HAL
open science

TELECOMMUNICATIONS ET ECONOMIES D'ENERGIE

Sébastien Schinella

To cite this version:

Sébastien Schinella. TELECOMMUNICATIONS ET ECONOMIES D'ENERGIE. 24èmes Journées Scientifiques de l'Environnement - La transition écologique des mégapoles, Feb 2013, Créteil, France. hal-00806294

HAL Id: hal-00806294

https://enpc.hal.science/hal-00806294

Submitted on 2 Apr 2013

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.

TELECOMMUNICATIONS ET ECONOMIES D'ENERGIE

Sébastien SCHINELLA[1, 2], *Doctorant CIFRE Université Paris Diderot – Orange Labs*

1. Orange Labs, Département « Research on Energy and Environment »,
38-40 avenue du Général Leclerc, 92794 Issy les Moulineaux Cedex 9
Tel : 01.45.29.62.49 – e-mail : sebastien.schinella@orange.com

2. Université Paris Diderot, Département Géomatériaux et Environnement,
35 rue Hélène Brion, 75013 Paris.

Résumé

Face à la double contrainte du changement climatique et du pic pétrolier (qui induit de fortes augmentations du coût de l'énergie à venir), il est nécessaire d'apporter une réponse efficace pour diminuer la consommation de notre société. Les télécommunications, et plus largement les technologies de l'information et de la communication (TIC) ont le potentiel de réduire la consommation énergétique de notre société grâce à la dématérialisation et la substitution aux transports (notamment via le télétravail, la visioconférence…). Mais les TIC sont elles-mêmes responsables d'une consommation d'énergie due à la fabrication de matériel de haute technologie et à l'utilisation directe d'électricité. Dans l'optique d'introduire les solutions TIC pour réduire la consommation énergétique des mégapoles, il est important de veiller à ce que les solutions apportées n'induisent pas un impact plus grand que le gain apporté.

Mots-Clés : *Services internet ; dématérialisation ; substitution ; consommation d'énergie ; ville intelligente*

1. Introduction : Les TIC et leur pouvoir d'économie d'énergie

Il n'est pas toujours facile de relier les technologies de l'information et de la communication (TIC) et les économies d'énergie. Pourtant, les acteurs de ce secteur ont mis en avant le potentiel d'économie d'énergie depuis de nombreuses années. En effet, depuis l'apparition du mp3 dans les années 2000, on prédisait la fin des supports matériels de la musique tels que les CD, et même depuis le développement de la micro-informatique dans les années 1980 avec la disparition des supports papier (cet effet a été tout à fait relatif). (EcoInfo, 2012)

Suite aux prix élevés du baril de pétrole atteint en 2008 et aux alertes soulevées par le 4ème rapport du GIEC en 2007 en ce qui concerne le changement climatique et le rôle du CO_2, le groupe GeSI (Global e-Sustainability Initiative) a publié un rapport exposant des pistes qui permettraient d'économiser de l'énergie grâce aux TIC, surtout par des économies dans les autres secteurs. (GeSI Smart 2020, 2008).

Plusieurs résultats de ce rapport sont présentés ici à travers le spectre des économies réalisées dans les émissions de gaz à effet de serre. En effet, dans le domaine des TIC, la quasi-totalité des émissions de gaz à effet de serre (souvent indirectes) sont imputables à la consommation

d'énergie. Réciproquement, d'un point de vue mondial, plus de 80% de la consommation d'énergie dans le monde provient des énergies fossiles. (IEA, 2012)

D'après le rapport du GeSI (2012), les TIC seraient donc capable en 2020 de permettre d'épargner l'émission de 7.8 $Gt_{CO2(e)}$ (Gigatonnes d'équivalent CO_2) pour une émission propre de 1.4 $Gt_{CO2(e)}$, pour un total d'émissions supposé à 51.9 $Gt_{CO2(e)}$ pour un scénario « Business as usual ». Les économies peuvent se faire 4 secteurs majeurs : l'industrie (1.1 $Gt_{CO2(e)}$), les transports (2.2 $Gt_{CO2(e)}$), les bâtiments (2.4 $Gt_{CO2(e)}$) et l'énergie (2.1 $Gt_{CO2(e)}$). Les moyens pour parvenir à cette réduction sont listés ci-dessous avec leur potentiel d'économie :

- "Smart motors systems" (1 $Gt_{CO2(e)}$) : surveillance des consommations d'énergie des machines industrielles pour cibler et gérer les économies d'énergie possibles. Dans une usine, la communication entre différentes machines permettrait également des économies.
- "Smart buildings" (1.7 $Gt_{CO2(e)}$) : gestion de l'énergie dans les bâtiments (chauffage, ventilation, lumière…) par un système de gestion et de communication domotique.
- "Smart logistics" (1.5 $Gt_{CO2(e)}$) : Communication entre les camions, ports, entrepôts… pour optimiser les flux.
- Optimisation du transport individuel (0.8 $Gt_{CO2(e)}$) et du trafic
- Amélioration de l'efficacité des centrales de production d'énergie (0.4 $Gt_{CO2(e)}$)
- "Smart grid" (2.1 $t_{CO2(e)}$) : équilibrage de l'offre et de la demande qui doivent être égales en tout instant, gestion des énergies renouvelables intermittentes.
- Dématérialisation (0.5 $Gt_{CO2(e)}$) : ce terme désigne plusieurs domaines qui permettent de substituer des supports virtuels à des supports réels. On peut citer par exemple le télétravail, la vidéoconférence, le e-commerce…

Mais face à toutes ces économies, nous avons des consommations qui sont induites par les TIC, avec la création de serveurs et de réseau qui doivent être très performants. Le même rapport prévoit une multiplication des émissions des TIC par 3 entre 2002 et 2020. Mais on peut se poser plusieurs questions sur ce rapport :

- L'augmentation de la consommation des TIC n'est-il pas sous-estimé ?
- Le potentiel de diminution de consommation n'est-il pas surestimé ?
- Y a-t-il vraiment substitution ou ajout de service ? (voir Figure 1)

2. La consommation propre des TIC

Comme nous l'avons évoqué dans la partie précédente, les TIC consomment elles-mêmes de l'énergie. Cette consommation est très diffuse et répartie : il faut aussi bien prendre en compte la consommation des réseaux et des datacenters que celle des terminaux (ordinateurs, téléphones) qu'utilisent les consommateurs des TIC.

2.1 Les terminaux

Selon l'agence internationale de l'énergie, la consommation d'électricité par les TIC est en croissance forte (IEA, 2009). Comme les ménages des pays développés se sont équipés en électroménager pendant les trente glorieuses, ils se sont équipés en équipements TIC dans les années 2000 avec l'avènement de l'internet grand public. Aujourd'hui, nous avons par exemple plus d'un ordinateur par personne aux États-Unis (Figure 1).

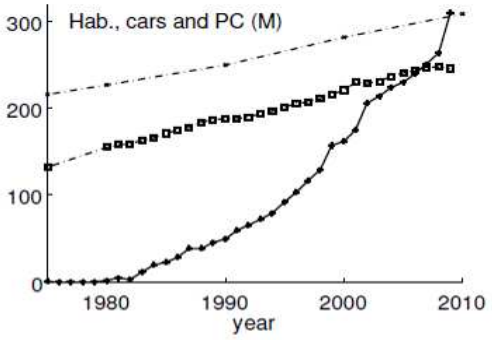

Figure 1 : évolution aux USA de la population (pointillés), du nombre de voitures (carrés) et du nombre de PC (points). Le développement de l'informatique n'a pas « dématérialisé » les déplacements en voiture, mais s'y est ajouté

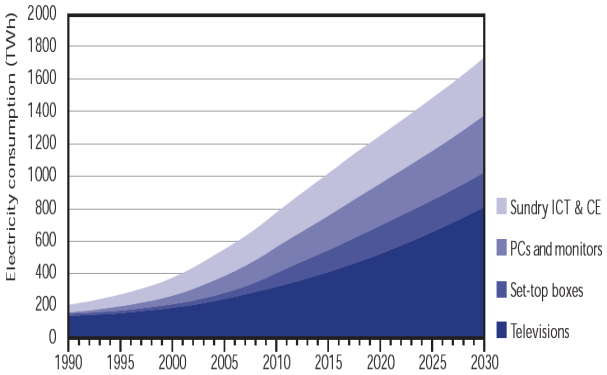

Figure 2 : évolution et prévision de la consommation des terminaux TIC entre 1990 et 2030 (IEA, 2009)

Le niveau de vie dans les pays dits émergents est également en forte croissance et cette augmentation s'accompagne d'acquisition, donc de consommation d'équipements TIC. L'AIE prévoit une croissance de la consommation des terminaux TIC (chez les particuliers) jusqu'à 1700 TWh en 2009 (Figure 2).

En plus des terminaux fixes, on ajoutera aussi les terminaux mobiles (téléphones mobiles, smartphones et tablettes), dont la quantité s'est fortement développée ces dernières années.

2.2 Le réseau

Le réseau permet de faire transiter les données entre les utilisateurs et les entreprises par internet. Il est de plus en plus performant pour permettre des débits de plus en plus importants. On est passé d'un débit par personne de 64 Kbits/s (débit de la voix échantillonnée en numérique pour le téléphone) à bientôt 100 Mbits/s pour les foyers équipés en fibre optique.

De même pour le mobile, qui était quasiment inexistant et très coûteux au début des années 1990, jusqu'au développement du GSM (9.6 Kbits/s) et à l'évolution des réseaux jusqu'à l'évolution future avec la 4G (~10 Mbits/s). Le mobile sert aujourd'hui à naviguer sur internet en plus de téléphoner, notamment pour accéder à des contenus vidéo.

Dans les pays développés, le réseau croit régulièrement, mais dans les pays en développés, le réseau n'existait même pas ou presque pas et il est amené à croitre très fortement dans les prochaines années[1].

2.3 Les datacenters

[1] http://www.itu.int/ITU-D/ict/facts/2011/material/ICTFactsFigures2011.pdf

Les données et la puissance de calcul des entreprises sont souvent stockées dans des serveurs, regroupés dans des centres appelés datacenters. A titre d'exemple, Facebook a désormais un nouveau datacenter d'environ 220 m², avec la moitié de la surface occupée par des baies contenant chacune une vingtaine de serveurs consommant chacun environ 100 W.

Les serveurs dégagent également de la chaleur qui doit être évacuée pour ne pas produire une élévation de la température, qui provoquerait une détérioration voire une destruction du matériel. Dans les datacenters classiques, il faut environ autant d'énergie pour climatiser la salle de serveurs que la consommation propre des serveurs.

Dans le monde, les datacenters consomment 30 GW d'électricité, soit environ la production de 30 centrales nucléaires.[2] Avec le développement du Cloud computing, on s'attend à ce que cette consommation augmente fortement.

2.4 La fabrication

En plus de la consommation en fonctionnement, les équipements TIC consomment de l'énergie pour leur fabrication. Plus le réseau est dense et plus le nombre de requêtes est grand dans un datacenter et plus il faut fabriquer d'équipement. A titre d'exemple, une étude interne d'Orange a calculé qu'il fallait 14 GJ pour fabriquer un serveur X série 336. En plus de cette consommation d'énergie, il faut ajouter la consommation de ressources non renouvelables comme les métaux précieux et les terres rares (EcoInfo, 2012).

De même pour les équipements individuels, on estime à presque 1 MWh d'énergie consommée pour fabriquer un PC (Williams, 2004), ce qui impliquerait que pour une durée de vie de 3 ans, l'énergie de fabrication du PC est deux fois plus grande que l'énergie consommée en fonctionnement. Le renouvellement rapide des équipements contribue à une augmentation de la consommation de fabrication des équipements.

3. Les méthodes actuelles d'évaluation de l'impact des TIC et leurs difficultés

3.1 Les méthodes utilisées pour les différents équipements

Diverses méthodes pour évaluer la consommation de certains équipement existent, mais elles sont parcellaires et ciblent bout par bout les éléments permettant les services TIC. On peut citer par exemple

- Le label « Energy Star » attestant des économies d'énergie des équipements des particuliers
- Les différentes méthodes pour évaluer la performance des datacenters. Des efforts sont faits pour diminuer le Power Usage Effectiveness (PUE) des datacenters, c'est-à-dire diminuer la consommation d'énergie non dédiée aux calculs proprement dits, car l'expression du PUE est

$$\frac{\text{Conso serveurs + Conso clim et auxiliaires}}{}$$

[2] http://www.nytimes.com/2012/09/23/technology/data-centers-waste-vast-amounts-of-energy-belying-industry-image.html?pagewanted=all&_r=0

Conso serveurs

- Les opérateurs proposent des évaluations de l'efficacité des équipements des réseaux en J/bit (à minimiser) ou en bit/J (à maximiser) (Bolla et al, 2011)

Des études ont été faites pour tenter de modéliser la consommation du réseau dans sa globalité (Baliga et al, 2011 ; Kilper et al, 2011 ; Souchon, 2008), mais avec des imprécisions et de nombreuses hypothèses. De même, il n'y a pas d'analyse globale du service, donc pas de possibilité d'évaluer le potentiel de substitution des services « matériels » par des services « immatériels ». Les Analyses de Cycle de Vie (ACV) tentent de répondre à ce problème.

3.2 Les Analyses de Cycle de Vie (ACV)

Le but d'une ACV est d'identifier les impacts d'un produit ou d'un service sur l'environnement. Elle fait une analyse des impacts de l'élément étudié « du berceau à la tombe », c'est-à-dire de l'extraction des matières premières des constituants jusqu'au traitement en fin de vie. L'analyse se fait suivant plusieurs étapes.

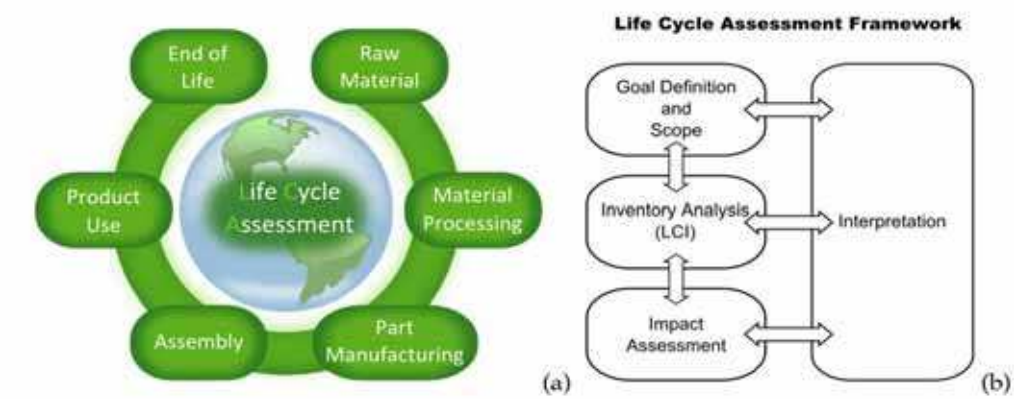

Figure 3 : Les différentes phases du cycle de vie d'un produit (à gauche) et les différentes étapes de l'ACV (à droite) (ISO 14044, 2006)

Différents impacts de pollution sont étudiés. On peut citer par exemple :

- Consommation de ressources (matière première, énergie, eau)
- Pollution air (gaz à effet de serre, ozone (déplétion et production d'ozone photochimique), toxicité, acidification)
- Pollution eau (toxicité, eutrophisation)
- Production de déchets dangereux

Elle permet d'identifier les sous-ensembles les plus impactants pour orienter le travail d'éco-conception pour diminuer les impacts en évitant les transferts de pollution. Elle doit également permettre de pouvoir comparer des produits entre eux, ce qui pourrait permettre au consommateur de faire des choix (et au producteur d'avoir un argument de marketing) et aussi de mettre en place une fiscalité écologique.

Afin d'harmoniser toutes les ACV, elles se basent sur des normes internationales : ISO 14040/14044, dont la mise en œuvre en France est garantie par l'ADEME et l'AFNOR. Dans le domaine des TIC, ces normes ont été adaptées dans la norme L.1410, qui cible les éléments spécifiques aux TIC et donne des solutions pour évaluer les impacts des réseaux hétérogènes et des services qui les utilisent.

3.3 Les limites de l'ACV

Malgré toutes les précautions prises pour évaluer au mieux les impacts répertoriés dans les ACV, les normes ISO 14040 et 14044 ont tout de même des lacunes. Tout d'abord, on peut lui reprocher son comportement « boite noire » : on rentre les hypothèses et les quantités utilisées dans un logiciel, qui utilise une base de données qui n'est pas directement apparente et qui donne le résultat. Ainsi, on peut se rendre compte que deux ACV d'un même produit faite avec les mêmes hypothèses mais avec des logiciels différents peuvent donner deux résultats très différents.

De plus, les incertitudes des bases de données sont mal maitrisées. Les logiciels et les normes ne proposent pas de méthode pour détecter les erreurs dans les bases de données ou les hypothèses peu probables.

Comme les calculs faits par le logiciel ne sont pas connus, nous sommes obligés pour l'optimisation de multiplier les scénarios afin de minimiser les impacts, au lieu de pouvoir cibler directement un paramètre. L'évaluation des impacts des services nécessite de nombreuses hypothèses d'utilisation du service, qui représentent souvent un scénario dit moyen, mais qui n'est pas forcément le scénario le plus fréquent.

L'Unité Fonctionnelle, qui est l'élément de structure du cadre de l'ACV, n'est pas adaptée pour un réseau hétérogène (la norme L.1410 permet de combler partiellement cette lacune) ni pour la substitution.

Pour les éléments multitâches, fréquents dans les télécommunications, il est difficile d'allouer les impacts correctement à chaque tâche. En effet, l'allocation est souvent sujette à des interprétations et des hypothèses.

4. La méthode développée par Orange et l'Université Paris Diderot pour faire face à ces difficultés

4.1 Présentation générale

La méthode utilisée pour la modélisation est celle développée par X. Chavanne et JP. Frangi pour les filières énergétiques (Chavanne et al, 2011), et en cours d'adaptation pour les services TIC depuis 2008 (Marquet et al, 2009).

Le principe de la méthode est d'étudier l'efficacité énergétique d'un système a travers de son taux de consommation R_X^{out}. Il s'agit du ratio de deux données qui doivent être mesurables :

- C_X le flux d'énergie consommé pour procurer une quantité de service ou d'objets. Par exemple, dans le cas de la fabrication des puces, nous pouvons prendre la consommation d'une usine de fabrication en un an, exprimée en Wh_e/an.
- F_{out} le flux de service rendu. Dans notre exemple, nous prenons la surface de puces produites durant un an exprimée en cm^2_{chip}/an.

$$R_X^{out} = C_X / F_{out}$$

Un système est souvent complexe et est constitué pas différents éléments, souvent très différents les uns des autres. Par conséquent, l'expression d'un taux global de consommation est aussi complexe, donc nous divisons le système étudié en sous-systèmes ou opérations

(**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Ces derniers peuvent être étudiés indépendamment les une des autres, et pour lesquelles nous avons des données établies provenant des industries, de données gouvernementales ou d'articles scientifiques.

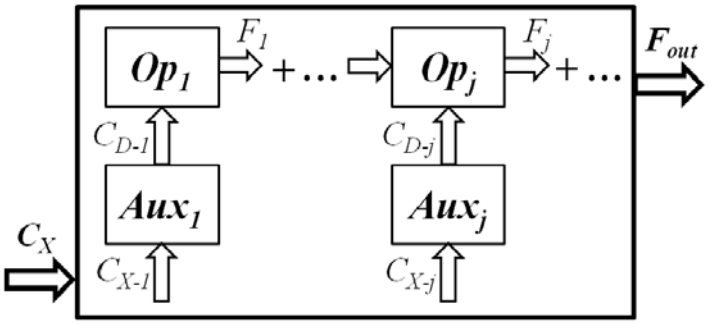

Figure 4 : Schématisation de la méthode développée par X. Chavanne et JP. Frangi. F_j est la quantité de service rendu par Op_j ; F_{out} est le flux de service du système entier ; C_{D-j} est la consommation directe de l'opération Op_j ; et C_X est la consommation totale nécessaire pour fournir le service (Chavanne et al, 2011)

Deux types de décompositions sont possibles :

- **Une décomposition en série** : Chaque opération Op_j a une fonction dédiée (par exemple, nous pouvons citer le système de conditionnement d'air d'une usine de lithographie), caractérisée par
  - Fj son flux caractéristique (dans notre exemple, c'est le volume d'air qui doit être traité proportionnellement à la surface de la salle blanche de l'usine de lithographie exprimée en m^2_{CR}).
  - C_{D-j} la consommation directe (par exemple, pour le conditionnement d'air, nous prendrons l'énergie fournie par la machine de production de froid (« chiller » en anglais) pour rafraichir l'air extérieur, exprimée en W_{th}).
  - De ces données, nous définissons le taux local de consommation de l'opération :

$$r_{D-j} = C_{D-j} / F_j$$

- **Une décomposition transverse** : la consommation directe peut être issue d'un système auxiliaire Aux_j (le chiller dans notre exemple), qui a sa propre consommation C_{X-j} (en pratique, il s'agit de la consommation électrique, et dans notre exemple, c'est la consommation d'électricité du chiller). Nous notons β_D^X le rendement de conversion du système auxiliaire (dans notre exemple, le coefficient de performance (COP) du chiller). Nous avons les relations

$$C_{X-j} = \beta_D^X * C_{D-j} \leftrightarrow r_{X-j} = \beta_D^X * r_{D-j}$$

Pour mettre en relation le taux de consommation d'une opération avec la consommation du service total, nous utilisons son poids w_j^{out} (par exemple la capacité de la salle blanche en termes de nombre de masques, donc d'opérations et de la surface possible à traiter, le tout exprimé en $cm^2_{in}.ML/m^2_{CR}$). Nous avons

$$w_j^{out} = F_j / F_{out}$$

Cette grandeur contiendra tous les paramètres et hypothèses chiffrés afin d'estimer au mieux d'impact d'une phase particulière du cycle de vie d'un produit ou service. Ensuite nous pouvons calculer le taux global de Opj et la consommation du système entier :

$$R_{X\text{-}j}^{out} = \beta_D^X * r_{D\text{-}j} * w_j^{out}$$

$$R_{X\text{-}j}^{out} = \Sigma_j R_{X\text{-}j}^{out}$$

Chaque sous-système peut être lui-même très complexe et re-décomposé à son tour.

4.2 Application à un service télécom

4.2.1 Première étude

Nous avons étudié la consommation énergétique d'un service de partage de documents. L'écran de l'ordinateur de l'organisateur est projeté grâce à un logiciel spécifique sur l'écran des autres participants. Entre temps, l'information a circulé dans les réseaux de télécommunications et a été traitée par des serveurs.

Parallèlement, le présentateur doit pouvoir parler aux autres participants via son téléphone. S'il n'a qu'un seul interlocuteur, un simple appel suffit, mais s'il en a plusieurs, il est nécessaire d'appeler un « pont audio » qui est un serveur qui va gérer les différentes voix.

Les flux d'information sont schématisés dans la figure ci-dessous.

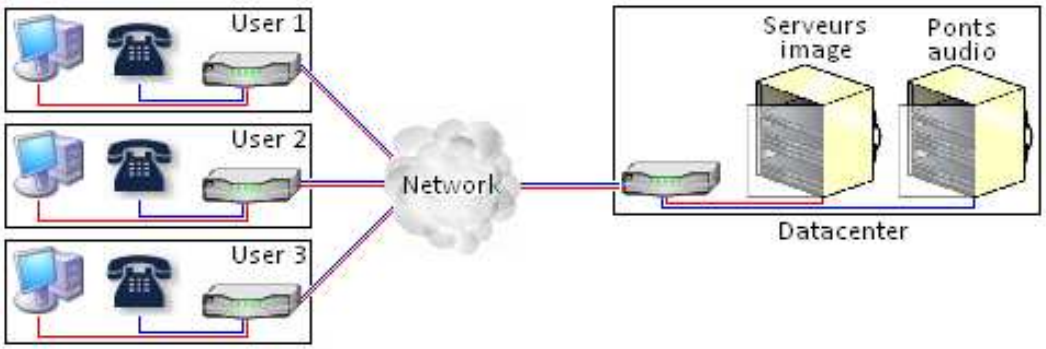

Figure 5 : Schématisation du service de téléréunion étudié. En rouge nous avons le flux de données et en bleu le flux audio

Dans ce cas de figure, nous séparons le service en trois parties :

- la partie « utilisateur », composée du téléphone, de l'ordinateur et de l'écran
- la partie « réseau », qui transmet l'information
- la partie « datacenter », où sont traitées les informations

L'étude complète est actuellement en cours d'acceptation et ne peut pas être complètement dévoilée (Chavanne et al, 2013). Nous détaillerons tout de même le cas des serveurs image afin d'expliquer l'application de la méthode et nous présenterons les résultats généraux.

Les serveurs consomment 24h/24, 7j/7, et toujours la même puissance qu'il soit en pleine charge ou en « idle » : 170 W. Nous considérerons que son taux local de consommation est la puissance consommée.

$$r_{e\text{-}serv} = 170\ W_e/serv = 170\ Wh_e/(h_{serv}.serv)$$

Le but étant de connaitre la consommation par conférence, nous allons multiplier la valeur ci-dessus par le poids des serveurs dans une conférence :

$$w_{serv}\ (h_{serv}.serv/conf) = \frac{N_{serv}(serv)*t_{on}(h_{serv}/week)*PUE}{N_{conf}(conf/week)}$$

En multipliant ces deux valeurs, nous obtenons le taux global de consommation des serveurs $R_{e\text{-}serv}$ exprimé en Wh_e/conf. Le Tableau 1 montre l'influence du paramètre du temps d'allumage des serveurs. Nous voyons que si nous éteignons les serveurs la nuit et le week-end, donc si le temps d'allumage passe de 168 heures par semaine à 60, nous passons de 156 Wh_e par conférence à 56.

D'autres scénarios ont été étudiés afin de voir l'influence d'autres paramètres sur le taux global de consommation des différents éléments, ils sont résumés dans le

Tableau 2.

Tableau 1 : présentation de deux cas d'utilisation des serveurs pour illustrer l'influence du scénario sur w_{serv} et $R_{e\text{-}serv}$

	Cas de base	Cas alternatif
Nombre de serveurs $N_{serv}(serv)$	35	35
Temps d'allumage $t_{on}(h_{serv}/week)$	168	**60**
Nombre de conférences $N_{conf}(conf/week)$	11500	11500
PUE	1.8	1.8
$w_{serv}(h_{serv}.serv/conf)$	0.92	**0.33**
$R_{e\text{-}serv}$ (Wh_e/conf)	156	**56**

Tableau 2 : Consommation des différents éléments en Wh_e/conf

SCENARIO	**Util.**	**Réseau**	**Data center**	**TOTAL**	**Econ.par rap. à ref.**
Référence : PC « standard » ; PUE = 1.8 ; allumage 7j/7 et 24h/24	625	1	156	782	
Tablette au lieu de PC (1)	**40**	1	156	197	75 %
PUE = 1.3 (2)	625	1	**113**	739	5.6 %
Allumage 5j/7 et 12h/24 (3)	625	1	**56**	682	13 %
Tablette (1) + Allumage 5j/7 et 12h/24 (3)	**40**	1	**56**	97	88 %
Tablette (1) + PUE = 1.3 (2) + Allumage 5j/7 et 12h/24 (3)	**40**	1	**40**	81	90 %

4.2.2 Deuxième étude plus poussée prenant en compte la fabrication

Une étude plus poussée a été menée pour évaluer plus précisément la consommation du service, en prenant en compte aussi la fabrication. Les éléments étudiés sont schématisés dans la Figure 6. La consommation de ces éléments rapportée à un utilisateur et une heure de conférence.

Nous constatons que, dans un scénario classiquement utilisé pour les ACV, plus de la moitié de la consommation du service est due à la fabrication du PC. Parmi les 1000 kWh nécessaires pour fabriquer un PC, environ la moitié est imputable à la fabrication des semi-conducteurs (RAM et processeurs principalement) (Williams, 2004).

Figure 6 : éléments étudiés dans la deuxième étude

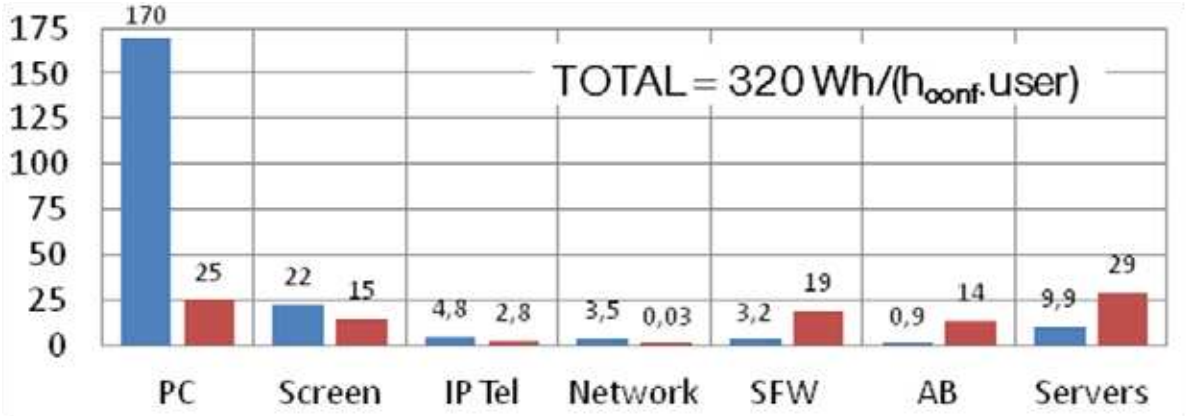

Figure 7 : Consommation des différents éléments. En bleu : consommation d'investissement (principalement la fabrication). En rouge : consommation en utilisation

Une étude plus poussée de la fabrication des semi-conducteurs donne une consommation de 51 $Wh_e/(cm^2_{in}.ML)$, soit 51 Wh par unité de surface de silicium et par masque, caractéristique de sa complexité (Schinella, 2013). On ajoute à cette énergie la consommation de purification du Silicium de 1 kWh_e/cm^2_{in} et l'énergie d'assemblage des puces de 1 kWh_e/cm^2_{in} et (Williams, 2002).

Le Tableau 3 récapitule la consommation des différentes étapes de la fabrication des semi-conducteurs dans un PC. Nous avons donc calculé que l'énergie de fabrication des semi-conducteurs est d'environ 50 kWh et non 500 kWh comme dit précédemment. Nous constatons donc une surestimation d'un facteur 10, et on peut se poser la question de la surestimation de la consommation de fabrication des autres éléments du PC.

Tableau 3 : Consommation de la fabrication des semi-conducteurs

	Taux local	RAM	CPU
Surface (cm²)		15	1.0
Nombre de masques		20	40
Purification	1.0 kWh_e/cm^2_{in}	15 kWh_e	1.0 kWh_e
Lithographie	51 $Wh_e/(cm^2_{in}.ML)$	15.3 kWh_e	2.0 kWh_e
Assemblage	1.0 kWh_e/cm^2_{in}	15 kWh_e	1.0 kWh_e
TOTAL		45.3 kWh_e	4.0 kWh_e
		49.3 kWh_e	

L'étude a également permis de mettre en avant les paramètres essentiels de la consommation de l'étape de lithographie : le taux de production des puces par rapport à la capacité, le climat du lieu d'implantation de l'usine et la filtration des particules (Schinella, 2013).

5. Conclusion et perspectives

Cette méthode a permis de mettre en avant les paramètres conditionnant la consommation d'un service TIC et d'avoir une évaluation plus précise et plus explicite que les méthodes précédemment existantes. Nous avons également pu mettre en évidence la possibilité de trouver des erreurs géantes.

Cette méthode est complémentaire aux ACV, car elle présente

- Des équivalences par rapport à l'ACV : étude du cycle de vie entier, définitions de frontières du système, étude sommaire liminaire
- Des avantages par rapport à l'ACV : affranchissement de l'unité fonctionnelle, moins opaque, règles de vérification
- L'ACV présente aussi des avantages par rapport à notre méthode : bases de données très fournies, nombreux indicateurs de pollution différents

Après les études faites par Schinella (2013) et Chavanne (2013), la suite du développement de la méthode se fera à travers de la consommation en utilisation des parties les plus consommatrices en intégrant des leviers d'action. L'idée d'étudier un autre service est également soulevée.

L'étude de la substitution doit également être menée pour évaluer l'impact positif des TIC. Pour ce faire, une étude des transports doit être faite à l'ordre 1 pour évaluer leur impact. Cependant, il conviendra également de tenir compte de l'effet rebond, qui est « l'augmentation de consommation liée à la réduction des limites à l'utilisation d'une technologie, ces limites pouvant être monétaires, temporelles, sociales, physiques, liées à l'effort, au danger, à l'organisation...» (Schneider, 2003). Ceci implique qu'il n'y a pas de remplacement d'une réunion physique par une téléréunion, tout comme un e-mail n'a pas pris la place d'une lettre. Pour ces deux exemples, on estime la multiplication par effet rebond par 3 et 100 respectivement.

D'autres effets négatifs sont à prendre en compte dans l'évaluation de la consommation : spams, vidéos incrustées, publicité sur certains sites internet… Les études futures devront également prendre en compte le cout énergétique des équipements « always on » et du remplacement rapide des équipement dits verts, qui induisent plus de consommation de fabrication.

Enfin, la résolution des problèmes d'éfficacité énergétique doivent s'accompagner de comportements qui veillent à ne pas ajouter les services les uns aux autres au lieu de les remplacer, comme ce fut le cas pour la micro-informatique par rapport à l'automobile (Figure 1).

Bibliographie

Baliga, J., Ayre, R. W., Hinton, K., & Tucker, R. S. (2011). Green cloud computing: Balancing energy in processing, storage, and transport.*Proceedings of the IEEE*, *99*(1), 149-167.

Bolla, R., Bruschi, R., Davoli, F., & Cucchietti, F. (2011). Energy efficiency in the future internet: a survey of existing approaches and trends in energy-aware fixed network infrastructures. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*,*13*(2), 223-244.

Chavanne, X., & Frangi, J. P. (2011). Comparison of the energy efficiency to produce agroethanol between various industries and processes: Synthesis. *Biomass and Bioenergy*, *35*(7), 2737-2754.

Chavanne, X., Schinella, S., Marquet, D., Frangi, J. P., Le Masson, S. (2013). Electricity consumptions during a telemeeting. *Science of the Total Environment*. (to be published)

EcoInfo CNRS (2012). Impacts écologiques des technologies de l'information et de la communication

GeSI Smart 2020 (2008): Enabling the low carbon economy in the information age. Climate Group.

IEA (2012). Key world energy statistics.

IEA (2009). Gadgets and Gigawatts.

ISO 14044 (2006). Management environnemental -- Analyse du cycle de vie -- Exigences et lignes directrices

Kilper, D. C., Atkinson, G., Korotky, S. K., Goyal, S., Vetter, P., Suvakovic, D., & Blume, O. (2011). Power trends in communication networks. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, *17*(2), 275-284.

Marquet, D., Aubrée, M., Frangi, J. P., & Chavanne, X. (2009, May). Scientific methodology for Telecom services energy consumption and CO2 emission assessment including negative and positive impacts. In *Telecommunication-Energy Special Conference (TELESCON), 2009 4th International Conference on*(pp. 1-14). VDE.

Schinella, S., Chavanne, X., Marquet, D., Frangi, J. P., Le Masson S., Tanaka, T. (2013). Research on ICT service energy impact assessment method: how much energy to manufacture a chip. In *IEEE Kaleidoscope Conference*

Schneider, F. (2003). L'effet rebond. *L'Écologiste n°11 Octobre 2003, Vol 4, n°3, p45*

Souchon, L. (2008). TIC et Énergétique: Techniques d'estimation de consommation sur la hauteur, la structure et l'évolution de l'impact des TIC en France. *PhD book*.

Williams, E. D., Ayres, R. U., & Heller, M. (2002). The 1.7 kilogram microchip: Energy and material use in the production of semiconductor devices. *Environmental science & technology*, *36*(24), 5504-5510.

Williams, E. (2004). Energy intensity of computer manufacturing: Hybrid assessment combining process and economic input-output methods. *Environmental Science & Technology*, *38*(22), 6166-6174.