

De l'intérêt de spécialiser les bandes de fréquences Wi-Fi pour différentes classes de stations

Loïc Desgeorges¹ et Thomas Begin¹ et Isabelle Guérin Lassous¹

¹ Univ Lyon, UCB Lyon 1, ENS Lyon, Inria, CNRS, LIP UMR 5668 Lyon, France

Dans cet article, nous étudions l'intérêt de spécialiser des bandes de fréquences Wi-Fi pour différentes classes de stations. Nous considérons deux classes de stations : une classe de stations nécessitant un fort débit sans contrainte énergétique et une classe de stations privilégiant l'autonomie énergétique aux performances réseaux et implémentant un mécanisme d'économie d'énergie basé sur des slots de transmission. Nous proposons deux politiques d'allocation des stations sur les différentes bandes de fréquences. Nous comparons ces deux politiques avec le simulateur WE3S dédié à la simulation des mécanismes d'énergie Wi-Fi. Les résultats obtenus sur les scénarios testés montrent qu'il n'y a pas d'intérêt à spécialiser les bandes de fréquences et qu'il vaut mieux répartir les stations en fonction de leur débit et non de leur classe.

Mots-clefs : Wi-Fi, économies d'énergie, multi-bande

1 Introduction

La technologie Wi-Fi est dominante dans les réseaux locaux sans-fil (WLANs) de par sa facilité d'utilisation et les performances qu'elle offre (telles que la portée et le débit). Le Wi-Fi permet à des équipements très différents de fonctionner sur un même WLAN. Par exemple, sur un même WLAN, il peut y avoir à la fois des ordinateurs portables pour visionner des flux vidéos, des consoles de jeux pour jouer en ligne et aussi des objets IoT pour collecter diverses données. Dans cet article, nous désignons par station (STA) tout équipement connecté à un WLAN. On peut identifier deux classes de STAs : celles ayant des contraintes fortes sur les performances réseaux comme le débit et/ou le délai et celles ayant des contraintes fortes sur l'énergie et l'autonomie des batteries. Par la suite, on distingue donc deux classes de STAs : *Perfs* et *Éco*. Les stations *Perfs* correspondent à celles ayant un besoin fort en débit et/ou délai sans se soucier de la partie énergétique, comme par exemple, une console de jeu afin d'assurer un confort aux joueurs. A contrario, les STAs *Éco* telles les capteurs privilégient fortement l'autonomie aux performances réseaux.

Depuis le premier amendement de sa norme en 1997, la technologie Wi-Fi a proposé divers mécanismes d'économie d'énergie [YLB21, GBGL23]. Le premier mécanisme d'économie d'énergie proposé, PS-Poll, est dédié aux trafics *downstream* (du point d'accès (AP) vers une STA) [C⁺97]. Plus récemment, le mécanisme *Target Wait Time* (TWT), proposé dans l'amendement 802.11ah [C⁺16], ne se limite pas qu'au trafic *downstream* mais aussi au trafic *upstream*.

Depuis quelques années, le Wi-Fi peut opérer sur deux bande de fréquences et plus récemment sur trois (2.4, 5 et 6 GHz) sans règles clairement spécifiées quant à l'assignation des STAs sur chaque bande. On peut aussi noter qu'IEEE avait exploré il y a quelques années la possibilité d'utiliser la bande des 800 MHz pour les équipements IoT avec 802.11ah [C⁺16] et envisage d'étendre le Wi-Fi à la bande des 60 GHz avec 802.11ay, qui serait alors réservée à des STAs ayant des besoins en débit très élevés [IEE21].

Avec une hétérogénéité de STAs et plusieurs bandes de fréquences en Wi-Fi, la question de spécialiser les bandes de fréquences en y regroupant les STAs selon leur classe est intéressante à étudier. À notre connaissance, il n'existe aucune étude qui répond à cette question.

2 Description du problème

Pour cette étude, nous nous concentrons sur les mécanismes d'économie d'énergie au niveau de la couche liaison de données. Ces mécanismes ont été présentés en détail dans [GBGL23]. Dans [GBGLB23], il a

été montré que ces différents mécanismes peuvent être synthétisés par l'ensemble des combinaisons de 4 stratégies, notées DL_slot, UL_slot, DL_prompt et UL_prompt. Les notations DL et UL font référence au type de trafic, respectivement downstream et upstream. La notation slot indique que la communication peut se faire durant certains intervalles de temps définis tandis que la notation prompt indique que la communication peut se faire seulement sur sollicitation de la STA.

Un mécanisme particulièrement mis en avant dans l'amendement récent 802.11ax (appelé aussi Wi-Fi 6) est le mécanisme TWT. Ce dernier repose sur la notion de rendez-vous entre la STA et l'AP, c'est-à-dire que les STA et AP négocient des temps d'échange afin que la STA puisse s'endormir en dehors de ces temps-là. Le mécanisme TWT correspond aux stratégies DL_slot et UL_slot, et dans cette étude, nous nous restreignons à la stratégie DL_slot. Avec cette stratégie, les AP et STA négocient la période et la durée des slots. Ainsi, l'AP n'enverra les trames à la STA que durant les slots et la STA pourra s'endormir entre les slots si elle n'a pas, de son côté, des trames à envoyer.

Pour notre étude, nous considérons un WLAN composé d'un seul AP pouvant opérer sur deux bandes de fréquences (représentées chacune par un canal de communication) et d'un ensemble de STAs Perfs et Éco. Nous supposons que les STAs Perfs ont seulement des besoins en débit. On cherche à déterminer s'il y a intérêt à attribuer une bande à chaque classe de STAs. Pour cela, nous considérons deux politiques.

Politique 1 : Spécialisation des bandes de fréquences par classe de STAs. Cette politique consiste à regrouper l'ensemble des STAs d'une même classe dans une même bande dans l'idée de mieux organiser la concurrence entre les STAs, afin d'assurer notamment une équité dans les accès au canal radio. Par exemple, on pourrait attribuer la bande des 2.4 GHz aux STAs Éco et la bande des 5 GHz aux STAs Perfs.

Politique 2 : Aucune spécialisation sur les bandes de fréquences. Les STAs Perfs sont donc en concurrence avec les STAs Éco. À noter que cette politique 2 ne spécifie pas la façon de répartir les STAs sur les 2 bandes. On a donc un sous-ensemble de politiques correspondant à l'ensemble des allocations possibles. À noter que le mécanisme d'économie d'énergie d'une STA Éco peut s'activer indépendamment de la bande sur laquelle cette STA communique. Cette deuxième politique soulève plusieurs questions : est-ce que les STAs Éco parviendront à échanger leur trafic sans surcoût énergétique excessif du fait de la concurrence des STAs Perfs ? ; est-ce que les STAs Perfs parviendront à atteindre leur débit ? Plus généralement, est-ce que la co-habitation de STAs de classes différentes sur une même bande est néfaste ?

Pour répondre à ces questions, nous allons comparer ces deux politiques. Pour cela, nous formalisons notre étude sous la forme d'un problème d'optimisation multi-objectif en introduisant la fonction objectif f à maximiser, comme suit : $f = \sum_{i \in STAs} (f_{debit,i} + f_{energie,i})$, où

- la composante $f_{debit,i} = \frac{\lambda_{obtenu,i}}{\lambda_{demande,i}}$ reflète la capacité du réseau à satisfaire les besoins en débit des STAs qu'elles soient Perfs ou Éco. Plus précisément, nous calculons pour chaque STA, puis combinons, un score débit égal au ratio du débit obtenu, $\lambda_{obtenu,i}$, sur le débit demandé, $\lambda_{demande,i}$ de la station i .
- la composante $f_{energie,i} = \frac{t_{do,i}}{t_{tot}}$ reflète le temps d'endormissement $t_{do,i}$ des STAs i par rapport au temps total t_{tot} . Plus précisément, nous calculons pour chaque STA un score énergie correspondant au pourcentage de temps que chaque STA Éco passe endormie.

Étant donné que le nombre de STA associées à un WLAN est généralement inférieur à 15 ou 20 (sauf dans certains cas extrême comme le "massive IoT" pouvant inclure des centaines de stations), il nous est possible d'explorer en un temps de calcul raisonnable l'ensemble des combinaisons produites par les politiques 1 et 2 (sans avoir recours à une solution plus efficace de recherche de l'optimal de f).

3 Résultats numériques

Pour comparer l'efficacité des deux politiques nous utilisons la simulation. Le choix du simulateur s'est porté sur WE3S[†]. Il s'agit d'un simulateur à événements discrets, codé en Python, qui met en œuvre les principaux mécanismes de la couche MAC de 802.11 et qui est dédié aux mécanismes d'énergie Wi-Fi. Ce simulateur implémente les principales stratégies d'économie d'énergie du Wi-Fi [GBGLB23]. À noter que nous avons écarté ns-3 qui a été pensé principalement pour évaluer les performances réseaux des WLANs et n'implémente pas la plupart des stratégies d'économie d'énergie proposée par le Wi-Fi.

[†]. <https://github.com/EstGue/WE3S>

Pour nos scénarios, nous considérons un WLAN opérant sur deux canaux de même largeur, l'un B_1 issu de la bande de fréquence à 2.4 GHz et l'autre B_2 de celle des 5 GHz. Le WLAN sert deux classes de STAs dont les paramètres, par STA, sont donnés dans la table 1. Avec ce paramétrage, chaque STA Éco dort la moitié du temps par période de 100 ms comme recommandé dans [GBGLB23].

Classe de STAs	Nombre de STAs	Débit upstream	Débit downstream	Taille des trames
Perfs	3 ou 10	5 Mbps	5 Mbps	1375 octets
Éco	10	9 kbps	1 kbps	1375 octets

Bande de fréquences	Débit de transmission	Période des slots	Durée des slots
B_1	100 Mbps	100 ms	50 ms
B_2	100 Mbps	100 ms	50 ms

TABLE 1 – Paramètres des scénarios étudiés.

Nous exécutons WE3S pour nos deux politiques sur ces scénarios, pour un temps simulé de 30s, et répétons ces exécutions 12 fois afin de calculer des intervalles de confiance de 95%. Pour rappel, la politique 1 consiste à spécialiser les bandes : les STAs Éco sont affectées à B_1 et les STAs Perfs à B_2 (où l'inverse). Il n'y a donc pour P1 qu'un seul choix possible. La politique 2 est en fait constituée de plusieurs variantes que nous explorons une à une en commençant avec toutes les STAs initialement sur B_2 , puis en les déplaçant une à une sur B_1 en commençant par les STAs Éco. Ce faisant, nous n'explorons pas toutes les variantes de la politique 2 mais celles-ci, après vérification, ne présentent pas de meilleurs résultats que celles présentées dans cet article.

3.1 WLAN faiblement chargé

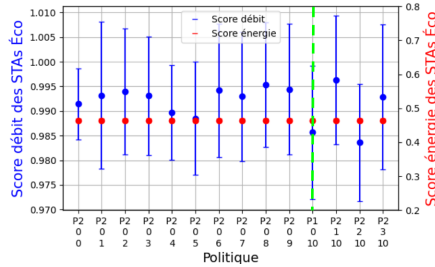


FIGURE 1 – Scénario faible charge : Évolution du score débit moyen par STA Éco selon les politiques. La ligne verte pointillée situe la politique 1. À sa gauche se trouvent les politiques 2 avec aucune STA Perfs sur B_1 .

Dans un premier temps, nous considérons le cas d'un WLAN faiblement chargé comprenant 3 STAs Perfs (en plus des 10 STAs Éco). À noter que le débit de transmission de chaque bande de fréquence est largement supérieur au débit total des STAs. La fig. 1 indique le score débit moyen obtenu par les STAs Éco en fonction des différentes politiques. La légende en abscisse est donnée sous la forme $\frac{PX}{a \ b}$ où PX correspond à la politique X (1 ou 2), a au nombre de STAs Perfs sur la bande B_1 et b au nombre de STAs Éco sur la bande B_1 .

On peut constater que l'écart entre les scores débit obtenus par les différentes politiques est relativement négligeable. De manière similaire, les scores énergie $f_{\text{energie},i}$ des STAs Éco, présenté en rouge (fig. 1), sont identiques et très bons quelle que soit la politique. Il n'y a donc pas de politique meilleure que les autres au sens de la fonction objectif f et la cohabitation entre les STAs Perfs et Éco se passe bien. Dans ce scénario faiblement chargé, la meilleure solution semble être de regrouper l'ensemble des STAs sur une seule bande de

fréquence afin de pouvoir éteindre la deuxième.

3.2 WLAN fortement chargé

Dans ce second scénario nous considérons un WLAN fortement chargé avec 10 STAs Perfs (en plus de 10 STAs Éco). Les autres paramètres sont identiques au scénario précédent. Avec ce paramétrage, le débit total demandé des STAs est proche du débit de transmission de chaque bande. La fig. 2 compare les deux politiques pour ce scénario. La fig. 2a (resp. 2b) donne le score débit moyen par STA Éco (resp. STA Perfs) en fonction des politiques. La légende des abscisses se lit identiquement à celle de la fig. 1. Enfin, la fig. 2c donne le score de la fonction objectif f obtenu par chaque politique. Comme pour le scénario à faible

charge, les scores énergie des STAs Éco sont très similaires pour toutes les politiques. À noter que sur les fig. 2b et 2c les intervalles de confiance sont de largeur très faibles.

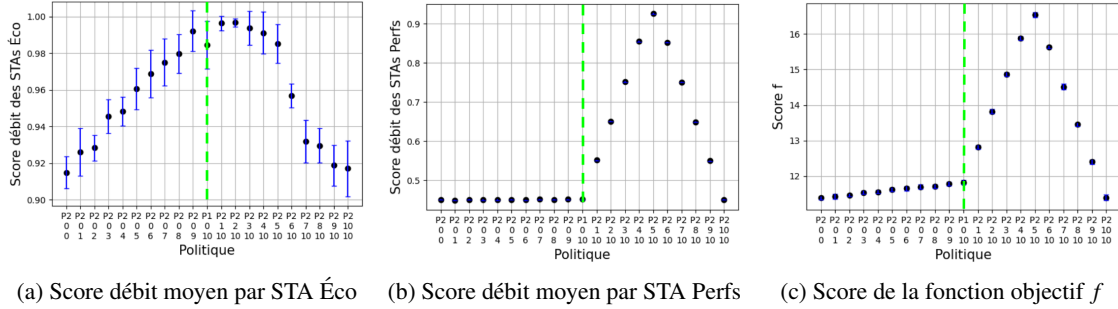


FIGURE 2 – Scénario forte charge : Évolution des scores selon les politiques. La ligne verte pointillée situe la politique 1.

On peut observer sur la fig. 2a que les STAs Éco arrivent à atteindre leur débit malgré la concurrence des STAs Perfs et leurs temps d’endormissement (les valeurs sont proches de 1). Leur débit est néanmoins légèrement amélioré quand le nombre de STAs Perfs en concurrence avec les STAs Éco est limité à 5. Néanmoins, dans tous les cas, elles arrivent à économiser de l’énergie (non présenté ici) et à atteindre un bon débit. En revanche, les STAs Perfs sont beaucoup plus impactées par la concurrence entre STAs Perfs.

Il est intéressant de noter, sur la fig. 2b, que le meilleur score est atteint pour la configuration $\frac{P2}{5}_{10}$, c’est-à-dire lorsque chaque bande sert 5 STAs perfs. Lorsqu’une bande doit gérer plus de STAs perfs alors les débits demandés ne peuvent pas être satisfaits du fait des surcoût protocolaires du Wi-Fi. Enfin, on peut noter sur la fig. 2c que le score débit des STAs Perfs a un impact prédominant sur le score de la fonction objectif f qui présente la même évolution en fonction des politiques. Dans ce scénario, la meilleure politique est de mettre toutes les STAs Éco sur une bande avec 5 STAs Perfs et d’attribuer la deuxième bande aux 5 autres STAs Perfs. Il semble donc préférable de veiller à répartir équitablement la charge entre les deux bandes afin qu’elles ne soient pas saturées, plutôt que de spécialiser les bandes par classes de STAs.

4 Conclusion

Notre étude indique que lorsqu’un WLAN peut opérer sur plusieurs bandes et comporte des stations très hétérogènes, il ne semble pas judicieux de spécialiser une bande de fréquence par classe de stations. Il est généralement plus intéressant, à la fois pour les stations demandant des débits élevés et celles ayant des contraintes d’autonomie, de répartir équitablement ces stations sur les différentes bandes en tenant compte de leur débit (et non de leur classe). Nos travaux futurs viseront à intégrer l’impact que les mécanismes d’énergie peuvent engendrer sur le délai des trames.

Références

- [C⁺97] IEEE Computer Society LAN MAN Standard Committee et al. Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications. *IEEE Std. 802.11-1997*, 1997.
- [C⁺16] IEEE Computer Society LAN MAN Standard Committee et al. Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specification; sub 1 ghz license exempt operation. standard 802.11a. *IEEE WG 802.11ah*, 2016.
- [GBGL23] Esther Guérin, Thomas Begin, and Isabelle Guérin Lassous. An overview of MAC energy-saving mechanisms in Wi-Fi. *Computer Communications*, 2023.
- [GBGLB23] Esther Guérin, Thomas Begin, Isabelle Guérin Lassous, and Anthony Busson. Performance analysis of MAC energy-saving strategies for WLANs. In *ACM MSWiM*, 2023.
- [IEE21] IEEE. Amendment 2 : Enhanced throughput for operation in license-exempt bands above 45 ghz. *Amendment by IEEE Std 802.11ax-2021*, 2021.
- [YLB21] Changmok Yang, Jinmyeong Lee, and Saewoong Bahk. Target Wake Time Scheduling Strategies for Uplink Transmission in IEEE 802.11ax Networks. In *WCNC*, pages 1–6, 2021.