) et les processeurs (16%) ? Premièrement, les unités ne sont pas identiques : la première est exprimée en fonction d'opérations par secondes java qui correspondent à une série d'opérations définies par le *benchmark* tandis que la seconde est exprimée en fonction du nombre de transistors. Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent l'évolution du nombre de transistors n'est pas nécessairement proportionnelle avec la puissance de calcul contrairement aux ops définies par le *benchmark*. Deuxièmement, l'efficacité du serveur dépend également de la vitesse de la mémoire et de son efficacité. Finalement, l'efficacité dépend également des systèmes auxiliaires : par exemple, le rendement des PSU a évolué sur la période des mesures étudiées, ce qui a un impact positif sur l'efficacité du serveur.

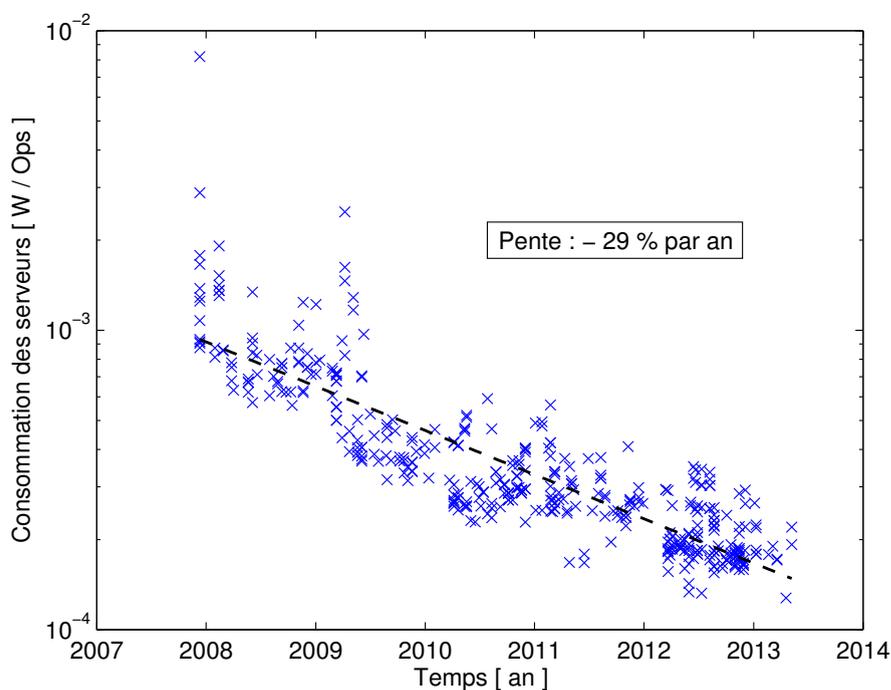


FIGURE 3.15: Consommation par ops des serveurs de 2007 à 2013

L'efficacité des disques durs peut être améliorée en utilisant des plateaux plus petits : le nombre IOPS par Watt peut être 2,5 fois plus important pour un DD 2,5" par rapport à un DD 3,5" [55]. Une autre technique consiste à diminuer la vitesse des plateaux pour de faibles charges et d'utiliser plusieurs têtes de lecture. Une alternative aux HDD est l'utilisation de SSD dans lesquels l'information est stockée sur une mémoire flash. Leur consommation est beaucoup plus faible que celle des HDD et permettrait une économie d'énergie de l'ordre de 80% [32]. Cependant, ces technologies sont très différentes, ce qui implique que leur consommation énergétique lors de la phase de production peut également varier de plusieurs ordres de grandeurs. Selon [56], l'énergie dépensée sur l'ensemble du cycle de vie de la

technologie SSD pourrait être plus importante que celle des HDD à cause du coût énergétique important de la fabrication des mémoires flash. Des ACV plus poussées sur les HDD devront cependant être réalisées pour conforter cette hypothèse. Il faudrait également tenir compte du potentiel d'amélioration énergétique des deux technologies pour voir comment cette tendance va évoluer avec le temps.

L'efficacité du réseau peut être améliorée en optimisant la topologie et en utilisant des routeurs plus performants. L'efficacité de ceux-ci sera plus particulièrement étudiée dans la section concernant le réseau central.

3.3.5.3 Changements structurels

Une technique déjà mise en place dans certains centres de données pour diminuer leur consommation énergétique - et leur coût - est la virtualisation : celle-ci permet de faire fonctionner un ou plusieurs systèmes d'exploitation sur un ou plusieurs serveurs au lieu d'en avoir un installé par machine. La virtualisation permet donc d'utiliser moins de serveurs et de les utiliser à une charge plus élevée. En général, les serveurs sont utilisés à une charge comprise entre 10 et 50% [35], la virtualisation permettrait d'atteindre une charge moyenne comprise entre 60 et 80%. Il est à noter que l'impact positif de cette technique sur l'efficacité en phase d'utilisation est limité plus les serveurs sont proportionnels. Les gains les plus conséquents se feraient lors de la phase de production car moins de serveurs seraient nécessaires pour réaliser la même tâche. Dans le cas pratique présenté dans [52], le nombre de serveurs pourrait passer de 180 à 44, c'est-à-dire que l'impact de la phase de production serait divisé par 4.

Une pratique répandue pour les entreprises ayant une grande capacité de calcul (Google, Facebook, etc.) est d'installer les centres de données dans des régions froides, telles que le nord de l'Europe. Le premier centre de données de Facebook a par exemple été inauguré à Lulea dans le nord de la Suède [57]. La température moyenne annuelle dans cette région est de 1,4 °C [58]. Le mois de juillet est le plus chaud avec une température moyenne de 15,2 °C suivi du mois d'août (12,8 °C). Selon [49], pour une consigne de 27 °C dans les salles de serveurs, le *free cooling* peut être utilisé en-dessous d'une température extérieure de 14 °C. Nous faisons l'hypothèse que, sous cette consigne, le *free cooling* est utilisé 11/12 de l'année dans cette région. Pour avoir une estimation plus précise, il faudrait connaître le nombre d'heures par année où la température extérieure est supérieure à 14 °C.

Finalement, une des tendances actuelles est le *cloud computing* au niveau des entreprises. C'est-à-dire que, à la place d'installer un centre de données de petite ou moyenne taille peu efficace et à faible coût, les entreprises délocalisent leurs applications sur le *cloud* dans de grands centres de données plus efficaces et qui peuvent réaliser de la virtualisation à un niveau plus important : dans le cas d'un centre de données privé, si l'entreprise n'utilise pas une certaine puissance de calcul, celle-ci ne peut être utilisée par personne d'autre, alors que sur le *cloud*, la puissance de calcul d'un serveur peut être répartie entre plusieurs utilisateurs. Selon [59], cette pratique permettrait de diminuer l'empreinte carbone par 4 dans

le cas où les applications d'un centre de données privé peu efficient (PUE=3) sont délocalisées sur le *cloud* (PUE faible et virtualisation).

3.3.6 Synthèse et projections

Dans cette section, la consommation énergétique d'un centre de données typique de 2005-2010 (2007) est comparée avec un centre de données optimisé à l'aide des méthodes présentées ci-dessus (2013). La consommation énergétique est exprimée en W/ops comme défini dans les *benchmarks* des serveurs présentés ci-dessus et est donnée en fonction de la charge. La puissance totale est donnée par l'équation 3.5. Les valeurs des paramètres pour une charge de 50% sont données dans le tableau 3.4. Le rendement de l'UPS du premier cas est donné par la courbe *LBNL Lowest Efficiency* de la Figure 3.14 alors que celui du second cas est donné par la courbe *APC Symmetra PX 500kVA*. Le système de refroidissement correspond à un climatiseur classique dans le centre de données typique de 2007 et à un système avec tour de refroidissement et containers dans celui de 2013. Les données proviennent du constructeur *Schneider Electric*. La répartition de l'énergie au sein des appareils IT en pleine charge d'un centre de données typique est telle que définie à la Section 3.3.2. Nous considérons dans ce cas que la puissance du stockage et du réseau est constante en fonction de la charge. La puissance du stockage du DC de 2013 correspond à un SSD. Par manque de données complémentaires, la puissance du réseau a été modélisée comme étant proportionnelle à la puissance des serveurs.

TABLE 3.4: Paramètres du modèle de la consommation énergétique d'un centre de données pour une charge des serveurs de 50%

Paramètres	DC typique (2007)	DC Etat de l'art des améliorations (2013)
η_{SG}	0,97	0,99
η_{UPS}	0,82	0,96
η_{PDU}	0,95	0,97
ϕ_{cool}	1,46	0,35
P_{server}/ops	$2,20 \cdot 10^{-3}$	$0,22 \cdot 10^{-3}$
$P_{storage}/ops$	$0,05 \cdot P_{serveur}(charge = 100\%)/ops$	Voir texte
$P_{network}/ops$	$0,10 \cdot P_{serveur}(charge = 100\%)/ops$	Voir texte

Les améliorations entre les deux modèles présentés ci-dessus sont illustrées à la Figure 3.16. L'amélioration de la proportionnalité des serveurs, du réseau et des infrastructures (refroidissement et alimentation) permet d'avoir des W/ops qui varient moins en fonction de la charge. Les répartitions des puissances par ops pour une charge de 50% sont données à la Figure 3.17. Grâce à l'utilisation de systèmes d'alimentation plus performants, de containers et d'une tour de refroidissement, le PUE est passé de 3,17 à 1,45. La proportion de l'énergie dépensée par le serveur est donc de plus en plus importante. La répartition de l'énergie au sein des appareils IT reste cependant incertaine car il est difficile d'estimer comment les

puissances du réseau et du système de stockage vont évoluer avec le temps, notamment à cause du peu de mesures de puissance disponibles dans la littérature. A cela s'ajoute l'incertitude de la répartition de la puissance au sein de l'IT en fonction de l'application du centre de données. Selon [40], la proportion de l'énergie dépensée par le réseau va augmenter dans les années à venir. Des analyses plus poussées devront donc être réalisées pour estimer comment la répartition de la puissance au sein des appareils IT évoluera au cours de temps et en fonction des applications.

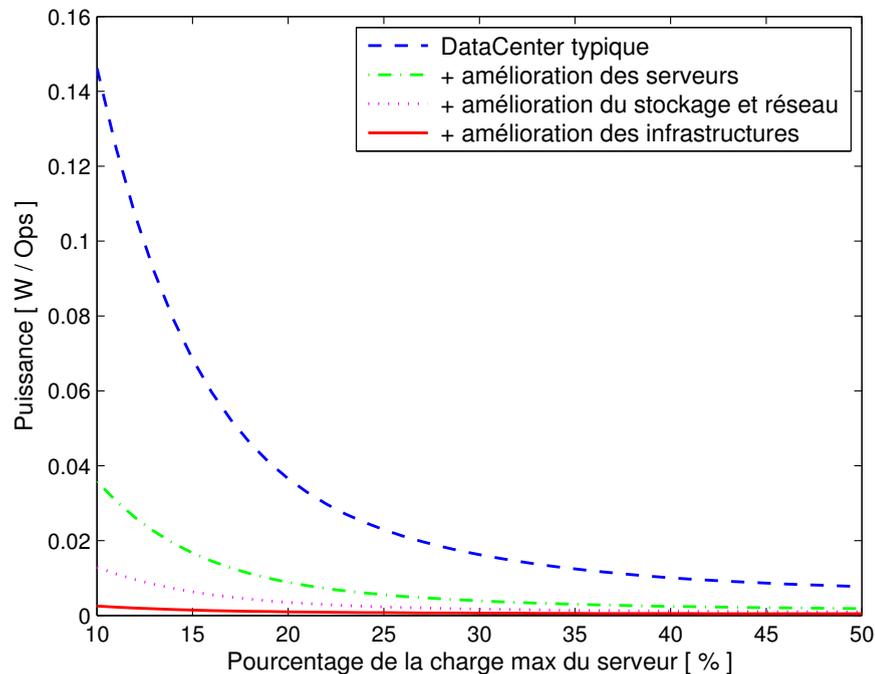


FIGURE 3.16: Améliorations d'un centre de données

Le PUE obtenu à l'aide des techniques présentées ci-dessus est de 1,45 alors que celui des centres de données de Google est en moyenne de 1,12. Cette performance est réalisée notamment grâce à l'utilisation du *free cooling*, de la virtualisation et à l'installation des DC dans des régions froides. Un PUE de 1,12 signifie que l'énergie dépensée pour le refroidissement et l'alimentation ne représente plus que 10% de la consommation des appareils IT. Ce résultat démontre qu'il devient à présent plus intéressant de se concentrer sur l'efficacité de l'IT que sur les infrastructures qui n'offrent plus un grand potentiel d'amélioration.

La proportionnalité des DC a également été fort améliorée ces dernières années. Le défi actuel est donc bien d'augmenter l'efficacité des serveurs et pas leur proportionnalité qui est déjà proche de la limite théorique. Comme discuté précédemment, l'évolution de cette efficacité à moyen terme est incertaine et dépendra probablement du déploiement de nouvelles technologies ou de nouveaux paradigmes.

Comment l'impact de la phase de production va évoluer proportionnellement à celui de la phase d'utilisation ? D'une part, la virtualisation permet de diminuer

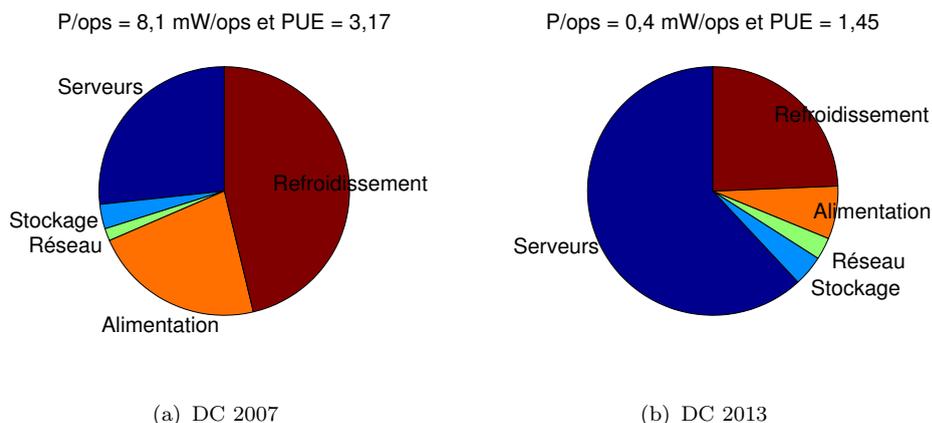


FIGURE 3.17: Répartition des P/ops en fonction des éléments d'un centre de données pour une charge de 50%

sensiblement la consommation en phase d'utilisation alors qu'elle permet de diviser le nombre de serveurs par 4, ce qui diminue considérablement l'impact de la phase de production, dominée par la fabrication des circuits intégrés et imprimés. D'autre part, l'utilisation de disques SSD et l'augmentation de la redondance des éléments du réseau - permettant de mettre les routeurs plus fréquemment en veille - pourrait augmenter la proportion de la phase de production. L'impact de cette phase dépendra donc en partie des choix de conception. Par conséquent, il est crucial dans l'avenir de réaliser des ACV plus poussées pour prendre les bonnes décisions de conception. Concernant les serveurs, il semble qu'actuellement l'énergie par circuit intégré dépensée lors de la phase d'utilisation augmente plus vite que l'énergie en phase de production. Cette tendance va probablement s'amplifier si l'efficacité des processeurs n'augmente pas avec le même taux qu'actuellement, ce qui est probable notamment car il n'est presque plus possible de réduire la tension d'alimentation des transistors. A moyen terme, il semble donc que l'impact énergétique du à la phase de production va tendre à devenir de moins en moins conséquent proportionnellement à la phase d'utilisation. Il est donc nécessaire de développer d'autres paradigmes et de nouvelles technologies.

Pour conclure cette section, de grands progrès ont été réalisés ces 8 dernières années pour diminuer l'impact énergétique des infrastructures et pour rendre les serveurs plus proportionnels : le PUE et le FP sont de plus en plus proches de leur valeur optimale (1), ce qui signifie que le potentiel d'amélioration est de plus en plus faible. Par conséquent, le défi pour les années à venir se trouve au niveau du matériel IT. Des études plus poussées sont à mener pour optimiser la topologie du réseau tout en considérant l'ensemble du cycle de vie des composants. L'augmentation de la puissance de calcul des serveurs en évitant une augmentation trop importante de la consommation énergétique semble également être un défi majeur pour le futur.

3.4 Réseau central

Le réseau central (*backbone*) est constitué de plusieurs nœuds connectés les uns aux autres par des lignes en fibre optique, principalement avec la technique *wavelength-division multiplexed* (WDM) qui permet de faire passer plusieurs signaux (souvent entre 40 et 80) de longueurs d'onde différentes sur une fibre optique. Chaque signal a une capacité entre 10 et 40 Gbps. Il est nécessaire de mettre des amplificateurs optiques tous les 80 km et des régénérateurs de signaux tous les 1500 km [18].

3.4.1 Consommation énergétique lors de la phase d'utilisation des éléments du réseau

Les nœuds du réseau opèrent au niveau des trois premières couches du modèle *Open Systems Interconnection* (OSI) : les commutations de la couche réseau se font à l'aide de routeurs IP/MPLS, ceux-ci sont connectés à plusieurs routeurs d'accès. La couche de liaison est gérée par des ports Ethernet tandis que la couche physique est gérée par des ports OTN (multiplexage temporel, transport, etc.) et des éléments nécessaires au multiplexage en longueur d'onde (WDM) tels que des transpondeurs et des commutateurs optiques [60]. Dans la majorité des nœuds actuels, tous les signaux optiques entrants sont convertis en signaux électriques avant d'être retransformés en optiques. Nous verrons dans la Section 3.4.4 que cette conversion n'est pas toujours nécessaire.

L'efficacité des éléments d'un nœud du réseau est donnée dans le tableau 3.5 en W/Gbps. Ces données sont tirées de [60], [61] et [62]. Ces rapports faisant déjà la synthèse de l'efficacité énergétique d'un ensemble d'éléments du réseau sur base de données provenant de la littérature et des *data sheets* des constructeurs, nous considérons que les valeurs du tableau 3.5 sont représentatives des dispositifs installés sur le réseau. Cependant, les puissances des équipements du réseau sont rares et les valeurs utilisées dans les différentes études peuvent varier considérablement. De plus, les technologies évoluent rapidement avec le temps, il s'agit donc d'utiliser des données les plus récentes possibles. Finalement, l'efficacité en W/Gbps varie en fonction de la capacité du dispositif, comme nous l'observons dans le tableau 3.5 : par exemple, un transpondeur de 10 Gbps consommera 2 fois moins d'énergie pour un bit transmis qu'un transpondeur de 2,5 Gbps. Les nœuds en périphérie du réseau ont donc une efficacité plus faible que les nœuds centraux où la capacité est plus élevée.

La consommation énergétique des lignes est due aux amplificateurs et aux régénérateurs de signaux. Des valeurs typiques d'efficacité des amplificateurs sont également présentées dans le tableau 3.5. Un régénérateur peut être considéré comme deux transpondeurs installés en vis-à-vis, leur efficacité en W/Gbps est donc deux fois plus grande que celle d'un transpondeur.

TABLE 3.5: Efficacité des composants d'un nœud du réseau

Catégorie	Type	Efficacité [W/Gbps]
Routeur IP/MPLS	Cisco CRS-1 (1x40G cards)	15
	Cisco CRS-3 (1x100G cards)	7,5
	Cisco CRS-3 (14x10G cards)	5
Port Ethernet	Ethernet 1Gbps port	7
	Ethernet 10Gbps port	3,8
Port OTN	OTN 1Gbps port	7
	OTN 10Gbps port	3,4
	OTN 100Gbps port	3,6
	Ciena CoreStream Agility	3,4
Transpondeur	Transpondeur/Muxpondeur 2.5G	10
	Transpondeur/Muxpondeur 10G	5
	Alcatel-Lucent WDM transponder 40G	1,8
Commutateur optique	OXC, degree=3, 40ch, 2.5G	1,8
	OXC, degree=3, 40ch, 10G	0,5
	ROADM, 40ch, 2.5G	2,2
	ROADM, 40ch, 10G	0,6
	Alcatel-Lucent 1675 switch	2,1
Amplificateur	OLA 80 km 2.5G	1,1
	OLA 80 km 10G	0,3

3.4.2 Consommation énergétique lors de la phase de production et de fin de vie des éléments du réseau

Une analyse de cycle de vie d'un routeur de la compagnie *Cisco* a été réalisée dans [63] suivant le norme ISO14044. Il en ressort que la phase d'utilisation représente 95% de l'empreinte carbone sous les hypothèses d'une durée de vie de 5 ans, un fonctionnement continu sur cette période et un PUE de 2. L'empreinte carbone de la phase de production est principalement due aux circuits intégrés et imprimés (Figure 3.18). L'impact de la phase de fin de vie est faible par rapport aux deux autres (de l'ordre de 0,6%).

Ces chiffres dépendent des hypothèses liées à la phase d'utilisation : durée de vie des appareils, efficacité du système de refroidissement et pourcentage du temps de fonctionnement. Comme nous l'avons vu dans la Section 2.4.3, l'empreinte carbone varie également d'une région à l'autre. Dans cette étude, l'empreinte carbone moyenne a été estimée en fonction des ventes de routeurs dans 3 régions du monde : Europe, Amérique et Asie. Par manque d'informations complémentaires sur la consommation énergétique de la phase de fabrication et de fin de vie des nœuds du réseau, nous considérerons dans le reste de l'étude que celle-ci équivaut à 5% de l'énergie consommée lors de l'utilisation.

Nous avons également peu d'informations sur l'empreinte énergétique d'une ligne en fibre optique terrestre. Nous supposons dans cette étude que, pour des lignes

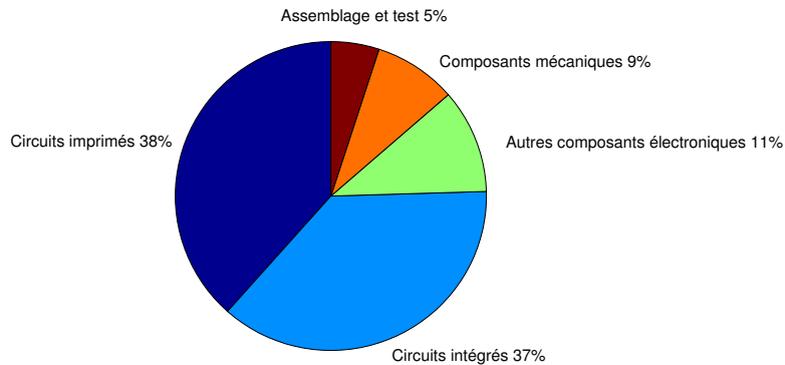


FIGURE 3.18: Répartition de l'énergie dépensée lors de la phase de production d'un routeur en fonction des composants

courtes (< 300 km), la consommation énergétique due à la production et à l'installation des lignes est négligeable par rapport à celle des nœuds. Cette hypothèse est forte et devra être confirmée/infirmée par des études ultérieures.

En ce qui concerne les systèmes de communication par câbles sous-marins en fibre optique, une analyse de cycle de vie détaillée a été réalisée dans [64] : pour une durée de vie de 13 ans, l'extraction des matériaux représente 7% de l'énergie primaire consommée, la conception et la fabrication des dispositifs 3%, l'installation 6%, l'utilisation et la maintenance 72% et la phase de fin de vie 10%. Sur l'ensemble de l'énergie primaire consommée, 43% est due aux câbles contre 57% pour les amplificateurs et les terminaux. Cette part importante dédiée aux câbles provient du fait qu'une grande quantité d'énergie est consommée par les bateaux pour l'installation, que les câbles doivent être blindés pour résister aux conditions sous-marines et que la maintenance des câbles est également très coûteuse en énergie. Le résultat de l'étude est que la consommation totale d'énergie primaire est de 65,8 kJ par 10000Gb.km. C'est-à-dire qu'il faut 65,8 kJ pour transférer un Gb sur 10000 km. Nous discuterons de ce résultat dans la section suivante où trois scénarios d'utilisation du réseau central seront étudiés.

3.4.3 Modèle de la consommation énergétique du réseau central

La puissance au sein du réseau central est modélisée par l'équation :

$$P_{backbone} = P_{node} + P_{line} \quad (3.10)$$

où $P_{backbone}$ est la puissance totale dépensée dans le réseau central, P_{node} est la puissance des nœuds et P_{line} est la puissance dépensée pour transmettre le signal

dans les lignes de fibre optique. La puissance des nœuds est la puissance nécessaire pour supporter les 3 couches. Elle est donnée par :

$$P_{node} = \frac{1}{\eta_{alim}} \cdot (1 + \Phi_{cool}) \cdot 2 \cdot \eta_{pr} \cdot N_{hop} \cdot C_{node} \cdot \left(\frac{P_{ip}}{C_{ip}} + \frac{P_{eth}}{C_{eth}} + \frac{P_{otn}}{C_{otn}} + \frac{P_{optsw}}{C_{optsw}} + \frac{P_{trans}}{C_{trans}} \right) \quad (3.11)$$

où η_{alim} est le rendement du système d'alimentation, Φ_{cool} est le facteur de refroidissement, η_{pr} est le facteur de protection, N_{hop} est le nombre de liaisons entre l'expéditeur et le destinataire et C_{node} est la capacité totale du nœud. $\frac{P}{C}$ est l'efficacité en W/Gbps des routeurs IP/MPLS (*ip*), des ports Ethernet (*eth*), des ports OTN (*otn*), des commutateurs optiques (*optsw*) et des transpondeurs (*trans*). Le facteur 2 dans l'équation vient du fait que les valeurs d'efficacité du tableau 3.5 sont données pour des transferts bidirectionnels uniques entre 2 nœuds. Si un nœud se trouve au sein du réseau, il faudra donc deux fois plus de ports pour un certain nombre de Mbps. Le facteur de protection tient compte de la protection du trafic, c'est-à-dire que les paquets de données sont transférés via plusieurs chemins pour s'assurer que l'information parvienne bien au destinataire malgré une coupure de ligne. Dans le cas d'une protection 1+1, η_{pr} vaut 2.

La puissance des lignes est donnée par :

$$P_{line} = P_{ampli} + P_{regen} \quad (3.12)$$

où P_{line} est la puissance totale dépensée dans les lignes, P_{ampli} est la puissance des amplificateurs et P_{regen} est la puissance pour régénérer les signaux sur de longues distances.

La puissance totale des amplificateurs est donnée par :

$$P_{ampli} = \frac{1}{\eta_{alim}} \cdot (1 + \Phi_{cool}) \cdot \left(\left\lfloor \frac{L_{line}}{L_{ampli}} \right\rfloor + 1 \right) \cdot \eta_{pr} \cdot N_{hop} \cdot C_{node} \cdot \frac{P_{ola}}{C_{ola}} \quad (3.13)$$

où L_{line} est la longueur moyenne d'une ligne entre deux nœuds, L_{ampli} est la distance entre les amplificateurs de ligne et $\frac{P_{ola}}{C_{ola}}$ est l'efficacité d'un amplificateur de ligne en W/Gbps. Le nombre d'amplificateurs intermédiaires est déterminé en prenant la valeur absolue de la distance moyenne entre deux nœuds divisée par la distance entre les amplificateurs moins un. A ce nombre, il faut encore ajouter l'amplificateur à la sortie du nœud (*booster*) et le pré-amplificateur à l'entrée de celui-ci. La puissance du régénérateur de signal est donnée par :

$$P_{regen} = \frac{1}{\eta_{alim}} \cdot (1 + \Phi_{cool}) \cdot \left(\left\lfloor \frac{L_{line}}{L_{regen}} \right\rfloor - 1 \right) \cdot \eta_{pr} \cdot N_{hop} \cdot C_{node} \cdot \frac{P_{re}}{C_{re}} \quad (3.14)$$

où L_{regen} est la distance entre les régénérateurs et $\frac{P_{re}}{C_{re}}$ est l'efficacité d'un régénérateur en W/Gbps. Le nombre de régénérateurs est déterminé de la même manière que pour les amplificateurs.

Les valeurs d'efficacité des éléments du modèle sont données dans le tableau 3.6. Bien que l'efficacité maximum d'un routeur IP/MPLS atteigne 5 W/Mbps pour les modèles les plus efficaces et une configuration optimale, nous avons choisi une valeur de 10 W/Gbps certainement plus représentative des éléments installés sur le réseau. De plus, comme expliqué précédemment, l'efficacité dépend de la capacité de l'installation. Le nombre de routeurs en périphérie du réseau étant plus important que le nombre de routeurs centraux -ceux avec une capacité plus grande- nous avons choisi pour notre modèle des valeurs d'efficacité correspondant à une capacité moyenne des données du tableau 3.5.

TABLE 3.6: Valeurs utilisées dans le modèle

Catégorie	Symbole	Valeur
Routeur IP/MPLS	P_{ip}/C_{ip}	10 [W/Gbps]
Port Ethernet	P_{eth}/C_{eth}	3,8 [W/Gbps]
Port OTN	P_{otn}/C_{otn}	3,4 [W/Gbps]
Transpondeur	P_{trans}/C_{trans}	3 [W/Gbps]
Régénérateur	P_{re}/C_{re}	6 [W/Gbps]
Commutateur optique	P_{optsw}/C_{optsw}	0,5 [W/Gbps]
Amplificateur	P_{ola}/C_{ola}	0,3 [W/Gbps]
Facteur de refroidissement	Φ_{cool}	0,5 [/]
Facteur de protection	η_{pr}	2 [/]
Rendement du système d'alimentation	η_{alim}	0,9 [/]
Nombre de liens	N_{hop}	11 [/]
Longueur entre amplificateurs	L_{ampli}	80 [km]
Longueur entre régénérateurs	L_{regen}	1500 [km]
Longueur moyenne des lignes	L_{line}	Voir différents scénarios

Les valeurs d'efficacité du tableau 3.6 sont données pour une capacité maximale et ne représentent donc pas la consommation d'énergie réelle par Mb transmis. En effet, la plupart des routeurs consomment la même quantité d'énergie indépendamment du trafic. Dans [65], ils estiment que le trafic vaut en moyenne 50% de trafic maximum alors que dans [64], ils estiment ce facteur à 25% dans le cas particulier des fibres optiques sous-marines. Sous l'hypothèse que le réseau n'est pas proportionnel, nous considérons que le réseau fonctionne en moyenne à 33% de sa capacité maximale. L'énergie réelle dépensée par Gb transmis est donc donnée par :

$$E_{backbone} = 3 \cdot \frac{P_{backbone}}{C_{node}} \quad (3.15)$$

où $E_{backbone}$ est l'efficacité réelle du réseau central en tenant compte de la sous-utilisation du réseau.

La consommation énergétique au sein du réseau pour une requête Internet est directement proportionnelle au nombre de liens (N_{hop}) que traverse le paquet de données (équations (3.10) à (3.14)). Estimer le nombre de liens parcourus est donc capital pour obtenir une valeur réaliste de la puissance consommée dans le réseau. Comme expliqué dans [66], le chemin parcouru par un paquet de données au sein du réseau peut être observé à l'aide de la commande *traceroute*. Cette méthode souffre de plusieurs inconvénients : les routeurs ne peuvent qu'être déduits du résultat obtenu, les liens observés dépendent du point d'observation et il n'y a pas d'informations sur la longueur des liens. Cependant, en absence de données plus précises des fournisseurs d'accès à Internet, *traceroute* reste le seul outil à notre disposition pour approximer le nombre de routeurs que traversent les données.

Les résultats d'une analyse *traceroute* effectuée pour 5 sites Internet à partir de la ville de Louvain-La-Neuve sont présentés dans le tableau 3.7. Le nombre moyen de routeurs semble être du même ordre de grandeur que le résultat présenté dans [67] qui l'estimait à 12,6 pour le réseau Européen. Dans notre modèle, nous utiliserons la moyenne des résultats du tableau 3.7, c'est-à-dire $N_{hop} = 11$.

TABLE 3.7: Résultats d'une analyse Traceroute

Site	Nombre de routeurs
Google	11
Youtube	9
facebook	11
Twitter	12
BBC news	10

Un autre facteur important est la longueur moyenne des lignes qui permet de déterminer P_{line} (équations (3.12) à (3.14)). Seule la destination du site *Youtube* a pu être déterminée grâce à *traceroute*, il s'agit de Londres. Nous savons également que le premier centre de données européen de *facebook* a été inauguré en Juillet 2013 en Suède [57] tandis que le centre de données de *Google* implanté à Mons a été inauguré en 2010 [48]. Dans le passé, les centres de données de ces compagnies étaient centralisés aux Etats-Unis, principalement en Californie. Dans cette étude, nous considérerons donc trois cas de figure spécifiques :

1. la destination est située dans un périmètre restreint
2. la destination est située sur un autre continent, typiquement aux Etats-Unis
3. la destination est située dans une zone froide et reculée, par exemple, au Nord de l'Europe

Ce troisième cas de figure est étudié pour comparer les dépenses énergétiques supplémentaires sur le réseau par rapport aux gains réalisés pour refroidir les centres de données lorsque ceux-ci sont délocalisés dans des régions où la température moyenne est faible. Cette pratique est de plus en plus privilégiée par les entreprises devant traiter un grand nombre de données dans le but de diminuer leur consommation énergétique et par la même occasion minimiser leurs coûts.

Dans le scénario 1, la distance moyenne entre routeurs est fixée à 160 km, ce qui signifie qu'il y a en moyenne un amplificateur intermédiaire entre chaque nœud. La régénération du signal n'est pas nécessaire dans ce cas-ci. Dans le scénario 2, la distance moyenne de 10 liaisons est fixée à 320 km plus une de 7500 km qui modélise le câble sous-marin entre deux continents. Pareil dans le scénario 3 mais pour une ligne de 3000 km. Les résultats sont présentés dans le tableau 3.8. Selon notre modèle et sous les hypothèses présentées ci-dessus, transférer des données d'un centre de donnée d'un autre continent consomme 14% d'énergie en plus sur le réseau que à partir d'un centre de donnée à proximité de l'utilisateur. A partir d'un centre de données d'une région froide reculée, ce surplus d'énergie atteint 6%.

TABLE 3.8: Résultats de la modélisation pour 3 scénarios

Scénarios	$E_{backbone}$ [J / Gb]
Scénario 1	4653
Scénario 2	5286
Scénario 3	4938

Le pourcentage de l'énergie dépensée dans les lignes est de 2% pour le scénario 1, 14% pour le second et 8% pour le troisième. Ces chiffres sont du même ordre de grandeur que dans [18] où la part de l'énergie consommée dans les lignes était estimée à 10%.

La différence entre les scénario 1 et 3 n'est que de 0,28 J/Mb, ce qui correspond à un surplus d'énergie de 6% sur le réseau central tandis que le *free cooling* permet de diminuer significativement l'énergie du système de refroidissement des centres de données dans les régions froides (voir Section 3.3.5). Comme nous le verrons dans la Section 4.2, l'impact énergétique du réseau est faible par rapport à celui des centres de données. Nous en concluons que le gain énergétique global de l'installation de centres de données dans des régions froides est positif.

Discussion et critiques du modèle

Le modèle présenté ci-dessus dépend des données de consommation, du nombre de nœuds et de la longueur des lignes. Pour obtenir des résultats plus représentatifs, il faudrait, d'une part, avoir accès à des mesures de puissance et de trafic sur des routeurs en utilisation réelle, d'autre part, connaître plus en détail la topologie réelle des nœuds au sein du réseau. Malheureusement, ces données sont gardées confidentielles par les fournisseurs d'accès à Internet. Connaître ces informations permettrait de définir un modèle plus précis qui tiendrait compte des différentes structures du réseau et des composants présents à chaque niveau de celui-ci.

Dans l'étude [64] analysant le cycle de vie d'un système de communication via câbles sous-marins en fibre optique, ils estiment que l'énergie électrique nécessaire pour transmettre 1Gb sur une distance de 10000 km est de $2,79 \cdot 10^{-3}$ kWh. En réécrivant ce résultat en kJ/Gb, nous obtenons 10,05 kJ/Gbps. Pour des câbles d'une

longueur de 7500 km (scénario 2) et 3000 km (scénario 3), cela donne 7540 J/Gb et 3015 J/Gb respectivement. 3,6% de cette énergie est due aux amplificateurs contre 96,4% pour les terminaux. Ce qui équivaut à 271 J/Gb dédiés aux câbles. Cette valeur est deux fois moins grande que le résultat obtenu par notre modèle : 582 J/Gb dépensés dans la ligne sous-marine. Une autre différence vient des valeurs de consommation des terminaux : selon cette étude, 7269 J/Gb sont consommés dans les nœuds à l'extrémité du câble sous-marin alors que, selon notre modèle, 4554 J/Gb sont consommés par l'ensemble des 11 nœuds séparant l'émetteur du destinataire. Cette différence peut provenir de plusieurs facteurs : premièrement, les valeurs d'énergie du rapport [64] ont été obtenues à l'aide de mesures sur deux terminaux tandis que les valeurs de capacités ont été déduites de données globales donnant l'ensemble des capacités installées et le nombre total de terminaux pour une certaine région. Pour avoir un résultat plus représentatif, il aurait fallu mesurer le débit de données entrant et sortant correspondant aux terminaux sur lesquels ont été effectuées les mesures d'énergie. Deuxièmement, il est possible que les technologies employées pour les communications sous-marines soient sensiblement différentes que pour les liens terrestres. Troisièmement, les technologies considérées dans l'étude sur les câbles sous-marins datent du début des années 2000 alors que notre modèle se base sur des données de 2009 à 2012. Finalement, dans [64] ils utilisent un facteur d'utilisation de 25% contre 33% dans notre modèle.

Par manque de données supplémentaires, il est difficile d'estimer quel résultat est plus représentatif que l'autre. Ce nouvel exemple met en évidence qu'il faut toujours rester critique par rapport aux résultats de certaines études et que ceux-ci peuvent varier de plusieurs ordres de grandeur en fonction des hypothèses et des données utilisées.

3.4.4 Améliorations potentielles de l'efficacité énergétique

Proportionnalité

La première méthode pour augmenter la proportionnalité du réseau central est d'avoir des routeurs les plus proportionnels possibles, c'est-à-dire dont la puissance diminue lorsque le débit diminue. Actuellement, les routeurs fonctionnent à puissance constante mais des techniques existent pour augmenter leur proportionnalité : par exemple, un prototype de software réalisé dans [68] permettrait de faire fonctionner un routeur de 50 à 100% de sa puissance en fonction du débit et ce, sans compromis avec les performances.

Une autre stratégie est de jouer sur la proportionnalité du réseau, et non plus d'un seul nœud. Ceci est réalisable grâce à une gestion dynamique de la topologie : à faible débit, certaines lignes seraient mises hors tension et l'information circulerait via un autre routeur. Cette technique pourrait diminuer la consommation énergétique du réseau central de 50% aux heures de faible utilisation [69].

Efficiences énergétique

Comme expliqué dans la Section 3.4.3, la consommation énergétique du réseau central est principalement due aux nœuds du réseau (plus de 90%). Dans les années à venir, la consommation énergétique par Mb des routeurs risque de ne plus diminuer au même taux qu'au début des années 2000 (-30% par an) à cause de la puissance dissipée aux interconnexions électroniques/optiques [65]. La consommation des routeurs ne diminuerait alors plus que de 10% par an.

Pour éviter cette limitation et pour diminuer la consommation énergétique du réseau, une des solutions est d'utiliser des *bypass* optiques. L'idée est que le signal non destiné au nœud intermédiaire reste dans le domaine optique et ne soit pas traité par le routeur. Cette technique permettrait d'économiser 45% d'énergie aux nœuds du réseau central [70].

Changements structurels

Une idée pour augmenter l'efficacité du réseau serait d'utiliser une architecture basée sur un unique serveur universel relié à des réseaux d'agrégation optiques. Selon [71], cette technique permettrait de diviser la consommation énergétique du réseau central par 1000. Il est cependant difficilement concevable de modifier l'architecture complète d'un réseau aussi complexe que celui d'Internet. Toutefois, cette étude met en évidence le fait que changer de paradigme pourrait permettre de diminuer considérablement la consommation énergétique de certaines parties du réseau Internet.

3.5 Accès au réseau

Dans cette section, trois technologies d'accès au réseau seront étudiées : accès via une ligne fixe (DSL), via un point d'accès Wi-Fi et via le réseau mobile. Pour chacune de ces technologies, la consommation énergétique lors de la phase d'utilisation, de production et de fin de vie sera présentée et discutée, ensuite un modèle sera développé où la puissance des dispositifs est donnée en fonction de plusieurs paramètres. Grâce à ce modèle, le potentiel d'amélioration de l'efficacité énergétique sera analysé selon les 3 catégories présentées en début de chapitre : proportionnalité, efficacité et changements structurels. Finalement, les différentes techniques d'accès au réseau seront comparées et l'évolution de leur impact énergétique dans le futur sera discutée.

3.5.1 Accès fixe

Dans cette sous-section, nous étudions la consommation énergétique de l'accès par câble le plus répandu : *Digital Subscriber Line* (DSL). Cette technologie permet un accès Internet via les câbles de cuivre des lignes téléphoniques. Comme représenté à la Figure 3.1, plusieurs utilisateurs, via leur modem, sont connectés à un *digital subscriber line access multiplexer* (DSLAM). Celui-ci récupère le trafic de données et le redirige vers le réseau central - via un *Broadband Remote Access Server* BRAS - selon le principe de multiplexage fréquentiel. D'autres technologies d'accès au réseau par câble seront discutées dans le paragraphe sur le potentiel d'amélioration de l'efficacité énergétique.

3.5.1.1 Consommation énergétique lors de la phase d'utilisation

Actuellement, la consommation énergétique des DSLAM dépend peu du trafic. La puissance d'un *DSLAM Alcatel Stinger FS+* est de 1,7 kW [72]. Celui-ci peut relier 1008 utilisateurs au réseau et a une capacité maximale de 2 Gb/s. Le débit descendant (*download*) réel pour une connexion ADSL est de l'ordre de quelques Mb/s alors que le débit maximum d'une connexion VDSL est de 24 Mb/s. Il est à noter que, à cause de l'atténuation, la longueur des lignes câblées pour une connexion VDSL est d'environ 300m contre plus de 1,5km pour l'ADSL.

La puissance des modems varie également peu avec le trafic. Les puissances moyennes en mode veille et en transmission de 3 modems différents sont données dans le tableau 3.9 [73]. Celles-ci sont de l'ordre de 5 à 7 W et ne varient que de quelques centièmes de watts en fonction du mode (en veille ou en transmission).

TABLE 3.9: Puissance d'un modem

	Mode Veille [W]	Transmission [W]
Linksys AG041	7,26	7,32
Netgear DG834G	5,14	5,22
Cisco 837	5,61	5,85

3.5.1.2 Consommation énergétique lors de la phase de production et de fin de vie

L'étude [74] compare l'empreinte carbone des systèmes avec câbles en fibre optique par rapport à ceux en cuivre. Cette étude révèle que l'impact énergétique de la phase de production et de fin de vie des systèmes en fibre optique est du même ordre de grandeur que les systèmes utilisant des câbles de cuivre. La phase d'utilisation est la plus importante dans les deux cas. Bien entendu, ces résultats dépendent des hypothèses d'utilisation et de la topologie étudiée. De plus, cette étude date de 2008, les technologies ont depuis évoluées et les données pour réaliser une ACV sont

aujourd'hui plus étoffées qu'à l'époque. Des analyses plus spécifiques devront être réalisées dans le futur pour voir comment la répartition énergétique des différentes phases du cycle de vie va évoluer en fonction du temps et des techniques d'accès utilisées, ce qui permettra de prendre les bonnes décisions de conception.

Des analyses spécifiques sur les DSLAM et les modems n'ont pas été réalisées. Au vu de leurs géométries similaires, nous faisons l'hypothèse que l'impact lors de la phase de production d'un modem est du même ordre de grandeur que celui d'un point d'accès Wi-Fi (voir Section 3.5.2.3). La puissance d'un DSLAM étant constante et élevée, sa consommation en phase d'utilisation est probablement prépondérante par rapport à celle de production. Ces hypothèses devront être confirmées par des études ultérieures.

3.5.1.3 Modèle de la consommation énergétique

Un modem est composé d'un modulateur, d'un démodulateur et d'un circuit d'interface à la ligne téléphonique (dont un amplificateur), ainsi qu'un routeur pour gérer la translation d'adresse entre l'adresse publique et les adresses privées, d'un *firewall* pour sécuriser la connexion et d'un commutateur pour gérer les communications entre les appareils du réseau. Les éléments d'un modem sont donc principalement des dispositifs électroniques.

Le DSLAM est composé de dispositifs faisant la connexion avec le réseau central, d'un multiplexeur et d'amplificateurs pour transmettre le signal dans les câbles le reliant au modem [75] - distance pouvant aller de 1,5 km à 5,5 km dans le cas de l'ADSL et environ 300 m pour le VDSL. Le DSLAM est souvent accompagné d'un système de refroidissement et d'un système d'alimentation électrique d'un rendement de l'ordre de 90 %. Le schéma simplifié d'un DSLAM est représenté à la Figure 3.19. Sa puissance est donnée par :

$$P_{DSLAM} = \frac{1}{\eta_{alim}} \cdot (1 + \Phi_{cool} \cdot (P_{elec} + P_{ampli})) \quad (3.16)$$

où η_{alim} est le rendement de l'alimentation électrique, Φ_{cool} est le facteur de refroidissement, P_{elec} est la puissance du multiplexeur et de l'interface avec le réseau, P_{ampli} est la puissance des amplificateurs de signaux. Le facteur de refroidissement peut varier entre 30 % pour un conditionneur d'air et presque 0 % pour un système de *free cooling*. Dans la suite de ce rapport, nous utiliserons la valeur $P_{DSLAM} = 1,7kW$ [72] qui tient déjà compte des pertes de l'alimentation et du refroidissement.

Dans des conditions idéales où la puissance des éléments du réseau serait proportionnelle au trafic et dans l'hypothèse où celui-ci serait uniformément distribué au sein des utilisateurs, l'énergie dépensée dans le réseau d'accès DSL pour transmettre un bit serait donnée par :

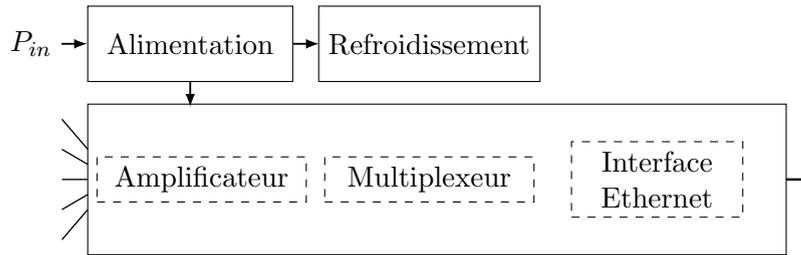


FIGURE 3.19: Diagramme simplifié d'un DSLAM

$$E_{fixe} = \frac{P_{modem}(DR) + \frac{P_{DSLAM}(DR)}{N_{users}}}{DR} \quad (3.17)$$

où N_{users} est le nombre d'utilisateurs connecté à un DSLAM et où DR (*data rate*) est le débit de données en b/s. Cependant, actuellement, la puissance est indépendante du trafic. Dans ces conditions, l'énergie réellement dépensée dans le réseau d'accès fixe pour un bit transmis est donnée par :

$$E_{fixe} = \frac{24 \cdot (P_{modem} + \frac{P_{DSLAM}}{N_{users}})}{N_{hours} \cdot DR_{avg}} \quad (3.18)$$

où N_{hours} est le nombre d'heures par jour pendant lesquelles un utilisateur transfère des données et DR_{avg} est le trafic moyen par utilisateur durant cette période.

La puissance par Mb/s minimale théorique est obtenue lorsqu'un maximum d'utilisateurs transfère des données au débit maximum (24 Mb/s). Pour une puissance de DSLAM de 1,7kW, une puissance constante du modem de 5 W et ($\frac{2000}{24} =$) 83 utilisateurs, l'équation 3.17 vaut 1,06 J/Mb.

Une valeur plus réaliste est obtenue en considérant que 1000 utilisateurs sont connecté à la DSLAM et transfèrent des données à un débit moyen de 1 Mb/s pendant 2 heures par jour. A titre indicatif, écouter de la musique en ligne (haute qualité) demande un transfert de données de 320 kb/s [76] alors que le téléchargement d'un film peut atteindre plusieurs Mb/s. Sous les mêmes conditions de puissance que ci-dessus, l'équation 3.18 vaut 80,4 J/Mb. 75% de cette énergie est dépensée dans les modems.

3.5.1.4 Améliorations potentielles de l'efficacité énergétique

Proportionnalité

La proportionnalité du réseau d'accès peut être améliorée à l'aide d'un mode *sleep* pour les modems [77] et les DSLAM [78]. Ces deux méthodes permettraient d'économiser 64 % de l'énergie consommée dans le réseau d'accès fixe.

Une autre méthode pourrait être d'utiliser une allocation dynamique de la bande passante (DBA). Cette technique permettrait à certains utilisateurs d'avoir une bande passante plus large lorsque d'autres demandent un débit plus faible. Cette technique est réalisable à l'aide de la technologie d'accès *passive optical network* (PON) qui sera décrite ci-dessous.

Efficiace

L'efficiace des DSLAM et des modems va s'améliorer au cours des années notamment grâce à l'amélioration de l'efficacité des éléments à base de semi-conducteurs discutée dans la Section 3.2. Selon [72], 20% de l'énergie dépensée dans un modem l'est dans le système d'alimentation, 70% dans l'électronique et 10% dans l'amplificateur. Au cours du temps la part dédiée à l'électronique va diminuer et l'impact de l'amplificateur va devenir de plus en plus conséquent. En effet, le potentiel d'amélioration de l'efficacité des amplificateurs est très faible, celui-ci n'évolue presque pas au cours du temps [72] alors que l'efficiace des processeurs évolue à un taux d'au moins 18% par an (voir discussions des sections 3.3.5.2 et 3.2.2).

Changements structurels

Une des solutions pour augmenter l'efficiace est de changer le moyen de transport du réseau d'accès. Actuellement, la solution la plus efficace est le réseau optique passif (PON) : la connexion entre le réseau central et le modem se fait avec des lignes de fibre optique contrairement aux connexions ADSL qui sont réalisées à l'aide de câbles en cuivre. L'atténuation dans les fibres optiques est moins importante que dans le cuivre, ce qui permet de transmettre plus de données sur de plus longues distances pour une même puissance. Le principe du PON est que plusieurs utilisateurs partagent la même fibre. Ceux-ci sont reliés au réseau à l'aide d'un *optical network unit* (ONU), les données sont ensuite transférées via fibre optique vers un *splitter* passif qui envoie les données des différents utilisateurs sur une même fibre optique (multiplexage) jusqu'à un *optical line terminal* (OLT). Un autre avantage de cette technique est que le *splitter* passif ne consomme pas de puissance contrairement au DSLAM des connexions ADSL. Selon [79], à un taux d'accès faible, la puissance consommée par le réseau DSL est similaire à celle du PON. Ceci est principalement dû au fait que la majorité des pertes se font dans le modem dont la consommation est du même ordre de grandeur dans les deux technologies. Cependant, le PON va devenir de plus en plus efficace proportionnellement aux connexions DSL avec l'augmentation du débit. En effet, la puissance d'amplification des ONU est très faible grâce aux atténuations réduites des lignes en fibre optique par rapport à celles des câbles en cuivre. La phase de production

et de fin de vie étant du même ordre de grandeur pour les systèmes en fibre optique et en cuivre, la technologie PON semble être énergétiquement favorable par rapport à l'ADSL et va sans doute se répandre dans les années à venir. A titre indicatif, la puissance d'un OLT typique est de 1,34 kW, celui-ci a une capacité de 16 Gbps et peut relier 1024 utilisateurs [72]. A capacité maximale, la puissance par Mbps d'un OLT (0,08 W/Mbps) est donc dix fois moins grande que celle d'un DSLAM (0,085 W/Mbps).

3.5.2 Accès fixe et Wi-Fi

Dans cette sous-section, nous étudions le cas où un ordinateur est connecté au modem à l'aide d'une transmission sans fil Wi-Fi. Il convient de mentionner que, actuellement, les fonctions de modem et de point d'accès Wi-Fi sont souvent rassemblées dans un même dispositif dénommé "routeur Wi-Fi". Les données de puissance de la section suivante correspondent à ce type d'appareil et ne devront donc pas être additionnées à celle d'un modem pour déterminer la consommation globale de l'accès au réseau.

3.5.2.1 Structure d'un point d'accès Wi-Fi

Dans un point d'accès Wi-Fi, le signal à transmettre est créé à l'aide de processeurs (codage, multiplexage, etc.), il est ensuite converti en un signal analogique, puis amplifié et transmis via une antenne radio. Lors de la réception, le signal est amplifié, converti en numérique, traité à l'aide d'un processeur de signal numérique (DSP) (filtrage, extraction des signaux, etc.) et finalement, est traité par le processeur *Media Access Control* (MAC). Un point d'accès Wi-Fi réel comporte d'autres fonctions consommatrices d'énergie tels que le module ethernet, les mémoires ou les ports USB [80]. La consommation d'une borne Wi-Fi est donc principalement due à des composants d'électronique numérique et aux amplificateurs de signaux. Il y a également des pertes dans le système d'alimentation électrique qui convertit le courant alternatif en continu.

Le rendement énergétique d'un amplificateur, c'est-à-dire la puissance du signal à la sortie divisée par la puissance totale consommée, varie de quelques % à presque 50 % en fonction de la puissance de sortie [81]. Selon l'étude [82], le rendement moyen en tenant compte de la probabilité d'utilisation de la puissance de sortie pour un amplificateur à grande efficacité pourrait s'élever à 6,38%. Les données constructeurs présentées dans [80] sont du même ordre de grandeur.

Pour transmettre des données, le point d'accès Wi-Fi peut jouer sur deux paramètres en fonction de l'affaiblissement de propagation (PL) jusqu'à l'émetteur : la puissance transmise (P_t) et le débit de la couche physique (C) [81].

3.5.2.2 Consommation énergétique lors de la phase d'utilisation

Des mesures de consommation en veille et de débit maximum sur des points d'accès Wi-Fi ont été réalisées dans [83]. Les résultats de ces mesures sont présentés dans le tableau 3.10. Il est à noter que les mesures de puissances de la deuxième colonne ont été réalisées à un débit de données nul. Les puissances correspondant au débit de la colonne 3 n'ont pas été mesurées mais sont probablement sensiblement supérieures que celles de la colonne 2. Les points d'accès présentés dans le tableau 3.10 ont été conçu pour permettre des transmissions sans fil selon la norme *IEEE 802.11n*, excepté le *Asus RT-N66U*, le *Netgear R6300* et le *Buffalo WZR-D1800H*. Ces derniers sont compatibles avec la norme *IEEE 802.11ac* qui permettrait un débit maximum théorique de 8 Gbps par point d'accès contre 0,45 Gbps pour la version précédente. Cette performance est réalisée à l'aide d'une largeur de bande plus importante (160 MHz), l'utilisation de 8 antennes grâce à la technologie *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO) et une plus grande densité de modulation (256-QAM) [84]. Ces techniques seront discutées dans la Section 3.5.2.5.

TABLE 3.10: Mesures de puissance et de débit maximum sur des points d'accès Wi-Fi

Point d'accès	Puissance en veille [W]	Débit maximum transmis [Mbps]
Amped Wireless R20000G	4,6	65
TP-link-TL-WDR4300	4,6	95
EnGenius ESR750H	4,9	70
D-Link VWR	5,3	/
Western Digital My Net N900	7,0	109
Netgear WNDR4500	7,7	134
Asus RT-N66U	9,1	145
Netgear R6300	9,7	362
Buffalo WZR-D1800H	9,8	319
Linksys EA6500	9,9	366
Linksys WRTP54G	11,9	/

Selon une deuxième étude réalisée sur 3 points d'accès Wi-Fi pour entreprise [85], la consommation varie entre 0,30 et 0,47 J/Mb en fonction du dispositif. Cette consommation peut augmenter de 20% pour des configurations de haute sécurité. La consommation des composants de base représente 67% de l'énergie totale consommée en pleine charge.

En faisant l'hypothèse que ce rapport est le même que pour les mesures du tableau 3.10, la puissance par débit maximum du point d'accès *IEEE 802.11n* le plus performant (*TP-link-TL-WDR4300*) est de 0,06 W/Mbps contre 0,03 W/Mbps pour le plus performant de la norme *IEEE 802.11ac* (*Linksys EA650*). Il est à noter que bien que leur puissance par débit en pleine charge soit deux fois moindre, la puissance des composants de base est deux fois plus importante pour les dispositifs de la norme *IEEE 802.11ac*. Si le débit de ces points d'accès n'est pas pleinement

exploité, leur consommation énergétique globale par Mb transmis pourrait donc s'avérer plus faible que les bornes *IEEE 802.11n*.

Finalement, selon des mesures effectuées par [86], un point d'accès Wi-Fi a une consommation au repos de 5,2 Watts et 8,3 Watts en pleine charge. Ces données sont en accord avec les deux études citées précédemment. Sous l'hypothèse d'un débit de 1 Mbps (un utilisateur), la consommation équivaldrait à 8,3W/Mbps. En revanche, si le débit correspond au maximum théorique d'une borne Wi-Fi *IEEE 802.11g*, c'est-à-dire 54 Mb/s, la consommation par débit de données serait égale à 0,15 W/Mbps.

En supposant que le débit transmis en phase d'utilisation est proche du débit maximum, la puissance moyenne d'un point d'accès Wi-Fi sur une journée est donnée par :

$$P_{PAvg} = \frac{(24 - N_{hours}) \cdot P_{PAidle} + N_{PAhours} \cdot P_{max}}{24} \quad (3.19)$$

où N_{hours} est le nombre d'heures d'utilisation sur une journée, P_{PAidle} est la puissance au repos du point d'accès et P_{PAmix} est la puissance en pleine charge. De la même manière que pour l'accès fixe, la consommation énergétique de l'accès via Wi-Fi est donnée par :

$$E_{wifi} = \frac{24 \cdot (P_{PAvg} + \frac{P_{DSLAM}}{N_{users}})}{N_{hours} \cdot DR_{avg}} \quad (3.20)$$

Sous les mêmes conditions d'utilisation que dans le cas de l'accès fixe, c'est-à-dire un débit moyen de 1 Mb/s pendant 2 heures par jour et une consommation au repos de 5,2 Watts et 8,3 Watts en pleine charge, les équation (3.19) et (3.20) valent respectivement 5,5 W et 83,4 J/Mb.

3.5.2.3 Consommation énergétique lors de la phase de production et de fin de vie

Une analyse du cycle de vie d'un point d'accès Wi-Fi a été réalisée dans [87]. Cette étude se focalise principalement sur la phase de production : elle tient compte de l'extraction des matières premières, de la fabrication des composants, de l'assemblage et du transport. Aucun recyclage n'est envisagé. Les résultats sont présentés dans le tableau 3.11. L'extraction des matériaux et la fabrication des composants représentent plus de 80% de l'énergie consommée lors de la phase de production. L'énergie totale dépensée lors de la phase de production s'élève à 199,90 MJ.

Il faut toutefois rester critique vis-vis de ces résultats : d'une part, les données sur les composants électroniques sont incertaines et peu nombreuses, d'autre part, cette étude se focalise uniquement sur un point d'accès en particulier : le nombre et la masse des composants pourrait varier selon la marque et la puissance de

TABLE 3.11: Répartition de l'énergie dépensée lors de la phase de production d'un point d'accès Wi-Fi

Etape	Energie [Wh]	[MJ]
Matériaux et composants	45018,18	162,07
Assemblage	9353,33	33,67
Transport	1157,10	4,17
Total	55528,61	199,90

l'appareil. D'un autre côté, cette étude est récente (2011) et se base sur plusieurs bases de données. De plus, chaque composant du point d'accès a été répertorié et pesé, il n'y a donc pas d'incertitude sur la composition du point d'accès. Les résultats en phase de production semblent donc être d'une qualité acceptable.

Par contre, les conclusions sur la phase d'utilisation semblent erronées : selon les auteurs de l'étude, la consommation en utilisation équivaldrait à 87 MJ par an. Sous l'hypothèse d'une durée de vie d'un an, la phase de production s'élèverait donc à 70% de l'énergie dépensée sur l'ensemble du cycle de vie. Ce nombre atteindrait 57% pour une durée de vie de trois ans. Cependant, l'auteur compare des données d'énergies primaires extraites de bases de données d'ACV avec des données de consommation électrique mesurées sur le dispositif. Comme expliqué dans la Section 2.4, il est nécessaire d'exprimer la consommation électrique en énergie primaire équivalente en la multipliant par le PEF - égal à 2,6 en Europe. De plus, la valeur de consommation utilisée dans l'étude est de 2,77 W alors que la puissance minimale des dispositifs présentés à la section précédente était de 4,6 W, et ce pour des normes identiques.

En faisant intervenir le PEF et en utilisant la valeur de P_{PAvg} calculée dans la section précédente (5,46 W), la consommation énergétique en phase de production ne s'élève plus qu'à 20% et 7% sous les hypothèses d'une durée de vie de 1 et 3 ans, respectivement.

3.5.2.4 Modèle de la puissance du signal transmis

La puissance à transmettre pour atteindre une certaine capacité sur une largeur de bande de fréquence donnée dépend de plusieurs facteurs, notamment du schéma de modulation et du code correcteur d'erreur employés. Cependant, la puissance minimale pour transmettre des données à une certaine capacité sans pertes peut être déduite de la formule de Shannon. Celle-ci stipule que l'efficacité spectrale, c'est-à-dire le débit maximum que l'on peut atteindre, est donnée par la formule [88] :

$$C = W \log_2(1 + SNR) \quad (3.21)$$

où C est la capacité du réseau en bit/s, W est la bande passante du canal en Hertz et SNR est le rapport signal-sur-bruit. En première approximation, nous considérons un bruit thermique blanc gaussien. En pratique, d'autres bruits peuvent exister dans un canal de transmission mais le bruit thermique est le seul dont on ne puisse pas se passer et sera en général prépondérant par rapport aux autres. La puissance du bruit thermique vaut [89] :

$$P_{Nth} = kTW \quad (3.22)$$

où k est la constante de Boltzmann ($1,3810^{-23}Ws/K$), T la température absolue et W la largeur de la bande de fréquence. Le rapport signal-sur-bruit vaut donc :

$$SNR = \frac{P_t}{kTW} \quad (3.23)$$

où P_t est la puissance du signal transmis. En injectant (3.23) dans (3.21), nous obtenons la puissance du signal transmis en fonction de la bande passante du canal et de la capacité souhaitée :

$$P_t = kTW(2^{\frac{C}{W}} - 1) [W] \quad (3.24)$$

En plus de l'effet du bruit sur le signal, il faut tenir compte des pertes liées au trajet. Celles-ci proviennent, d'une part, de l'atténuation du signal due à la propagation dans l'air et, d'autre part, de la dispersion due notamment aux multi-trajets (*fading*) et aux obstacles entre l'émetteur et le récepteur (*shadowing*). Ces pertes dépendent de trois paramètres majeurs : l'environnement, la fréquence du signal et la distance entre les deux antennes [90].

Dans un environnement d'intérieur tel qu'un bureau ou une maison, cet affaiblissement de propagation peut être modélisé de la façon suivante [91] :

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (3.25)$$

où PL (*Path Loss*) est exprimé en dB, d_0 est la distance de référence, d la distance entre l'émetteur et le récepteur et n le coefficient d'atténuation. Dans le cas théorique d'un espace sans obstacles, n vaudrait 2 et $PL(d_0)$ correspondrait à l'affaiblissement de propagation en espace libre :

$$PL(d_0) = 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi df}{c}\right) \quad (3.26)$$

où f est la fréquence de propagation et c la vitesse de propagation de l'onde. Les paramètres de ce cas théorique ainsi que d'autres déterminés empiriquement pour différents environnements sont repris dans le tableau 3.12. LOS (*line-of-sight*) signifie qu'il n'y a pas d'obstacles entre l'émetteur et le récepteur à l'inverse du NLS (*non-line-of-sight*).

L'affaiblissement de propagation en fonction de la distance entre les antennes pour

TABLE 3.12: Affaiblissement de propagation en intérieur

Environnement	Source	$PL(d_0)$	n
Théorique 5 GHz	[90]	46,8	2,0
Ecole	[90]	20,2	6,1
Bureaux	[90]	46,1	3,1
LOS Résidentiel	[92]	47,2	1,8
NLS Résidentiel	[92]	50,3	3,3

différents environnements est représenté à la Figure 3.20. Il est à noter que les paramètres pour l'école ont été définis à partir de mesures réalisées dans un intervalle de 5 à 60 mètres tandis que les mesures pour un environnement résidentiel sont comprises entre 0 et 11 mètres. Ceci explique en partie la pente plus importante de la courbe correspondant à l'école.

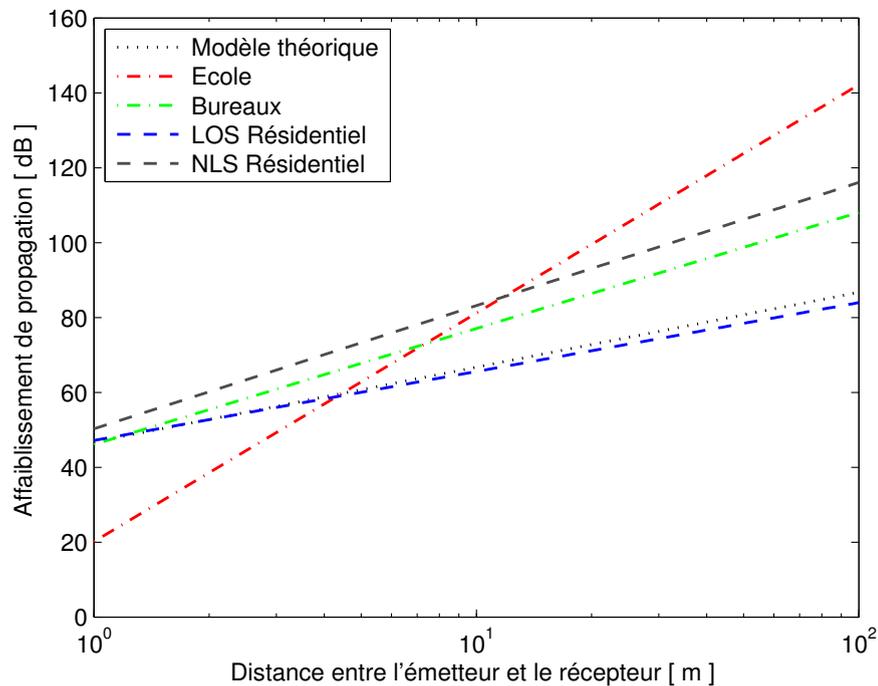


FIGURE 3.20: Affaiblissement de propagation pour différents environnements d'intérieur

La puissance minimale du signal à transmettre est déterminée en multipliant l'équation (3.24) par (3.25) (en W) :

$$P_t = PL(d)kTW(2^{\frac{C}{W}} - 1) \text{ [W]} \quad (3.27)$$

Dans le cas d'antennes directives, la puissance minimale à transmettre est inversement proportionnelle au gain G :

$$P_t = \frac{1}{G} PL(d)kTW(2^{\frac{C}{W}} - 1) \text{ [W]} \quad (3.28)$$

Le gain G est défini comme le rapport entre la puissance rayonnée dans le lobe principal et la puissance rayonnée par une antenne isotrope.

Les équations présentées ci-dessus ainsi que les valeurs expérimentales de l'affaiblissement de propagation seront utilisées par la suite pour discuter des améliorations potentielles de l'efficacité des systèmes d'accès sans fil. Ces équations sont également d'application pour la puissance de transmission des stations de base et seront utilisées pour discuter du compromis entre efficacité spectrale et efficacité énergétique dans les systèmes de transmission sans fil.

3.5.2.5 Améliorations potentielles de l'efficacité énergétique

Proportionnalité

Au même titre que les modems de l'accès fixe, la technique principale pour augmenter la proportionnalité d'un point d'accès Wi-Fi est d'utiliser un mode basse consommation lorsque celui-ci n'est pas utilisé. Il est à noter qu'il existe un compromis entre utilisation d'un mode veille et qualité de service : lorsqu'un utilisateur se connecte à une borne en mode basse consommation, celle-ci prendra plus de temps à établir la connexion. C'est pourquoi la consommation des points d'accès à débit de données nul est actuellement élevée par rapport à la consommation en pleine charge.

Des améliorations peuvent également être effectuées au niveau de l'amplificateur et du DSP. Ces techniques seront décrites dans la Section 3.5.3.5 correspondant aux améliorations potentielles d'une station de base.

Efficiences

Il existe plusieurs méthodes pour augmenter l'efficacité d'une transmission Wi-Fi. Une de ces techniques consiste à jouer sur la directivité des antennes. Actuellement, toutes les antennes sont omnidirectionnelles pour être capables de se connecter dans toutes les situations. Cependant, dans certains cas et à l'aide de plusieurs antennes, elles pourraient modifier leur directivité en direction du récepteur. Comme la puissance minimale à transmettre est inversement proportionnelle au gain (voir équation 3.28), le point d'accès Wi-Fi consommerait moins de puissance pour un même taux de données.

La puissance minimale de transmission augmente de manière exponentielle avec l'efficacité spectrale, c'est-à-dire avec le débit par unité de largeur de bande (voir équation 3.28). Une technique pour consommer moins de puissance pour un même

débit est donc d'utiliser une largeur de fréquence plus large et d'utiliser une densité de modulation plus grande.

Ces deux techniques ont été implémentées dans la norme *IEEE 802.11ac* discutée à la Section 3.5.2.2. Comme expliqué précédemment, bien que ces techniques permettent de transmettre à un même débit pour une puissance de transmission plus faible, l'impact global énergétique pourrait ne pas être positif à cause de l'augmentation de la consommation des composants de base. Une augmentation de l'efficacité découplée d'une amélioration de la proportionnalité des dispositifs peut donc avoir un effet négatif sur la consommation énergétique globale dans le cas où le débit moyen utilisé est beaucoup plus faible que le débit maximum atteignable.

De plus, bien que l'augmentation de la densité de modulation et l'utilisation d'antennes multiples permettent de diminuer la puissance du signal transmis - et donc la puissance dépensée dans l'amplificateur de puissance -, elles nécessitent une puissance de calcul plus importante et, par conséquent, une puissance énergétique des dispositifs électroniques plus importante. Il y a donc un compromis à trouver entre puissance transmise et puissance de modulation comme cela a été discuté dans [93].

D'autres techniques permettant de diminuer la puissance du signal transmis seront discutées dans la Section 3.5.3.5 correspondant aux améliorations potentielles d'une station de base. Ces améliorations sont également d'application pour les points d'accès Wi-Fi. Leur potentiel d'amélioration énergétique est cependant plus important pour les stations de base qui ont une consommation plus importante due à leur plus grande portée.

Changements structurels

Une dernière proposition pour diminuer la consommation énergétique de l'accès Wi-Fi est l'utilisation d'antennes distribuées. Le principe est de transmettre les données via plusieurs antennes réparties dans un bâtiment et reliées par fibre optique à une station centrale plutôt que d'utiliser une seule antenne avec une puissance du signal transmis plus importante. Comme représenté à la Figure 3.20, l'affaiblissement de propagation en *line-of-sight* - converti de dB en un rapport de puissance $P_1/P_0 = 10^{X_{dB}/10}$ - est 12,6 fois plus important à 20 m que à 5 m. Si le récepteur n'est pas dans la même pièce que l'émetteur (NLS), l'affaiblissement de propagation est alors 2000 fois plus important. C'est-à-dire que la puissance minimale du signal transmis pour un même débit devra être 2000 fois plus importante pour transmettre un paquet de données, conformément à l'équation 3.28. Les antennes distribuées permettent donc de diminuer la puissance rayonnée à performances constantes et de diminuer les interférences. Selon [80], cette pratique permettrait d'augmenter de 15% l'efficacité énergétique du réseau d'accès par rapport à une architecture usuelle composée d'un seul point d'accès. Pour estimer le gain énergétique total de cette technologie, il faudrait également évaluer l'augmentation de l'énergie lors de la phase de production des antennes et du système de raccordement à la station centrale.

3.5.3 Accès mobile

3.5.3.1 Consommation énergétique lors de la phase d'utilisation

La consommation énergétique d'une station de base lors de la phase d'utilisation dépend notamment :

- du nombre d'utilisateurs et du débit attribué à chacun
- de la distance par rapport aux émetteurs et de leur emplacement
- de la technologie employée (codage, multiplexage)
- de l'efficacité spectrale, c'est à dire du nombre du taux de données disponible pour une certaine bande passante. Et donc du nombre de secteurs par cellule.

Actuellement, la puissance des stations de base varie peu en fonction du trafic comme cela a été mesuré dans [14], [94] et [95]. Cette tendance est illustrée à la Figure 3.21 et est due au fait que les éléments d'une station sont dimensionnés pour un trafic maximum et ne se mettent pas en veille en cas de faible trafic. Les puissances minimales et maximales mesurées sur 4 stations de base *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS) sont présentées dans le tableau 3.13. Seule l'étude [94] datant de 2008 donne le trafic moyen sur une heure en Mb/h. La moyenne sur 6 jours de la première station est de 1065 Mb/jour. Pour une puissance moyenne de 910 W, l'énergie dépensée par bit transmis est donnée par :

$$E_{BS} = \frac{24 \cdot 3600 \cdot 910}{1065 \cdot 10^6} = 74 \cdot 10^3 \text{ [J/Mb]} \quad (3.29)$$

Cette valeur est considérable comparé aux 80,4 J/Mb estimés pour l'accès fixe au réseau dans la Section 3.5.1.3. Cette consommation élevée est due au fait que, d'une part, la puissance reste presque constante au cours du temps, même quand le trafic est nul. D'autre part, les stations de base sont dimensionnées pour gérer un trafic théorique maximal qui est rarement atteint, notamment car les opérateurs anticipent l'augmentation des abonnés dans les années futures. Cette tendance est d'autant plus marquée que les connexions sans fil à Internet sont en plein développement. Il y a quelques années, le débit sur le réseau mobile n'était pas élevé, il n'était pas nécessaire d'optimiser les stations de base car leur consommation énergétique restait raisonnable.

TABLE 3.13: Mesures de puissances sur des stations de base

Sources	Année	‡ Secteurs	Puissance Min [W]	Puissance Max [W]	Trafic Max [Mb/h]
[14]	2007	6	1742	1811	/
[94] (1)	2008	3	905	916	250
[94] (2)	2008	3	911	924	160
[95]	2012	3	551	582	/

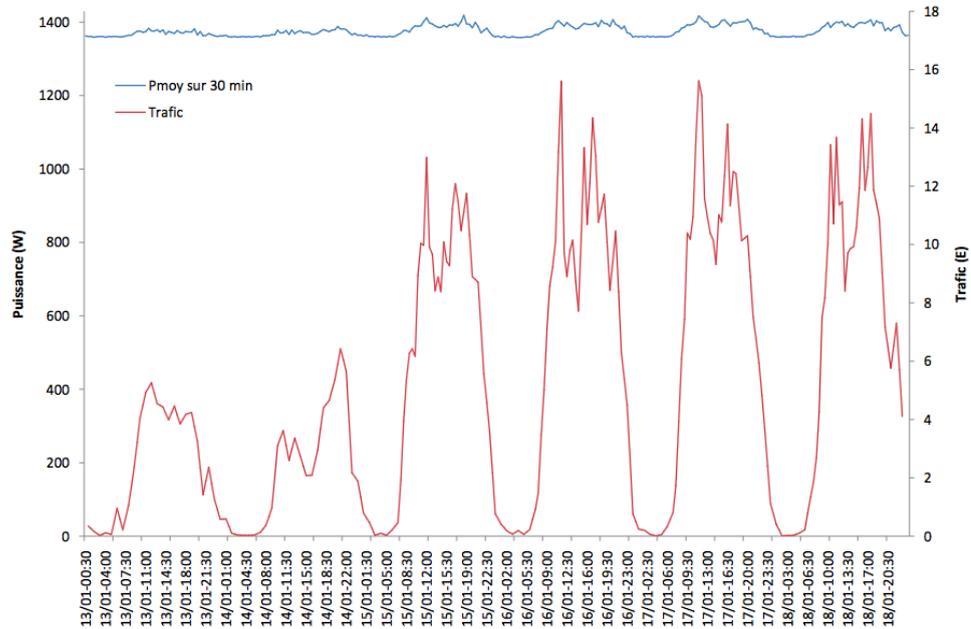


FIGURE 3.21: Variations de puissance et trafic d'une station de base sur 6 jours [14]

Finalement, selon le rapport *EARTH* (Energy Aware Radio and Network Technologies) [96], la consommation moyenne des stations de base *Long-Term Evolution* LTE s'élèverait de 328 à 615 J/Mb. Cette consommation est estimée à partir de modèles du trafic en fonction de l'heure de la journée, de la répartition géographique des stations de base - représentant un mélange approprié des scénarios de densité de la population *urbaine dense*, *urbaine*, *suburbaine* et *rurale*- et d'un modèle des technologies de 2010. Cette consommation serait inférieure de 24% pour un modèle correspondant aux technologies de 2012, c'est-à-dire entre 249 et 467 J/Mb. Le rapport *EARTH* est un projet investiguant l'efficacité énergétique des systèmes de communication mobiles et regroupant des dizaines de scientifiques à travers le monde. Dans la suite de ce rapport nous nous baserons donc sur ces résultats pour quantifier l'efficacité d'une station de base, plus précisément, nous utiliserons la moyenne de ces deux valeurs :

$$E_{BS} = 358 \text{ [J/Mb]} \quad (3.30)$$

Il est à noter que entre les $74 \cdot 10^3$ J/Mb mesurés par [94] en 2008 et les 358 J/Mb modélisés en 2012, la consommation moyenne par bit a diminué de 70% par an. Cette diminution s'explique principalement par la hausse du débit partiellement découplée de l'augmentation de la consommation énergétique des stations de base. Cependant, selon *EARTH*, la diminution des J/Mb des stations de base LTE n'aurait diminué que de 24% entre 2010 et 2012. Ces deux nombres mettent en évidence le fait qu'il est très difficile d'estimer l'évolution des J/Mb des accès mobiles car leur développement pour des hauts débits est récent. Dans la suite de cette section, une station de base sera modélisée ainsi que la puissance minimale du signal transmis dans le but d'analyser les améliorations potentielles de l'efficacité

énergétique et tenter de faire ressortir les limites auxquelles l'accès mobile risque d'être confronté.

3.5.3.2 Consommation énergétique lors de la phase de production et de fin de vie

Dans l'étude [97], une analyse du cycle de vie du réseau 3G a été réalisée. Les résultats sont présentés dans le tableau 3.14. Les évolutions de l'UMTS de 2004 et 2006 ont un impact moindre que l'UMTS standard. Ceci est principalement dû au fait que le taux de données maximum est plus important pour ces versions notamment grâce au *time division duplex* (TDD) et au protocole *High Speed Downlink Packet Access* (HSDPA) basé sur la technologie *Wideband-Code Division Multiple Access* WCDMA et adaptant le codage et la modulation en fonction des conditions radio. La consommation énergétique totale est principalement due aux stations de base (89%). La consommation énergétique de la phase de production représente entre 25 et 30 % de la phase d'utilisation. La phase de recyclage quand à elle permet d'économiser 5 % de l'énergie totale dépensée.

TABLE 3.14: Résultats de l'étude [97]

Technologie	Taux descendant [Mb/s]	Production [J/b]	Utilisation [J/b]	Fin de vie [J/b]
UMTS R'99	0,384	0,60	2,40	-0,15
UMTS R'04	1,920	0,12	0,30	-0,02
UMTS R'06	<14,400	0.05	0,15	-0.01

L'étude [98] analyse l'empreinte carbone du réseau UMTS et arrive à des résultats similaires : la phase de production représente 34 % du total de l'empreinte carbone, la phase d'utilisation 67 % et la phase de recyclage -1 %.

Finalement , l'étude [99] estime la consommation énergétique de la phase de production d'une station de base à l'aide d'une estimation du poids de chaque composant et de données de la littérature. L'énergie dépensée lors de la phase de production s'élève à 75 GJ plus 10 GJ pour la maintenance. Comme pour la plupart des éléments du réseau Internet, la production des semiconducteurs et des circuits intégrés est le secteur le plus énergivore (Figure 3.22).

Pour une station de base de 1kW fonctionnant en permanence pendant une durée de vie de 10 ans, et pour un PEF de 2,6, l'énergie primaire en phase d'utilisation équivaut à 820GJ. Par conséquent, sous ces hypothèses, la phase de production représente 10% de la consommation énergétique sur l'ensemble du cycle de vie.

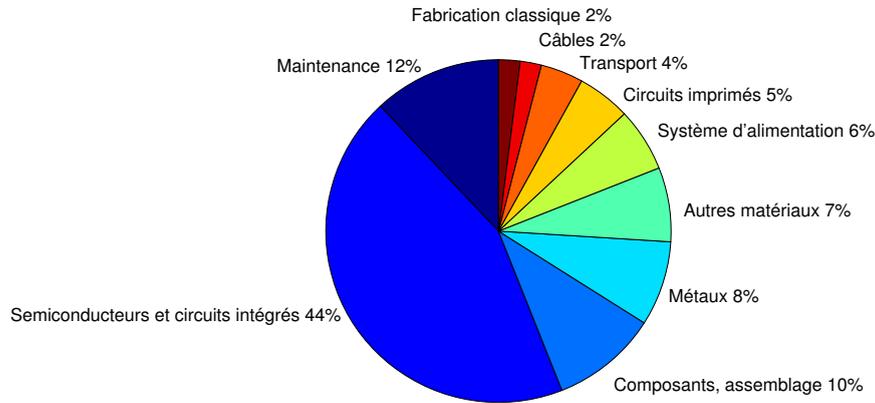


FIGURE 3.22: Répartition en fonction des composants de l'énergie dépensée lors de la phase de production d'une station de base

3.5.3.3 Modèle de la puissance du signal transmis

Le modèle de la puissance minimale pour transmettre des données à un certain débit est équivalent à celui des signaux Wi-Fi donné à l'équation (3.27) :

$$P_t = PL(d)kTW(2^{\frac{C}{W}} - 1) \text{ [W]} \tag{3.31}$$

L'affaiblissement de propagation en extérieur peut être modélisé par l'équation :

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + s \tag{3.32}$$

qui correspond à l'équation (3.32) avec un paramètre supplémentaire s . Celui-ci correspond à l'effet néfaste sur le signal provoqué par les grands obstacles (immeubles) entre l'émetteur et le récepteur (*Shadow fading*). L'affaiblissement de propagation dépend de nombreux paramètres : hauteur des antennes, hauteur et densité des bâtiments, densité des arbres, etc. Il varie également fort en fonction de l'emplacement de l'antenne réceptrice. Les paramètres de l'équation (3.32) déterminés empiriquement pour différents milieux sont donnés dans le tableau 3.15. L'affaiblissement correspondant en fonction de la distance est représenté à la Figure 3.23. Il convient de remarquer que même pour un environnement similaire (suburbain), les valeurs d'affaiblissement peuvent prendre des valeurs significativement différentes.

3.5.3.4 Modèle d'une station de base

Le modèle d'une station de base est représenté à la Figure 3.24. Celle-ci est constituée d'un amplificateur de puissance (PA), d'un émetteur-récepteur (*transceiver*) notamment pour la conversion du signal numérique en digital et d'un processeur

TABLE 3.15: Affaiblissement de propagation en extérieur

Environnement	Source	$PL(d_0)$	n	s
Suburbain / Vallonné / Grande densité d'arbres	[100]	78,1	5,5	10,6
Suburbain / Plat / Faible densité d'arbres	[100]	78,1	4,9	8,2
Suburbain US	[101]	53,9	3,84	0
Urbain (Newark)	[101]	55,2	4,3	0
Urbain (Tokyo)	[101]	77,8	3,1	0

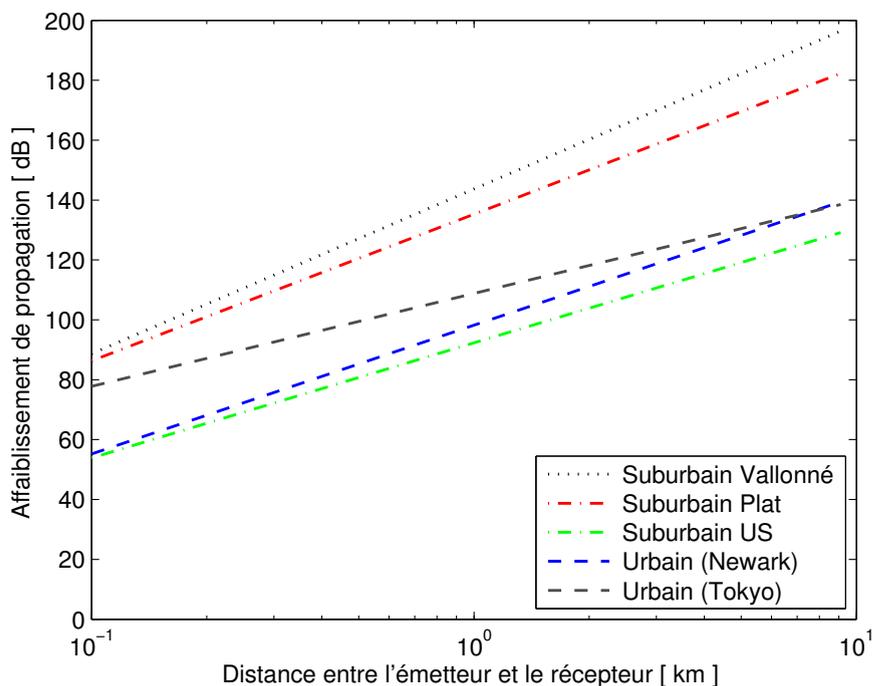


FIGURE 3.23: Affaiblissement de propagation pour différents environnements d'extérieur

en bande de base (traitement du signal). En plus de ces composants électroniques, il faut tenir compte des pertes liées à l'alimentation électrique et la puissance dépensée pour refroidir la station. La répartition de puissance typique entre ces différents composants en pleine charge est donnée à la Figure 3.25 [102].

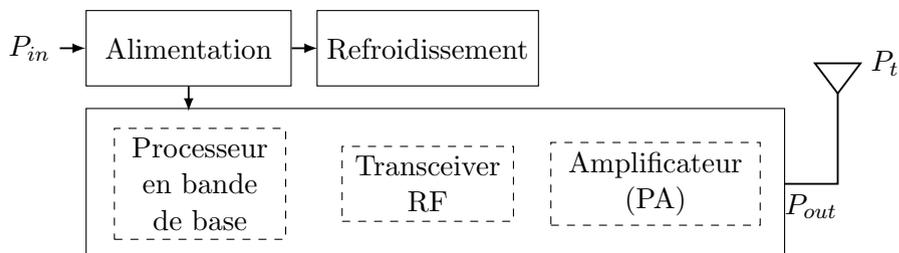


FIGURE 3.24: Diagramme simplifié d'une station de base

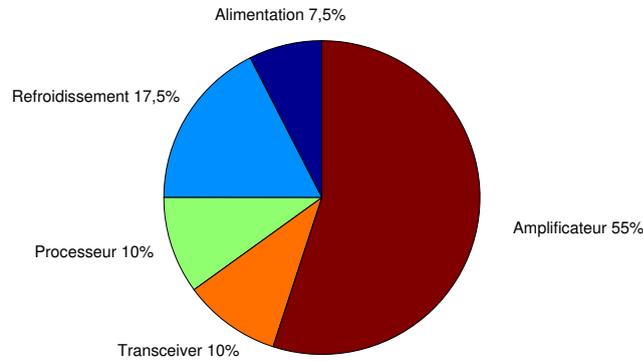


FIGURE 3.25: Répartition typique de la puissance dans une station de base (2011)

La puissance d'entrée de la station de base est donnée par l'équation :

$$P_{BS} = \frac{1}{\eta_{alim}} \cdot (P_{cool} + P_{proc} + P_{transc} + P_{ampli}) \quad (3.33)$$

où η_{alim} est le rendement du système d'alimentation. Celui-ci peut varier de 90% pour une installation classique à 97% pour les plus efficaces. P_{cool} , P_{proc} , P_{transc} et P_{ampli} correspondent à la puissance du système de refroidissement, du processeur, du transceiver et de l'amplificateur. La puissance dissipée dans le système d'alimentation est donnée par l'équation :

$$P_{alim} = \frac{1 - \eta_{alim}}{\eta_{alim}} \cdot (P_{cool} + P_{proc} + P_{transc} + P_{ampli}) \quad (3.34)$$

La puissance pour refroidir la station de base est proportionnelle à la puissance consommée par le reste de l'installation sous forme de chaleur, c'est-à-dire la puissance injectée dans les composants électroniques moins la puissance du signal à la sortie de l'amplificateur. La puissance de refroidissement est donc donnée par :

$$P_{cool} = \Phi_{cool} \cdot (P_{proc} + P_{transc} + P_{ampli} - P_{out}) \quad (3.35)$$

où Φ_{cool} est le facteur de refroidissement. Comme pour les centres de données, ce facteur est une fonction de la charge dans le cas où le système de refroidissement n'est pas tout à fait proportionnel. Φ_{cool} peut varier de 30 % pour des conditionneurs d'air à quelques pourcents pour des systèmes de *free cooling*. P_{out} est la puissance du signal à la sortie de l'amplificateur et est proportionnelle à la puissance du signal à transmettre :

$$P_{out} = \frac{P_t}{\eta_{cable}} \quad (3.36)$$

où η_{cable} représente les pertes dans le câble entre l'amplificateur et l'antenne. Cette distance peut atteindre plusieurs dizaines de mètres et les pertes peuvent être conséquentes vu que la puissance du signal à transmettre est importante. η_{cable} varie entre 50 % pour un câble coaxial à presque 100 % lorsque la technologie *remote radio heads* est utilisée. Il s'agit d'une boîte contenant les dispositifs radio (notamment l'amplificateur) placée proche de l'antenne et reliée au DSP à l'aide d'un câble en fibre optique [103].

La puissance de l'amplificateur est définie par son rendement η_{ampli} qui correspond à la puissance du signal à la sortie divisée par la puissance fournie à l'amplificateur. Dés lors, la puissance de l'amplificateur est donnée par :

$$P_{ampli} = \frac{P_{out}}{\eta_{ampli}} \quad (3.37)$$

Le rendement de l'amplificateur est de l'ordre de 10% [104].

Finalement, en injectant les équations (3.35) à (3.37) dans (3.33), la puissance à l'entrée de la station de base est modélisée par l'équation :

$$P_{BS} = \frac{1}{\eta_{alim}} \cdot [(1 + \Phi_{cool}) \cdot (P_{proc} + P_{transc} + \frac{1}{\eta_{cable}} (\frac{1}{\eta_{ampli}} - 1) P_t) + \frac{P_t}{\eta_{cable}}] \quad (3.38)$$

3.5.3.5 Améliorations potentielles de l'efficacité énergétique

Proportionnalité

Comme cela a été montré à la Section 3.5.3.1, la puissance des stations de base actuelles varie peu en fonction du trafic. Il existe cependant plusieurs technologies pour améliorer leur proportionnalité :

1. utiliser un système de refroidissement proportionnel à la chaleur à évacuer (voir discussion sur les systèmes de refroidissement des centres de données à la Section 3.3.5)
2. utiliser des amplificateurs dont la puissance d'entrée est proportionnelle à la puissance du signal à transmettre. Ceci est réalisable à l'aide d'amplificateurs qui adaptent leur niveau de saturation en fonction de la puissance d'alimentation ou grâce à la désactivation d'étages d'amplification lorsque ceux-ci ne sont pas utilisés [103]. La combinaison de ces deux techniques permet d'obtenir la courbe de charge présentée à la Figure 3.26 [96].
3. choisir des processeurs dont la puissance varie avec la charge. Comme montré dans la Section 3.3, la proportionnalité des processeurs a considérablement évolué ces dernières années. Bien que les processeurs étudiés dans la Section 3.3 ne soient pas spécifiquement optimisés pour les stations de base - mais pour les serveurs d'un centre de données - , nous faisons l'hypothèse que les mêmes performances sont réalisables pour ce type d'application. Il faut

également tenir compte du fait que des calculs sont réalisés même quand aucun bit utile n'est transféré, notamment pour la localisation des utilisateurs. Dans notre modèle, nous considérerons donc que 20 % du processeur fonctionne en continu.

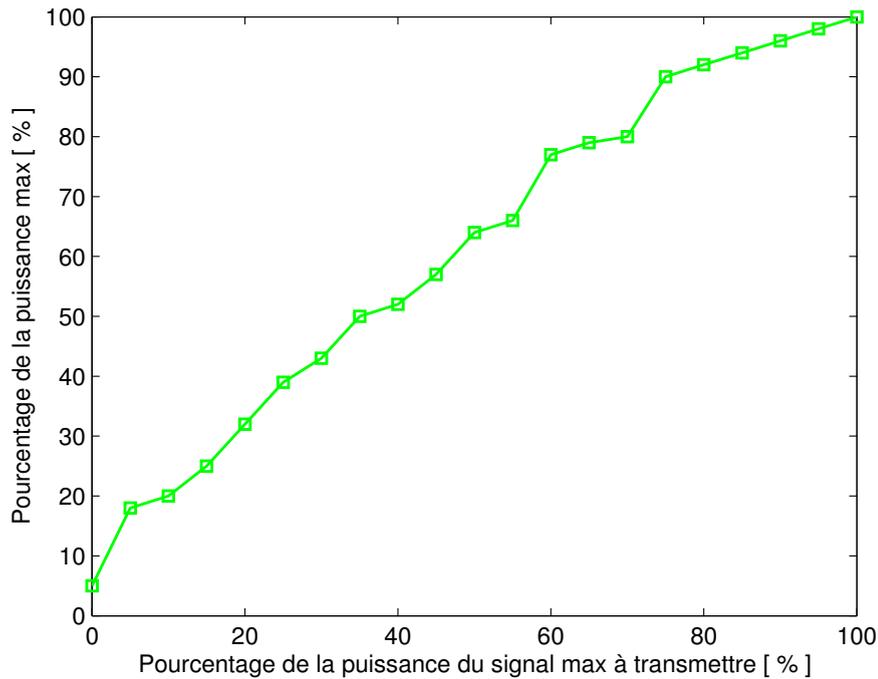


FIGURE 3.26: Proportionnalité d'un amplificateur grâce à la désactivation d'étages d'amplification et l'ajustement du point d'opération

En considérant la répartition de puissance en pleine charge représentée à la Figure 3.25, en négligeant les pertes dans les câbles et en intégrant les 3 améliorations présentées ci-dessus dans l'équation (3.38), nous obtenons la courbe *Propo - Etat de l'art* de la Figure 3.27. Les trois autres courbes correspondent à la limite théorique de proportionnalité et aux valeurs expérimentales de 2008 et 2012 présentées dans la Section 3.5.3.1. Comme représenté à la Figure 3.27, améliorer la proportionnalité permettrait d'économiser plus de 70 % d'énergie lorsque le trafic est nul et 30 % lorsqu'il est à 50% de son débit maximum.

Efficienc e énergétique

Pour augmenter l'efficienc e énergétique, c'est-à-dire diminuer le nombre de watts par Mbps, il est possible d'agir soit sur l'efficienc e des éléments de la station de base, soit modifier les caractéristiques du signal transmis (couches physiques et de liaison).

L'efficienc e des amplificateurs de signaux est de l'ordre de 10% et peut être améliorée à l'aide d'amplificateurs en gallium par exemple : un prototype atteignant un rendement global de 28 % a été réalisé dans [105]. Pour ce qui est des systèmes

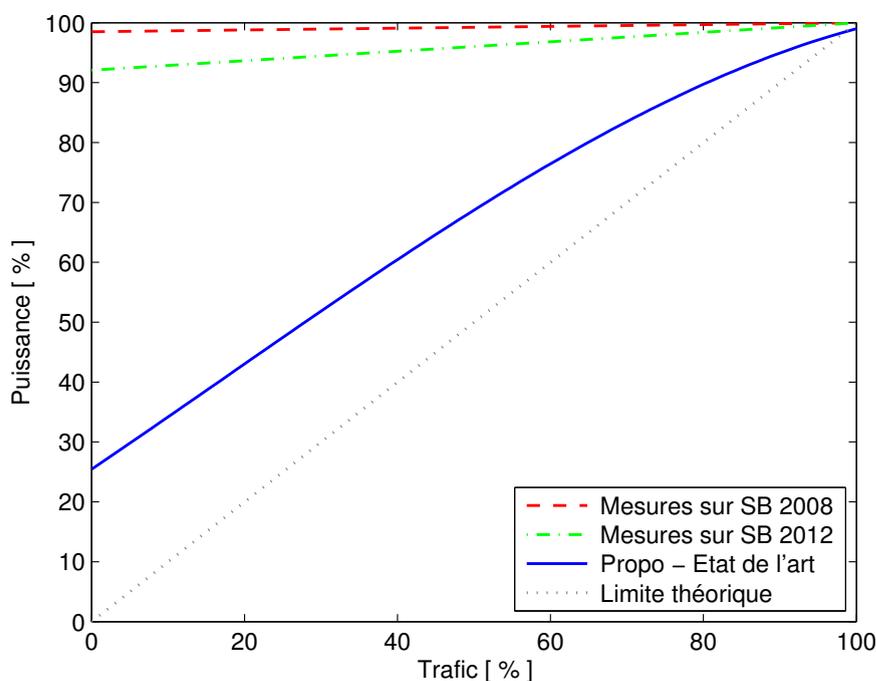


FIGURE 3.27: Proportionnalité d'une station de base : puissance en fonction du trafic

de refroidissement, d'alimentation électriques et des processeurs, la discussion est similaire que pour les centres de données (Section 3.3.5).

Au niveau du signal transmis, plusieurs méthodes existent pour augmenter l'efficacité. Afin de discuter ces méthodes, nous utilisons l'équation (3.31) pour un certain débit des données DR (data rate) :

$$P_t = PL(d)kTW(2^{\frac{DR}{W}} - 1) \text{ [W/Mbps]} \quad (3.39)$$

L'efficacité énergétique du signal transmis est donc donnée par :

$$\frac{P_t}{DR} = PL(d)kT \frac{W}{DR} (2^{\frac{DR}{W}} - 1) \text{ [W]} \quad (3.40)$$

Celle-ci dépend du débit de données par unité de bande passante $\frac{DR}{W}$ et de l'atténuation de propagation $PL(d)$. La courbe donnant l'efficacité énergétique en fonction de l'efficacité spectrale est donnée à la Figure 3.28. Dans cet exemple, l'affaiblissement de propagation correspond à une distance de 1 km entre l'émetteur et le récepteur dans un environnement suburbain plat (tableau 3.15) et $T = 300K$.

Dans la Figure 3.28, nous observons que, dans le cas où la transmission est proche de la limite de Shannon, la consommation énergétique par Mbps augmente exponentiellement avec l'efficacité spectrale. Une des solutions pour éviter d'augmenter

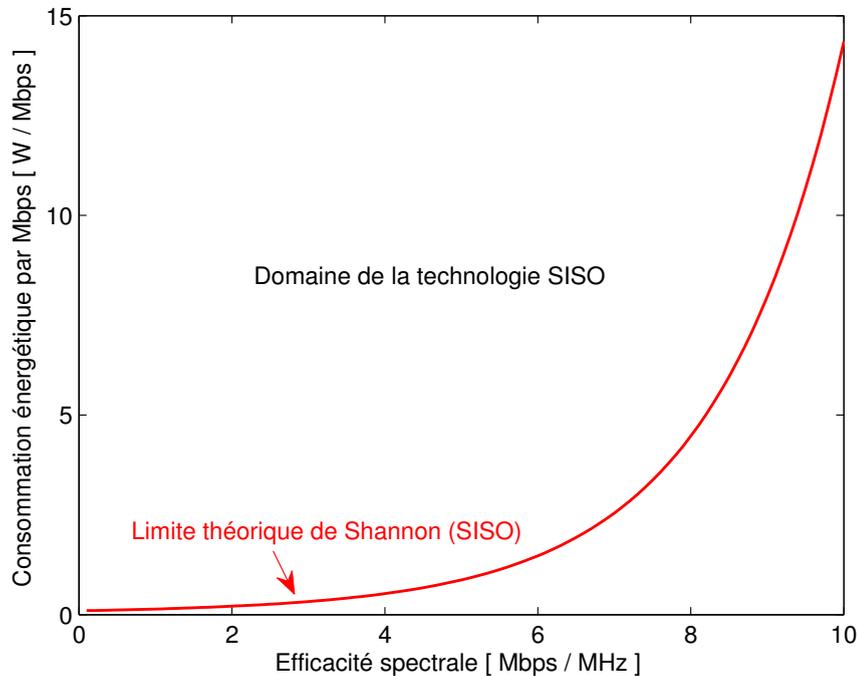


FIGURE 3.28: Efficacité énergétique en fonction de l'efficacité spectrale : limite théorique de Shannon

la puissance du signal serait d'augmenter la largeur de fréquences. Malheureusement, en pratique, augmenter la largeur de fréquence implique de nombreuses difficultés : étalement des retards et sélectivité en fréquence du canal, bruit de phase, non-linéarité des amplificateurs de puissance et des autres circuits en large bande de fréquence. De plus, le nombre de bandes de fréquence alloué à chaque système est standardisé et régulé, les systèmes ne peuvent donc pas en utiliser plus. Une des solutions pour augmenter la largeur des bandes allouées à chaque système serait d'exploiter les fréquences plus élevées que celles utilisées actuellement (inférieures à 5GHz). Cependant, comme mentionné à l'équation 3.26, augmenter la fréquence accentue l'effet de l'affaiblissement de propagation.

D'autres techniques consistent à augmenter l'efficacité spectrale sans augmenter la puissance, notamment en utilisant d'autres schémas de modulation et de codage. Ceci est faisable tant que la puissance minimale correspondant à la capacité de Shannon n'a pas été atteinte (domaine de la technologie *Single Input Single Output* (SISO) de la Figure 3.28). Ensuite, cette limite peut être dépassée à l'aide de la technologie MIMO qui consiste à utiliser plusieurs antennes à l'émetteur et au récepteur. L'étude [106] analyse les gains potentiels de la technologie MIMO par rapport à l'utilisation d'antennes simples (SISO). Les résultats montrent que, en considérant l'énergie dépensée dans l'ensemble de la station, l'efficacité énergétique pourrait être doublée à l'aide de la technologie MIMO.

Changements structurels

Comme expliqué précédemment, l'affaiblissement de propagation augmente avec la distance entre l'émetteur et le récepteur. Une des solutions pour consommer moins au réseau d'accès mobile, serait donc d'utiliser un plus grand nombre de stations avec une portée moins grande. Une alternative serait d'utiliser des stations de base à plusieurs niveaux : une avec une grande portée mais un faible débit et d'autres à plus courte portée et à plus grand débit. Lorsqu'un débit élevé ne serait pas nécessaire, les micro-stations pourraient être mises en veille. [107].

Cependant, utiliser plus de stations nécessite également plus d'énergie lors de la phase de production. Il doit donc exister une distance optimum entre chaque station qui minimise l'énergie totale consommée en phase d'utilisation et de production. L'étude [99] a réalisé cette estimation et, selon son modèle, la distance optimale entre deux stations s'élève à 1,2 km. Cependant, cette étude compare l'énergie primaire de la phase de production avec l'énergie électrique de la phase d'utilisation. En tenant compte du PEF, la phase de production ne vaut plus que 18% de l'énergie consommée sur l'ensemble cycle de vie contre 36% calculés dans l'étude. La distance optimale est donc inférieure à 1,2 km.

3.6 Terminaux

Dans cette section, la consommation typique des terminaux ainsi que l'énergie consommée lors des phases de production et de fin de vie seront présentées. Les améliorations potentielles de l'efficacité ne seront pas étudiées. Les chiffres qui vont suivre sont principalement donnés à titre comparatif et n'ont pas fait l'objet d'une étude approfondie. Pour caractériser la consommation des terminaux, il serait plus pertinent d'analyser leur consommation en fonction de la tâche réalisée (vidéo, audio, etc.) et du moyen d'accès (Wi-Fi, 3G, etc.). Des mesures de consommation pour certaines tâches réalisées sur un smartphone ont été prises dans [108] et la consommation en fonction du moyen d'accès a été étudiée dans [109]. Ces deux études pourraient être un bon point de départ pour des travaux ultérieurs.

La puissance typique d'un smartphone est de 3W, un ordinateur portable 15W et un ordinateur fixe (et moniteur) 70W [110]. Plusieurs ACV de ce genre d'appareils ont déjà été réalisées, en voici 4 récentes :

- Selon [111], l'empreinte carbone d'un *iPhone 4* s'élève à 46 kg CO_2e . Sous l'hypothèse d'une durée de vie de 3 ans, la phase d'utilisation ne représente que 33% des émissions de CO_2e de l'ensemble du cycle de vie de l'appareil. La phase de production équivaut à 56%, le transport 10%, et le recyclage 1%.
- Selon [112], les émissions de CO_2e d'un *15-inch MacBook Pro* sur l'ensemble de son cycle de vie s'élèvent à 460 kg CO_2e dont 63 % sont dus à la production,

28% à l'utilisation, 8% au transport et moins de 1% au recyclage.

- L'étude [113] réalise une analyse du cycle de vie sur un *Dell Latitude E6400 laptop*. La durée de vie est fixée à 4 ans, la région considérée est l'Europe et 75% de l'appareil est recyclé, le reste est incinéré pour récupérer l'énergie. L'empreinte carbone est approximativement 320 kg CO_2e . La production de la carte mère, de l'écran, du châssis et de la batterie représentent plus de 95% de la phase de production. Le recyclage permet d'économiser 30 kg CO_2e . La phase de production et d'utilisation sont du même ordre de grandeur.
- Finalement, selon [114], l'empreinte carbone d'un *27-inch iMac* est de 1010 kg CO_2e . La phase d'utilisation s'élève à 50% de l'empreinte totale. La phase de production équivaut à 45%, le transport 3% et le recyclage 2%.

Les résultats de ces études montrent que les phases d'utilisation et de production d'un terminal sont du même ordre de grandeur. Selon [111] et [112], la phase d'utilisation des appareils mobiles est même plus faible que celle de production et ne représente que 30% de l'empreinte totale du cycle de vie.

Dans le Chapitre 4, les répartitions présentées ci-dessus seront étendues au domaine énergétique pour exprimer la consommation de la phase de production en fonction de celle d'utilisation. Comme expliqué dans la Section 2.4.3, cette conversion n'est pas tout à fait exacte mais elle donne un bon ordre de grandeur.

3.7 Synthèse

Le tableau 3.16 récapitule la consommation énergétique typique de chacune des sections présentées ci-dessus ainsi que leur évolution future espérée. Plus précisément, la colonne 2 donne la consommation énergétique en phase d'utilisation en J/Mb. La colonne 3 donne le taux de croissance annuel moyen (TCAM) espéré de la consommation électrique sur la période 2012-2017. Cette durée correspond au champ de l'étude [11] qui sera utilisée dans le Chapitre 4. Pour certains éléments de l'Internet, le TCAM est très incertain. C'est notamment le cas de l'accès mobile dont le débit de données maximum a considérablement évolué ces dernières années et pour lequel très peu de données de consommation sont disponibles. Par conséquent, le TCAM réel pourrait s'avérer relativement différent des estimations exposées ci-dessous. Il est donc nécessaire de considérer les discussions des améliorations potentielles de l'efficacité des sections précédentes et de rester critique vis-à-vis du TCAM présenté dans ce tableau. La quatrième colonne donne la consommation en phase de production et de fin de vie en pourcentage de l'énergie dépensée en phase d'utilisation. Ce pourcentage dépend des hypothèses d'utilisation et de durée de vie des dispositifs discutées précédemment. Notons que la colonne 2 est exprimée en "Joules électriques" par Mb, il faut donc multiplier cette valeur par le PEF pour obtenir des "Joules primaires" par Mb. Il est également à noter que cette valeur est exprimée en pourcentage de l'énergie consommée en phase d'utilisation et pas

en pourcentage de l'énergie totale, ce qui était le cas dans les sections précédentes. Cette notation permet d'exprimer directement l'énergie en phase de production en fonction de celle en phase d'utilisation. Les deux dernières colonnes donnent la tendance de l'amélioration énergétique à court-terme (5 ans) et à long-terme (10 ans) en fonction des discussions des sections précédentes. Le sigle "+++" signifie que le potentiel d'amélioration de l'efficacité énergétique est grand tandis que "+" indique que le potentiel est plus faible. Cette tendance est qualitative et permet de mettre en évidence certaines limites auxquelles les concepteurs et opérateurs pourraient être confrontés et dans quels domaines les enjeux seront les plus grands. Il n'est pas exclu que le développement d'une nouvelle technologie ou d'un nouveau paradigme permette de surmonter ces difficultés.

TABLE 3.16: Synthèse de la consommation énergétique des sections de l'Internet et de leur évolution

Section	Utilisation [J/Mb]	TCAM	Production et Fin de vie	Améliorations Court terme	Améliorations Long terme
Centres de données	126,1	-12%	11 %	+++	+
Réseau central	4,6	-10%	5 %	+	++
Accès fixe	80,4	-10%	7%	+	+++
Accès Wi-Fi	83,4	-10%	7%	+	++
Accès mobile	358	- 13%	11%	++	+
Smartphone	3	/	233%	/	/
Ordinateur portable	15	/	233%	/	/
Ordinateur fixe	70	/	100%	/	/

Centre de données

La discussion sur l'efficacité d'un centre de données a été réalisée en W/ops car des données de consommation énergétique de serveurs sur plusieurs années étaient disponibles, ce qui permettait de discuter de leur évolution. Cependant cette unité ne nous permet pas d'exprimer la consommation en J/Mb comme pour les autres éléments du réseau. Pour réaliser cette conversion, nous utilisons les données de Google présentées dans le tableau 3.2. Selon [115], le débit de codage d'une vidéo Youtube est en moyenne de 510 kbps, ce qui donne une consommation pour les appareils IT d'un centre de données de 15,76 J/Mb pour la visualisation d'une vidéo de une minute (voir tableau 3.2). Il est à noter que, en streaming, le débit de codage correspond au débit de données minimal pour éviter des interruptions [116]. Ce débit ne tient donc pas compte des frais généraux de protocole et des paquets de données de retransmission. Il est donc plus faible que le débit net de la couche physique. Par conséquent, la valeur citée précédemment est légèrement surestimée. Selon [117], la taille moyenne d'une page Internet en 2012 était de 1MB. En considérant qu'une page Google présente les mêmes caractéristiques, la consommation des appareils IT d'un centre de données s'élève à 120,6 J/Mb pour l'utilisation d'un moteur de recherche.

Pour un PUE de 1,85 - estimation de la moyenne mondiale en 2012 - donné à la Section 3.3.2, cela donne 29,16 J/Mb pour une vidéo en streaming et 223,11 J/Mb pour une recherche sur un moteur de recherche. La moyenne de ces deux valeurs est donnée à titre indicatif dans le tableau 3.16. La consommation par Mb parcourus sur le réseau est plus importante pour l'utilisation d'un moteur de recherche car, d'une part, le trafic sur le réseau est moins important que pour la visualisation d'une vidéo et, d'autre part, car une recherche consomme deux fois plus d'énergie qu'une minute de vidéo au sein du centre de données. Ceci est probablement dû au fait qu'une recherche implique l'utilisation d'un grand nombre de processeurs. Des données plus précises sur l'architecture interne des centres de données permettraient de confirmer cette hypothèse.

A court-terme, le potentiel d'amélioration de l'efficacité des centres de données est grand. En effet, comme discuté dans la Section 3.3.6, le PUE d'un DC typique pourrait descendre à 1,45 en utilisant uniquement des technologies déjà disponibles et sans avoir recours à l'installation du centre de données dans une région froide. De plus, la proportionnalité des serveurs a considérablement augmenté ces dernières années. La virtualisation est également une technique qui permet d'augmenter l'efficacité des centres de données.

A long terme, la proportionnalité des serveurs atteindra son maximum (1) et il ne sera plus possible d'augmenter l'efficacité à l'aide de cette technique. Le PUE est également proche de sa valeur optimale (1) et le potentiel d'amélioration est de plus en plus réduit. De plus, comme discuté dans les sections 3.2 et 3.3, l'augmentation de l'efficacité des serveurs pourrait évoluer avec un taux plus faible les années à venir. Les améliorations de l'efficacité à long terme sont donc incertaines.

Dans la Section 3.3.5, nous avons vu que la consommation des serveurs en W/ops diminuait de 29% par an. La proportion de l'énergie dépensée dans le IT est due à 85% aux serveurs. Dès lors, en première approximation, le TCAM de la consommation des centres de données pourrait être approximé par -29% - et ce, en considérant que le PUE n'évolue pas et que l'efficacité du réseau et du système de stockage augmente aussi avec le temps. Cependant ce TCAM correspond à la consommation en watts par ops sur les serveurs et pas en joules par Mb sur le réseau (ou W/Mbps). Il n'est pas certain que la puissance de calcul des serveurs évolue proportionnellement avec le trafic sur le réseau. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, les J/Mb dans les centres de données dépendent fort de la tâche réalisée. Il est donc probable que, pour un même débit sur le réseau, le nombre de calculs réalisés dans le centre de données varie au cours du temps. Pour connaître le TCAM de la consommation en J/Mb, il faudrait connaître comment le rapport $ops(serveurs)/Mbps(rseau)$ évoluera au cours du temps pour différentes requêtes. En connaissant cette donnée, en utilisant le PUE et en faisant l'hypothèse que l'énergie dépensée dans le IT l'est complètement dans les serveurs, le TCAM des centres de données en J/Mb pourrait être déterminé comme ceci :

$$\frac{J}{Mb} = PUE \cdot \frac{W}{ops} \cdot \frac{ops(Serveurs)}{Mbps(Réseau)} \quad (3.41)$$

Cependant, l'évolution des $ops(serveurs)/Mbps(rseau)$ est difficile à estimer et dépend de nombreux paramètres, notamment de l'évolution en fonction du temps des applications et des tâches réalisées sur l'Internet. Une alternative pour estimer le TCAM des centres de données en J/Mb est d'utiliser l'évolution globale des ops et du trafic sur le réseau. Les ops globaux sont obtenus en multipliant le nombre de serveurs dans le monde par la quantité d'ops par serveur. Selon [4], le nombre de serveurs va augmenter avec un TCAM de 17% de 2011 à 2020. Le trafic global est donné par l'étude [11] qui sera utilisée dans le Chapitre 4. L'équation (3.41) devient alors :

$$\frac{J}{Mb} = PUE \cdot \frac{W}{ops} \cdot \frac{ops}{Serveur} \cdot \frac{Nbr\ global\ de\ serveurs}{Trafic\ global} \quad (3.42)$$

En effectuant une régression linéaire du premier ordre sur la puissance en fonction de l'année des serveurs testés par le *benchmark SPECpower_ssj2008*, il ressort que la puissance des serveurs n'évolue pas au cours de temps. C'est-à-dire que les améliorations de l'efficacité se font uniquement grâce à l'augmentation du nombre de ops par serveur. Le TCAM du réseau Internet est de 24% [11]. Pour tenir compte de l'évolution du PUE moyen, nous considérons que celui-ci évoluera de 1,85 en 2012 à 1,45 - état de l'art des améliorations de la Section 3.3.6 - en 2017. Ce qui correspond à un TCAM de -5%. Le TCAM global est donné en multipliant celui de chaque composant de l'équation (3.42), ce qui donne :

$$TCAM = -5 - 29 + 29 + 17 - 24 = -12\% \quad (3.43)$$

Réseau central

Le consommation du réseau central du tableau 3.16 correspond au scénario 1 de la Section 3.4.3. A court terme, l'efficacité va être limitée par l'énergie dissipée lors de la conversion du signal optique en électronique et inversement. L'effet de cette limitation sera toutefois atténué grâce à l'utilisation de *bypass* optiques. Actuellement, la puissance des nœuds du réseau ne varie pas avec la charge et les études se penchant sur la question sont moins nombreuses que celles dédiées à la proportionnalité des centres de données. A long terme, différentes techniques permettraient d'améliorer la proportionnalité et donc de diminuer la consommation énergétique. Le TCAM correspond à la tendance de la consommation des routeurs discutée dans 3.4.4. Nous ne tenons pas compte ici de l'évolution de la puissance dissipée dans les lignes qui représente moins de 10% de la puissance totale.

Accès fixe

Les chiffres de consommation présentés dans le tableau 3.16 ont été discutés dans la Section 3.5.1.3. A court terme, l'efficacité de l'accès fixe va peu évoluer car la

consommation est principalement due aux dépenses des modems et que, actuellement, ceux-ci ne tendent pas à devenir proportionnels. A long terme, l'utilisation de fibre optique dans le réseau d'accès va permettre d'augmenter le débit sans augmenter la puissance consommée. L'utilisation de modems plus proportionnels permettra également de diminuer cette consommation. Nous faisons l'hypothèse que le TCAM sera de -10% dans les années à venir.

Accès Wi-Fi

Les chiffres de consommation ont été calculés dans la Section 3.5.2.2. Une discussion similaire que pour l'accès fixe peut être réalisée pour l'accès Wi-Fi. Cependant, à long terme, avec l'augmentation du débit, la puissance dépensée dans les amplificateurs pourrait devenir relativement importante et limiter les améliorations d'efficacité d'un point d'accès Wi-Fi. Cette tendance dépendra en partie des techniques mises en place pour augmenter l'efficacité spectrale tout en maintenant la puissance du signal transmis à une valeur raisonnable. Le TCAM considéré est le même que pour l'accès fixe.

Accès mobile

Les chiffres de consommation ont été estimés dans la Section 3.5.3.1. A court terme, l'augmentation du débit pour une station de base (non proportionnelle) permet de consommer moins de watts par Mb transmis. Cependant, à plus long terme, la hausse du débit entraîne un accroissement de la puissance du signal transmis et donc de la puissance de l'amplificateur. La diminution de la consommation dépendra donc des techniques et technologies mises en place pour améliorer l'efficacité spectrale tout en augmentant l'efficacité énergétique du signal transmis. Les stations de base vont également tendre à devenir plus proportionnelles et leur nombre va augmenter afin de minimiser les pertes liées à l'affaiblissement de propagation. Dans la Section 3.5.3.1, nous avons vu que la diminution des J/Mb des stations de base LTE a diminué de 24% entre 2010 et 2012. Cela correspond à un TCAM de -13%.

Terminaux

Les chiffres de consommation des terminaux ont été calculés grâce aux puissances typiques présentées dans 3.6 et au débit moyen utilisé dans les scénarios des sections 3.5.1.3 et 3.5.2.2. L'évolution de leur efficacité au cours du temps n'a pas été discutée dans ce travail.

Chapitre 4

Consommation énergétique l'Internet

Dans un premier temps, l'évolution et la répartition du trafic global seront présentées. Ensuite, la consommation énergétique globale de l'Internet ainsi que son évolution jusqu'en 2017 seront estimées et discutées.

4.1 Répartition et évolution du trafic global

Pour estimer la consommation énergétique globale de l'Internet, nous utilisons les prévisions du trafic réalisées par la compagnie Cisco [11]. La méthode employée repose sur une combinaison de projections d'analystes, d'estimations, de prévisions internes et de collectes directes de données. La méthodologie complète est présentée dans [11]. Au même titre que l'estimation du nombre global d'appareils des études "ascendantes" présentées dans la Section 2.2, l'estimation du trafic global implique un grand nombre d'approximations, ce qui augmente le niveau d'incertitude. L'avantage de cette approche est qu'il est possible de différencier le trafic par type, secteur et sous-secteur et prévoir leur évolution au cours du temps. Ces résultats sont présentés dans le tableau 4.1.

Le trafic *Internet Protocol IP* global devrait passer de 43750 petabytes ($\text{PB} = 10^{15}$ bytes) par mois en 2012 à 120643 PB par mois en 2017, soit un taux de croissance annuel moyen (TCAM) de 23%. Sur cette même période, le trafic du réseau mobile devrait exploser avec un TCAM de 66% pour atteindre 11157 PB par mois en 2017, soit 9% du trafic IP global. Le trafic sur le réseau métropolitain devrait croître plus rapidement que le long-courrier (*long-haul*) et représenterait 58% du trafic global en 2017. Le trafic lié à l'utilisation des particuliers est plus important que le trafic dédié au business et devrait s'élever à 82% du réseau IP global en 2017. Le type *Autre IP* correspond au trafic des WAN d'entreprises et du transport IP de la TV et de la vidéo à la demande (VoD). Cette utilisation s'apparente plus à une alternative à la connexion TV traditionnelle qu'à une application spécifique de l'Internet bien que la distinction soit de moins en moins évidente comme discuté

dans la Section 2.4. Dans la suite de ce travail, nous étudierons principalement la consommation énergétique liée à l'utilisation de l'Internet (sans *Autre IP*) des particuliers qui représentera 63% du trafic IP global en 2017.

TABLE 4.1: Evolution du trafic IP global en PB par mois [11]

Catégorie	2012	2013	2014	2015	2016	2017	TCAM
Par type :							
Fixe	31339	39295	47987	57609	68878	81818	21%
Autre IP	11346	14679	18107	21523	24740	27668	20%
Mobile	885	1578	2798	4704	7437	11157	66%
Par secteur :							
Particulier	35047	45023	56070	68418	82683	98919	23%
Business	8522	10530	12822	15417	18372	21724	21%
Metro vs Long-haul :							
Metro	19698	26319	34623	44451	56246	69513	29%
Long-haul	23871	29233	34268	39384	44808	50572	16%
Total :							
Trafic IP global	43570	55553	68892	83835	101055	120643	23%

L'évolution et la répartition en types et en sous-secteurs du trafic Internet des particuliers sont données dans le tableau 4.2. Le TCAM de l'accès mobile est plus ou moins équivalent à celui du trafic IP global. Le sous-secteur le plus important est celui des vidéos, il représentera presque 70% du trafic Internet des particuliers d'ici 2017. La sous-section *Vidéo* inclut les vidéos de courtes durées (par exemple, Youtube), de longues durées (par exemple, Hulu), les vidéos en live, l'achat de vidéos en ligne et les communications via webcam. En deuxième position, vient l'utilisation traditionnelle du web, l'envoi de mails et les autres transferts de données (partage de fichiers exclu) qui s'élèveront à 19% du trafic Internet des particuliers en 2017. Vient ensuite le partage de fichiers incluant aussi bien le *peer-to-peer* (P2P) que les applications telles que Dropbox. Finalement, les jeux en ligne représentent une part négligeable du trafic.

Comme expliqué précédemment, le trafic Internet mobile va exploser dans les prochaines années et va être multiplié par 10 de 2012 à 2017. Comme représenté à la Figure 4.1 [118], plus de 65% de ce trafic sera du aux Smartphones. Leur nombre va croître d'un TCAM de 20% sur la période 2012-2017 alors que le trafic de données associé va croître avec un taux de croissance de 81%.

Comme représenté à la Figure 4.2, la visualisation de vidéos via des dispositifs mobiles va croître dans les années à venir et pourrait représenter plus de 65% du trafic de données mobiles en 2017. 84% du trafic de données mobiles total sera du au Cloud en 2017, comparé aux 74% en 2012 (par exemple : Netflix, Youtube, Pandora, Spotify). Dans les années à venir, la part du trafic de données en provenance du réseau fixe (wifi résidentiel, femtocells et picocells) aura tendance à être plus importante et représentera 46% du trafic des appareils mobiles en 2017

TABLE 4.2: Evolution de trafic Internet des particuliers en PB par mois [11]

Catégorie	2012	2013	2014	2015	2016	2017	TCAM
Par type :							
Fixe	25529	32097	39206	47035	56243	66842	21%
Mobile	684	1239	2223	3774	6026	9131	68%
Par sous-secteur :							
Vidéo	14818	19855	25800	32962	41916	52752	29%
Web, email et données	5173	6336	7781	9542	11828	14494	23%
Partage de fichiers	6201	7119	7816	8266	8478	8667	7%
Jeux en ligne	22	26	32	39	48	59	22%
Total :							
Trafic Internet privé	26213	33337	41429	50809	62269	75973	24%

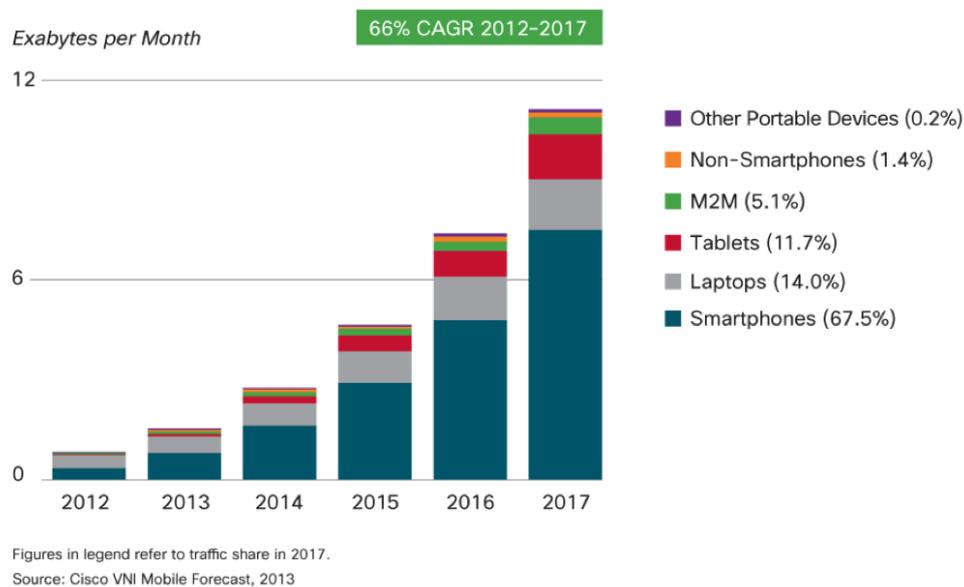


FIGURE 4.1: Evolution du trafic de données de l'accès mobile en fonction du dispositif [11]

contre 33% en 2012. Le reste du trafic est géré par le réseau mobile cellulaire (les figures 4.1 et 4.2 correspondent uniquement au trafic du réseau mobile cellulaire). En 2012, la vitesse moyenne de connexion du réseau mobile était de 526 kbps. Cette valeur devrait atteindre 3,9 Mbps en 2017 et 6,5 Mbps pour les Smartphones. Cette augmentation sera principalement soutenue par le déploiement des technologies tels que le *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WiMAX) et Long-Term Evolution (LTE). En 2012, la consommation de données sur l'ensemble des appareils d'un utilisateur à l'aide du Wi-fi était 4 fois plus importante que celle du réseau mobile (55MB contre 13 par jour et par utilisateur). Pour les Smartphones, cette consommation de données était répartie de la façon suivante : vidéos et communication 45%, information 12%, navigation sur le web 6%, réseaux sociaux 7%, musique et audio streaming 4%. Le nombre de connexions Machine to Machine

(M2M) va augmenter avec l'avènement de l'IoT : leur trafic sera 24 fois plus important en 2017 par rapport à 2012 et représentera plus de 5% du trafic mobile global.

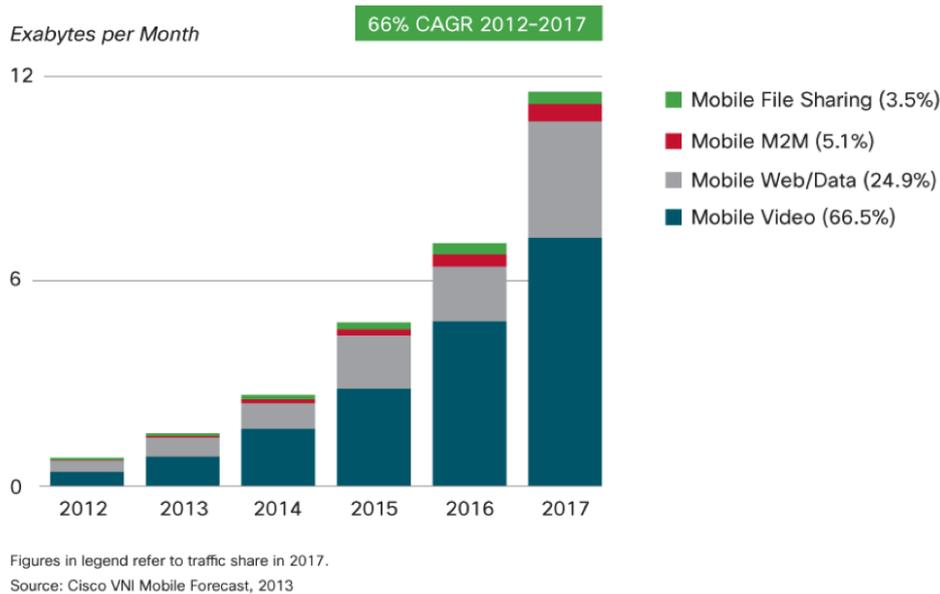


FIGURE 4.2: Evolution du trafic de données des dispositifs mobiles en fonction du service [11]

4.2 Consommation énergétique globale

Pour estimer la consommation énergétique de l'Internet, nous considérerons que le trafic métropolitain correspond au scénario 1 de la Section 3.4.3 et le trafic long-courrier au scénario 2, ce qui correspond aux hypothèses réalisées. Dès lors, la consommation globale du réseau centrale est donnée par :

$$E_{backbone} = DR_{Internet} \cdot (pc_{metro} \cdot E_{backboneSc1} + pc_{LongHaul} \cdot E_{backboneSc3}) \quad (4.1)$$

où $DR_{Internet}$ est le trafic de l'Internet privé (dernière ligne du tableau 4.2), pc_{metro} est le pourcentage de données circulant dans la réseau métropolitain (ligne "Metro" divisée par "Trafic IP Global" du tableau 4.1), $pc_{LongHaul}$ le pourcentage de données circulant dans le réseau long-courrier et $E_{backboneSc1}$ et $E_{backboneSc3}$ sont l'énergie par débit de données du réseau central des scénarios 1 et 3 du tableau 3.8.

Selon une étude de 2005 [119], 52% des ménages américains connectés au réseau Internet utilisait la technologie Wi-Fi. Il est probable que cette tendance se soit renforcée ces dernières années. Dans cette étude, nous considérerons que 80% des ménages sont connectés au réseau fixe via la technologie Wi-Fi. Les autres 20% sont connectés au modem directement via un câble.

Le trafic correspondant à l'Internet mobile du tableau 4.2 est accessible via des stations de base de type *macrocell* (portée de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres). Les accès via *microcells* (moins de 100m) et *femtocells* (moins de 20m) sont compris dans le trafic à accès fixe et nous considérerons dans cette étude que leur consommation énergétique est proche de celle d'un point d'accès Wi-Fi. En effet, comme mesuré dans [120], la consommation d'une *femtocell* est d'approximativement 8 W, ce qui est de même ordre que la consommation d'un point d'accès Wi-Fi (voir Section 3.5.2.2). Dès lors, l'énergie totale dépensée à l'accès du réseau vaut :

$$E_{access} = DR_{fixe} \cdot (0,2 \cdot E_{fixe} + 0,8 \cdot E_{wifi}) + DR_{mobile} \cdot E_{BS}. \quad (4.2)$$

où DR_{fixe} est le trafic fixe (ligne 3 du tableau 4.2) et DR_{mobile} est le trafic mobile (ligne 4 du tableau 4.2). Les valeurs sélectionnées pour E_{fixe} , E_{wifi} et E_{BS} ont été calculées dans les sections correspondantes et sont synthétisées dans le tableau 3.16.

Selon l'étude [121] qui recense les 10 applications les plus importantes en terme de trafic, 24% du trafic fixe européen est du à l'application Youtube contre 2% pour Skype. En Amérique du Nord, Netflix (films en flux continu sur Internet) équivaut à 32% du trafic, Youtube 17% et Hulu 2%. Skype n'intervient pas dans ce classement. Nous en concluons que la majorité du sous-secteur *Vidéo* provient d'applications fournissant des vidéos en provenance de centres de données (Youtube, Netflix, Hulu). Le trafic dû aux vidéoconférences ou aux communications vidéo (Skype) reliant deux utilisateurs sans accès à un centre de données ne représente que quelques pourcents du trafic global des vidéos. Nous utiliserons donc les données de consommation énergétique des appareils IT de Youtube (tableau 3.2) pour décrire la consommation des centres de données du sous-secteur *Vidéo*. L'énergie totale dépensée dans les centres de données vaut :

$$E_{DC} = R_{video} \cdot E_{video} + R_{web} \cdot E_{web} + R_{partage} \cdot E_{partage} \quad (4.3)$$

où R_{video} , R_{web} et $R_{partage}$ correspondent aux débits de données des lignes 6 à 8 du tableau 4.2. Le trafic engendré par les jeux vidéo est négligé dans ce modèle. E_{video} a été calculé dans la Section 3.7 (29,16 J/Mb). Nous ferons l'hypothèse que l'énergie par Mb du service web E_{web} correspond à celle d'une recherche sur un moteur de recherche calculée également à la Section 3.7 (223,11 J/Mb) tandis que $E_{partage}$ vaut la moyenne des deux valeurs précédentes. Ces deux hypothèses sont fortes et devront être affinées dans des études ultérieures lorsque la relation entre tâche réalisée et consommation énergétique au sein d'un centre de données aura été étudiée plus en détail.

Nous faisons également l'hypothèse que les accès fixes se font via un ordinateur fixe, les accès Wi-Fi via un ordinateur portable et les accès mobiles via un smartphone :

$$E_{terminal} = R_{fixe} \cdot (0,2 \cdot E_{computer} + 0,8 \cdot E_{laptop}) + R_{mobile} \cdot E_{smartphone} \quad (4.4)$$

où $E_{computer}$, E_{laptop} et $E_{smartphone}$ correspondent à la consommation typique par Mb d'un ordinateur fixe, d'un ordinateur portable et d'un smartphone. Ces valeurs ont été calculées dans la Section 3.7 et sont données dans le tableau 3.16.

Conformément à l'équation 3.1, la consommation globale de l'Internet est donnée par la formule :

$$E_{Internet} = E_{DC} + E_{backbone} + E_{access} + E_{terminal} \quad (4.5)$$

En tenant compte de la phase de production et de fin de vie (voir tableau 3.16) et en multipliant l'énergie électrique en phase d'utilisation par le PEF, nous obtenons les résultats présentés à la Figure 4.3. Selon notre modèle, l'énergie primaire dépensée sur l'ensemble du cycle de vie de l'Internet privé en 2012 s'élève à 1757 PJ. Les éléments les plus énergivores sont les centres de données (37%) et l'accès fixe et Wi-Fi (32%). Les phases de production et de fin de vie représentent 22% de l'impact énergétique global. Il est à noter que la consommation énergétique en phase de fin de vie est très faible par rapport à la phase de production, comme cela a souvent été illustré dans les sections suivantes. Cette proportion est équivalente à ce qui a été estimé dans [3]. Nos résultats confirment donc l'hypothèse énoncée dans la Section 2.2 selon laquelle l'étude [17] n'aurait pas converti l'énergie électrique en primaire pour la comparer avec celle dépensée lors de la phase de production. L'énergie dépensée lors de la phase de production vient majoritairement de la fabrication des terminaux, dont la consommation énergétique de la phase de production et d'utilisation est du même ordre de grandeur.

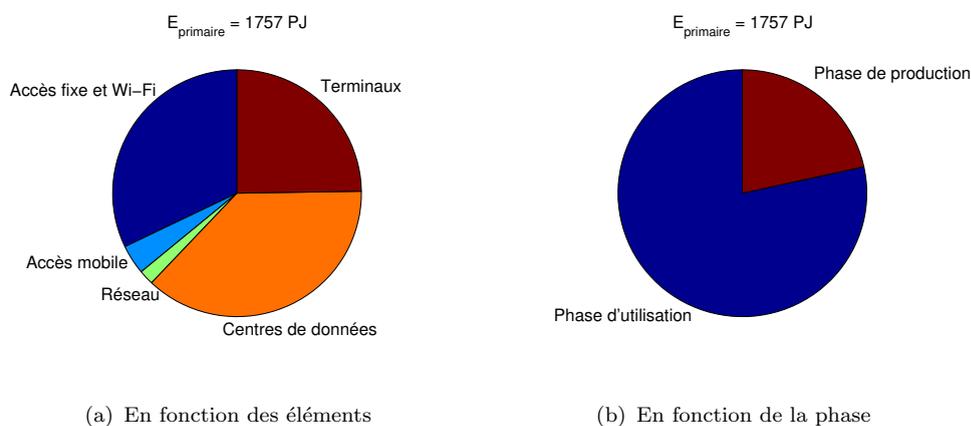


FIGURE 4.3: Consommation d'énergie primaire sur l'ensemble du cycle de vie de l'Internet privé en 2012 (terminaux compris)

A présent, nous allons discuter de l'évolution de la consommation énergétique au cours du temps. N'ayant pas d'informations sur l'évolution de l'efficacité des terminaux et sur l'évolution de la consommation en phase de production dans le

temps, nous ne considérerons que la phase d'utilisation sans les terminaux dans cette discussion. Cette consommation sera exprimée en énergie électrique.

En utilisant les TCAM des tableau 3.16 et 4.2, nous obtenons l'évolution de la consommation de 2012 à 2017 illustrée à la Figure 4.4. La répartition en fonction des éléments est donnée à la Figure 4.5 pour 2012 et 2017. Nous observons sur ces graphiques que la consommation énergétique de l'accès mobile va devenir de plus en plus prépondérante au court du temps : alors qu'il ne représente que 4% des dépenses de l'Internet (terminaux exclus) en 2012, il équivaudra en 2017 à 16% de la consommation globale. Cette tendance est principalement due à l'explosion du trafic mobile discutée dans la Section 4.1. Remarquons également que la consommation du réseau central est très faible par rapport aux autres éléments. Cette tendance va probablement perdurer dans les années à venir. L'énergie électrique consommée en phase d'utilisation par l'Internet (terminaux exclus) en 2012 a été estimée à 530 PJ. Ce qui équivaut à 2,5% de la consommation électrique mondiale. En 2017, ce chiffre atteindra 958 PJ, ce qui représentera 3,6% de la consommation électrique mondiale - les chiffres de consommation électrique dans le monde proviennent de [7].

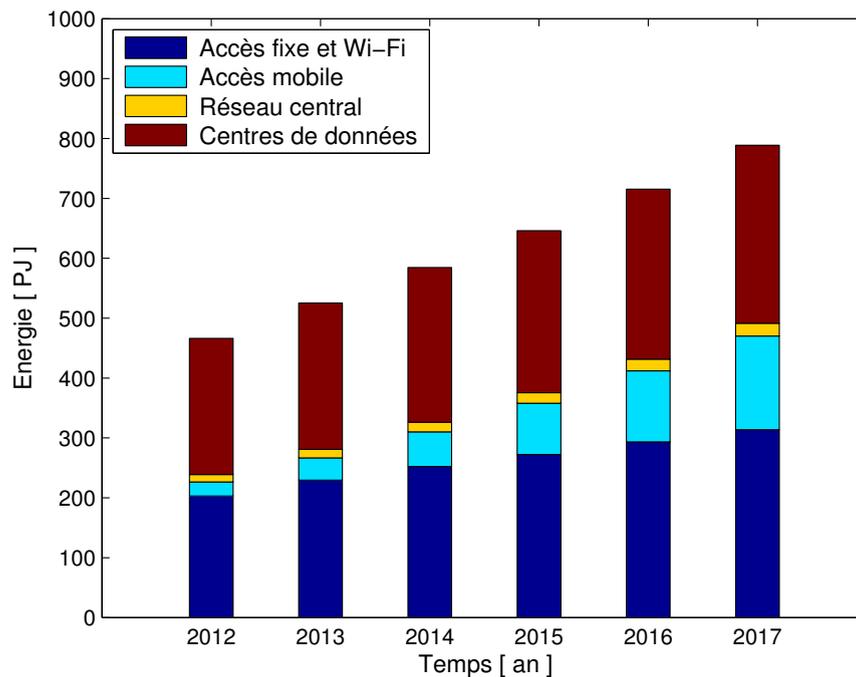


FIGURE 4.4: Evolution de la consommation électrique en phase d'utilisation de l'Internet privé en fonction des éléments du réseau (terminaux exclus)

En exprimant la consommation électrique en puissance moyenne équivalente sur un an, nous obtenons 17 GW. Ce nombre est plus faible que ce qui a été estimé selon l'étude "descendante" [17] : 42,5 GW. Cette différence s'explique notamment par le fait que nous avons surestimé l'efficacité des dispositifs installés sur le réseau. En effet, nous avons utilisé des données de consommation de dispositifs datant de 2011-2013 alors que la majorité des éléments installés sur le réseau date de

plusieurs années. Notre estimation de l'énergie électrique consommée sur le réseau est donc probablement sous-estimée.

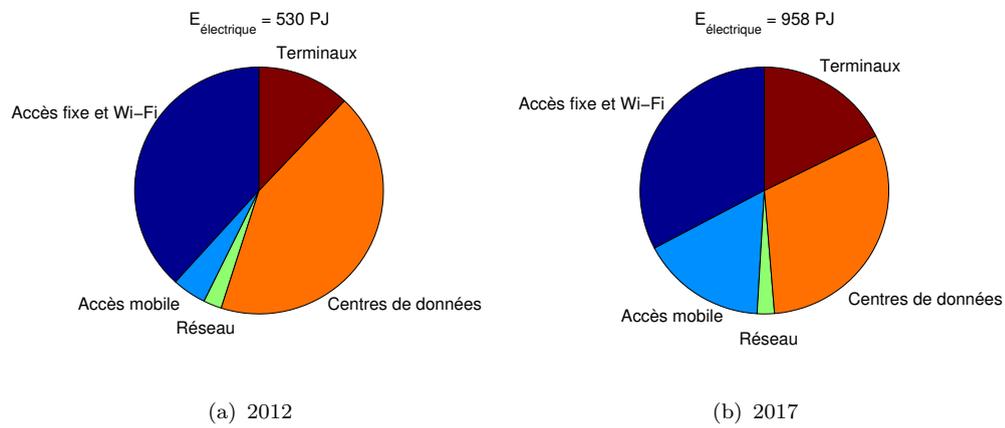


FIGURE 4.5: Répartition des dépenses d'énergie électrique en phase d'utilisation de l'Internet privé (terminaux exclus)

Chapitre 5

Conclusion

Dans cette étude, nous avons estimé la consommation énergétique de l'Internet selon une approche "ascendante". Cette méthode nous a permis de prédire l'évolution de la consommation en fonction des informations sur la tendance du trafic IP dans les prochaines années. Cela a notamment permis de mettre en évidence la croissance rapide de la consommation énergétique du réseau d'accès mobile.

Nous avons également pu comparer nos résultats avec ceux d'une étude "descendante". Notre estimation est deux fois plus faible que celle de cette étude. Cette différence s'explique en partie par le fait que nous avons utilisé des données de consommation de dispositifs récents qui ne sont pas spécialement représentatifs des appareils installés.

Nous avons également analysé en détail plusieurs techniques permettant d'augmenter l'efficacité des éléments du réseau. Cela a permis de faire ressortir plusieurs limites auxquelles nous risquons d'être confrontés dans quelques années. Nous avons également différencié les améliorations de l'efficacité avec celles de la proportionnalité. Cette distinction nous a notamment permis de mettre en avant le fait que bien que la proportionnalité des centres de données ait considérablement évolué ces dernières années, le potentiel d'amélioration dans le futur est limité.

Selon notre modèle, la consommation électrique globale annuelle de l'accès au réseau, du réseau central et des centres de données s'élève à 530 PJ en 2012 et atteindra 958 PJ en 2017. Ce qui représentera 3,6% de la consommation mondiale d'électricité. Ces dépenses énergétiques sont principalement dues au réseau d'accès et aux centres de données. Le réseau centrale ne représente qu'une faible portion de la consommation globale. Actuellement, les dépenses à l'accès du réseau sont principalement dues aux modems et aux routeurs Wi-Fi qui restent en mode actif en permanence. Une des priorités pour diminuer la consommation de l'Internet serait donc d'augmenter la proportionnalité de ces éléments. Par exemple, que leur consommation soit très faible quand le débit de données est nul. Il est à noter que l'amélioration de la proportionnalité se ferait au détriment de la qualité de service. En effet, il faudrait un certain temps pour que le dispositif change de mode. Cet exemple met en évidence qu'il existe souvent un compromis entre

efficacité énergétique et qualité de service. En 2017, l'accès mobile représenterait 16% de la consommation énergétique de l'Internet. La part de l'énergie dépensée dans les amplificateurs de puissance des stations de base est de plus en plus importante par rapport aux dépenses liées aux dispositifs d'électronique numérique. Le rendement des amplificateurs ayant un très faible potentiel d'amélioration, il est important de développer de nouvelles technologies et de nouvelles normes qui permettront d'augmenter l'efficacité spectrale du signal sans trop impacter son efficacité énergétique.

En tenant compte des terminaux, la portion de l'énergie dépensée lors de la phase de production équivaldrait à 22% de l'énergie sur l'ensemble du cycle de vie de l'Internet. Bien que la phase de production soit du même ordre de grandeur que celle d'utilisation pour les terminaux, celle-ci est relativement faible dans les autres éléments du réseau. La phase de fin de vie a souvent un impact négligeable par rapport à celui de la production. Il est à noter que plusieurs études sur la consommation énergétique des éléments du réseau oublient de convertir l'énergie électrique en énergie primaire avant de les comparer, ce qui mène à des conclusions erronées. Il est donc crucial de rester vigilant face à ce genre d'études.

Il faut également rester critique face aux résultats d'études globales comme celle effectuée dans ce travail. Premièrement, nous ne tenons pas compte de l'ensemble de l'Internet et nous nous basons sur un modèle simplifié du réseau. Ensuite, nous nous concentrons uniquement sur la consommation énergétique. Il serait intéressant d'étudier d'autres indicateurs pour pouvoir tirer des conclusions plus précises sur l'impact environnemental global d'une pratique par rapport à une autre. Finalement, les pratiques et les technologies dans le domaine de l'électronique et des télécommunications évoluent très rapidement. Il est donc difficile de prédire la tendance de l'efficacité énergétique au cours du temps. L'évolution de l'efficacité des semi-conducteurs est également incertaine et pourrait limiter l'augmentation de l'efficacité des dispositifs électroniques dans le cas où de nouveaux paradigmes ou technologies ne seraient pas développés.

Il est donc crucial que la recherche dans le domaine continue à se développer. Des ACV plus poussées permettraient également de mieux orienter le travail des concepteurs. Les opérateurs devraient également investir dans des dispositifs dont la consommation énergétique est plus proportionnelle avec le trafic. Finalement, vu que l'impact énergétique de la phase de production des terminaux représente une part importante de la consommation globale de l'Internet, augmenter la durée de vie des smartphones, ordinateurs portables et autres tablettes est également à préconiser.

Bibliographie

- [1] GéoPopulation. Démographie mondiale. <http://www.geopopulation.com/20090307/demographie-mondiale-les-projections-2050-constituent-la-chaire-developpement-durable-d> Mai 2013.
- [2] Stockholm Resilience Centre. Planetary boundaries research. <http://www.stockholmresilience.org/planetary-boundaries>, Mai 2013.
- [3] McKinsey & Company. Smart2020 : Enabling the low carbon economy in the information age. 2008. Global e-ustainability Initiative.
- [4] IDC. The digital universe decade – are you ready? May 2010.
- [5] Jan M Rabaey. *Low power design essentials*. Springer, 2009.
- [6] Mueen Uddin, Muhammad Talha, Azizah Abdul Rahman, Asadullah Shah, JA Khader, and J Memon. Green information technology (it) framework for energy efficient data centers using virtualization. *International Journal of Physical Sciences*, 7(13) :2052–2065, 2012.
- [7] International Energy Agency. Statistiques. <http://www.iea.org/statistics/>, Mai 2013.
- [8] ASPO. Peakoil. <http://www.peakoil.net>, Mai 2013.
- [9] Sarah B Boyd. *Life-cycle assessment of semiconductors*. Springer Science+ Business Media, 2012.
- [10] IPCC. Climate change : Synthesis report. 2007.
- [11] Cisco. Cisco visual networking index : Forecast and methodology, 2012–2017. February 2013.
- [12] Jonathan G Koomey. Estimating total power consumption by servers in the us and the world, 2007.
- [13] Bio Intelligence Service. Impacts of information and communication technologies on energy efficiency. September 2008. European Commission DG INFSO.
- [14] Laetitia Souchon Foll. *TIC et Énergétique : Techniques d'estimation de consommation sur la hauteur, la structure et l'évolution de l'impact des TIC en France*. PhD thesis, Institut National des Telecommunications, 2008.
- [15] Gartner. Green it : the new industry shockwave. In *Symposium/ITXPO conference*, April 2007.
- [16] Mario Pickavet, Willem Vereecken, Sofie Demeyer, Pieter Audenaert, Brecht Vermeulen, Chris Develder, Didier Colle, Bart Dhoedt, and Piet Demeester. Worldwide energy needs for ict : The rise of power-aware networking. In *Advanced Networks and Telecommunication Systems, 2008. ANTS'08. 2nd International Symposium on*, pages 1–3. IEEE, 2008.
- [17] Barath Raghavan and Justin Ma. The energy and emergy of the internet. In *Proceedings of the 10th ACM Workshop on Hot Topics in Networks*, page 9. ACM, 2011.
- [18] Willem Vereecken, Ward Van Heddeghem, Margot Deruyck, Bart Puype, Bart Lannoo, Wout Joseph, Didier Colle, Luc Martens, and Piet Demeester. Power consumption in telecommunication networks : overview and reduction strategies. *Communications Magazine, IEEE*, 49(6) :62–69, 2011.

- [19] SJBen Yoo. Energy efficiency in the future internet : the role of optical packet switching and optical-label switching. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 17(2) :406–418, 2011.
- [20] Oliver Blume, Dietrich Zeller, and Ulrich Barth. Approaches to energy efficient wireless access networks. In *Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP), 2010 4th International Symposium on*, pages 1–5. IEEE, 2010.
- [21] Marianne Parry Francoise Berthoud. Evaluation des impacts environnementaux de l’informatique : Quels outils ? quelles limites ? 2011.
- [22] Lars-Hendrik Röller and Leonard Waverman. Telecommunications infrastructure and economic development : A simultaneous approach. *American Economic Review*, pages 909–923, 2001.
- [23] Robert U Ayres, Jeroen CJM van den Bergh, Reiner Kümmel, Dietmar Lindenberger, and Benjamin Warr. The weight of energy in economic growth. 2009.
- [24] M.F. Ashby. *Materials and the Environment : Eco-informed Material Choice*. Eco-informed Material Choice Series. Elsevier Science, 2009.
- [25] ISO. Management environnemental - analyse du cycle de vie - principes et cadre. 2006.
- [26] IEA. Co2 emissions per kwh from electricity generation. Technical report, 2010.
- [27] T. Boermans E. Molenbroek, E. Stricker. Primary energy factors for electricity in buildings : Toward a flexible electricity supply. July 2011.
- [28] David Bol, Sarah Boyd, and David Dornfeld. Application-aware lca of semiconductors : Life-cycle energy of microprocessors from high-performance 32nm cpu to ultra-low-power 130nm mcu. In *Sustainable Systems and Technology (ISSST), 2011 IEEE International Symposium on*, pages 1–6. IEEE, 2011.
- [29] Eric D Williams, Robert U Ayres, and Miriam Heller. The 1.7 kilogram microchip : Energy and material use in the production of semiconductor devices. *Environmental science & technology*, 36(24) :5504–5510, 2002.
- [30] Eric D Williams. Environmental impacts of microchip manufacture. *Thin Solid Films*, 461(1) :2–6, 2004.
- [31] Christos Kozyrakis, Aman Kansal, Sriram Sankar, and Kushagra Vaid. Server engineering insights for large-scale online services. *Micro, IEEE*, 30(4) :8–19, 2010.
- [32] Consortium projet PrimeEnergyIT. Efficacité énergétique des technologies et infrastructures dans les datacentres et salles serveurs. Juillet 2011.
- [33] Rob Ayre Rod Tucker, Kerry Hinton. Energy efficiency in cloud computing and optical networking, 2012.
- [34] High-Performance Buildings for High-Tech Industries. Benchmarking : Data centers - case study reports. <http://hightech.lbl.gov/dc-benchmarking-results.html>, Juillet 2013.
- [35] Luiz André Barroso and Urs Hölzle. The datacenter as a computer : An introduction to the design of warehouse-scale machines. *Synthesis Lectures on Computer Architecture*, 4(1) :1–108, 2009.
- [36] Uptime Institute. Institute publications. <http://uptimeinstitute.com/publications>, Juillet 2013.
- [37] Google. Efficiency : How we do it. <http://www.google.com/about/datacenters/efficiency/internal/index.html> \backslash sharp $\$$ measuring-efficiency, Juillet 2013.
- [38] Steven Pelley, David Meisner, Thomas F Wenisch, and James W VanGilder. Understanding and abstracting total data center power. In *Workshop on Energy-Efficient Design*, 2009.
- [39] Google. The big picture faqs. <http://www.google.com/green/bigpicture/references.html>, Juin 2013.
- [40] Priya Mahadevan, Amip Shah, and Cullen Bash. Reducing lifecycle energy use of network switches. In *Sustainable Systems and Technology (ISSST), 2010 IEEE International Symposium on*, pages 1–6. IEEE, 2010.

- [41] Dennis Abts, Michael R Marty, Philip M Wells, Peter Klausler, and Hong Liu. Energy proportional datacenter networks. In *ACM SIGARCH Computer Architecture News*, volume 38, pages 338–347. ACM, 2010.
- [42] Markus Stutz. Carbon footprint of a typical rack server from dell. Technical report, EMEA, November 2011.
- [43] Justin Meza. Lifecycle-based data center design. Technical report, HP Laboratories, 2010.
- [44] Mingsheng Liu. Impacts of static pressure reset on vav system air leakage, fan power and thermal energy, 2011.
- [45] SPEC. Standard performance evaluation corporation. [http://www.spec.org/power\\$__\\$sj2008/results/power\\$__\\$sj2008.html](http://www.spec.org/power$__$sj2008/results/power$__$sj2008.html), Juillet 2013.
- [46] Frederick Ryckbosch, Stijn Polfiet, and Lieven Eeckhout. Trends in server energy proportionality. *Computer*, 44(9) :69–72, 2011.
- [47] Storage Performance Council. Home. <http://www.storageperformance.org/home/>, Juillet 2013.
- [48] Etienne Froment. Google investit 300 millions d’euros dans son data center de mons. <http://geeko.lesoir.be/2013/04/10/google-investit-300-millions-deuros-dans-son-data-center-de-mons/>, Juillet 2013.
- [49] Ian Bitterlin. Datacenter dynamics. <http://www.datacenterdynamics.com/blogs/ian-bitterlin/free-cooling-isn%E2%80%99t-free-it-can-be-cheap%E2%80%A6>, Juillet 2013.
- [50] Shneider Electric. Apc. <http://www.apc.com/site/apc/>, Juillet 2013.
- [51] Datadock. Datadock : Le centre de donnees le plus écologique d’europa. Technical report, 2013. <http://www.datadock.eu/en/>.
- [52] Freddy Noris. Amélioration des performances énergétiques d’un centre informatique. Séminaires de Science et de Gestion Environnementale, Octobre 2012.
- [53] Neil Rasmussen and James Spitaels. A quantitative comparison of high efficiency ac vs. dc power distribution for data centers. Technical report, Schneider Electric, 2012.
- [54] Lawrence Berkeley National Laboratory. High performance buildings : Data centers – server power supplies, December 2005.
- [55] Seagate. Seagate savvio 15k.2 data sheet. 2010.
- [56] Sarah Boyd, Arpad Horvath, and David Dornfeld. Life-cycle assessment of nand flash memory. *Semiconductor Manufacturing, IEEE Transactions on*, 24(1) :117–124, 2011.
- [57] Bulletins électroniques. Facebook inaugure le premier data center européen en suède. <http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/73613.htm>, Juillet 2013.
- [58] Météo Belgique. Climatogrammes. <http://www.meteobelgique.be/article/climatogramme.html>, Juillet 2013.
- [59] WSP Environment and Energy LLC. The carbon emissions of server computing for small-to-medium-sized organizations. 2012.
- [60] Ward Van Heddeghem, Filip Idzikowski, Willem Vereecken, Didier Colle, Mario Pickavet, and Piet Demeester. Power consumption modeling in optical multilayer networks. *Photonic Network Communications*, 24(2) :86–102, 2012.
- [61] Yi Zhang, Pulak Chowdhury, Massimo Tornatore, and Biswanath Mukherjee. Energy efficiency in telecom optical networks. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, 12(4) :441–458, 2010.
- [62] Filip Idzikowski. Power consumption of network elements in ip over wdm networks. Technical report, Technische Universitat Berlin Telecommunication Networks Group, 2009.
- [63] John J Conway et al. *Evaluation of environmental foot printing techniques*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2012.
- [64] Craig Donovan. Twenty thousand leagues under the sea : A life cycle assessment of fibre optic submarine cable systems. Technical report, KTH Architecture and the built environment, 2009.

- [65] Dan Kilper. Tutorial : Energy efficient network. 2011.
- [66] Olivier Bonaventure, Pierre Francois, and Bruno Quoitin. Issues in modelling isp networks. <http://inl.info.ucl.ac.be>, 2007.
- [67] P. Van Mieghem. Performance analysis of computer systems and networks. 2006.
- [68] Luca Niccolini, Gianluca Iannaccone, Sylvia Ratnasamy, Jaideep Chandrashekar, and Luigi Rizzo. Building a power-proportional software router. In *Proceedings of the 2012 USENIX conference on Annual Technical Conference (Berkeley, CA, USA, 2012), USENIX ATC*, volume 12, pages 8–8, 2012.
- [69] Bart Puype, Willem Vereecken, Didier Colle, Mario Pickavet, and Piet Demeester. Power reduction techniques in multilayer traffic engineering. In *Transparent Optical Networks, 2009. ICTON'09. 11th International Conference on*, pages 1–4. IEEE, 2009.
- [70] Ward Van Heddeghem, Maarten De Groote, Willem Vereecken, Didier Colle, Mario Pickavet, and Piet Demeester. Energy-efficiency in telecommunications networks : link-by-link versus end-to-end grooming. In *Optical Network Design and Modeling (ONDM), 2010 14th Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2010.
- [71] Hidetoshi Takeshita, Daisuke Ishii, and Naoaki Yamanaka. High-energy efficient layer-3 network architecture based on solitary universal cloud router and optical aggregation network. In *Optical Internet (COIN), 2010 9th International Conference on*, pages 1–3. IEEE, 2010.
- [72] Jayant Baliga, Robert Ayre, Kerry Hinton, and Rodney S Tucker. Energy consumption in wired and wireless access networks. *Communications Magazine, IEEE*, 49(6) :70–77, 2011.
- [73] Atwin O Calchand, Philip Branch, and Jason But. Analysis of power consumption in consumer adsl modems. *Power*, 12 :1A.
- [74] Nicole Unger and Oliver Gough. Life cycle considerations about optic fibre cable and copper cable systems : a case study. *Journal of Cleaner Production*, 16(14) :1517–1525, 2008.
- [75] Littelfuse. Digital subscriber line access multiplexer. <http://www.littelfuse.com/technical-resources/application-designs/digital-subscriber-line-access-multiplexer.aspx>, Juin 2013.
- [76] Spotify. What bitrate does spotify use for streaming. <https://support.spotify.com/be-fr/learn-more/faq/#!/article/What-bitrate-does-Spotify-use-for-streaming>, Juillet 2013.
- [77] Edoardo Bonetto, Alessandro Finamore, Maurizio M Munafo, and Riccardo Fiandra. Sleep mode at the edge : How much room is there ? In *Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (NETWORKS), 2012 XVth International*, pages 1–6. IEEE, 2012.
- [78] Martin Wolkerstorfer, Driton Statovci, and Tomas Nordström. Energy-saving by low-power modes in adsl2. *Computer Networks*, 56(10) :2468–2480, 2012.
- [79] Rodney S Tucker, Rajendran Parthiban, Jayant Baliga, Kerry Hinton, Robert WA Ayre, and Wayne V Sorin. Evolution of wdm optical ip networks : A cost and energy perspective. *Journal of Lightwave Technology*, 27(3) :243–252, 2009.
- [80] Yves Josse. *Modélisation énergétique de réseaux à antennes distribuées pour les communications sans-fil indoor*. PhD thesis, Télécom Bretagne, Université de Bretagne-Sud, 2013.
- [81] Daji Qiao, Sunghyun Choi, Amjad Soomro, and Kang G Shin. Energy-efficient pcf operation of ieee 802.11 a wireless lan. In *INFOCOM 2002. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, volume 2, pages 580–589. IEEE, 2002.
- [82] Gary Hanington, Pin-Fan Chen, Peter M Asbeck, and Lawrence E Larson. High-efficiency power amplifier using dynamic power-supply voltage for cdma applications. *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, 47(8) :1471–1476, 1999.
- [83] legitreviews. Cisco linksys ea6500 smart wi-fi router review. <http://www.legitreviews.com/article/2080/6>, Juin 2013.

- [84] Michael Kassner. Cheat sheet : What you need to know about 802.11ac. <http://www.techrepublic.com/>, Juin 2013.
- [85] Anthony Murabito. A comparison of efficiency, throughput, and energy requirements of wireless access points. Technical report, University of New Hampshire, March 2009.
- [86] Priya Mahadevan, Puneet Sharma, Sujata Banerjee, and Parthasarathy Ranganathan. A power benchmarking framework for network devices. In *NETWORKING 2009*, pages 795–808. Springer, 2009.
- [87] Biplab Sikdar. Environmental impact of ieee 802.11 access points : a case study. *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, 38(3) :66–70, 2011.
- [88] C. E. Shannon. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27 :379–423, 623–656, July, October 1948.
- [89] P.G. Fontolliet. *Systèmes de télécommunications*. Traité d'électricité de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Presses polytechniques et universitaires romandes, 1996.
- [90] Jonas Medbo and J-E Berg. Simple and accurate path loss modeling at 5 ghz in indoor environments with corridors. In *Vehicular Technology Conference, 2000. IEEE VTS-Fall VTC 2000. 52nd*, volume 1, pages 30–36. IEEE, 2000.
- [91] Scott Y Seidel and Theodore S Rappaport. 914 mhz path loss prediction models for indoor wireless communications in multifloored buildings. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 40(2) :207–217, 1992.
- [92] SS Ghassemzadeh, LJ Greenstein, A Kavcic, T Sveinsson, and V Tarokh. Uwb indoor path loss model for residential and commercial buildings. In *Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Fall. 2003 IEEE 58th*, volume 5, pages 3115–3119. IEEE, 2003.
- [93] Pulkit Grover, Kristen Woyach, and Anant Sahai. Towards a communication-theoretic understanding of system-level power consumption. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 29(8) :1744–1755, 2011.
- [94] A. Corliano (Fachhochschule Nordwestschweiz). Energieverbrauch der mobilen kommunikation. 2007.
- [95] Josip Lorincz. Measurements and modeling of base station power consumption under real traffic loads. Technical report, University of Split, 2012.
- [96] Gunther Auer. Energy efficiency analysis of the reference systems, areas of improvements and target breakdown. *Energy Aware Radio and Network Technologies*, 2012.
- [97] Wolfram Scharnhorst, Lorenz M Hilty, and Olivier Jolliet. Life cycle assessment of second generation (2g) and third generation (3g) mobile phone networks. *Environment International*, 32(5) :656–675, 2006.
- [98] Ericson. Sustainable energy use in mobile communications. August 2007.
- [99] Iztok Humar, Xiaohu Ge, Lin Xiang, Minh Jo, Min Chen, and Jing Zhang. Rethinking energy efficiency models of cellular networks with embodied energy. *Network, IEEE*, 25(2) :40–49, 2011.
- [100] Vinko Erceg, Larry J Greenstein, Sony Y Tjandra, Seth R Parkoff, Ajay Gupta, Boris Kulic, Arthur A Julius, and Renee Bianchi. An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 17(7) :1205–1211, 1999.
- [101] LIYTH NISSIRAT. Macro-cell path loss prediction, calibration, and optimization by lee's model for south of amman city, jordan at 900, and 1800 mhz. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2012.
- [102] Josip Lorincz, Antonio Capone, and Dinko Begušić. Optimized network management for energy savings of wireless access networks. *Computer Networks*, 55(3) :514–540, 2011.
- [103] Angelos Chatzipapas, Sara Alouf, and Vincenzo Mancuso. On the minimization of power consumption in base stations using on/off power amplifiers. In *Online Conference on Green Communications (GreenCom), 2011 IEEE*, pages 18–23. IEEE, 2011.

- [104] Margot Deruyck, Willem Vereecken, Emmeric Tanghe, Wout Joseph, Mario Pickavet, Luc Martens, and Piet Demeester. Power consumption in wireless access network. In *Wireless Conference (EW), 2010 European*, pages 924–931. IEEE, 2010.
- [105] Hitoshi Hirata, Kazuyuki Totani, Takashi Maehata, Tatsuhiro Shimura, Masayuki Take, Y Jurokawa, Masahiko Onishi, Yuuki Ada, and Yoshitsugu Hirata. Development of high efficiency amplifier for cellular base stations. *SEI Tech. Rev*, pages 47–52, 2010.
- [106] Fabien Hélot, Muhammad Ali Imran, and Rahim Tafazolli. On the energy efficiency gain of mimo communication under various power consumption models. In *Future Network & Mobile Summit (FutureNetw), 2011*, pages 1–9. IEEE, 2011.
- [107] Shengqian Han, Chenyang Yang, Gang Wang, and Ming Lei. On the energy efficiency of base station sleeping with multicell cooperative transmission. In *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2011 IEEE 22nd International Symposium on*, pages 1536–1540. IEEE, 2011.
- [108] Aaron Carroll and Gernot Heiser. An analysis of power consumption in a smartphone. In *Proceedings of the 2010 USENIX conference on USENIX annual technical conference*, pages 21–21, 2010.
- [109] Niranjana Balasubramanian, Aruna Balasubramanian, and Arun Venkataramani. Energy consumption in mobile phones : a measurement study and implications for network applications. In *Proceedings of the 9th ACM SIGCOMM conference on Internet measurement conference*, pages 280–293. ACM, 2009.
- [110] Center for energy-efficient telecommunications. The power of wireless cloud. Avril 2013.
- [111] Romas Malevicius. An application of lca. environmental impact of iphone 3gs and iphone 4, March 2010.
- [112] Apple Inc. 15-inch macbook pro environmental report. Technical report, February 2011.
- [113] Markus Stutz. Carbon footprint of a typical business laptop from dell. Technical report, EMEA Environmental Affairs Manager, May 2010.
- [114] Apple. 27-inch imac environmental report, October 2012.
- [115] Pablo Ameigeiras, Juan J Ramos-Munoz, Jorge Navarro-Ortiz, and Juan M Lopez-Soler. Analysis and modelling of youtube traffic. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 23(4) :360–377, 2012.
- [116] Wikipedia. Bit rate. http://en.wikipedia.org/wiki/Bit_rate, Juillet 2013.
- [117] Radware. Web performance today. <http://www.webperformancetoday.com/>, Juillet 2013.
- [118] Cisco. Cisco visual networking index : Global mobile data traffic forecast update, 2012–2017. February 2013.
- [119] D. Becker. Cisco linksys ea6500 smart wi-fi router review. <http://www.legitreviews.com/article/2080/6>, Novembre 2005.
- [120] Roberto Riggio and Douglas J Leith. A measurement-based model of energy consumption in femtocells. In *Wireless Days (WD), 2012 IFIP*, pages 1–5. IEEE, 2012.
- [121] Sandvine Intelligent Broadband Networks. Global internet phenomena report, 2013.