

Mises en Veille Dynamiques pour Minimiser la Consommation d'Énergie d'une Station de Base

Rémi BONNEFOI, Christophe MOY, Jacques PALICOT

CentraleSupélec/IETR, CentraleSupélec Campus de Rennes, 35510 Cesson-Sévigné, France
{remi.bonnefoi, christophe.moy, jacques.palicot}@centralesupelec.fr

Résumé – La mise en veille dynamique des stations de base (cell DTx en anglais) permet de réduire leur consommation d'énergie. Nous montrons, dans cet article, que lorsque ces veilles sont utilisées avec un contrôle de la puissance d'émission, il existe un compromis entre puissance instantanée et temps de veille qui permet de minimiser la consommation de la station de base. De plus, nous proposons un algorithme efficace utilisant des expressions analytiques pour trouver cet optimum. Nous montrons que pour des macro-cellules, la solution proposée permet de réduire la puissance moyenne consommée de 7W par rapport à une stratégie naïve. Cela représente 4% de l'énergie totale consommée par la station de base.

Abstract – Cell DTx can reduce a base station energy consumption. We show, in this paper, that when cell DTx and power control are used, there is a trade-off between the user's instantaneous transmit power and the time during which the base station has to be switched to sleep mode in order to minimize the base station energy consumption. Furthermore, we propose an efficient algorithm which allows to find this optimum. With the proposed solution, the average base station power consumption can be reduced by 7W compared to a naive strategy. This accounts for 4% of the total base station energy consumption.

1 Introduction

Les stations de base consomment aujourd'hui 50% de l'énergie totale des réseaux mobiles [1]. Par conséquent, une amélioration de leur efficacité énergétique aura un fort impact sur l'empreinte carbone des technologies de l'information et des communications (TIC).

La consommation des stations de base peut être diminuée grâce à des mécanismes de mise en veille [1]. Ces veilles peuvent se faire pendant de longues durées lorsqu'il n'y a pas d'utilisateurs dans la cellule. Une seconde solution consiste à mettre en veille dynamiquement la station de base pendant des temps très courts (de l'ordre de la milliseconde) [2]. Durant ces courtes veilles, certains éléments de la chaîne RF tels que l'amplificateur de puissance sont arrêtés.

Les premiers travaux sur les veilles dynamiques des stations de base ne considéraient pas l'allocation de puissance [3]. Lorsque les veilles dynamiques sont utilisées pour la voie descendante d'une station de base, il existe un compromis entre le temps pendant lequel la station de base sert un utilisateur et la puissance d'émission qui lui est allouée. En effet, plus un utilisateur sera servi avec une puissance d'émission instantanée élevée, plus le temps de veille sera long et vice-versa. Ce compromis, en accès multiple à répartition dans le temps (TDMA en anglais), a d'abord été étudié via des méthodes numériques [4, 5].

Dans cet article, nous étudions de manière analytique le compromis évoqué ci-dessus. Nous proposons un algorithme efficace s'appuyant sur des expressions analytiques qui permet

de trouver l'équilibre entre puissance instantanée et temps de veille et donc de minimiser la puissance consommée par la station de base.

2 Modèle et formulation du problème

Nous supposons une station de base servant N_u utilisateurs en TDMA. Dans chaque trame de longueur T , la station de base ajuste le temps de service t_i et la puissance d'émission P_{TX}^i de chaque utilisateur afin de minimiser sa consommation d'énergie tout en satisfaisant, pour chacun d'eux, une contrainte de débit (capacité) C_i :

$$C_i = B\mu_i \log_2 \left(1 + \frac{P_{TX}^i G_i}{B} \right) \quad (\text{bits/s}) \quad (1)$$

Dans cette équation, B est la bande passante, et $G_i = \frac{|h_i|^2}{N_0}$ désigne le gain de canal de l'utilisateur (comportant aussi le bruit thermique). Le rapport $\rho_i = \frac{P_{TX}^i G_i}{B}$ est le rapport signal à bruit (RSB) de l'utilisateur i . De plus $\mu_i = \frac{t_i}{T}$ représente la proportion de trame allouée à l'utilisateur i .

De plus, nous considérons un modèle linéaire pour la consommation de la station de base [6] :

$$\begin{cases} P_{cons} = P_0 + mP_{TX} & \text{si } 0 < P_{TX} \leq P_{max} \\ P_{cons} = P_s & \text{en veille} \end{cases} \quad (2)$$

Dans cette équation, P_0 est la puissance statique consommée par la station de base, m est le coefficient de proportionnalité de la puissance d'émission. P_s est la puissance consommée pendant les veilles. De plus, la puissance d'émission permettant

de satisfaire la contrainte de capacité d'un utilisateur peut être déduite de l'équation (1) :

$$P_{TX}^i = \frac{B}{G_i} \left(2^{\frac{C_i}{B\mu_i}} - 1 \right). \quad (3)$$

Pour minimiser l'énergie consommée par la station de base, nous minimisons la puissance moyenne consommée pendant une trame. Cette puissance moyenne est la somme de la puissance consommée lorsque la station de base est active et pendant les veilles. A partir de l'équation (2), on obtient :

$$P_m = \left(\sum_{i=1}^{N_u} \mu_i \right) P_0 + \left(1 - \sum_{i=1}^{N_u} \mu_i \right) P_s + mB \sum_{i=1}^{N_u} \mu_i \frac{1}{G_i} \left(2^{\frac{C_i}{B\mu_i}} - 1 \right) \quad (4)$$

La première ligne de cette équation (puissance statique moyenne) est minimisée en minimisant le temps de service. Au contraire, la seconde ligne (puissance dynamique moyenne) est minimisée en allongeant le temps de service. Résoudre ce problème revient donc à trouver un compromis entre ces deux puissances. La minimisation de P_m doit se faire en considérant les contraintes du système. En effet, la puissance d'émission doit être inférieure à la puissance d'émission maximale de la station de base et le temps de service des utilisateurs ne doit pas être plus long que la durée de la trame. Cette seconde contrainte s'écrit :

$$\sum_{i=1}^{N_u} \mu_i \leq 1 \quad (5)$$

Pour faciliter la résolution du problème, nous transformons la contrainte sur la puissance d'émission en une contrainte sur le temps de service. En effet, pour chaque utilisateur, avoir une puissance d'émission inférieure à P_{max} équivaut à avoir un temps de service supérieur à $\mu_{i min}$ défini comme suit :

$$\mu_{i min} = \frac{C_i}{B \log_2 \left(1 + \frac{P_{max} G_i}{B} \right)} \quad (6)$$

$\mu_{i min}$ est le temps qu'il faut pour servir un utilisateur avec la puissance maximale P_{max} . On en déduit la dernière contrainte de notre problème :

$$\mu_i \geq \mu_{i min} \quad \forall i \in \llbracket 1; N_u \rrbracket \quad (7)$$

Il a été prouvé dans [7] que ce problème est un problème convexe. Dans la suite de cet article, nous décrivons un algorithme efficace permettant de résoudre ce problème.

3 Algorithme

La convexité du problème nous permet d'utiliser les conditions de Karush-Kuhn et Tucker (KKT). D'après ces conditions, pour traiter ce problème, nous pouvons commencer par le résoudre sans considérer les contraintes. Si le résultat obtenu ne satisfait pas l'une des contraintes, le problème doit être résolu en la considérant comme saturée (comme une égalité). Dans la suite, nous proposons un algorithme qui permet de gérer efficacement les contraintes du problème.

Nous notons $\mu_{i opt1}$ la valeur de μ_i optimale sans contrainte. $\mu_{i opt1}$ est la valeur de μ_i pour laquelle la dérivée de P_m par rapport à μ_i est égale à 0. Elle s'exprime en utilisant la fonction W de Lambert [8] qui est la bijection réciproque de $x \mapsto xe^x$:

$$\mu_{i opt1} = \frac{C_i \ln(2)}{B} \frac{1}{\mathcal{W} \left(e^{-1} \left[\frac{G_i (P_0 - P_s)}{m} - 1 \right] \right) + 1}. \quad (8)$$

Une fois que cette expression a été dérivée, il faut vérifier que $\mu_{i opt1}$ est supérieur à $\mu_{i min}$. D'après les conditions de Karush-Kuhn et Tucker, si $\mu_{i opt1}$ est inférieur à $\mu_{i min}$ alors l'optimum est obtenu pour $\mu_i = \mu_{i min}$.

Il a été prouvé dans [9] que pour déterminer si un utilisateur doit être servi durant $\mu_{i min}$, il suffit de comparer ρ_i^M le RSB maximum de l'utilisateur qui est donné par :

$$\rho_i^M = \frac{P_{max} G_i}{B}, \quad (9)$$

avec un seuil ρ_{lim}^M dépendant uniquement de la variable :

$$r = \frac{P_0 - P_s}{m P_{max}} \quad (10)$$

Nous montrons sur la figure 1 l'évolution de ρ_{lim}^M en fonction de r et les valeurs de ρ_{lim}^M pour différents types de stations de base dont les caractéristiques sont données dans [6].

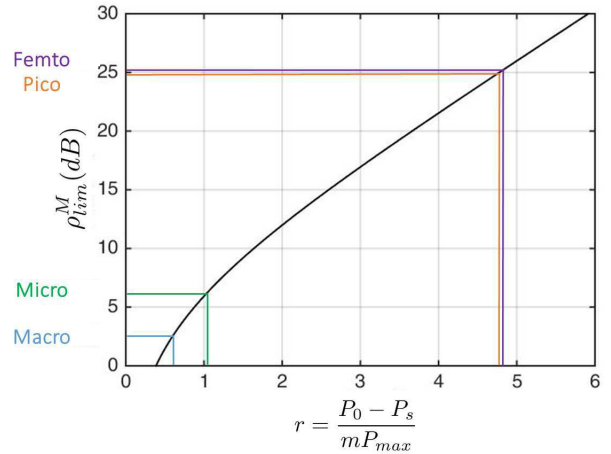


FIGURE 1 – ρ_{lim}^M en fonction de r . Ce graphique permet de déterminer pour chaque type de station de base la valeur de ρ_{lim}^M .

Pour chaque utilisateur on peut calculer la valeur de ρ_i^M . Si $\rho_i^M \leq \rho_{lim}^M$ l'utilisateur devra être servi durant $\mu_{i min}$. Dans le cas contraire, il faudra le servir pendant un temps plus long. On peut voir sur la figure 1 que pour de petites stations de base, la quasi-totalité des utilisateurs doit être servie durant $\mu_{i min}$. Au contraire, pour des stations de base à plus grande couverture, ρ_{lim}^M est faible (de l'ordre de quelques dB) et la majorité des utilisateurs sera servi pendant des temps plus long que $\mu_{i min}$.

Il est maintenant nécessaire de considérer la contrainte de l'équation (5). En effet, si après les calculs précédents le temps pendant lequel la station de base sert les utilisateurs ($\sum_{i=1}^{N_u} \mu_i$) est plus grand que la longueur de la trame, il faut augmenter

la puissance d'émission allouée aux utilisateurs afin de réduire la durée pendant laquelle les utilisateurs sont servis. Si la contrainte de l'équation (5) est saturée, le problème d'optimisation à résoudre est le suivant :

$$\min_{\mu_i} P_m = P_0 + mB \sum_{i=1}^{N_u} \frac{\mu_i}{G_i} \left(2^{\frac{C_i}{B\mu_i}} - 1 \right) \quad (11a)$$

$$\text{S.t.} \quad \sum_{i=1}^{N_u} \mu_i = 1 \quad (11b)$$

$$\mu_i \geq \mu_{i \min} \quad (11c)$$

Le Lagrangien de ce problème s'écrit :

$$\mathcal{L} = P_0 + \sum_{i=1}^{N_u} \mu_i \frac{mB}{G_i} \left(2^{\frac{C_i}{B\mu_i}} - 1 \right) + K \left(\sum_{i=1}^{N_u} \mu_i - 1 \right) \quad (12)$$

Où K désigne le multiplicateur de Lagrange. Pour résoudre ce problème, nous calculons d'abord l'expression de la fonction $K \mapsto \mu_i(K)$ qui minimise le Lagrangien. Ensuite, nous utilisons des méthodes numériques pour calculer la valeur de K_{opt} qui vérifie :

$$\sum_{i=1}^{N_{min}} \mu_{i \min} + \sum_{i=N_{min}+1}^{N_u} \mu_{i \text{opt}2}(K_{opt}) - 1 = 0, \quad (13)$$

Où $\mu_{i \text{opt}2}(K)$ la fonction qui minimise potentiellement le Lagrangien (sans considérer les contraintes sur $\mu_{i \min}$). En dérivant le Lagrangien par rapport à μ_i , on obtient :

$$\mu_{i \text{opt}2}(K) = \frac{C_i \ln(2)}{B} \frac{1}{\mathcal{W}(e^{-1} [\frac{G_i K}{B m} - 1]) + 1}. \quad (14)$$

Dans l'équation (14), K est vu comme la valeur théorique de $P_0 - P_s$ telle que le temps de service soit égal à 1. Une fois que cette expression a été dérivée, on peut procéder en deux étapes :

1. D'abord identifier les utilisateurs servis pendant $\mu_{i \min}$ et ceux servis pendant un temps plus long.
2. Une fois ces utilisateurs identifiés, nous utilisons un algorithme de recherche des zéros d'une fonction.

Pour la première des deux étapes, nous calculons d'abord, pour chaque utilisateur, la valeur de K à partir de laquelle l'utilisateur est servi pendant $\mu_{i \min}$:

$$K_i = \left[\frac{mB}{G_i} + mP_{max} \right] \ln \left(1 + \frac{P_{max} G_i}{B} \right) - mP_{max} \quad (15)$$

Nous remarquons que K_i augmente avec G_i . Par ailleurs, à l'optimum, tous les utilisateurs pour lesquels $K_i < K_{opt}$ sont servis pendant $\mu_{i \min}$. Pour identifier les utilisateurs servis durant $\mu_{i \min}$, il faut donc identifier l'utilisateur ayant la plus grande valeur de G_i pour lequel $\sum_{j=1}^{N_u} \mu_{j \text{opt}2}(K_i) > 1$. On utilise pour cela l'algorithme 1.

Une fois que les N_{min} utilisateurs servis durant $\mu_{i \min}$ ont été identifiés, nous utilisons une méthode de recherche des zéros d'une fonction (méthode de Newton, dichotomie, regula falsi) pour trouver la valeur de K_{opt} qui vérifie l'équation (14).

Après avoir calculé les temps de service, le calcul de la puissance d'émission de chaque utilisateur se fait grâce à l'équation (3).

Algorithm 1 Utilisateurs servis pendant $\mu_{i \min}$

- 1: Trier les utilisateurs en ordre croissant de G_i
 - 2: $K := P_0 - P_s$ and $p := N_m$
 - 3: **while** $\sum_{i=1}^{N_u} \mu_{i \text{opt}}(K) > 1$ **do**
 - 4: $p := p + 1$
 - 5: $K := \left[\frac{mB}{G_p} + mP_{max} \right] \ln \left(1 + \frac{P_{max} G_p}{B} \right) - mP_{max}$
 - 6: **for** i in 1 to N_u **do**
 - 7: $\mu_{i \text{opt}}(K) = \max\{\mu_{i \min}, \mu_{i \text{opt}2}(K)\}$
 - 8: **end for**
 - 9: **end while**
 - 10: $N_{min} := p - 1$
-

4 Résultats numériques

Pour les résultats numériques, nous supposons une macrocellule pour laquelle $P_0 = 130W$, $P_s = 75W$, $m = 4.7$ et $P_{max} = 20W$ [6]. Nous supposons une bande passante de $10MHz$ centrée autour de $f = 2GHz$. Les utilisateurs sont répartis suivant un processus de Poisson. Le nombre d'utilisateurs moyen dans la cellule étant égal à 10. La distance entre les utilisateurs et la station de base varie entre 300 et 1500m. Nous utilisons le modèle Hata du COST 231 pour calculer le path loss. Un shadowing de $10dB$ avec une distribution log-normale est ajoutée. La station de base a un gain d'antenne de $10dBi$ et le facteur de bruit est de $9dB$. Nous supposons dans cette partie que tous les utilisateurs ont la même contrainte de capacité.

Nous regardons la consommation de la station de base avec trois stratégies :

- Chaque utilisateur est servi pendant $\mu_{i \min}$, la durée du mode veille est maximisée. Dans cette stratégie, aucun contrôle de puissance n'est utilisé.
- La puissance d'émission est minimisée sans mettre en veille la station de base.
- La stratégie optimale présentée dans cet article est utilisée.

Notons que la première stratégie minimise la consommation statique (qui ne dépend pas de la puissance d'émission) alors que la seconde minimise la consommation dynamique de la station de base. Dans un premier temps, nous regardons l'évolution de la puissance moyenne en fonction de la contrainte de capacité.

On peut voir sur la figure 2 que lorsque la contrainte de capacité est faible, la stratégie optimale permet d'économiser 40% de l'énergie totale. Lorsque la capacité augmente, cet écart se réduit et la stratégie optimale s'éloigne de la stratégie avec mise en veille uniquement et se rapproche de la stratégie sans mise en veille. Pour une contrainte de capacité de 2 Mbits/s, l'écart entre la stratégie optimale et celle sans contrôle de puissance représentent 4% de l'énergie totale.

Pour comprendre l'évolution de la stratégie optimale, il faut considérer l'évolution des puissances moyennes statique et dynamique. En effet, lorsque la contrainte de capacité augmente, la part de puissance dynamique augmente. C'est pour cela que la stratégie optimale s'éloigne de la stratégie optimale sans

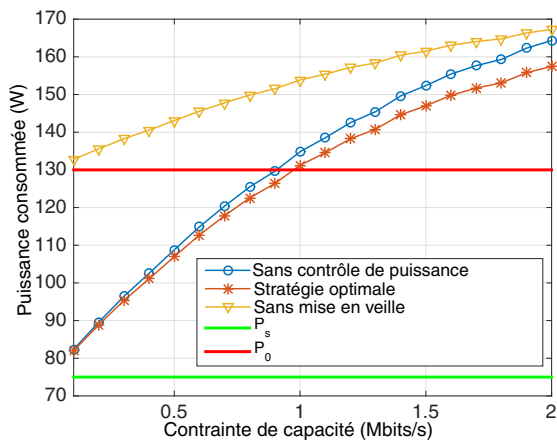


FIGURE 2 – Puissance consommée par la station de base avec les trois stratégies étudiées.

contrôle de puissance (optimale pour la puissance statique) et se rapproche de la stratégie optimale sans mise en veille (optimale pour la puissance dynamique).

Pour mieux faire apparaître cette évolution, nous avons tracé sur la figure 3 l'évolution de l'efficacité énergétique des deux stratégies avec mise en veille normalisée par rapport à la stratégie optimale sans mise en veille. On voit bien que lorsque la contrainte de capacité augmente, la stratégie optimale se rapproche de la stratégie sans mise en veille tout en s'éloignant de la stratégie sans contrôle de puissance.

5 Conclusion

Dans cet article nous avons proposé un algorithme permettant de minimiser la consommation d'énergie d'une station de base en utilisant des mises en veilles dynamiques et du contrôle de puissance. Nous avons montré que dans certains cas, cet optimum peut s'exprimer par des formes analytiques. De plus, nous avons montré que dans le cas contraire, le calcul des temps de service peut se faire en utilisant des algorithmes simples tels que la méthode de Newton. Les résultats obtenus montrent que comparé à une solution naïve utilisant des veilles dynamiques, la solution proposée apporte un gain représentant 4% de la puissance totale consommée par la station de base.

Remerciements

Ce travail est en partie financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans le projet SOGREEN sous la référence ANR-14-CE28-0025-02 et par la région Bretagne, France.

Références

[1] A. Fehske, G. Fettweis, J. Malmodin, and G. Biczok, "The global footprint of mobile communications : The eco-

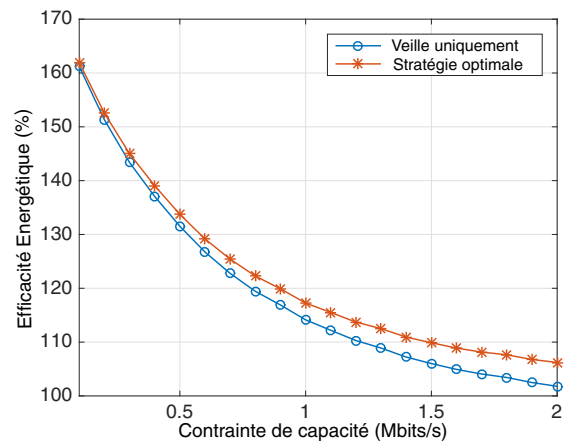


FIGURE 3 – Comparaison de l'efficacité énergétique des deux méthodes utilisant des mises en veille. L'efficacité énergétique a été divisée par l'efficacité énergétique de la station de base sans mise en veille.

logical and economic perspective," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 49, pp. 55–62, August 2011.

- [2] P. Frenger and al., "Reducing Energy Consumption in LTE with Cell DTX," in *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011 IEEE 73rd*, pp. 1–5, May 2011.
- [3] A. Chatzipapas, S. Alouf, and V. Mancuso, "On the minimization of power consumption in base stations using on/off power amplifiers," in *Online GreenCom, 2011 IEEE*, pp. 18–23, Sept 2011.
- [4] H. Holtkamp, G. Auer, and H. Haas, "On Minimizing Base Station Power Consumption," in *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2011 IEEE*, pp. 1–5, Sept 2011.
- [5] H. Holtkamp, G. Auer, S. Bazzi, and H. Haas, "Minimizing Base Station Power Consumption," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, pp. 297–306, February 2014.
- [6] G. Auer and al., "How much energy is needed to run a wireless network?," *IEEE Wireless Communications*, vol. 18, pp. 40–49, October 2011.
- [7] R. Bonnefoi, C. Moy, and J. Palicot, "Dynamic Sleep Mode for Minimizing a Femtocell Power Consumption", pp. 618–629. Cham : Springer International Publishing, 2016.
- [8] R. Corless and al., "On the LambertW function," *Advances in Computational Mathematics*, vol. 5, no. 1, pp. 329–359, 1996.
- [9] R. Bonnefoi, C. Moy, and J. Palicot, "New Macrocell Downlink Energy Consumption Minimization with Cell DTx and Power Control," in *ICC, 2017 IEEE*, pp. 1–7, May 2017.