

Académie des technologies

---

Impact des TIC sur  
la consommation d'énergie  
à travers le monde

---

Rapport de l'Académie des technologies  
voté le 14 mai 2014

Imprimé en France  
ISBN: 978-2-7598-1781-8

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1<sup>er</sup> de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2015

## PRÉFACE

L'Académie des technologies examine régulièrement l'impact sociétal des technologies que nos industries mettent en œuvre et analyse leur impact dans divers domaines comme l'économie, les comportements sociaux ou environnementaux. Les technologies ne sont pas elles-mêmes isolées les unes des autres : elles agissent les unes sur les autres de façon complexe ; l'interaction des technologies de l'information et des communications (TIC) avec la consommation globale d'énergie en est un bon exemple avec les effets que ces technologies induisent comme le télétravail ou la gestion intelligente de l'énergie elle-même.

Mais au fur et à mesure que s'étend l'usage de l'informatique au sens large, sa consommation d'énergie électrique augmente tout naturellement, donnant lieu à des inquiétudes qui ont fait l'objet de différents rapports ou déclarations. En sens opposé, un nouveau domaine d'activité à la fois industriel et dans le monde de la recherche s'est progressivement développé : *le Green IT*.

Ainsi, dès la fin de l'année 2011 fut mis en place un groupe de travail animé par Erol Gelenbe, membre de l'Académie des technologies, pour éclairer et évaluer la part de la consommation d'énergie électrique qui résulte de l'usage de l'informatique et des télécommunications et pour suggérer, le cas échéant, des pistes de recherche qui pourraient limiter son augmentation, sans pour autant freiner le développement bénéfique des technologies de l'information.

Ce rapport voté par l'Assemblée générale de notre Académie est le résultat du travail qui s'est déroulé sur une période de deux ans et qui a permis la consultation de nombreux experts français et étrangers et l'analyse de documents abordant cette question, cités en référence. Ce rapport met en évidence la croissance modérée de la consommation d'énergie par les TIC, tente un chiffrage comparatif de leur effet par rapport à d'autres secteurs d'activité comme les transports et suggère quelques pistes de recherche et de développement qui pourraient encore limiter cette croissance sur les décennies à venir.

**Alain Bugat,**  
Président de l'Académie des technologies

# RÉSUMÉ

Ce rapport s'intéresse à l'impact des technologies de l'information et de la communication (TIC) sur la consommation énergétique de nos sociétés et aux émissions de gaz à effet de serre associées. Il vise à évaluer le bilan comptable imputable au secteur, en considérant les impacts générés pour le fonctionnement de ses différents appareils et infrastructures et les économies qu'il génère dans les autres secteurs d'activité.

Les TIC représentaient, en 2012, 4,7% de l'électricité consommée sur la planète et une empreinte carbone évaluée à 1,7% du total mondial (pour un périmètre des TIC comportant les équipements informatiques professionnels et grand public, les appareils et infrastructures de télécommunication et les *data centers*). Ces données s'inscrivent dans une tendance de hausse régulière et soutenue, mais dans des proportions moindres que la croissance des usages. Ce découplage traduit l'effet d'amortisseur des innovations technologiques développées par les industriels pour améliorer le rendement énergétique de leurs produits et équipements.

Les contributions des TIC à l'allègement de la facture énergétique et du bilan carbone des autres secteurs d'activité sont manifestes et appelées à s'intensifier dans le futur. Certains domaines d'application semblent particulièrement propices, notamment le secteur des transports, l'optimisation énergétique des bâtiments, les applications industrielles ou encore les procédures dématérialisées. Le présent rapport se penche notamment sur le cas du transport, qui bénéficie des apports du numérique au sein des véhicules (électronique embarquée et amélioration

des performances moteurs) et se place à l'échelle globale de la mobilité, avec la réduction ou l'optimisation des besoins de déplacements. La situation des États-Unis, où l'on constate un recul de l'automobile individuelle depuis une dizaine d'années, fournit un cadre pour comparer les économies de carburant liées à cette baisse avec la consommation des TIC, qu'il conduit à relativiser.

Le rapport dresse enfin la liste de pistes actuelles de recherches visant à de meilleures performances de l'informatique avec une consommation moindre en énergie.

Le bilan énergétique et carbone des TIC révèle, en conclusion, un solde nettement positif. Leur contribution aux efforts de réduction de la consommation énergétique des autres secteurs d'activité s'avère en effet largement supérieure aux impacts générés par leur usage.

# SOMMAIRE

- 01 Introduction**
- 05 Chiffres de consommation électrique  
des TIC pour la période 2007-2012
- 07 Prospective de la consommation énergétique due aux TIC**
- 11 Bilan énergétique des TIC**
- 15 L'exemple du transport**
- 19 Pistes de recherches**
- 21 Conclusions**
- 23 Remerciements**
- 25 Bibliographie**
- 27 Publications de l'Académie**



## INTRODUCTION

Ce rapport concerne l'étude de la consommation énergétique et des émissions de gaz à effet de serre résultant de l'usage des TIC. Il vise à l'évaluation du bilan du secteur sur ces deux critères, en intégrant ses contributions négatives (les impacts liés au fonctionnement de ses différents appareils et infrastructures) et positives (les gains générés par les TIC dans les autres secteurs d'activité). Le périmètre de l'étude ainsi délimité impose de rappeler, en préambule, les préceptes requis pour une évaluation environnementale complète, qui demande d'analyser l'ensemble des impacts environnementaux sur tout le cycle de vie du produit ou service étudié.

Selon un rapport du Gartner Group datant de 2007 [1], la consommation totale d'énergie dans les TIC évolue vers des chiffres très élevés et son impact carbone serait comparable à celui du transport aérien civil, soit près de 2 % du total des émissions de CO<sub>2</sub>.

La figure 1 du Gartner Group présente une projection en 2020 de ces tendances, où l'on représente la part qui correspond aux principaux secteurs des TIC, tandis que la figure 2 détaille l'évolution sur la période 2002-2020 de la part de ces différents secteurs sur l'impact CO<sub>2</sub>.

L'établissement du bilan carbone lié à l'usage des TIC peut se réduire, sans erreur significative, au calcul des émissions générées pour la production du courant d'alimentation de ses appareils et infrastructures (la consommation d'électricité étant, à de rares exceptions près, la seule cause d'émissions de gaz à effet de serre lors de la phase d'utilisation des TIC). Ceci n'inclut pas les dépenses énergétiques liées à la fabrication des appareils, ni celles induites par la récupération de matériels, qui, en général, n'ont qu'une durée de vie de quelques années. Pour une même énergie fournie, ces émissions dépendent de la source d'énergie primaire utilisée, et du mode de production de l'électricité. À l'échelle mondiale, on peut retenir, pour ordre de grandeur, que la production d'un kWh génère en moyenne 400 g de CO<sub>2</sub>.

En 2020, la consommation d'électricité des TIC à travers le monde pourrait être de l'ordre des 3 270 TWh/an, soit six fois la consommation électrique totale française en 2012. Pour une valeur moyenne de 400 g de CO<sub>2</sub> par kWh d'électricité (la moyenne européenne étant d'environ 370 g, beaucoup moins actuellement en France), ceci représenterait 1,3 Gt de CO<sub>2</sub>/an. Il s'agit là seulement d'un ordre de grandeur.

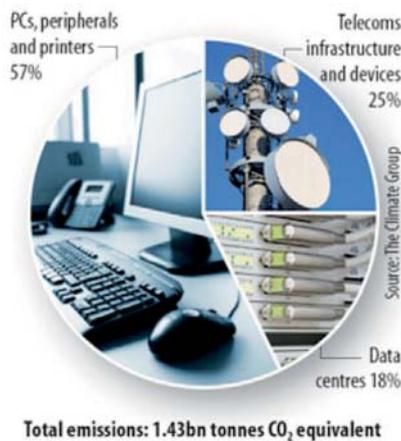


Figure 1 : Estimation et projection pour l'année 2020 de la part des émissions de CO<sub>2</sub> par secteur d'activité des TIC. On voit l'importance moindre des data centres (18 %) par rapport aux télécommunications (25 %) et à l'usage général de l'informatique (57 %).

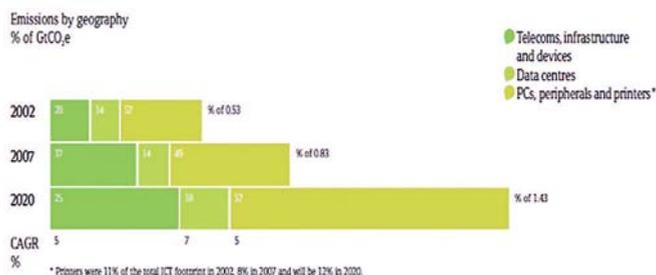


Figure 2 : Évolution de l'impact carbone (en milliards de tonnes équivalent CO<sub>2</sub>) de l'énergie consommée par les TIC, représentée en pourcentages par secteur d'activité : Télécommunications (vert), Centres de Données (Data Centers, vert clair) et Informatique générale et Bureau (jaune).

On peut penser que les TIC par eux-mêmes continueront à prendre une part croissante de la consommation d'énergie dans le monde encore pendant quelques décennies, du fait du développement économique et culturel dans les BRIC, l'Asie, l'Afrique et l'Amérique latine.

En effet, un autre rapport du Gartner Group qui concerne plus particulièrement l'Inde, indiquait que, partant en 2009 d'un montant total de 24 TWh d'électricité consommée dans les entreprises indiennes par les TIC, cette consommation pourrait atteindre 31 TWh en 2014. L'impact CO<sub>2</sub> pour ces mêmes besoins passerait alors de 20 à 25 Mt. Les secteurs des TIC qui sont concernés évolueraient en Inde de la même façon qu'au niveau mondial : en 2009 25 % de la consommation correspondait aux systèmes de télécommunications, tandis que 62 % pouvait être attribué à l'informatique courante (ordinateurs de bureau, matériel d'impression et de saisie, réseaux locaux).

Notons que l'usage des *data centers* est – en partie – la conséquence de certains usages individuels (Google, le commerce en ligne, les réseaux sociaux), tandis que pour une autre part (les activités des centres financiers, le *data mining*, les supercalculateurs) il s'agit d'usages professionnels spécifiques. Ceci est aussi vrai pour les télécommunications : l'Internet est utilisé comme une part intégrale des usages individuels (courrier, accès aux sites Web, réseaux sociaux), tandis que les réseaux mobiles sont soutenus par les stations de base hertziennes et les réseaux filaires (fibres optiques ou cuivre), avec leurs routeurs et commutateurs qui contribuent tous à la consommation d'énergie électrique.

## IDÉES REÇUES ET CONTRE-VÉRITÉS

Il y a dans l'opinion publique une véritable crainte, qui est alimentée par les prévisions de croissance exponentielle, telles que celles faites en 2007, et par un certain nombre d'articles à sensation, qui sont le plus souvent inexacts, mais qui frappent l'opinion avec des comparaisons marquantes. Dans le cas de *Second Life* (un jeu de réalité virtuelle en 3D qui était très populaire au début des années 2000), il a été affirmé qu'un « avatar » consommait plus d'énergie qu'un Africain et à peu près autant qu'un Brésilien (cf. le blog du médiatique Nicholas Carr). Ces calculs sont tout simplement faux, ils confondent le nombre d'avatars (de l'ordre de 10 millions) et le nombre de connections simultanées (de l'ordre de 10 000). Le raisonnement correct serait de dire qu'une personne qui jouerait toute l'année, du matin au soir, consommerait alors l'équivalent d'un Brésilien. La consommation par avatar était en fait mille fois plus faible que suggéré par ce blog. Dans le cas de Google, il y a eu beaucoup de discussions à l'époque où les chiffres étaient tenus secrets. Aujourd'hui, pour fixer les idées, on estime la consommation totale des *data centers* de Google à 2 TWh/an, pour une puissance installée de 260 MW [2], qui correspond approximativement à 1,3 millions de serveurs (200 W par serveur). Seule une petite partie de cette consommation (de l'ordre de 5 %) est utilisée pour la recherche (un des services parmi Gmail, YouTube, etc.) et on considère qu'une recherche (répartie entre 1 000 serveurs, pour obtenir une latence inférieure à 200 ms) consomme 0,3 Wh [2]. C'est à peu près la consommation d'un PC pendant les 10 secondes nécessaires pour poser la question et lire le résultat. Dans le cas de Facebook, la consommation totale de ce service est de l'ordre de 0,5 TWh/an, ce qui représente à peu près 500 Wh/an par utilisateur. Si l'on prend en compte l'utilisation moyenne de Facebook (de l'ordre de 20 h par mois, avec une distribution assez resserrée par pays, le Canada étant en tête à plus de 40 h), on obtient une puissance consommée de 2 W pendant l'utilisation, à rapporter à l'utilité du service pour ses utilisateurs.

## CHIFFRES DE CONSOMMATION ÉLECTRIQUE DES TIC POUR LA PÉRIODE 2007-2012

Les chiffres du Gartner Group méritent d'être examinés à la lumière du rapport plus détaillé produit par le projet européen (D8.1) du réseau d'excellence sur la « science de l'Internet » EINS [3].

La consommation totale mondiale du secteur des TIC y est évaluée à 920 TWh en 2012, soit 4,7% du total mondial de 19 500 TWh de la consommation électrique. Ceci correspond approximativement à 530 Mt de CO<sub>2</sub>, soit 1,7% du total mondial des émissions de GES (31 Gt en 2012). Il faut se rappeler [4] [5] que l'électricité représente 15% de l'énergie finale consommée mais 37% de l'émission de CO<sub>2</sub> [6]. Si l'on se réfère à l'empreinte des TIC par rapport à la demande énergétique, on obtient pour l'Europe le chiffre de 1,6% [7].

Pour comprendre le périmètre de ce qui est placé dans les TIC, la figure 3, extraite du document de l'EINS [3], représente la consommation par secteur des TIC. Alors que le Gartner group cité dans l'introduction utilise une définition restrictive du syntagme *data center* (les grands centres du *Cloud* fournissant des services gratuits ou payants), le rapport cité ici utilise une définition assez extensive : tous les centres de calculs au-delà de la bureautique, d'où un pourcentage d'incidence doublé. Les *data centers* selon cette définition représentent aujourd'hui à peu près un tiers de ce total, les équipements personnels représentant un autre tiers, et les réseaux de communication fournissant le dernier tiers. Ceci permet de retrouver le chiffre d'environ 1,5% de la consommation électrique pour les *data centers* en 2012.

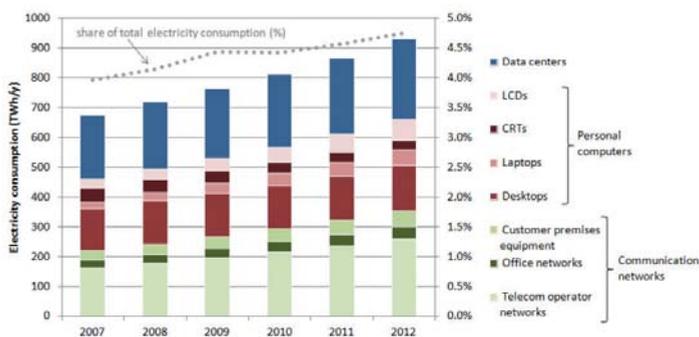


Figure 3: (Figure 3.1 du rapport [3]) Utilisation mondiale de l'électricité pour les différents secteurs des TIC, ainsi que la part totale dans la consommation sur la période 2007-2012 [4,7% en 2012].

D'autres rapports utilisent un périmètre encore différent. Dans le rapport remis au gouvernement français en 2008 [4], les téléviseurs, les imprimantes, et d'autres appareils sont inclus dans le périmètre des TIC, ce qui explique un chiffre plus important de 13 % de la consommation électrique française, et une part des *data centers* minorée : moins de 1 % de la consommation française.

## PROSPECTIVE DE LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE DUE AUX TIC

L'année 2007 n'a pas été choisie au hasard, car elle correspond à une période de forte médiatisation des questions relatives à l'explosion de la consommation d'énergie des TIC. Les prévisions formulées à cette époque méritent d'être relativisées à l'aune des travaux plus récents menés sur le sujet, dont les conclusions se révèlent plus modérées. Cela vaut pour la projection du Gartner Group évaluant la consommation des TIC à 3 270 TWh en 2020, une valeur qui semble aujourd'hui largement surestimée par rapport à la consommation de 920 TWh constatée en 2012.

Dans son rapport paru en 2010 [8], Jonathan G. Koomey trouve que la consommation des *data centers* a augmenté de 56 % en 5 ans, à comparer avec l'augmentation de 36 % pour l'ensemble de la consommation électrique des TIC aux États-Unis. Avec des chiffres plus récents, le rapport précédemment cité de l'EINS considère que la part des TIC dans la consommation électrique est passée de 4 % en 2007 à 4,7 % en 2012. Autrement dit, on constate une croissance régulière et soutenue, mais pas l'augmentation « exponentielle » crainte par certains, que

l'on peut illustrer avec une citation de l'organisation GreenTouch : « *ICT consumes relatively little energy, but usage is exploding* ».

Cette croissance seulement régulière et soutenue de la part des TIC dans la consommation électrique globale est paradoxale dans la mesure où les besoins explosent et continueront à croître très rapidement dans les 10 ans à venir s'ils sont mesurés en fonction du trafic dans les réseaux mobiles et fixes. Il est important de comprendre ce qui produit l'augmentation de cette consommation.

La figure 4 représente de façon schématique la « chaîne de consommation » des TIC dans les *data centers*. Elle illustre par le changement de couleur le fait qu'une augmentation forte de la demande est amortie par différents progrès technologiques pour ne produire qu'une croissance modérée de la consommation électrique.

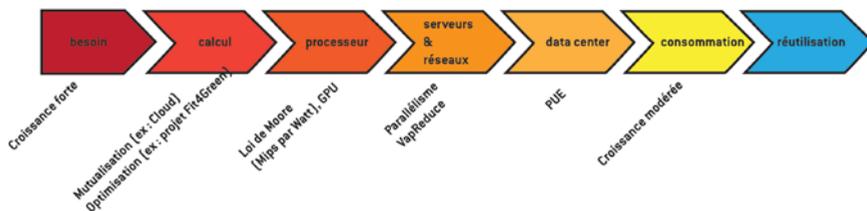


Figure 4: De l'usage à la consommation électrique des *data centers*.

En reprenant chacun des « maillons » dans l'ordre, nous pouvons dire que :

- ▶ l'augmentation des besoins est alimentée par celle de la puissance des machines (les terminaux comme les serveurs), de la capacité des réseaux et de la fraction de la population mondiale qui utilise ces services ;
- ▶ l'utilisation du *cloud computing* favorise la mutualisation des ressources de calcul et évite les *data centers* qui fonctionnent parfois (presque) « à vide ». Certains projets de recherche s'intéressent à l'optimisation énergétique des calculs et des opérations ;
- ▶ le progrès technologique fait que l'augmentation de la puissance de calcul ne se traduit pas mécaniquement par la même augmentation de la consommation, ainsi que l'illustre la courbe de « puissance de calcul par watt » reproduite dans la figure 5. En effet, la capacité de calcul pour un watt consommé était cinq fois plus importante en 2012 qu'en 2008. L'évolution des architectures, comme l'utilisation des GPU (Graphical

Processing Unit) au lieu des CPU (Computing Processing Unit) est un exemple d'architecture qui permet de faire certains types de calculs avec un meilleur rendement énergétique ;

- ▶ la parallélisation massive des traitements est une tendance de fond de l'informatique, puisque le progrès de la « loi de Moore » ne s'exprime plus en termes de fréquence d'horloge (pendant longtemps, le progrès a consisté à faire tourner les CPU de plus en plus vite), mais en terme d'intégration (de plus en plus de cœurs de calcul sur une puce) ; nous faisons référence ici à la constatation empirique de l'augmentation exponentielle continue de la puissance des machines depuis 40 ans, et non à la formulation précise de Gordon Moore. Cette parallélisation est exigeante puisqu'il faut programmer différemment, mais elle est plus efficace d'un point de vue énergétique ;
- ▶ les *data centers* progressent en termes de rendement énergétique, qui est mesuré par le PuE (*Power usage Effectiveness*), le ratio de l'énergie consommée pour le traitement informatique sur l'énergie totale, incluant le refroidissement et les opérations. Cette optimisation technologique est très en vogue depuis quelques années et participe de la démarche du *Green IT*. Nous aurons gagné presque un facteur deux en 10 ans, mais nous approchons du ratio de un pour les meilleurs *data centers* (Google, Facebook) ;
- ▶ la piste de la réutilisation de la chaleur produite par le calcul est intéressante, surtout s'il se confirme qu'une partie des calculs sont « déplaçables dans le temps/asynchrones ». Il existe déjà des exemples de réutilisation de la chaleur produite par les serveurs, mais le fait de disposer de « calculs intermittents » permet de les coupler avec des besoins intermittents ou des sources d'énergie intermittente (solaire ou éolienne).

Ce raisonnement s'applique en partie aux équipements terminaux (smartphones, tablettes, PC) et aux équipements réseaux, puisque la technologie permet d'obtenir des performances de plus en plus grandes par Watt utilisé (cf. figure 5). L'argument de mutualisation s'applique en partie pour les réseaux, pour lesquels le *cloud* joue un rôle de plus en plus important. Il ne s'applique pas au contraire pour les équipements, puisqu'il est facile de prévoir que le nombre d'objets informatiques connectés ou embarqués (*embedded*) par habitant va continuer à augmenter.

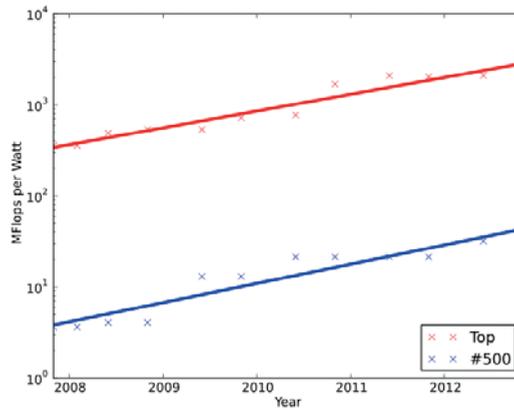


Figure 5: «Loi de Moore» projetée en Mflops/Watt (Wikipedia).  
(1 Mflops = 1 million d'opérations par seconde).

Le fait que la croissance de la consommation énergétique, des TIC en général et des *data centers* en particulier, soit plus modérée que ce que l'on pouvait supposer en 2007 ne doit pas cacher l'ampleur de la facture associée et son importance dans le modèle d'affaires des *data centers*. Le prix de l'électricité est un paramètre stratégique pour leur développement, et donc pour celui du *cloud computing*. Les États-Unis, qui s'appuient sur la production des hydrocarbures non-conventionnels, ont baissé très considérablement le coût de l'électricité proposée aux *data centers* depuis quelques années (on estime le coût du MWh proposé à 40 à 60 \$ selon les États, soit 40 % de moins qu'en Angleterre et 70 % de moins qu'en Allemagne). Ces baisses de coût donnent lieu à une relocalisation importante des *data centers*.

## BILAN ÉNERGÉTIQUE DES TIC

Il est évident que la crise économique que nous avons traversée ces dernières années, surtout dans les pays les plus développés, peut avoir réduit la consommation d'énergie dans les transports et l'industrie, ou au moins diminué sa croissance, et ce fait pourrait biaiser nos tentatives d'évaluer les liens pouvant exister entre l'extension de l'usage des TIC et les économies d'énergie dans d'autres secteurs d'activité économique, sociale et industrielle. En outre, l'augmentation très significative du prix de l'essence et des produits pétroliers, y compris aux États-Unis, a été de nature à dissuader l'usage des moyens de transport individuels et donc à freiner l'augmentation de la consommation d'énergie dans ce secteur.

Pour évaluer l'empreinte des TIC sur la consommation énergétique, il faut se poser deux questions :

- ▶ quelle est la part des TIC dans la création de valeur de l'industrie et des services ?
- ▶ quelle est la part des TIC dans la réduction de la consommation énergétique ?

La première question dépasse le cadre de ce rapport. Elle fait l'objet de nombreux débats, mais il est clair que les TIC contribuent pour une part importante

à l'économie moderne, part qui semble à première vue supérieure aux quelques pourcent de leur consommation explicitée dans la première section concernant son impact sur l'empreinte CO<sub>2</sub> de sa propre consommation d'énergie.

La seconde question fait l'objet de nombreuses études depuis quelques années.

Le WWF a produit un rapport en 2008 [9] qui évalue la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> grâce aux TIC à 4 Gt pour un scénario médian en 2030 (un scénario pessimiste sur l'utilisation des TIC dans les domaines « smart » – cf. plus loin – donne 1 Gt, un scénario optimiste donne 8 Gt).

Les cinq domaines principaux dans lesquels les TIC permettent de réduire les émissions de GES de 4 Gt sont plus précisément :

- ▶ l'informatique embarquée dans les véhicules et l'optimisation globale du transport (1,5 Gt). Ce domaine est l'un des plus importants, nous allons y revenir un peu plus loin ;
- ▶ l'e-commerce et l'industrie dématérialisée (0,9 Gt), et aussi l'administration dématérialisée ;
- ▶ l'utilisation des TIC dans le secteur de l'énergie et dans l'industrie, par exemple au moyen de l'effacement (0,8 Gt) ;
- ▶ l'utilisation des TIC dans les logements existants pour optimiser la consommation (0,5 Gt) ;
- ▶ l'utilisation des TIC dans les nouveaux bâtiments (0,4 Gt).

On retrouve aussi les nouveaux domaines *smart* (*Smart car*, *Smart home*, *Smart Grid*, *Smart City*), appelés à se déployer rapidement.

Pour analyser la contribution des TIC à l'allègement de la facture énergétique et du bilan carbone des autres secteurs d'activité, la plupart des travaux menés sur le sujet retiennent la réduction des gaz à effet de serre comme unité de mesure. Elle présente l'intérêt de pouvoir intégrer les économies d'énergie permises par les TIC sous leurs différentes formes (économies d'électricité, de carburant, de combustible divers...). On peut également lire dans ce choix l'importance actuelle accordée au thème du réchauffement climatique.

Plus récemment [10], le GeSI (*Global e-Sustainability Initiative*) s'est livré au même exercice. Avec un périmètre élargi pour définir les TIC et une approche plus volontariste, il aboutit à une réduction des émissions mondiales de GES de 9 Gt en 2020. À titre de comparaison, la répartition par domaines serait la suivante :

- ▶ transport (1,9 Gt) ;
- ▶ énergie (2 Gt) ;
- ▶ agriculture (1,6 Gt) ;
- ▶ construction/logements (neuf & ancien) (1,6 Gt) ;
- ▶ industrie (manufacturing) (1,3 Gt) ;
- ▶ services (0,7 Gt).

En conséquence du périmètre élargi pour définir les TIC, le rapport évalue l'émission de GES des TIC en 2011 à 0,9 Gt, qui augmenterait à 1,3 Gt en 2020 (une augmentation modérée en ligne avec l'analyse de la section précédente). Le chiffre de 0,9 Gt (comparé à celui de 0,5 que nous avons cité précédemment) s'explique par la vision plus large du périmètre des TIC.

Quel que soit le scénario retenu (de 4 à 9 Gt, en 10 ou 20 ans), le bilan carbone des TIC est donc favorable, puisque la réduction rendue possible par eux dépasse très largement l'émission globale liée à leur utilisation.



## L'EXEMPLE DU TRANSPORT

Plusieurs études américaines concernant les transports en voiture individuelle [11] [12] [13] montrent que depuis 2007 les conducteurs américains se déplacent moins en voiture. Le nombre moyen de kilomètres parcourus par un Américain au volant aurait décliné d'environ 7 % sur les huit dernières années, contrairement aux 60 années précédentes où l'on a observé une croissance constante de cet indice. Ainsi, la distance moyenne parcourue aux États-Unis en véhicule individuel par personne et par an est passée de 8 700 à 16 100 km entre 1970 et 2007 (+ 85 %), tandis qu'elle a diminué depuis 2007 pour n'atteindre que 15 000 km en 2012 (- 7 %).

Les Américains dans leur ensemble auraient effectué 10 % de plus de déplacements par les transports en commun en 2011 par rapport à 2005 et les déplacements à vélo et à pied auraient également augmenté.

En particulier, les individus plus jeunes prendraient plus souvent les transports en commun, obtiendraient moins souvent leur permis de conduire (alors qu'avant c'était systématique) et seraient moins enclins à utiliser une voiture individuelle [12]. En effet, en 2012 les conducteurs représentaient 49 % de la population de plus de 16 ans, contre 61 % en 2005. Précisons encore que dans la tranche d'âge des 16–34 ans, le nombre de kilomètres effectués en voiture a diminué de 23 %

en 2009 par rapport à 2001. Il est clair que désormais les plus jeunes conduisent moins que par le passé.

Y a-t-il relation de cause à effet entre cette diminution des déplacements motorisés individuels et l'usage des moyens informatiques ? On note effectivement au moins une corrélation. Ce groupe d'âge représente aussi celui qui adopte le plus facilement les TIC ainsi que le télétravail, la téléformation, la téléconférence, les réseaux sociaux et le commerce en ligne. On observe aussi que ceux qui utilisent le plus l'Internet sont en même temps ceux qui se déplacent le moins en voiture. En 2012, l'Institut de recherche sur les transports de l'université du Michigan [13] a aussi constaté que les jeunes obtiennent moins de permis de conduire que les générations précédentes.

Ces observations laissent donc penser que les TIC peuvent déjà avoir eu un effet sur la réduction des dépenses d'énergie, au moins en matière de transports individuels, dans certains des pays les plus développés.

D'autres facteurs sont bien sûr aussi à prendre en compte dans la réduction des dépenses d'énergie. En effet, la demande de mobilité aux États-Unis sur la période considérée a aussi été sensible à une augmentation importante des prix des carburants depuis 2004 et à la crise des subprimes en 2008. En effet, le prix du pétrole est passé de 25 \$/baril en 2004 à 148 \$/baril en juillet 2008. Ceci s'est traduit par une augmentation du prix des carburants à la pompe particulièrement significative aux États-Unis, compte tenu du montant faible des taxes sur les carburants dans ce pays. Cette augmentation des prix à la pompe a pesé sur la consommation de carburants. En outre, la crise des subprimes en 2008 a eu un impact sur les revenus disponibles des ménages qui a pesé sur la demande de mobilité.

À ces dimensions énergétique et économique, s'ajoute une dimension sociologique supplémentaire à celle déjà évoquée pour les individus de 16 à 34 ans. D'une part, la croissance de la population urbaine réduit la demande de mobilité individuelle. D'autre part, la voiture perd progressivement dans les pays industrialisés l'image symbolique qu'elle avait, après la guerre, d'accès à un statut social et à la liberté. D'une certaine façon, le téléphone portable et Internet remplacent la voiture pour la génération Y dans les pays industrialisés. Il est à noter que dans les pays émergents tels que la Chine, la possession d'une voiture a cette dimension symbolique qu'elle a perdue progressivement dans les pays développés.

Ainsi les déterminants de la demande de mobilité sont multiples : le développement des TIC est sans doute un des éléments qui pèse déjà, au moins

dans des pays comme les États-Unis et qui sera amené à peser encore plus à l'avenir.

### UNE TENTATIVE DE CHIFFRAGE

Par un calcul préliminaire prudent relatif aux ordres de grandeur de l'effet que nous venons de décrire et portant sur un volume de 100 millions d'individus réduisant leur kilométrage annuel de 1 100 km grâce aux TIC et dont les véhicules auraient une consommation moyenne de 5 litres pour cent kilomètres, nous arrivons à une économie de 5,5 milliards de litres d'essence par an, soit 13,2 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>, en utilisant un rapport de 2,4 Kg de CO<sub>2</sub> par litre d'essence.

Pour comparer avec l'informatique, on constate que sur 240 journées de travail par an, à hauteur de 4 heures d'utilisation journalière d'un ordinateur à 55 W, un ordinateur de bureau consommera 52 kWh d'électricité par an, soit (à 400 g de CO<sub>2</sub> par kWh, ce qui est proche de la moyenne européenne) 20,8 kg de CO<sub>2</sub> par ordinateur individuel et par an.

En considérant que ces 100 millions d'individus utilisent tous un ordinateur individuel, on pourrait estimer que 13,2 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> pourraient avoir été économisées aux États-Unis sur des voitures individuelles au prix de 2,08 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> dépensées pour le fonctionnement des ordinateurs, auquel il convient d'ajouter l'énergie consommée en communications et en *data centers* pour soutenir les ordinateurs (ainsi que les mobiles des mêmes individus).

En supposant donc que ces 2,08 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> représentent environ 50 % du total de la production de CO<sub>2</sub> qui résulte de l'usage informatique de ces 100 millions d'individus (cf. figure 1), nous arrivons à une dépense d'environ 4,16 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> qui pourraient contribuer à une économie de 13,2 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>.

Mais, à ce bilan, on pourrait (devrait) aussi ajouter l'énergie utilisée pour fabriquer ces 100 millions d'ordinateurs, plus les tablettes (et les mobiles) qui sont tout aussi complexes même si elles sont moins volumineuses, et aussi les effets induits par le renouvellement des équipements et les conséquences sur l'environnement de la récupération des restes des matériels informatiques.



## PISTES DE RECHERCHES

Il existe des pistes de recherche prometteuses pour arriver à de meilleures performances de l'informatique avec une consommation moindre en énergie, notamment :

- ▶ la conception d'équipements informatiques qui minimisent l'énergie consommée pour la mise en sommeil et le réveil des équipements ;
- ▶ les recherches visant à minimiser ou à éliminer l'énergie perdue lors du passage du courant alternatif au courant continu pour l'alimentation des équipements ;
- ▶ l'identification de la charge optimale des équipements en fonction de la qualité de service voulue et de leur consommation d'énergie [14] ;
- ▶ la conception de topologies de réseaux qui minimisent l'énergie consommée pour une charge de trafic donnée, tout en assurant à la fois une haute fiabilité et une qualité de service acceptable [15] [16] ;
- ▶ la gestion dynamique du niveau d'activité (y compris le sommeil) des équipements, en fonction de leur charge, et la gestion dynamique des apports d'énergie aux équipements en fonction de leurs besoins [17] ;
- ▶ la gestion dynamique d'ensemble des *data centers* dans les « nuages » pour répartir la charge en tenant compte aussi bien de la qualité de service que de la consommation d'énergie [18] ;

- ▶ l'étude de dispositifs de *Energy harvesting* et de leur effet sur l'efficacité des systèmes informatiques et de communication [19] ;
- ▶ l'optimisation d'algorithmes, de logiciels et d'architectures, pour minimiser leur consommation d'énergie sans mettre en cause leur efficacité et leur fiabilité [20] [21] [22] ;
- ▶ le choix d'architectures de mémoire et de stockage de données qui optimisent l'énergie consommée pour le stockage, la recherche et le transfert des informations.

Ceci sans oublier les efforts à poursuivre dans tous les domaines applicatifs. Ainsi, il sera utile d'approfondir les travaux sur l'impact des TIC dans le transport en tenant compte des dimensions énergétique, économique et sociologique, mais aussi dans la conception et l'optimisation du fonctionnement des éco-quartiers, etc.

## CONCLUSIONS

Ce rapport a mis en évidence que « par usage et par personne », la consommation des TIC en énergie électrique est modique. Nous notons aussi que les TIC peuvent induire des économies d'énergie dans d'autres secteurs (par exemple les transports, y compris une plus grande efficacité énergétique des voitures individuelles, l'optimisation globale de l'utilisation des réseaux via les *smart grids*<sup>1</sup>). En effet, les économies par transfert sont réelles dans certains secteurs, mais mal évaluées dans leur ensemble. En outre, la récupération de la chaleur émise par les équipements informatiques constitue une piste qui permettrait d'amplifier ce transfert.

Aussi, malgré les efforts importants faits dans l'industrie et dans certains établissements universitaires et publics, les impacts de la récupération et du recyclage du matériel informatique ne sont pas encore bien appréhendés et mériteraient plus d'efforts.

<sup>1</sup> Sujet qui fait l'objet de nombreuses études puisque central pour la meilleure utilisation possible des sources d'énergie intermittentes.

Mais, dans son ensemble, la facture énergétique des TIC reste élevée et devrait encore augmenter avec l'extension des usages et la croissance du nombre d'utilisateurs, ceci malgré la poursuite des gains de productivité énergétique de l'informatique (loi de Moore, mise en sommeil et réveil dynamique des équipements). L'énergie a donc un impact économique important sur les Télécoms et les *data centers*. Pour ces derniers, des gains d'efficacité ont déjà été effectués et se poursuivront. Dans les Télécoms, et aussi dans les secteurs d'usage courant, il reste encore beaucoup de progrès à faire d'autant que l'extension des réseaux mobiles vers la 5G demandera une densification des stations de base pour assurer une couverture efficace dans des environnements offrant, comme les grandes villes, beaucoup d'obstructions à la propagation des ondes hertziennes.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Muriel Beauvais et Alain Brenac ainsi qu'Alain Pouyat et Gérard Roucairol de l'Académie des technologies, pour leurs contributions importantes aux travaux qui ont mené à ce rapport. Ils remercient aussi Yves Bamberger et Olivier Appert de l'Académie des technologies pour leurs remarques judicieuses, ainsi qu'Adrien Chiodo pour l'attention et le soin qu'il a apporté à l'amélioration de la rédaction et à la présentation de ce rapport. Ils sont reconnaissants au Comité des travaux et au Comité de la qualité de l'Académie des technologies pour leurs commentaires utiles et pertinents. Enfin, ils remercient les experts extérieurs qui ont bien voulu participer à certaines réunions du groupe de travail Eco-TIC, notamment Mmes Anne Benoit et Anne-Cécile Orgerie, et MM. Giorgio Da Costa, Jean-Marc Ducos, Andy Hopper, Yacine Kessaji, Laurent Lefevre, Thomas Ludwig, Jean-Marc Menaud et Jean-Michel Rodriguez.



## BIBLIOGRAPHIE

1. Gartner, Inc. "Gartner Estimates {ICT} Industry Accounts for 2 Percent of Global CO<sub>2</sub> Emissions", <http://www.gartner.com/it/page.jsp?id=503867>, 2007.
2. James Gland : Google Details, and Defends, its use of Electricity. *New York Times*, Septembre 2011.
3. Overview of ICT energy consumption (D8.1) – Report FP7-2888021, European Network of Excellence in Internet Science, February 2013, The EINS Consortium.
4. H. Breuil, D. Burette, B. Flüry-Herard, J. Cueugnet, D. Vignolles, : Rapport *TIC et Développement durable*, Décembre 2008.
5. *2012 Key World Energy Statistics*, International Energy Agency,
6. Comparison of Lifecycle GreenHouse Gas Emissions of Various Electricity Generation Sources, Word Nuclear Association, Juillet 2011. [http://www.world-nuclear.org/uploaded-Files/org/WNA/Publications/Working\\_Group\\_Reports/comparison\\_of\\_lifecycle.pdf](http://www.world-nuclear.org/uploaded-Files/org/WNA/Publications/Working_Group_Reports/comparison_of_lifecycle.pdf)
7. L. M. Hilty, V. Coroama, M. Ossés de Eicker, T. F. Ruddy, E. Müller,] The Role of ICT in Energy Consumption and Energy Efficiency. FP7-ICT-2007-2 Project, ICT- Ensure, EMPA, 2009.
8. Growth in data center electricity use 2005 to 2010, J. G. Koomey, Stanford, August 2011, *A report by Analytics Press, completed for The New York Times*.
9. The potential global CO<sub>2</sub> reductions from ICT use. *WWF*, Mars 2008.

10. GeSI SMARTer 2020 : The Role of ICT in Driving a Sustainable Future. Global e-Sustainability Initiative (GeSI) and Boston Consulting Group (BCG), December 2012.
11. <http://advisorperspectives.com/dshort/charts/indicators/miles-driven.html?miles-driven-CNP160V-adjusted.gif>
12. <http://uspimg.org/reports/usp/new-direction>
13. M. Spivak, University of Michigan Transportation Research Center, [deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/86680/102764.pdf;jsessionid=F1303CFE5D5F5198B27BF2F568FDD572?sequence=4](http://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/86680/102764.pdf;jsessionid=F1303CFE5D5F5198B27BF2F568FDD572?sequence=4).
14. E. Gelenbe, R. Lent : Trade-offs between energy and quality of service. *SustainIT* 2012 : 1-5.
15. G. Sakellari, C. Morfopoulou, Toktam Mahmoodi, Erol Gelenbe : Using Energy Criteria to Admit Flows in a Wired Network. *SCIS* 2012 : 63-72.
16. E. Gelenbe, C. Morfopoulou : A Framework for Energy-Aware Routing in Packet Networks. *Comput. J.* 54 (6) : 850-859, 2011.
17. E. Gelenbe : Energy packet networks : smart electricity storage to meet surges in demand. *SimuTools* 2012 : 1-7, 2012.
18. E. Gelenbe, R. Lent, Markos Douratsos : Choosing a Local or Remote Cloud. *NCCA* 2012 : 25-30, 2012.
19. Erol Gelenbe, Deniz Gündüz, Haluk Kulah Elif Uysal-Biyikoglu : Energy Harvesting Communication Networks : Optimization and Demonstration - The E-CROPS Project. 24th TIWDC 2013 "Green ICT", *IEEEExplore* Sept. 23 - 25, 2013, Genes.
20. G. Aupy, A. Benoit, F. Dufossé, Y. Robert : Reclaiming the energy of a schedule : models and algorithms. *Concurrency and Computation : Practice and Experience* 25 (11) : 1505-1523 (2013).
21. M. Diouri, G. Tsafack Chetsa, O. Glück, L. Lefevre, J.-M. Pierson, P. Stolf, G. Da Costa : Energy efficiency in HPC with and without knowledge on applications and services. *International Journal of High Performance Computing Applications*, Sage Publisher, 27 : 232-243, 2013.
22. A.-C. Orgerie, M. Dias de Assunção, L. Lefèvre : A Survey on Techniques for Improving the Energy Efficiency of Large Scale Distributed Systems. *ACM Computing Surveys*, 46 (4), 2014.

## PUBLICATIONS DE L'ACADÉMIE

Les travaux de l'Académie des technologies sont l'objet de publications réparties en quatre collections<sup>1</sup> :

- ▶ Les rapports de l'Académie : ce sont des textes rédigés par un groupe de l'Académie dans le cadre du programme décidé par l'Académie et suivi par le Comité des travaux. Ces textes sont soumis au Comité de la qualité, votés par l'Assemblée, puis rendus publics. On trouve dans la même collection les avis de l'Académie, également votés en Assemblée, et dont le conseil académique a décidé de la publication sous forme d'ouvrage papier. Cette collection est sous couverture bleue.

<sup>1</sup> - Les ouvrages de l'Académie des technologies publiés entre 2008 et 2012 peuvent être commandés aux Éditions Le Manuscrit (<http://www.manuscrit.com>). La plupart existent tant sous forme matérielle que sous forme électronique.  
- Les titres publiés à partir de janvier 2013 sont disponibles en librairie et sous forme de ebook payant sur le site de EDP sciences (<http://laboutique.edpsciences.fr/>). À échéance de six mois ils sont téléchargeables directement et gratuitement sur le site de l'Académie.  
- Les publications plus anciennes n'ont pas fait l'objet d'une diffusion commerciale, elles sont consultables et téléchargeables sur le site public de l'Académie [www.academie-technologies.fr](http://www.academie-technologies.fr), dans la rubrique « Publications ». De plus, l'Académie dispose encore pour certaines d'entre elles d'exemplaires imprimés.

- ▶ Les communications à l'Académie sont rédigées par un ou plusieurs Académiciens. Elles sont soumises au Comité de la qualité et débattues en Assemblée. Non soumises à son vote elles n'engagent pas l'Académie. Elles sont rendues publiques comme telles, sur décision du Conseil académique. Cette collection est publiée sous couverture rouge.
- ▶ Les « Dix questions à... et dix questions sur... » : un auteur spécialiste d'un sujet est sélectionné par le Comité des travaux et propose dix à quinze pages au maximum, sous forme de réponses à dix questions qu'il a élaborées lui-même ou après discussion avec un journaliste de ses connaissances ou des collègues (Dix questions à...). Ce type de document peut aussi être rédigé sur un thème défini par l'Académie par un académicien ou un groupe d'académiciens (Dix questions sur...). Dans les deux cas ces textes sont écrits de manière à être accessibles à un public non-spécialisé. Cette collection est publiée sous une couverture verte.
- ▶ Les grandes aventures technologiques françaises : témoignages d'un membre de l'Académie ayant contribué à l'histoire industrielle. Cette collection est publiée sous couverture jaune.
- ▶ Par ailleurs, concernant les Avis, l'Académie des technologies est amenée, comme cela est spécifié dans ses missions, à remettre des Avis suite à la saisine d'une collectivité publique ou par auto saisine en réaction à l'actualité. Lorsqu'un avis ne fait pas l'objet d'une publication matérielle, il est, après accord de l'organisme demandeur, mis en ligne sur le site public de l'Académie.
- ▶ Enfin, l'Académie participe aussi à des co-études avec ses partenaires, notamment les Académies des sciences, de médecine, d'agriculture, de pharmacie...

Tous les documents émis par l'Académie des technologies depuis sa création sont répertoriés sur le site [www.academie-technologies.fr](http://www.academie-technologies.fr). La plupart sont peuvent être consultés sur ce site et ils sont pour beaucoup téléchargeables.

Dans la liste ci-dessous, les documents édités sous forme d'ouvrage imprimé commercialisé sont signalés par une astérisque. Les publications les plus récentes sont signalées sur le site des éditions. Toutes les publications existent aussi sous forme électronique au format pdf et pour les plus récentes au format ebook.

**AVIS DE L'ACADÉMIE**

1. Brevetabilité des inventions mises en œuvre par ordinateurs : avis au Premier ministre – juin 2001
2. Note complémentaire au premier avis transmis au Premier ministre – juin 2003
3. Quelles méthodologies doit-on mettre en œuvre pour définir les grandes orientations de la recherche française et comment, à partir de cette approche, donner plus de lisibilité à la politique engagée ? – décembre 2003
4. Les indicateurs pertinents permettant le suivi des flux de jeunes scientifiques et ingénieurs français vers d'autres pays, notamment les États-Unis – décembre 2003
5. Recenser les paramètres susceptibles de constituer une grille d'analyse commune à toutes les questions concernant l'énergie – décembre 2003
6. Commentaires sur le Livre Blanc sur les énergies – janvier 2004
7. Premières remarques à propos de la réflexion et de la concertation sur l'avenir de la recherche lancée par le ministère de la Recherche – mars 2004
8. Le système français de recherche et d'innovation (SFRI). Vue d'ensemble du système français de recherche et d'innovation – juin 2004
  - Annexe 1 – La gouvernance du système de recherche
  - Annexe 2 – Causes structurelles du déficit d'innovation technologique. Constat, analyse et proposition.
9. L'enseignement des technologies de l'école primaire aux lycées – septembre 2004
10. L'évaluation de la recherche – mars 2007
11. L'enseignement supérieur – juillet 2007
12. La structuration du CNRS – novembre 2008
13. La réforme du recrutement et de la formation des enseignants des lycées professionnels – Recommandation de l'Académie des technologies – avril 2009
14. La stratégie nationale de recherche et l'innovation (SNRI) – octobre 2009
15. Les crédits carbone – novembre 2009
16. Réduire l'exposition aux ondes des antennes-relais n'est pas justifié scientifiquement : mise au point de l'Académie nationale de médecine, de l'Académie des sciences et de l'Académie des technologies – décembre 2009
17. Les biotechnologies demain – juillet 2010

18. Les bons usages du Principe de précaution – octobre 2010
19. La validation de l'Acquis de l'expérience (VAE) – janvier 2012
20. Mise en œuvre de la directive des quotas pour la période 2013–2020 – mars 2011
21. Le devenir des IUT – mai 2011
22. Le financement des start-up de biotechnologies pharmaceutiques – septembre 2011
23. Recherche et innovation : Quelles politiques pour les régions ? – juillet 2012
24. La biologie de synthèse et les biotechnologies industrielles (blanches) – octobre 2012
25. Les produits chimiques dans notre environnement quotidien – octobre 2012
26. L'introduction de la technologie au lycée dans les filières d'enseignement général – décembre 2012
27. Évaluation de la recherche technologique publique – février 2013
28. L'usage de la langue anglaise dans l'enseignement supérieur – mai 2013
29. La réglementation thermique 2012, la réglementation bâtiment responsable 2020 et le climat – novembre 2014
30. Les réseaux de chaleur – décembre 2014
31. Sur la loi relative à la « transition énergétique pour une croissance verte » – juin 2015
32. La fabrication additive – juin 2015

### **RAPPORTS DE L'ACADÉMIE**

1. Analyse des cycles de vie – octobre 2002
2. Le gaz naturel – octobre 2002
3. Les nanotechnologies : enjeux et conditions de réussite d'un projet national de recherche – décembre 2002
4. Les progrès technologiques au sein des industries alimentaires – Impact sur la qualité des aliments / La filière lait – mai 2003
5. \*Métrologie du futur – mai 2004
6. \*Interaction Homme-Machine – octobre 2004
7. \*Enquête sur les frontières de la simulation numérique – juin 2005

8. Progrès technologiques au sein des industries alimentaires – la filière laitière, rapport en commun avec l'Académie d'agriculture de France – 2006
9. \*Le patient, les technologies et la médecine ambulatoire – avril 2008
10. \*Le transport de marchandises – janvier 2009 (version anglaise au numéro 15)
11. \*Efficacité énergétique dans l'habitat et les bâtiments – avril 2009 (version anglaise au numéro 17)
12. \*L'enseignement professionnel – décembre 2010
13. \*Vecteurs d'énergie – décembre 2011 (version anglaise au numéro 16)
14. \*Le véhicule du futur – septembre 2012 (publication juin 2013)
15. \*Freight systems (version anglaise du rapport 10 le transport de marchandises) – novembre 2012
16. \*Energy vectors – novembre 2012 (version anglaise du numéro 13)
17. \*Energy Efficiency in Buildings and Housing – novembre 2012 (version anglaise du numéro 11)
18. \*Les grands systèmes socio-techniques / Large Socio-Technical Systems – ouvrage bilingue, juillet 2013
19. \* Première contribution de l'Académie des technologies au débat national sur l'énergie / First contribution of the national academy of technologies of France to the national debate on the Future of energies supply – ouvrage bilingue, juillet 2013
20. Renaissance de l'industrie : construire des écosystèmes compétitifs fondés sur la confiance et favorisant l'innovation – juillet 2014
21. Le Méthane : d'où vient-il et quel est son impact sur le climat ? – novembre 2014
22. Biologies blanches et biologie de synthèse (à paraître, 2015)
23. Impact des TIC sur la consommation d'Énergie à travers le monde – mai 2015
24. Le big data : un changement de paradigme peut en cacher un autre / Opportunités et menaces liées à l'émergence de nouveaux écosystèmes (à paraître novembre 2015)
25. Appropriation des technologies par la société (à paraître novembre 2015)
26. Le Biogaz (à paraître)

## **COMMUNICATIONS À L'ACADÉMIE**

1. \*Prospective sur l'énergie au XXI<sup>e</sup> siècle, synthèse de la Commission énergie et environnement – avril 2004, MàJ décembre 2004
2. Rapports sectoriels dans le cadre de la Commission énergie et environnement et changement climatique :
  - Les émissions humaines – août 2003
  - Économies d'énergie dans l'habitat – août 2003
  - Le changement climatique et la lutte contre l'effet de serre – août 2003
  - Le cycle du carbone – août 2003
  - Charbon, quel avenir ? – décembre 2003
  - Gaz naturel – décembre 2003
  - Facteur 4 sur les émissions de CO<sub>2</sub> – mars 2005
  - Les filières nucléaires aujourd'hui et demain – mars 2005
  - Énergie hydraulique et énergie éolienne – novembre 2005
  - La séquestration du CO<sub>2</sub> – décembre 2005
  - Que penser de l'épuisement des réserves pétrolières et de l'évolution du prix du brut ? – mars 2007
3. Pour une politique audacieuse de recherche, développement et d'innovation de la France – juillet 2004
4. \*Les TIC : un enjeu économique et sociétal pour la France – juillet 2005
5. \*Perspectives de l'énergie solaire en France – juillet 2008
6. \*Des relations entre entreprise et recherche extérieure – octobre 2008
7. \*Prospective sur l'énergie au XXI<sup>e</sup> siècle, synthèse de la Commission énergie et environnement, version française et anglaise, réactualisation – octobre 2008
8. \*L'énergie hydro-électrique et l'énergie éolienne – janvier 2009
9. \*Les Biocarburants – février 2010
10. \*PME, technologies et développement – mars 2010.
11. \*Biotechnologies et environnement – avril 2010
12. \*Des bons usages du Principe de précaution – février 2011
13. L'exploration des réserves françaises d'hydrocarbures de roche mère (gaz et huile de schiste) – mai 2011
14. \*Les ruptures technologiques et l'innovation – février 2012
15. \*Risques liés aux nanoparticules manufacturées – février 2012
16. \*Alimentation, innovation et consommateurs – juin 2012
17. Vers une technologie de la conscience – juin 2012
18. Les produits chimiques au quotidien – septembre 2012

19. Profiter des ruptures technologiques pour gagner en compétitivité et en capacité d'innovation – novembre 2012 (à paraître)
20. Dynamiser l'innovation par la recherche et la technologie – novembre 2012
21. La technologie, école d'intelligence innovante. Pour une introduction au lycée dans les filières de l'enseignement général – octobre 2012 (à paraître)
22. Renaissance de l'industrie : recueil d'analyses spécifiques – juillet 2014
23. Réflexions sur la robotique militaire – février 2015
24. Le rôle de la technologie et de la pratique dans l'enseignement de l'informatique (à paraître, 2015)

### **DIX QUESTIONS POSÉES À...**

1. \*Les déchets nucléaires – 10 questions posées à Robert Guillaumont – décembre 2004
2. \*L'avenir du charbon – 10 questions posées à Gilbert Ruelle – janvier 2005
3. \*L'hydrogène – 10 questions posées à Jean Dhers – janvier 2005
4. \*Relations entre la technologie, la croissance et l'emploi – 10 questions à Jacques Lesourne – mars 2007
5. \*Stockage de l'énergie électrique – 10 questions posées à Jean Dhers – décembre 2007
6. \*L'éolien, une énergie du XXI<sup>e</sup> siècle – 10 questions posées à Gilbert Ruelle – octobre 2008
7. \*La robotique – 10 questions posées à Philippe Coiffet, version franco-anglaise – septembre 2009
8. \*L'intelligence artificielle – 10 questions posées à Gérard Sabah – septembre 2009
9. \*La validation des acquis de l'expérience – 10 questions posées à Bernard Decomps – juillet 2012
10. Les OGM - 10 questions posées à Bernard Le Buanec - avril 2014

### **GRANDES AVENTURES TECHNOLOGIQUES**

1. \*Le Rilsan – par Pierre Castillon – octobre 2006
2. \*Un siècle d'énergie nucléaire – par Michel Hug – novembre 2009

### **HORS COLLECTION**

1. Actes de la journée en mémoire de Pierre Faure et Jacques-Louis Lions, membres fondateurs de l'Académie des technologies, sur les thèmes de l'informatique et de l'automatique – 9 avril 2002 avec le concours du CNES
2. Actes de la séance sur "Les technologies spatiales aujourd'hui et demain" en hommage à Hubert Curien, membre fondateur de l'Académie des technologies – 15 septembre 2005
3. Libérer Prométhée – mai 2011

### **CO-ÉTUDES**

1. Progrès technologiques au sein des industries alimentaires – La filière laitière. Rapport en commun avec l'Académie d'agriculture de France – mai 2004
2. Influence de l'évolution des technologies de production et de transformation des grains et des graines sur la qualité des aliments. Rapport commun avec l'Académie d'agriculture de France – février 2006
3. \*Longévité de l'information numérique – Jean-Charles Hourcade, Franck Laloë et Erich Spitz. Rapport commun avec l'Académie des sciences – mars 2010, EDP Sciences
4. \*Créativité et Innovation dans les territoires – Michel Godet, Jean-Michel Charpin, Yves Farge et François Guinot. Rapport commun du Conseil d'analyse économique, de la Datar et de l'Académie des technologies – août 2010 à la Documentation française
5. \*Libérer l'innovation dans les territoires. Synthèse du Rapport commun du Conseil d'analyse économique, de la Datar et de l'Académie des technologies. Créativité et Innovation dans les territoires Édition de poche – septembre 2010 – réédition novembre 2010 à la Documentation française
6. \*La Métallurgie, science et ingénierie – André Pineau et Yves Quéré. Rapport commun avec l'Académie des sciences (RST) – décembre 2010, EDP Sciences.
7. Les cahiers de la ville décarbonée en liaison avec le pôle de compétitivité Advancity
8. Le brevet, outil de l'innovation et de la valorisation – Son devenir dans une économie mondialisée – Actes du colloque organisé conjointement avec l'Académie des sciences le 5 juillet 2012 éditions Tec & doc – Lavoisier

9. Quel avenir pour les biocarburants aéronautiques ? – rapport commun avec l'Académie d'Air et de l'espace – juillet 2015
10. Déclaration conjointe de 4 Académies (Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, acatech-Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Académie des sciences, Académie des technologies) sur la transition énergétique en France et en Allemagne – juillet 2015