



HAL
open science

Taser et sabre laser, une petite guerre du carbone

Gabriel Pierre André Moreau, Géraud Danzel d'Aumont

► **To cite this version:**

Gabriel Pierre André Moreau, Géraud Danzel d'Aumont. Taser et sabre laser, une petite guerre du carbone. Congrès JRES: Les Journées Réseaux de l'Enseignement et de la Recherche, RENATER, Nov 2017, Nantes, France. hal-01669063

HAL Id: hal-01669063

<https://hal.science/hal-01669063v1>

Submitted on 20 Dec 2017

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

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



Distributed under a Creative Commons CC0 - Public Domain Dedication 4.0 International License

Taser et sabre laser, une petite guerre du carbone

Gabriel Moreau

Laboratoire LEGI - UMR 5519 (CNRS)
1209-1211 rue de la piscine
Domaine Universitaire
38400 Saint Martin d'Hères

Géraud Danzel d'Aumont

Sales Manager Western Europe - Nexans Advanced Networking Solutions
Nexans France
4 Allée de l'Arche
92070 Paris La Défense Cedex

Résumé

L'économie et le mode de pensée bas carbone se développent partout dans le monde. Des études montrent que la partie réseau participe pour environ un cinquième de la consommation totale de l'informatique [1]. C'est un nombre impressionnant ! Une partie sert au routage et à la commutation des paquets IP, une autre au transport de ces paquets entre les équipements. C'est la partie cachée que l'utilisateur voit peu et qui nous intéresse plus particulièrement.

Pour le câblage réseau des bureaux, le LEGI dispose d'une topologie fibre (optique) dite FTTO (Fiber To The Office) ainsi que d'une topologie cuivre (électrique) plus ancienne. Forts de cette expérience, nous souhaitons partager notre prise de conscience de l'impact écologique de ces deux technologies au regard des bilans carbone :

- *du cycle de vie : extraction des matières premières, purification des minerais, mise en forme dans les extrudeuses, durée de vie du support, recyclage après usage ;*
- *du fonctionnement : puissance dissipée en fonction des distances, des débits.*

L'augmentation des débits et des fréquences est un cas concret concernant des problématiques énergétiques. Dans un autre contexte, la distribution du PoE par étages dans les bureaux peut aussi être un autre casse-tête énergétique. Par ailleurs, il existe des données sur le bilan carbone de l'extraction du cuivre et de la silice ainsi que sur leurs processus de mise en forme.

Cet article a comme objectif d'établir une zone d'échanges et de débats autour du développement durable dans le déploiement des réseaux d'extrémité. On verra qui gagnera la guerre !

Mots clefs

Bilan carbone, Cycle de vie, Consommation, Cuivre, Fibre optique, Performance énergétique

1 Liminaire

Il existe d'autres modes de transport de l'information que les modes guidés. Par exemple les ondes radio ou infrarouge, les ondes acoustiques... Le Wi-Fi, la 3G sont ainsi des vecteurs très importants des réseaux

d'aujourd'hui. Avec l'augmentation des débits, les puissances en jeu s'envolent. Ainsi, d'après un article du site greenit.fr [2], la 3G utilise 15 fois plus d'énergie que le Wi-Fi et le facteur est de 23 fois pour la 4G !

De très nombreux équipements doivent ou devront être connectés sur le réseau mais n'ont pas forcément besoin de débit énorme, par exemple un réfrigérateur ou un système d'éclairage de pièce. Ils ont principalement besoin d'une connexion consommant le minimum d'énergie afin de limiter l'impact sur la consommation globale du logis (donc la facture électrique) ou d'augmenter leur autonomie (pour les équipements à piles). On peut signaler de très gros efforts par exemple via la norme IEEE 802.15.4 (ZigBee - 15 mW) ou le très performant IEEE P1902.1 (Rubees - 40 nW). Ainsi que le montre la figure 1, les consommations

Protocole	Consommation d'énergie (mode)		
	endormi	transmission	réception
IEEE 802.15.4	0.06 μ W	36.9 mW	34.8 mW
ANT	1.8 μ W	39 mW	33.9 mW
ONE-NET	0.3 μ W	63 mW	57.9 mW
ENOcean	0.6 μ W	99 mW	72 mW
Z-Wave	8.25 μ W	75,9 mW	120 mW
Wimax	33.6 μ W	224 mW	358 mW
Bluetooth	330 μ W	215 mW	215 mW
Wi-Fi	6600 μ W	835 mW	1550 mW

Figure 1 - Comparaison des consommations d'énergie en fonction des modes : source Wikipedia [3]

de différents protocoles actuellement déployés [3] sont très inférieures au Bluetooth et au Wi-Fi...

Les questions énergétiques et de bilan carbone ne sont donc pas l'apanage des réseaux câblés. Il nous semblait important dans cette courte introduction de donner en pâture quelques chiffres et quelques exemples de réseaux sans fil. Le lecteur intéressé par le sujet est amené à approfondir par lui-même la question. La suite de cet article ne concernera plus les transmissions en milieu ouvert.

2 Extraction

Les réseaux câblés, qu'ils soient à base de cuivre ou de silice, nécessitent en premier lieu de la matière première de qualité. En effet, avec l'augmentation des débits, le contrôle qualité sur les câbles est de plus en plus sévère. D'où vient la matière première de nos câbles ?

2.1 Le cuivre

En 2011 selon l'Institut Européen du Cuivre [4] 41% du cuivre utilisé en Europe provient du recyclage. À cette date là, on était déjà à plus de 250% de consommation de cuivre depuis 1960 passant de 5 à 18 millions de tonnes par an. Cela fait tout de même 11 millions de tonnes à extraire par an, en augmentation... En 2015 d'après l'Adrastia [5], ce sont 12 millions de tonnes de cuivre qu'il faut extraire malgré un taux de recyclage de 60%. Les chiffres entre ces deux études ne sont pas tout à fait les mêmes mais dans les grandes lignes sont équivalents. L'extraction est un élément essentiel et est largement dominé par la Chine et le Chili.

Ces données donnant le vertige, voici quelques chiffres concernant des objets de notre entourage quotidien : un ordinateur fixe contient environ 1,5 kg de cuivre, une maison environ 100 kg et une éolienne, 5 tonnes ! Heureusement, les portables étant plus légers, ils contiennent moins de cuivre.

D'après une étude de l'ADEME [6], l'impact carbone du cuivre sans tenir compte de la part minière (donc la part recyclage) serait d'environ 990 kgCO₂/t. Évidemment, le bilan minier est nettement moins bon et cette même étude estime le bilan global de la production de cuivre à 2930 kgCO₂/t avec une incertitude de 50%.

Au fait, comment le cuivre est-il extrait ?

L'essentiel des procédés est donné par Wikipedia ([Histoire de la production du cuivre](#) [7], [Extraction du cuivre](#) [8]). La source la plus commune de minerai de cuivre est la **chalcopryrite** (CuFeS_2) qui représente plus de 50% de la production. Le minerai est ensuite traité principalement par voie liquide dite **hydrométallurgique** permettant sa purification ou dans des fours **pyrométallurgiques**. Ces derniers pourtant intrinsèquement énergivores, ne représentent plus que 10% de l'énergie nécessaire à toute l'extraction du cuivre (Voir EcoInfo : [L'énergie des métaux](#) [9]).

À noter que dans la mine à ciel ouvert de Chuquicamata au Chili, un très beau gisement, le rapport **déchets-minerais** est de 3 à 1 [10]. Au delà du simple impact carbone, que faire de ce volume de déchets (finissant malheureusement souvent dans les rivières dans les Andes suite à des ruptures de digues) ?

2.2 La silice

Le site de l'ADEME comporte une section détaillée sur les [verres](#) [11]. La figure 2 résume assez bien le

Nom	Valeur	Hypothèse d'incorporation de calcin	Taux de recyclé
Verre d'emballage	0,81 kgCO _{2e} / kg	70%	70%
Verre flotté plat	1,26 kgCO _{2e} / kg	4%	4%
Verre courbé	2,39 kgCO _{2e} / kg	25%	25%
Verre renforcé (verre monocouche de sécurité-ESG) (épaisseur 1 mm; densité 2.5 kg/m ²)	4,56 kgCO _{2e} / kg	10%	10%
Verre de sécurité laminé; RER	3,42 kgCO _{2e} / kg	25%	25%
Cristal/Verre au plomb; RER	1,90 kgCO _{2e} / kg	Non précisé	0%
Verre à motifs; RER	1,16 kgCO _{2e} / kg	Non précisé	0%

Figure 2 - Facteurs d'émission des différents type de verre : source ADEME [11]

bilan carbone de nombreux type de verre, comportant plus ou moins de pourcentage de verre recyclé. En prenant une moyenne élevée sachant que le verre utilisé dans les fibres optiques est de qualité, on pourrait estimer à 4000 kgCO₂/t le bilan carbone coté silice, soit légèrement plus élevé que pour le cuivre.

Au fait, d'où vient la silice ?

La **silice** est très abondante dans la nature, sous forme de quartz, de calcédoine et de terre de diatomée. La silice représente en effet plus de 60% de la masse de la croûte terrestre continentale. Elle est extraite dans des mines voire plutôt dans des carrières au vu de la facilité des procédures comme expliqué dans ce cas [canadien](#) [12]. Cette [autre étude](#) [13] montre des taux de silice dans les carrières au Québec de 97,8 à 99,1%. De tels taux limitent les déchets !

3 Du minerai au câble

3.1 Le cuivre

Le minerai de cuivre est préchauffé, les fils en cuivre sont **extrudés** puis toronnés ensemble de manière plus ou moins complexe dans une seconde étape afin d'en faire un câble. Avec les câbles réseaux modernes (Catégorie 7 par exemple), un double blindage paire par paire puis du câble complet est réalisé par un matériau conducteur (aluminium et/ou acier le plus souvent). Au bilan carbone des fils de cuivre doit donc s'ajouter celui du blindage...

3.2 La silice

La fabrication d'une fibre optique opérationnelle a été une révolution qui a pris beaucoup de temps comparativement au fil électrique en cuivre (voir cet article de [Wilfried Blanc](#) [14]). Le tout peut être brièvement résumé actuellement en trois étapes (voir [La Fibre Lyonnaise](#) [15]) : la préforme, le fibrage et le polissage. A noter que pour réaliser le saut d'indice, on doit rajouter des produits dopants, par exemple du germanium ou du phosphore dans le cœur et du bore ou du fluor dans la gaine. Nous n'avons pas de chiffrage carbone de ces éléments complémentaires qui sont cependant moins courants que le quartz. La fibre est ensuite rapidement enrobée d'un mince film de plastique afin de la protéger de l'oxydation (tout comme pour le cuivre pour lequel le plastique joue aussi un rôle d'isolant).

4 De la masse volumique à la masse linéique

Un élément de comparaison important est la masse volumique de la matière première ainsi que le diamètre des fils.

- Cuivre : 8,96 g/cm³
- Silice : 2,2 g/cm³

Il y a en masse un rapport de plus de 4 entre le cuivre et la silice. Le bilan carbone étant ramené à la tonne, comparer de manière simplifiée la tonne de cuivre et la tonne de silice n'a pas énormément de sens dans le cadre des réseaux informatiques.

4.1 La silice

La suite du raisonnement utilise des fibres monomode afin de ne pas surcharger l'exposé.

Une fibre optique monomode fait environ 125 μm de diamètre pour un cœur de 9 à 10 μm, soit environ 0,027 kg/km de silice. Une préforme de verre d'environ 17,2 kg, d'une longueur de 1 m et de 10 cm de diamètre permet d'obtenir par étirement une fibre monomode d'une longueur de l'ordre de 150 km. La

Nominal dimensions & technical parameters					
	48 OF	72 OF	96 OF	144 OF	
Physical	Cable external diameter	5.8 mm	6.3 mm	7.0 mm	8.8 mm
	Cable weight	28 kg/km	37 kg/km	46 kg/km	74 kg/km
	Operating Temperature range (IEC-60794-1-F1)	-10°C +60°C			
	Storage Temperature range	-40°C +60°C			

Figure 3 - Masse linéique de câbles fibre : source NEXANS

figure 3 extraite d'une documentation de NEXANS donne une idée de la masse (et du diamètre) de câbles comportant de 48 à 144 fibres monomodes. Dans ce dernier cas, la masse du câble est de 74 kg/km dont seulement 3,9 kg/km de silice. Méfions-nous des raisonnements trop simplistes ne tenant pas compte des couches d'isolation même si celles-ci ont peu de chance d'être favorables au cuivre !

4.2 Le cuivre

Les choses ne sont pas aussi simples. Les câbles en cuivre sont de plus en plus complexes, de plus en plus blindés lorsqu'on monte en catégorie. Au niveau du cuivre, la section des fils est plus importante en catégorie 6 qu'en catégorie 5 (passage de 24 AWG à 22 AWG). Nous calculons la masse de cuivre pour un câble Ethernet selon sa catégorie en prenant le cas le plus favorable d'un câble massif [16] :

- Catégorie 6 - fil 22 AWG = diamètre 0,644 mm, soit 2,88 kg/km

— Catégorie 5 - fil 24 AWG = diamètre 0,511 mm, soit 1,82 kg/km

L'Institut Européen du Cuivre a un article étonnant : [Cuivre et carbone](#) [17]. Celui-ci explique qu'augmenter le diamètre des fils et des câbles dans les caténaies et les bobinages des moteurs et des transformateurs peut améliorer considérablement leur efficacité énergétique. Nous citons ici un extrait de celui-ci :

« En utilisant un logiciel de dimensionnement classique, les fils électriques utilisés pour la construction d'un bâtiment de bureaux de 1 000 m² représentent 32,5 kg de cuivre. En passant au calibre juste supérieur, la masse de cuivre monte à 52,2 kg et évite l'émission de 6 000 kg de CO₂eq (avec le mix énergétique européen) durant la durée de vie de l'équipement. [...] L'augmentation du diamètre des conducteurs en cuivre permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Les bénéfices qui y sont associés comprennent un excellent impact environnemental, la réduction du coût du cycle de vie des systèmes et un potentiel de recyclage de 100% à la fin de vie des équipements. »

4.3 Rapport de masse linéique

Pour un **câble catégorie 6** (4 paires), nous obtenons environ 23 kg/km de cuivre à comparer au 0,054 kg/km de silice d'une **jarretière double fibre** ! Le **facteur de masse de matière première est de plus de 430** entre le cuivre et la silice au détriment du cuivre. À noter que les choses vont en empirant à chaque nouvelle génération de catégorie cuivre. Avec le développement de la **FTTH**, la fibre monomode est de plus en plus employée en simplex, c'est à dire que les signaux de A vers B et de B vers A partagent la même fibre. Le rapport de masse linéique est alors de plus de 860. À noter qu'entre un câble cuivre classique de 26 AWG (diamètre 0,409 mm) et de la fibre monomode en simplex, le **rapport de masse reste supérieur à 300**.

Bien que nous n'ayons pas réellement l'impression que l'empreinte carbone au kg soit différente, c'est à notre sens principalement l'énorme gain de masse au mètre linéaire qui fait la différence du point de vue bilan carbone.

5 Installation

Actuellement, dans les liaisons longue distance, la fibre optique a quasiment tout le marché (sauf les liaisons par satellite). De même, pour les liaisons courtes, le cuivre est très largement majoritaire. Par exemple, la connectique **Thunderbolt** conçue par Intel devait à ses débuts, sous l'appellation de code Light Peak, utiliser de la fibre optique. Pour le moment, force est de constater que toutes les versions se déclinent uniquement en cuivre.

Un bon élément de comparaison est donc le réseau informatique, actuellement très majoritairement câblé en cuivre dans les locaux d'entreprise mais où la fibre, via l'offre **FTTO**, propose une solution globale cohérente et qui profite, d'une certaine façon, des déploiements importants de la **FTTH** en ville.

La comparaison d'une installation en cuivre ou en fibre optique pourrait faire l'objet d'un article complet. Le lecteur est ici fortement convié à lire l'article «[Retour d'expérience sur le premier bâtiment universitaire câblé en fibre optique](#)» [18] présenté lors des **JRES 2015** avant de poursuivre s'il n'a pas de connaissance précise de la **FTTO**. Nous ne donnerons donc que quelques pistes de réflexion tournées principalement du côté du bilan carbone.

- Rapport de masse : le volume de matière première étant beaucoup plus important lors d'un câblage en cuivre, le besoin en rotation camion augmente.
- Chemin de câble : le poids d'un réseau cuivre oblige à la pose de chemins de câble (séparés de ceux réservés aux courants forts) là où une boucle fibre se fixe sur la tranche de ceux existants. Cela rajoute de la masse en acier à fabriquer et à amener sur le chantier. . .

- Sous-répartiteur : les longueurs parfois importantes d'un bâtiment obligent à la création de sous répartition. Au delà des mètres carrés utilisés, cela entraîne du béton et du placoplâtre pour ces locaux techniques, ainsi que la pose d'éclairages (encore du cuivre). Donc encore de la matière première à rajouter au bilan carbone.
- Temps sur chantier : il est beaucoup plus rapide en temps de poser une boucle fibre (un simple câble guère plus gros que le petit doigt) puis de brancher un par un les bureaux avec des jarretières optiques depuis cette boucle que de déployer une ou plusieurs pieuvres cuivre. De très nombreux chantiers l'ont montré. Le lien direct entre *temps de pose* et *bilan carbone* est cependant une question ouverte et complexe.
- Actifs répartis : dans le cadre d'un réseau FTTO, le matériel actif est réparti dans les bureaux ce qui nécessite qu'il soit alimenté donc la création d'un réseau cuivre. Selon les choix effectués, l'impact peut-être plus ou moins important. Un pontage de ces actifs sur les prises utilisateurs les plus proches limite cependant ce réseau d'alimentation à sa plus simple expression.
À noter que l'actif réparti dans les goulottes ayant 4 ports RJ45 en façade, on divise en moyenne par 3 ou par 4 le nombre de liaisons vers le répartiteur central par rapport à une solution cuivre.
- Qualification : les techniciens sont actuellement opérationnels sur les déploiements cuivre et ne connaissent pas tous les solutions FTTO. Les opérations de fusion nécessitent par exemple un agent qualifié. Cela a un impact économique (temps de formation...) mais *a priori* un faible niveau carbone.

En prenant en compte les composants actifs et passifs, le gain économique d'une solution fibre, lorsqu'elle est prise en compte dès la conception des bâtiments, serait à ce jour en moyenne de 30% selon plusieurs études commerciales de NEXANS (fabriquant de fibre mais principalement de câble en cuivre). En pratique, il y a de forts gains coté surface (m²) et coté chemins de câble, deux éléments qui ont des masses intrinsèques non négligeables. Il semble donc peu probable que l'impact carbone lors de l'installation puisse pencher en sens inverse du bilan économique.

6 Recyclage

Ainsi que nous l'avons vu dans la partie extraction, le pourcentage de matière première recyclée augmente année après année. Cependant, cette augmentation est moindre dans le cas du cuivre que l'augmentation de la demande mondiale annuelle.

Dans le cadre de nos bâtiments universitaires, le recyclage effectif est souvent proche de zéro. La dépose d'un câblage de bâtiment étant très dispendieux et le réseau dans les locaux étant bien moins dense il y a 20 ans qu'aujourd'hui, il est classique de mettre en place un nouveau réseau par dessus l'ancien. Au mieux, lors de la réfection d'un bureau, les câbles sont cisailés aux frontières de celui-ci et mis dans la benne dédiée aux métaux.

Concernant la fibre optique, les premières fibres ayant environ 25 ans sur le campus de Grenoble sont encore en place et pour la plupart, sont encore opérationnelles. Si le choix avait été fait du monomode, tant que la silice est protégée par le plastique de l'oxydation, la fibre peut encore fonctionner des années. Dans le cas de fibres multimodes, le risque de voir ce support périmé à plus ou moins court terme va entraîner sa mise au rebut dans les années qui viennent. Le principal problème rencontré provient de la connectique fibre qui a changé de trop nombreuses fois en 25 ans (MFO, ST, SC, LC...). Il est cependant possible de recâbler les extrémités ce qui a été fait sur quelques tableaux (notamment multimode MFO) sur notre site.

À noter que sauf variation extérieure de température et d'humidité, la fibre en elle même ne vieillit pas lors du passage des photons alors qu'un câble électrique chauffe et refroidit au gré des débits. Ainsi, sauf

mauvaise manipulation humaine, il y a peu de raison qu'un réseau fibre vieillisse plus vite que les multiples couches de plastique protecteur.

Si l'on part sur l'hypothèse qu'un réseau fibre dure deux fois plus longtemps qu'un réseau cuivre (nous avons connu depuis les premières fibres encore opérationnelles les réseaux AppleTalk, les réseaux BNC, la catégorie 3 et maintenant la 6 ou la 7), le gain est déjà de deux.

Comme nous l'avons vu précédemment, la différence de masse entre un câble fibre et un câble cuivre aura une conséquence énorme sur le démantèlement : plus rapide à démonter, moins de masse à recycler au final. La boucle vertueuse est enclenchée ! Il reste cependant la question actuellement ouverte de l'influence des produits dopants sur le recyclage des fibres optiques.

7 Fonctionnement du réseau

7.1 Commutateurs à connectique RJ45

Nous l'avons aperçu lors du calcul de la masse linéique, avec l'augmentation des débits, les câbles en cuivre ont changé de catégorie.

- Catégorie 5 / 100BASE-T jusqu'à 100 m ;
- Catégorie 6 / 1000BASE-T jusqu'à 100 m, 10GBASE-T jusqu'à 56 m ;
- Catégorie 7 / 10GBASE-T jusqu'à 100 m, 40GBASE-T jusqu'à 56 m.

Le principal problème de la catégorie 7 (ou 7a) est que son connecteur n'est pas normalisé contrairement aux catégories précédentes qui utilisaient depuis longtemps le RJ45. Il y a donc plusieurs solutions (comme le GG45) mais aucun commutateur n'a pour le moment basculé sur ces prises. En 2017, la catégorie 8 a été ratifiée pour des distances inférieures à 36 m. Elle n'est envisagée qu'en interne dans les salles serveurs.

Afin de limiter la consommation du réseau [19], la norme 802.3az ratifiée en 2010 par l'IEEE pourrait en moyenne réduire de 20 à 25% la consommation énergétique d'un commutateur (voir figure 4). L'idée est de réduire automatiquement le débit d'une liaison voire de se mettre en veille lorsque celle-ci n'est pas utilisée. Actuellement, la plupart des commutateurs et des cartes réseaux des postes de travail implémentent déjà cette norme.

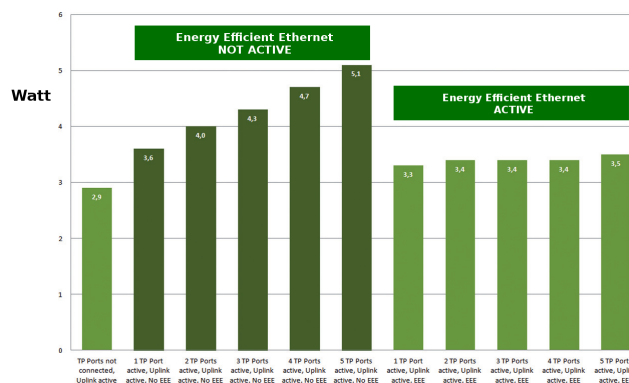


Figure 4 - Réduction de la consommation énergétique en W/port sur des commutateurs FTTO - aucun port cuivre actif (2,9 W/port), de 1 à 5 ports actifs sans IEEE 802.3az (de 3,6 à 5,1 W/port), de 1 à 5 ports actifs avec IEEE 802.3az activé (de 3,3 à 3,5 W/port) : source NEXANS

Dans une note technique sur la gamme Catalyst 3560, CISCO donne la consommation des commutateurs avec ou sans PoE, à pleine et à mi charge réseau (il faut éliminer tous les commutateurs Fast Ethernet dans

cette note, ne consommant que 1 W/port, ils ne permettent pas le 1 Gb/s). Les versions PoE consomment un peu plus même lorsque le PoE ne sert pas et on tourne globalement entre 2,3 et 3,5 W/port sur cette gamme. L'initiative *Green Ethernet* lancé par D-Link mérite d'être étendue (si elle fonctionne correctement). Elle consiste à ajuster la puissance envoyée par le commutateur à la longueur réelle du câble. En effet, les commutateurs actuels sont assez puissants pour envoyer des signaux pour une longueur de 100 m quelle que soit la longueur effective. D-Link allègue qu'il est possible de réaliser plus de 80% d'économies d'énergie grâce à ses commutateurs *Green Ethernet* et de bénéficier ainsi de produits offrant une durée de vie plus longue grâce à une dissipation calorifique moindre (voir section Recyclage). Nous n'avons jamais testé ni eu de retour utilisateur concernant ces produits.

7.2 Commutateurs à connectique SFP

La fibre optique est un domaine avec une assez grande variabilité de solutions : monomode/multimode, duplex/simplex, 10 km, 50 km, etc. Il n'était pas envisageable de commercialiser des commutateurs avec chaque type de signal. Les transceivers SFP (Small Form Factor) ont donc été la *solution normalisée* [20] en 1 Gb/s ayant regroupé tous les constructeurs en 2001. Les commutateurs ont des ports SFP en lieu et place des ports RJ45 1000BASE-T et chacun connecte dans ce port le transceiver SFP adapté à ses besoins.

Part Number	FIM32111	FIM32141	FIM32151	FIM32150Wxx	FIM32160Wxx
Application	SR-1 / LX	LR-1 / LH	LR-2 / ZX	CWDM	DWDM
Data Rate	0.622 to 2.488Gbps				0.622 to 2.7Gbps
Wavelength	1260 to 1360nm	1260 to 1360nm	1500 to 1580nm	1470 to 1610nm	1528 to 1565nm
Wavelength Accuracy (EOL)	---			-7 to 8nm	±100pm
Distance	2 to 5km	40km	80km		120km
Average Output Power	-10 to -3dBm	-2 to +3dBm		-1 to +4dBm	0 to +4dBm
Dynamic Extinction Ratio	> 8.2dB				
Eye Mask for Optical Output	Compliant with Telcordia GR-253 CORE and ITU-T G.957				
Input Power Range	-3 to -18dBm	-9 to -27dBm	-9 to -28dBm	-9 to -29dBm	-9 to -28dBm
Chromatic Dispersion	---		1600ps/nm	2400ps/nm	
Power Supply Voltage	Single 3.3V ± 5%				
Power Consumption	1.0W (Max)				1.3W (Max)
Operating Case Temperature	-20 to 85°C			-5 to 70°C	

Figure 5 - Consommation réelle des transceivers SFP : source Fujitsu [21]

Le SFP est alimenté par deux connecteurs noté VccR (récepteur) et VccT (transmetteur). Chacun dispose au maximum de 3,3V (±5%) et de 300 mA donc 2 W au mieux. En pratique, ils consomment le plus souvent deux fois moins donc environ 1 W ainsi que le montre la figure 5 extraite de la documentation technique de Fujitsu [21]. Le seul transceiver de cette gamme consommant 1,3 W transmet à 120 km. Combien consommerait de Watt une ligne électrique sur cette distance !

Nous avons pris une marque parmi d'autres mais d'autres exemples fournissent des résultats équivalents. Nous savons qu'il y a très peu d'usines au monde fabriquant réellement des transceivers. Quelle que soit la marque, ils sont tous à peu près identiques et ont des caractéristiques très proches.

La consommation énergétique semble *a priori* moindre en optique qu'en cuivre d'un facteur 3 à 5 (revoir la figure 4). Mais il existe des SFP 1000BASE-T vérifiant la norme SFP (moins de 2 W pour une distance de 100 m). Par exemple, CISCO indique une consommation de 1,1 W pour un de ses modèles. La comparaison n'est pas aussi immédiate qu'on pourrait le penser car le calcul de la consommation par port dans un commutateur RJ45 prend en compte la consommation du commutateur lui-même, ce qui n'est pas le cas ici où la consommation interne du commutateur SFP a été oubliée !

Dans un *White Paper* d'Intel [22], il est expliqué que si à l'origine du Gb/s, la consommation était bien de 6,5 W/port, avec les améliorations successives, les dernières générations de commutateurs sont tombées sous le 1W/port.

Au bilan, pour le 1 Gb/s, la consommation des commutateurs tant cuivre qu'optique semble assez proche.

7.3 SFP+ et 10GBASE-T

Le 10 Gb/s a déjà envahi nos salles serveurs. Les dernières générations de serveurs ont par défaut des interfaces au 10 Gb/s. La norme SFP+ s'est imposée pour les liaisons optiques pour les débits de 10 Gb/s devant le XFP, le CX4, etc. Elle a l'avantage d'être compatible avec le SFP en reprenant les mêmes dimensions. La consommation est là aussi de 1W pour la plupart des modèles ainsi que le montre cette documentation technique de CISCO.

Concernant le 10GBASE-T, la consommation initiale pouvait être de 25 W/port (voir Intel [22]). Actuellement, on semble tourner autour des 2 à 5 W/port selon la longueur du câble (voir Fiber Optic Equipment [23] dont est extrait la figure 6).

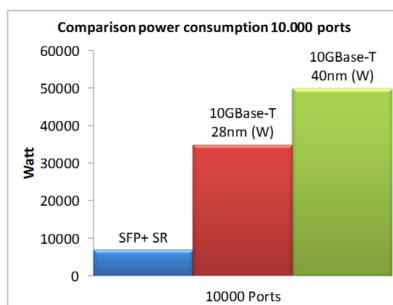


Figure 6 - Comparaison des consommations : source Fiber Optic Equipment [23]

À ce jour, il n'existe aucun transceiver SFP+ répondant à la norme 10GBASE-T. Quelques modèles sont disponibles (par exemple HPE 813874-B21) mais tous sont limités à 30 m (la norme impose 100 m). La raison principale de cette limitation est la limite à 2 W imposée au transceiver.

Au delà du 10 Gb/s, la connectique QSFP a pour le moment le vent en poupe. Il s'agit principalement d'un agglomérat de 4x10 Gb/s ou de 4x25 Gb/s. À ces débits, il n'y a plus de connectique cuivre au delà de quelques mètres. Nous n'allons donc pas les étudier de plus près.

Autant pour le 1 Gb/s, les solutions fibre et cuivre semblent proches en terme de consommation, autant côté 10 Gb/s, il y a environ un facteur 4 à ce jour. Certes, le 10 Gb/s est relativement limité aux salles serveurs actuellement mais le laboratoire LEGI sur Grenoble, fortement numérique et expérimental, a déjà par exemple 5 expérimentations utilisant le 10 Gb/s (parfois éloigné de plus de 80 m) pour remonter les données (principalement vidéo) en central avant traitement.

7.4 La problématique PoE

Le PoE (Power over Ethernet - IEEE 802.3af) est certainement le changement le plus significatif sur nos réseaux ces dernières années. De plus en plus d'équipements terminaux tirent leur puissance directement du câble Ethernet. Les plus connus sont les bornes Wi-Fi ou les téléphones IP dont nous avons des déploiements massifs sur nos installations.

La figure 7 montre sur l'interface web d'un commutateur NEXANS la consommation de 3,1 W de deux téléphones IP Alcatel (appareil de classe 2) ainsi que celle de 7,6 W d'une borne Wi-Fi CISCO (appareil de classe 3).

Mélanger ainsi la puissance et les données sur le même support n'est pas forcément une bonne idée mais c'est ainsi. Les pertes en ligne sont relativement importantes car les sections en cuivre des câbles ne sont pas forcément adaptées. Ainsi, il faut compter de 10 à 20% de pertes d'énergie. En PoE, pour une puissance maximale de 15,4 W, seuls 13 W sont utilisables, le reste chauffant les câbles par effet Joule. À ce niveau là, il faut être prudent car la concentration des câbles dans les chemins de câble occasionne un échauffement

Power-over-Ethernet State								
Port No.	Port Descr.	Port Name	Power Setup	Power Limit (W)	Voltage (V)	Current (mA) [Measured by Switch]	Power (W) [Measured by Switch]	Powerclass : max. Power (W) [Reported by Device]
0 Setup	Power Supply	-	-	60	54	118	6,3	-
1 Setup	TP-1	<none>	Auto 802.3at High-Power	30	54	60	3,2	Class 2 / 6,49
2 Setup	TP-2	<none>	Auto 802.3at High-Power	30	Not powered	-	-	-
3 Setup	TP-3	<none>	Auto 802.3at High-Power	30	Not powered	-	-	-
4 Setup	TP-4	<none>	Auto 802.3at High-Power	30	54	58	3,1	Class 2 / 6,49

Power-over-Ethernet State								
Port No.	Port Descr.	Port Name	Power Setup	Power Limit (W)	Voltage (V)	Current (mA) [Measured by Switch]	Power (W) [Measured by Switch]	Powerclass : max. Power (W) [Reported by Device]
0 Setup	Power Supply	-	-	60	53	144	7,6	-
1 Setup	TP-1	<none>	Auto 802.3at High-Power	30	Not powered	-	-	-
2 Setup	TP-2	<none>	Auto 802.3at High-Power	30	Not powered	-	-	-
3 Setup	TP-3	<none>	Auto 802.3at High-Power	30	Not powered	-	-	-
4 Setup	TP-4	<none>	Auto 802.3at High-Power	30	53	144	7,6	Class 3 / 12,95

Figure 7 - Consommation PoE - téléphone IP et borne Wi-Fi : source LEGI

accru, ce qui implique un vieillissement accéléré et des caractéristiques physiques différentes des câbles, notamment ceux au centre des torons.

Avec le PoE+ (IEEE 802.3at), on augmente la puissance maximale en sortie de commutateur à 30 W pour 25 W utile sur l'équipement terminal. Le 4PPoE (IEEE 802.3bt [24]) monte à 60 W. Des débuts d'incendie pourraient se produire sur les vieux câbles trop résistants (voir section 4.2 et [17]) ! Afin de limiter les pertes et d'assurer au mieux du 50 V sur l'équipement d'extrémité, la tension est passée de 50 à 57 V en sortie de commutateur. La valeur couramment admise de non danger pour l'humain en milieu sec est de 50 V continu (25 V en milieu mouillé). Les opérateurs vont devoir petit à petit se former aux éventuels risques qu'amène un fort déploiement PoE sur nos réseaux.

À première vue et avec toutes ces pertes par effet Joule, la distribution sur un support non adapté de la puissance n'est pas bonne pour le bilan carbone !

Cependant, bien que tous les effets négatifs ne puissent être annulés, la centralisation de la gestion de la puissance permet de couper dès le commutateur la puissance en dehors des heures de travail. Un calcul rapide montre que les machines informatiques tournent 24/24 tous les jours de l'année pour un taux d'utilisation moyen de l'ordre de 19% à 25% ! Il est peut-être possible d'améliorer son bilan carbone en coupant le PoE la nuit (si les locaux sont inoccupés) et de diviser ainsi par deux sa consommation.

Technology	How much it could save	When will the saving kick-in	Number of Ethernet Links shipped per year
EEE over GbE	~1W per link	Power saving is instantaneously when link is idle	200M and growing
EETPoE with .3af	~0.6W per link	Power saving will occur as long as power is on	40M and growing
EETPoE with .3at	~2.1W per link	Power saving will occur as long as power is on	30M and growing
Total Savings for EEE + EETPoE	3.13W per link		

Figure 8 - Energy Efficient PoE : source MARVELL [25]

Un White Paper de MARVELL [25] évoque l'Energy Efficient PoE. Il s'agit comme la montre la figure 8 de généraliser le 802.3az au PoE. De 1 à 2 W par lien pourrait ainsi être gagné.

Quelle est la différence entre un réseau cuivre et un réseau fibre coté PoE ?

- Dans le cadre d'un réseau cuivre, les commutateurs en baie de brassage doivent fournir le PoE. Ils sont parfois fort éloignés des points PoE ce qui est mauvais pour les pertes en ligne. Si nous reprenons

la gamme CISCO Catalyst 3560 avec le modèle PoE à 48 ports, sa consommation sans équipement PoE est de 130 W, à 50% de la puissance max PoE il est à 328 W et consomme 534 W (dont 370 W pour le PoE) à pleine puissance. À ce rythme là, le sous-répartiteur hébergeant les commutateurs doit rapidement être climatisé. Au coût carbone de l'équipement de climatisation s'ajoute le bilan énergétique doublé de ce genre de salle n'ayant souvent pas un coefficient PUE inférieur à 2 ! Le PoE centralisé est clairement énergivore. . .

- Dans le cadre d'un réseau fibre FTTO, il n'a échappé à personne que la fibre étant un isolant galvanique, aucun électron se promenant dans les bureaux utilisateurs ne rentre dans la salle serveur en empruntant le réseau informatique. Cependant, les micro-commutateurs installés dans les goulottes des bureaux ont en général 4 ports PoE en façade (et au moins 1 port SFP caché dans la goulotte). La distance entre la génération du PoE et l'équipement terminal n'est que de quelques mètres. Les pertes sont donc minimales, bien inférieures aux valeurs données précédemment. Le PoE étant distribué par l'ensemble des micro-commutateurs qui sont eux-mêmes répartis dans l'ensemble des locaux, il n'y a pas de concentration de calories en une pièce et donc pas de nécessité d'installer une climatisation spécifique.

Ainsi, aussi étonnant que cela puisse paraître, un réseau fibre de type FTTO est le meilleur ami du PoE. Il minimise les pertes et distribue au mieux les calories évitant tout point chaud.

7.5 La latence

Pourquoi les transceivers SFP+ ont-ils une latence plus faible que le cuivre ? En effet, selon Paul Kish [26], les liens SFP+ ont une latence de 0.3 μ s alors que le 10GBASE-T est autour de 2.6 μ s. La figure 9 extraite de Fiber Optic Equipment [23] donne des résultats identiques en affinant la latence réelle mesurée selon le nombre de liens utilisés. On aurait pu penser qu'avec le couple émetteur / récepteur optique, le changement de structure du signal fasse perdre du temps (le fait que le signal optique se propage moins vite dans le verre, environ 177000 km/s, que le signal électrique dans le cuivre, environ 273000 km/s, ne joue aucun rôle ici du fait de la petite taille de la Terre). En réalité, c'est la simplicité des schémas électroniques et donc

Number of Links	SFP+ Cable Latency	10G SFP Latency	10GBASE-T SFP Latency
1	0.3	0.1	2.6
2	0.6	0.2	5.2
3	0.9	0.3	7.8
4	1.2	0.4	10.4
5	1.5	0.5	13.0
6	1.8	0.6	15.6

Figure 9 - Latence selon le type de lien : source Fiber Optic Equipment [23]

des traitements à réaliser sur le signal qui fait gagner en latence. En effet, le 10GBASE-T utilise du codage par blocs pour transporter des données sur le câble sans erreurs alors que le SFP+ ne réalise pas d'encodage spécifique. À ce propos, au laboratoire LEGI, nous avons remarqué que le taux d'erreur CRC en 10 Gb/s sur du multimode est rarement nul sur des distances de moins de 10 m durant une semaine alors que sur du monomode, il n'y a jamais d'erreur de transmission.

Tout cela pourrait avoir un effet non nul sur le bilan carbone. En cas de latence importante, toute la chaîne de traitement de l'information attend et tourne à vide mais pas sans échauffement ! C'est assez connu des spécialistes du HPC. . .

8 Conclusion

Cet article n'avait pas la prétention de faire le tour complet de la question et de fournir des résultats scientifiques chiffrés et reproductibles. Nous voyons dans ce tour d'horizon rapide que toutes les technologies évoluent, que les ingénieurs améliorent en permanence les protocoles. Ainsi, ce qui semblait impossible il y a encore quelques temps, un SFP+ 10GBASE-T existe à ce jour mais pour une distance limitée non normalisée. Certaines consommations par port ont été divisées par 10 en moins de 20 ans, les matériaux sont de plus en plus recyclés même si la demande augmente plus vite !

La fibre monomode était en avance sur son temps il y a 25 ans. Les connecteurs étaient complexes à faire ainsi que des émetteurs / récepteurs ayant 9 μm de diamètre. Avec la miniaturisation, nous voyons qu'il n'y a plus réellement de problème de nos jours. Actuellement, fin 2017, on trouve des transceivers bi-directionnels 1 Gb/s (dit *bidi* ou *simplex* - émettant et recevant sur une seule fibre) aux mêmes prix que les duplex et à moins de 30 € pièce. Il est ainsi envisageable de tout faire en *bidi* et de diviser par deux le volume de silice utilisé (ainsi que le nombre de fusions...). Avec la photonique, il est envisageable d'avoir à court terme des lasers intégrés dans les puces et pourquoi pas des fibres ayant un cœur encore plus petit. La technologie des fibres creuses pourrait aussi prendre le pas...

Transmettre la puissance avec les données révolutionne petit à petit nos réseaux. Ceux-ci n'ont pas été conçus pour le PoE mais tout le monde s'adapte petit à petit de part la contrainte de l'énergie (les réseaux consomment 20% de l'énergie électrique liée à l'informatique). On aurait pu croire que le PoE allait définitivement exclure la fibre optique des locaux de bureau. Tout au contraire, le développement d'offres globales de type FTTO ont permis de rapprocher la production du PoE de l'équipement terminal. Les mises en veille ou les vitesses de transmission variables vont devenir la norme tout comme les CPU de nos ordinateurs sont capables d'éteindre et de rallumer des cœurs à chaud.

Quel sera notre réseau local dans 20 ans ? Difficile à prédire. Les partisans de chaque camp travaillent fort à trouver des solutions et à mettre en difficulté leurs adversaires (n'oublions pas les liaisons sans fil). Pendant longtemps, les fabricants de commutateurs ont pratiqué des prix scandaleux (au delà de toute marge raisonnable) et ont plombé l'optique afin de capitaliser sur leur rente et leurs usines. Ce n'est plus le cas à ce jour où tout semble possible et où quelques Watt permettent déjà d'envoyer un paquet d'information à l'autre bout du continent.

À vous de vous faire votre propre opinion sur cette guerre du carbone et d'échanger sur le sujet lors des différents forum qui jalonnent notre route.

Remerciement : nous tenons à exprimer notre sincère reconnaissance à **Catherine Grenet** de l'IAP PARIS pour son travail essentiel de relecture et d'amélioration continue de l'article.

Bibliographie

- [1] Journal du NET. L'informatique est-elle consommatrice d'énergie ? <http://www.journaldunet.com/solutions/expert/33551/l-informatique-est-elle-consommatrice-d-energie.shtml>.
- [2] GreenIT.fr. Internet mobile : la 4G est-elle une abomination énergétique ? <https://www.greenit.fr/2016/03/15/internet-mobile-la-4g-est-elle-une-abomination-energetique/>.
- [3] Wikipedia. Liaison sans fil à faible consommation énergétique. https://fr.wikipedia.org/wiki/Liaison_sans_fil_%C3%A0_faible_consommation_%C3%A9nerg%C3%A9tique.
- [4] Institut Européen du Cuivre. Les besoins en cuivre de l'Europe sont de plus en plus satisfaits grâce au recyclage. <http://copperalliance.fr/le-cuivre/le-recyclage-du-cuivre>.
- [5] Adrastia. Transition 2017 – 1/4 : La réalité n'existe pas. <http://adrastia.org/transition-2017-1-realite/>.

- [6] ADEME. Autres métaux. http://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?autres_métaux.htm.
- [7] Wikipedia. Histoire de la production du cuivre. https://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire_de_la_production_du_cuivre.
- [8] Wikipedia. Extraction du cuivre. https://fr.wikipedia.org/wiki/Extraction_du_cuivre.
- [9] EcoInfo. L'énergie des métaux. <http://ecoinfo.cnrs.fr/?p=11396>.
- [10] Institut Européen du Cuivre. Extraction et métallurgie. <http://copperalliance.fr/le-cuivre/extraction-et-metallurgie>.
- [11] ADEME. Verre et articles en verre. http://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?verre_et_articles_en_verre.htm.
- [12] Le Charlevoisien. Une deuxième mine de silice dans la région. <http://www.lecharlevoisien.com/deuxieme-de-silice-region/>.
- [13] Ministère Énergie et Ressources naturelles du Québec. Exploration de la silice au Québec. <https://www.mern.gouv.qc.ca/mines/industrie/mineraux/mineraux-exploration-silice.jsp>.
- [14] Blanc Wilfried. Le développement des fibres optiques de silice. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01081774/document>.
- [15] La Fibre Lyonnaise. La fabrication de la fibre optique. <http://www.lafibrelyonnaise.fr/fabrication-de-la-fibre-optique/>.
- [16] Wolfgang Knap. AWG Tabelle. <http://www.knap.at/datenblaetter/all/awg-tabelle.pdf>.
- [17] Institut Européen du Cuivre. Cuivre et carbone. <http://copperalliance.fr/le-cuivre-et-la-societe/environnement/cuivre-et-carbone>.
- [18] Moreau Gabriel. Retour d'expérience sur le premier bâtiment universitaire câblé en fibre optique. https://conf-ng.jres.org/2015/document_revision_1603.html?download.
- [19] BFM Business. Vers un réseau informatique économe en énergie. <http://bfmbusiness.bfmtv.com/01-business-forum/vers-un-reseau-informatique-econome-en-energie-531047.html>.
- [20] SFF Committee. INF-8074i specification for SFP (Small Formfactor Pluggable) Transceiver. <https://ta.snia.org/higherlogic/ws/public/download/617/INF-8074.PDF>.
- [21] Fujitsu. SFP MSA Transceiver. <http://www.fujitsu.com/downloads/OPTCMP/lineup/sfpmsa/sfp-catalog.pdf>.
- [22] Intel. White Paper - 10GBASE-T for Broad 10 Gigabit Adoption in the Data Center. https://www.intel.com/content/dam/support/us/en/documents/network/sb/intel_ethernet_10gbaset.pdf.
- [23] Fiber Optic Equipment. 10G SFP or 10GBASE-T SFP for 10GbE Network? <http://www.fiber-optic-equipment.com/tag/10-gigabit-ethernet>.
- [24] IEEE 802.3 Ethernet Working Group. 4-Pair Power over Ethernet (PoE) Study Group. <http://www.ieee802.org/3/4PPOE/>.
- [25] MARVELL. White Paper - Power over Ethernet (PoE) : An Energy-Efficient Alternative. <http://www.marvell.com/switching/assets/Marvell-PoE-An-Energy-Efficient-Alternative.pdf>.
- [26] Kish Paul. SFP+ and 10GBASE-T Face Off in the Data Center. <http://www.belden.com/blog/datacenters/SFP-and-10GBASE-T-Face-Off-in-the-Data-Center.cfm>.