ÉNERGIE ET RADIOSCIENCES

Limites énergétiques et radiocommunications

Jean-Yves Baudais
CNRS, IETR, UMR 6164, F-35708 Rennes, France {jean-yves.baudais@insa-rennes.fr}

Mots clés : efficacité énergétique, modèle de communication (*energy efficiency, communication model*)

Résumé L'évaluation de la consommation d'énergie d'une radiocommunication nécessite de faire l'analyse du cycle de vie des éléments utilisés. Mais cette analyse ne nous dit rien sur les limites énergétique qu'il est possible d'envisager. Des approches théoriques permettent alors d'appréhender ces limites, connues dans des cas très variés de transmission d'information. Cependant, les réponses ne sont pas toujours satisfaisantes, notamment dans le cas de canaux de radiocommunications variant dans le temps. Après un exposé rapide de la notion de limite énergétique d'une radiocommunication, en commençant par une approche globale, nous montrons que, contrairement aux résultats publiés, la limite énergétique est toujours non nulle si les contraintes physiques sont correctement exprimées.

Abstract *The evaluation of the energy consumption of a radiocommunication requires to analyse the life cycle of the elements used. Howerver, this analysis does not specify the energetic limits. Theoretical approaches allow to draw these limits which are known in multiple cases of information transmission. However, the answers are not always satisfactory, in particular in the case of time varying channels. After a fast presentation of the notion of energetic limit of a radiocommunication, and beginning with a global approach, we show that, contrary to the published results, the energetic limit always differs from zero if the physical constraints are correctly expressed.*

1 Introduction

Évaluer la consommation énergétique d'une radiocommunication permettant l'échange d'information est un problème complexe qui dépasse le seul domaine d'activité des sciences et technologies de l'information et de la communication. Une telle évaluation, si nous la voulons complète, nécessite de faire l'analyse du cycle de vie de tous les éléments permettant de réaliser cette radiocommunication. Il est alors possible de calculer la contribution des flux d'énergie depuis l'extraction des matières premières qui composent les émetteurs-récepteurs jusqu'à leur élimination en fin de vie, en passant par les phases de distribution et d'utilisation [1]. L'évaluation de l'énergie consommée par l'analyse du cycle de vie, ou énergie grise, peut alors aider à identifier les améliorations possibles des performances énergétiques des produits et services. Cette évaluation est *technologique* dans la mesure où elle est liée à une réalisation. Les évolutions technologiques, prédites par les conjectures de Moore et leurs corollaires [2] peuvent alors aider à prédire les réductions de la consommation d'énergie. Cependant, ni ces conjectures, ni même le concept de singularité technologique [3], ne bornent les évolutions. Nous pouvons alors nous demander si les améliorations engendrées ont une limite et quelle est, pour ce qui est de l'énergie qui nous intéresse, la consommation minimale ?

Des réponses partielles à cette question existent déjà dans des cas très variés. Cependant, ces réponses ne sont pas satisfaisantes dans le cas de canaux de radiocommunications variant dans le temps. Après un exposé rapide de la notion de limite énergétique d'une radiocommunication, nous montrons que la limite énergétique est toujours non nulle si les contraintes physiques sont correctement exprimées.

2 Quelles limites ?

Si les innovations technologiques successives semblent toujours repousser les limites envisagées par les technologies qui les précèdent, les futures limites envisagées sont, elles aussi, fortement liées à des processus technologiques [4]. L'établissement de limites fondamentales nécessite alors de s'affranchir de ces processus mais nécessite un cadre conceptuel. Bien évidemment, ce cadre conceptuel peut toujours devenir obsolète ou entrer en concurrence avec d'autres représentations [5].

Nous nous plaçons dans le cadre du paradigme de Shannon-Weaver illustré à la figure 1. L'envoie d'un message issu d'une source d'information nécessite au moins un émetteur, un canal de transmission à proprement parler

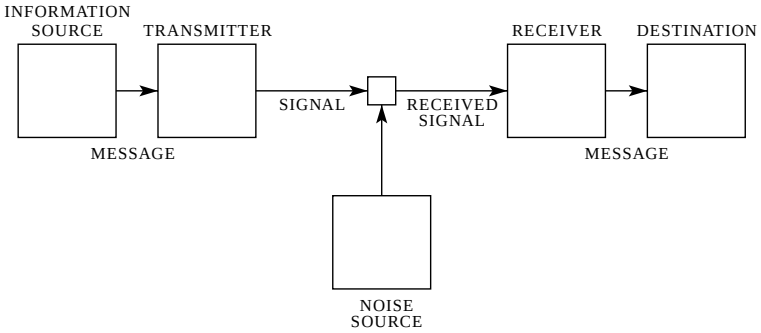

FIGURE 1 – Paradigme de Shannon-Weaver, in [6].

et un récepteur. Les limites énergétiques peuvent alors être formulées de la façon suivantes : quelle énergie faut-il pour émettre, ou transmettre, et recevoir un bit d'information ? Nous sommes bien loin ici d'une consommation technologique telle qu'envisagée précédemment et faisant intervenir l'analyse du cycle de vie. La réponse à ces questions nous permet cependant d'établir les bornes théoriques que nous pouvons espérer approcher, en l'absence de limitations théoriques supplémentaires. En regroupant l'émetteur et le récepteur, nous obtenons l'énergie $\mathrm{E_{BB}}$ liée à l'informatique et correspondant au traitement en bande de base (calcul, traitement de l'information, mesure ou préparation du signal porteur d'information) que nous distinguons de l'énergie $\mathrm{E_{RF}}$ liée à la communication à proprement parler, ou transmission, et correspondant à la partie radiofréquence. Nous avons alors d'un côté la relation de Shannon-von Neumann-Landauer qui fixe la plus petite énergie pour traiter un bit lors d'une opération irréversible [7]

$$\varepsilon_{\mathrm{BB}} = \min \mathrm{E_{BB}} = k\mathrm{T}\ln 2\,, \tag{1}$$

avec k la constante de Boltzmann en J/K et T la température en Kelvin. De l'autre, nous avons la relation de Shannon-Hartley [6] qui permet de calculer l'énergie par bit nécessaire à la transmission via un canal

$$\varepsilon_{\mathrm{RF}} = \min \mathrm{E_{RF}} = \lim_{\Delta f \Delta t \to \infty} \left(2^{\frac{1}{\Delta t \Delta f}} - 1\right) \Delta t \Delta f \, k\mathrm{T} = k\mathrm{T}\ln 2\,, \tag{2}$$

où $\Delta t \Delta f$ est l'espace temps-fréquence utilisé pour la transmission et kT est la densité spectrale de puissance du bruit. Cette limite est asymptotique. Elle est obtenue en supposant la conservation de l'énergie et un canal gaussien. Elle est également obtenue à partir du second principe de la thermodynamique, sans faire intervenir la notion de capacité d'un canal [5].

La limite énergétique est alors la même pour traiter et pour transmettre l'information. Concernant la transmission, l'expression précédente est donnée pour une radiocommunication en régime établi. Pour une durée finie de transmission et une contrainte d'énergie $\mathrm{E_{RF}} = \Delta t \mathrm{P}$, d'autres expressions de la capacité, différente de la relation de Shannon-Hartley, doivent être utilisées afin de fournir des expressions plus exactes. Cependant, les relations précédentes restent de bonnes approximations dans le cas ergodique et pour une quantité d'information largement supérieure à 1 [8].

3 Limites relatives et écoradio

Les deux relations (1) et (2) dépendent de la température T, c'est-à-dire que dans les deux cas il y a interaction avec l'environnement. La température de bruit peut être réduite à l'aide de système cryogénique [9], comme ce qui est fait pour des systèmes ou liaisons satellites. Nous pouvons donc conclure qu'il est possible de réduire $\varepsilon_{\mathrm{BB}}$ et $\varepsilon_{\mathrm{RF}}$ à des valeurs aussi faibles que souhaitées en réduisant T. La nouvelle question pourrait alors être quelle énergie faut-il pour isoler un système et réduire sa température de bruit ? Cependant, la conclusion de l'étude de la limite énergétique fondamentale est encore loin d'être tranchée. D'autres phénomènes et limites de la physique peuvent intervenir et conduire à une limite énergétique non nulle [4, 10, 11].

Les relations (1) et (2) donnent une base permettant de mesurer les efficacités énergétiques η_{BB} et η_{RF} d'un système de communication en contexte opérationnel. Pour un débit de transmission R, en bit/s, la puissance consommée en phase d'utilisation est

$$\mathrm{P} = \eta_{\mathrm{BB}}^{-1} \mathrm{R} \varepsilon_{\mathrm{BB}} + \eta_{\mathrm{RF}}^{-1} \mathrm{R} \varepsilon_{\mathrm{RF}}\,. \tag{3}$$

Pour que l'évaluation soit complète il faudrait y ajouter les autres flux d'énergie intervenant dans le cycle de vie des éléments de la transmission. En ne considérant que la phase d'utilisation, l'ordre de grandeur de η_{BB} est de 10^{-8} aujourd'hui, ce qui correspond à une puissance de calcul de quelques GFLOP/W des meilleurs calculateurs ou de

0,25 pJ/bit des meilleures transmissions sur puce [12]. Concernant η_{RF}, les données du projet EARTH conduisent à des valeurs comprises entre 10^{-17} et 10^{-13} [13]. Ce qui laisse plusieurs ordres de grandeur d'économie d'énergie possible.

L'objectif de l'écoradio est de « diminuer le niveau électromagnétique en envoyant le signal juste dans la bonne direction avec la puissance optimale, seulement quand c'est nécessaire et pour une même qualité » [14]. Dans le contexte énergétique et environnemental actuel et plutôt que de subir une efficacité énergétique, nous pouvons alors décider d'un point de fonctionnement défini par une efficacité énergétique et évaluer ce qu'il est possible de faire afin de proposer de nouveaux services [15].

4 Canaux linéaires variant dans le temps

Jusqu'à présent, la limite énergétique de la transmission a été rappelée pour un canal statique. Qu'en est-il des canaux dynamiques ? La limite ne concerne alors que celle décrite par (2).

4.1 Canaux de Rayleigh

La capacité ergodique a été étudiée dans le cas de canaux de Rayleigh, sans allocation de puissance [16] et avec allocation de puissance [17]. Cette capacité s'écrit

$$\mathrm{C(P)} = \max_{\mathrm{P}(\gamma)} \int \Delta f \log_2 \left(1 + \gamma \frac{\mathrm{P}(\gamma)}{\Delta f\, k\mathrm{T}}\right) f_\Gamma(\gamma)\mathrm{d}\gamma\,, \tag{4}$$

avec γ la variable aléatoire représentant les variations du canal de densité de probabilité f_Γ. Elle est telle que l'allocation de puissance $\mathrm{P}(\gamma)$ vérifie

$$\int \mathrm{P}(\gamma) f_\Gamma(\gamma)\mathrm{d}\gamma = \mathrm{P}\,, \tag{5}$$

où P est la contrainte de puissance. À noter que lorsqu'il n'y pas d'allocation de puissance, la solution est $\mathrm{P}(\gamma) = \mathrm{P}$. Il est possible d'en déduire l'énergie par bit nécessaire

$$\mathrm{E_{RF}} = \frac{\mathrm{P}}{\mathrm{C(P)}} \tag{6}$$

et la limite énergétique est obtenue en minimisant $\mathrm{E_{RF}}$ selon les variables du modèle, ici P, voire Δf.

Sans allocation de puissance, cette limite est toujours la valeur de ε_{RF} donné par (2). Cette valeur est également obtenue pour une large gamme de canaux [18]. Par contre, cette limite tend vers zéro avec allocation de puissance [19]. Autrement dit, il est *asymptotiquement* possible de transmettre une quantité d'information finie avec une énergie aussi faible que l'on veut si le canal est un canal de Rayleigh variant dans le temps. L'analyse de la solution montre que la puissance instantanée reçue est alors supérieure à la puissance instantanée émise. Ceci est un contresens physique dans la mesure où le canal est passif et dispersif. Cette observation implique de modéliser les variations du canal par une densité de probabilité à support borné afin d'évaluer correctement la limite énergétique.

4.2 Contrainte sur la puissance reçue

Sous contrainte de puissance instantanée reçue inférieure à la puissance instantanée émise et selon le principe du maximum d'entropie, la distribution qui maximise l'entropie du modèle de transmission est la distribution uniforme [20]. Sans allocation de puissance, la capacité ergodique est alors

$$\mathrm{C(P)} = \int_0^1 \Delta f \log_2 \left(1 + \gamma \frac{\mathrm{P}}{\Delta f\, k\mathrm{T}}\right) \mathrm{d}\gamma = \Delta f \left(1 + \frac{\Delta f\, k\mathrm{T}}{\mathrm{P}}\right) \log_2 \left(1 + \frac{\mathrm{P}}{\Delta f\, k\mathrm{T}}\right) - \frac{\Delta f}{\ln 2} \tag{7}$$

et l'énergie minimale consommée par bit

$$\min_{\{\mathrm{P},\Delta f\}} \mathrm{E_{RF}} = \lim_{\frac{\mathrm{P}}{\Delta f} \to 0} \frac{\mathrm{P}}{\mathrm{C(P)}} = 2k\mathrm{T}\ln 2\,. \tag{8}$$

La limite énergétique est ainsi le double de la valeur de ε_{RF} donnée par (2). Avec un modèle de transmission tel que la puissance moyenne reçue est P, la limite énergétique est alors la valeur de ε_{RF} donnée par (2).

Avec allocation de puissance et en suivant la méthode analytique développée dans [17], l'énergie consommée par bit est exprimée par

$$\mathrm{E_{RF}} = k\mathrm{T}\ln 2 \frac{\displaystyle\int_{\gamma_0}^1 \left(\frac{1}{\gamma_0} - \frac{1}{\gamma}\right) \mathrm{d}\gamma}{\displaystyle\int_{\gamma_0}^1 \ln \frac{\gamma}{\gamma_0} \mathrm{d}\gamma}\,. \tag{9}$$

Nous montrons alors que la limite est obtenue lorsque γ_0 tend vers la borne supérieure de l'intégrale, c'est-à-dire 1. La valeur minimale de (9) est alors

$$\min \mathrm{E_{RF}} = \lim_{\gamma_0 \to 1} \frac{\mathrm{P}}{\mathrm{C(P)}} = k\mathrm{T}\ln 2\,. \tag{10}$$

La valeur $\varepsilon_{\mathrm{RF}}$ donnée par (2) est retrouvée ici. La limite énergétique n'est donc pas nulle si la puissance instantanée reçue est inférieure à la puissance instantanée émise.

Le résultat (10) se généralise facilement à un support de distribution du modèle de transmission quelconque. Soit $[0, a]$ ce support, nous en déduisons alors, en généralisant (9),

$$\min \mathrm{E_{RF}} = k\mathrm{T}\ln 2 \lim_{\gamma_0 \to a} \frac{\displaystyle\int_{\gamma_0}^{a} \left(\frac{1}{\gamma_0} - \frac{1}{\gamma}\right) f_\gamma(\gamma)\mathrm{d}\gamma}{\displaystyle\int_{\gamma_0}^{a} \ln\frac{\gamma}{\gamma_0} f_\gamma(\gamma)\mathrm{d}\gamma} = k\mathrm{T}\ln 2 \lim_{\gamma_0 \to a} \frac{\left(\frac{1}{\gamma_0} - \frac{1}{a}\right) f_\gamma(a)}{\ln\frac{a}{\gamma_0} f_\gamma(a)} = \frac{k\mathrm{T}\ln 2}{a}\,. \tag{11}$$

Ce résultat montre que la limite énergétique dépend fortement du support de distribution utilisé pour modéliser la transmission. Si ce support est infini, la limite énergétique est alors nulle mais la puissance reçue est supérieure à la puissance émise. Avec un modèle ou la puissance reçue est inférieure à la puissance émise, c'est-à-dire $a < \infty$, alors la limite énergétique n'est pas nulle. Avec une puissance reçue inférieure à la puissance émise a est de plus inférieur à 1.

La limite énergétique d'un radiocommunication peut alors être déterminée par la sommation de (1) et (11).

5 Conclusion

Nos besoins en énergie pour soutenir ce qui est appelé le « progrès » ne cessent de grandir. Les conséquences sont aujourd'hui des émissions de CO2 qui, à moyen et long terme, semblent déstabiliser le climat terrestre. Les possibilités de réductions de la consommation des radiocommunications sont gigantesques au regard des limites énergétiques. Mais jusqu'où cette augmentation de la dégradation anthropique de l'énergie restera-t-elle compatible avec la stabilité du système thermodynamique terrestre ? Espérons que nos besoins nous laisserons le temps de développer des solutions durables pour une certaine stabilité de nos existences.

Références

[1] ISO 14014, *Management environnemental. Analyse du cycle de vie. Principes et cadre.* Comité technique ISO/TC 207, 2 éd., juil. 2006.

[2] B. Marr, B. Degnan, P. Hasler et D. Anderson, « Scaling energy per operation via an asynchronous pipeline », *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration Systems*, vol. 21, p. 147–151, jan. 2013.

[3] A. Eden, J. Moor, J. Soraker et E. Steinhart, « Singularity hypotheses: An overview », *in Singularity Hypotheses: A Scientific and Philosophical Assessment*, chap. 1, p. 1–12, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2012.

[4] I. Markov, « Limits on fundamental limits to computation », *Nature*, vol. 512, p. 147–154, août 2014.

[5] L. Levitin, « Energy cost of information transmission (along the path to understanding) », *Physica D: Nonlinear Phenomena*, vol. 120, p. 162–167, sept. 1998.

[6] C. Shannon, « A mathematical theory of communication », *The Bell System Technical Journal*, vol. 27, p. 379–423, 623–656, juil. 1948.

[7] S. Lloyd, « Ultimate physical limits to computation », *Nature*, vol. 406, p. 1047–1054, août 2000.

[8] Y. Polyanskiy, H. Poor et S. Verdú, « Channel coding rate in the finite blocklength regime », *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 56, p. 2307–2359, mai 2010.

[9] M. Klauda, T. Kasser, B. Mayer, C. Neumann, F. Schnell, B. Aminov, A. Baumfalk, H. Chaloupka, S. Kolesov, H. Piel, N. Klein, S. Schornstein et M. Bareiss, « Superconductors and cryogenics for future communication systems », *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 48, p. 1227–1239, juil. 2000.

[10] R. Landauer, « Energy needed to send a bit », *Proceedings of the Royal Society of London Series A*, vol. 454, p. 305–311, jan. 1998.

[11] L. Gammaitoni, D. Chiuchiú, M. Madami et G. Carlotti, « Towards zero-power ICT », *Nanotechnology*, vol. 26, p. 1–10, juin 2015.

[12] X. Yu, H. Rashtian, S. Mirabbasi, P. Pande et D. Heo, « An 18.7 Gb/s 60 GHz OOK demodulator in 65-nm CMOS for wireless network-on-chip », *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 62, p. 799–806, mars 2015.

[13] D. Zeller (coordinator) et M. Olsson (technical manager), « Energy aware radio and network technologies », FP7-ICT integrated project, European union, 2010–2012.

[14] J. Palicot et H. Zhang, « Cognitive radio for green communications and networking ». Advanced International Conference on Telecommunications, juin 2013.

[15] J.-Y. Baudais, A. Tonello et A. Hamini, « Energy efficient resource allocation for quantity of information delivery in parallel channels », *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. ??, p. ??, ?? (2014 online version, early view of record published before inclusion in an issue).

[16] W. Lee, « Estimate of channel capacity in rayleigh fading environment », *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 39, p. 187–189, août 1990.

[17] A. Goldsmith et P. Varaiya, « Capacity of fading channels with channel side information », *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 43, p. 1986–1992, nov. 1997.

[18] S. Verdú, « Spectral efficiency in the wideband regime », *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 48, p. 1319–1343, juin 2002.

[19] J.-Y. Baudais, « Relâchement temporel et économie d'énergie. un problème d'allocation des ressources ». Journée thématique du GdR-ISIS, écoradio, mai 2015.

[20] G. Bretthorst, « An introduction to model selection using probability theory as logic », *in Maximum Entropy and Bayesian Methods* (G. Heidbreder, éd.), vol. 62, chap. 1, p. 1–42, Kluwer Academic Publishers, 1996.