



**HAL**  
open science

# Etude du système d'agrégation de IEEE 802.11n et évaluation de son implémentation dans le simulateur Opnet

Damien Breck, Jean-Philippe Georges, Thierry Divoux

► **To cite this version:**

Damien Breck, Jean-Philippe Georges, Thierry Divoux. Etude du système d'agrégation de IEEE 802.11n et évaluation de son implémentation dans le simulateur Opnet. 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation, MOSIM'14, Nov 2014, Nancy, France. hal-01100174

**HAL Id: hal-01100174**

**<https://hal.science/hal-01100174v1>**

Submitted on 6 Jan 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Étude du système d'agrégation de IEEE 802.11n et évaluation de son implémentation dans le simulateur Opnet

Damien Breck, Jean-Philippe Georges, Thierry Divoux

Université de Lorraine, CRAN, UMR 7039  
Campus Sciences, BP 70239  
54506 Vandœuvre lès Nancy Cedex - France  
CNRS, CRAN, UMR 7039, France  
damien.breck@univ-lorraine.fr

**RÉSUMÉ :** *Quelle confiance pouvons nous accorder à l'implémentation du mécanisme d'agrégation de paquets de 802.11n au sein du simulateur Riverbed Opnet modeler ? Très utilisé dans le domaine des réseaux et télécommunications, cet outil de simulation a récemment implémenté l'agrégation de paquets effectuée par la couche MAC du célèbre Wi-Fi n. Dans nos précédents travaux, nous avons évalué les performances de ce système en termes de majorants du délai et de l'arriéré de traitement en le modélisant formellement. L'étape suivante consiste à conforter ces résultats avec ceux obtenus en simulation. À notre connaissance, aucun article utilisant cette nouvelle version d'Opnet n'a encore été publié. Dans cette étude, nous cherchons à évaluer la conformité de l'implémentation d'Opnet vis à vis de la norme IEEE 802.11n. Pour cela, nous revenons sur la définition d'un système d'agrégation de paquets et ses interprétations. Ensuite, une analyse de la norme nous permet de calculer les durées des différentes étapes de transmission d'un agrégat. Enfin, les résultats de cette étude sont comparés avec ceux obtenus en simulation.*

**MOTS-CLÉS :** *agrégation de paquets, Opnet modeler, IEEE 802.11n, A-MSDU, simulation.*

## 1 Introduction

L'agrégation de paquets est une des améliorations apportée par la norme (IEEE-802.11n 2012). Un tel système accumule les paquets provenant de différents flux pour créer un nouveau "super flux". Il permet aux stations sans fil d'atteindre des débits plus élevés au niveau de la couche MAC en réduisant l'impact des en-têtes et de la compétition pour l'accès au medium.

Les performances de ce système ont été étudiées par plusieurs auteurs (Lin & Wong 2006, Kuppa & Dattatreya 2006, Ginzburg & Kesselman 2007, Skordoulis et al. 2008, Wang & Wei 2009) et chacun d'entre-eux considère la définition suivante d'un système d'agrégation.

**Définition.** *Le système d'agrégation libère un agrégat dès que :*

- *la quantité de données dans la mémoire tampon à l'entrée de la couche MAC est supérieure ou égale à un seuil de taille  $S$ .*
- *le temps passé dans le système par le premier paquet de cet agrégat est supérieur à un seuil temporel  $T$ .*

Motivés par l'évaluation des performances de ce système en termes de majorants du délai et de l'arriéré de traitement (Breck et al. 2014), nous avons également adhéré à cette définition. L'étape suivante consiste à conforter nos résultats avec ceux obtenus en simulation. En effet, notre modèle repose sur des enveloppes du trafic et leur précision influence les résultats obtenus. Un simulateur permettrait de quantifier cette influence. Quelques outils existaient lorsque nous avons débuté l'étude mais ils implémentaient uniquement les modèles contributifs du système d'agrégation utilisés lors de son développement. Aujourd'hui, la norme a atteint un niveau de maturité suffisant pour que des outils de simulation tels qu'Opnet implémentent complètement le système d'agrégation. La question suivante se pose alors :

Quelle confiance pouvons nous accorder à l'implémentation du mécanisme d'agrégation de paquets de 802.11n au sein du simulateur Riverbed Opnet modeler ?

L'implémentation native de l'agrégation de paquets dans Riverbed Opnet modeler 17.5 (Riverbed 2014) réfute la précédente définition du système d'agrégation.

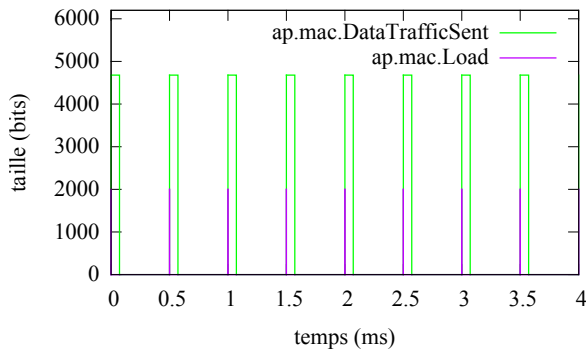


Figure 1 – Retransmission immédiate par le point d'accès des trames émises par l'unique source sur le réseau

En effet, les premiers résultats de simulation collectés nous ont permis d'observer que la définition ne s'applique que lorsque le médium est occupé. En effet, nous avons remarqué qu'un agrégat en préparation était immédiatement libéré dès que le médium était libre sans pour autant attendre une durée temporelle  $T$  (paramètre d'ailleurs non présent dans le modèle Opnet). Nous proposons donc le corollaire ci-dessous.

**Corollaire.** *Le système d'agrégation libère un agrégat dès que :*

- la quantité de données dans la mémoire tampon à l'entrée de la couche MAC est supérieure ou égale à un seuil de taille  $S$ .
- la classe de service de la station gagne l'accès au médium.

De plus, si le médium est libre, une trame ne sera pas retenue pour former un agrégat mais immédiatement émise comme le montre la Figure 1. Un agrégat ne pourra donc être formé que si le médium est resté suffisamment occupé pour que deux trames aient été reçues. On notera d'ailleurs que seuls des paquets partageant la même classe de service peuvent être agrégés. Ce comportement semble logique si l'on considère ce système comme un moyen d'améliorer le débit utile au niveau de la couche MAC. À première vue, conserver les paquets en mémoire alors que le médium est libre ne présente aucun avantage. Les paquets sont alors émis et la station agrège uniquement quand le médium est occupé.

La Figure 2 montre à quel niveau de la couche MAC de 802.11n se situe l'agrégation et explicite la notion de classe de service (*access category* (AC)). À savoir, une mémoire différente dans laquelle sont stockés des paquets partageant les mêmes contraintes temporelles (rappelées plus loin dans le Tableau 2). Ces mémoires tampons sont en compétition pour accéder au

médium au même titre que des stations différentes à ceci près qu'elles ont des priorités entre elles. Ces priorités sont assurées par des valeurs différentes pour  $AIFS$ ,  $CW_{min}$  et  $CW_{max}$ .

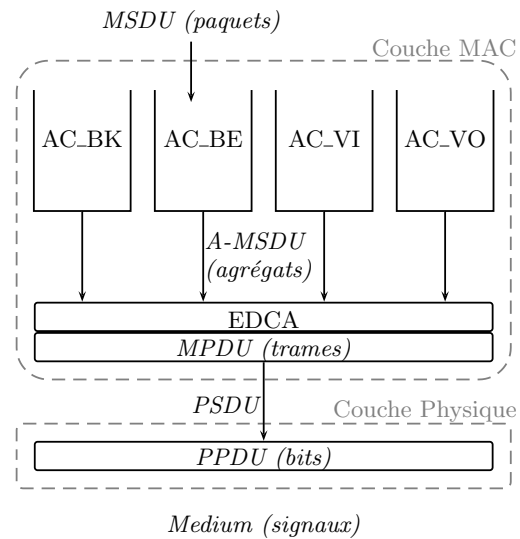


Figure 2 – Classe de service et système d'agrégation

Comme le corollaire, la norme n'évoque pas de seuil temporel. Nous pouvons donc imaginer qu'Opnet est conforme à la norme ce que nous nous attacherons à vérifier. D'autant plus qu'une étude de l'impact de l'agrégation sur des expérimentations 802.11n menées à l'aide du driver MadWifi (Bhanage et al. 2009) a également retenu le modèle établi dans Opnet.

Malgré ces choix logiques de notre point de vue, il apparaît nécessaire de comparer l'implémentation de l'agrégation dans Opnet avec celle décrite par la norme IEEE 802.11n. Nous cherchons ici à éprouver notre confiance dans ce simulateur.

La section 2 décrit le cas d'étude considéré. Ensuite, la section 3 apporte les résultats d'une étude approfondie de la norme (IEEE-802.11n 2012). Elle débute avec la définition de la séquence d'émission d'une trame (partie 3.1), continue avec le calcul du temps de transmission des trames de données et des acquittements (respectivement en parties 3.2 et 3.3) et se termine avec une application numérique (partie 3.4). Enfin, la section 4 compare les résultats obtenus précédemment avec ceux issus de la simulation. Les définitions, abréviations et acronymes (particulièrement nombreux dans le monde sans fil) se trouvent en annexe B.

## 2 Cas d'étude

La topologie considérée dans ce cas d'étude est représentée en Figure 3. Une station Ethernet émet des trames à une station sans fil au travers d'un point d'accès en utilisant un lien Gigabit Ethernet.

Le point d'accès agrège les paquets en provenance de cette station pour former des A-MSDU (8.3.2.2, (IEEE-802.11n 2012)). Le flux entrant est composé de paquets de 500 octets émis toutes les 50  $\mu s$  soit un débit de 80 Mb/s de données. Ce flux appartient à la classe de service *Best-effort* (AC\_BE). La configuration des équipements sans fil est résumée dans le Tableau 1.

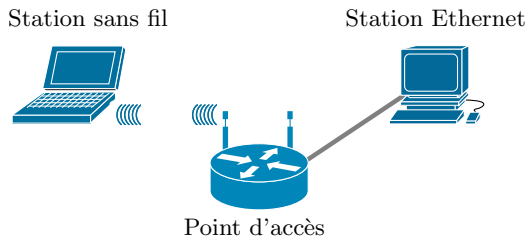


Figure 3 – Topologie du cas d'étude

Access medium policy	HCF EDCA
A-MSDU	3839 bytes
A-MPDU	desactivé
Block Ack	desactivé
Backoff	forcé à 0
TXOP limit	une MSDU
AIFSN	3
SigExt	6 $\mu s$
ISM Band	2.4 GHz
Base Data Rate	65 Mb/s
Maximal Data Rate	600 Mbps
Spatial Stream	1
Guard Interval	800 ns (regular)
Channel spacing	20 MHz
Slot Time	9 $\mu s$
SIFS	10 $\mu s$
PPDU format	HT-mixed

Tableau 1 – Configuration des stations sans fil

De tels paramètres permettent de déduire un débit opérationnel de 65 Mb/s à partir du Tableau 20-30 dans (IEEE-802.11n 2012).

### 3 Résultats théoriques (IEEE 802.11n)

Avec un seul flux dans notre scénario, aucune station n'occupera le médium excepté le point d'accès. Il agrégera donc des paquets lorsqu'il émet lui-même sur le médium. Ainsi, le premier paquet reçu sera

immédiatement émis sans être agrégé.

Lors de sa transmission, le point d'accès recevra plusieurs paquets et sera à même de former un premier agrégat. Le scénario décrit dans la section précédente a été choisi afin de respecter cette condition. Dans le cas contraire, aucun agrégat n'aurait été émis. La quantité de paquets reçue est alors supérieure à la capacité de traitement du système. À terme, cela conduira à des pertes de paquets par débordement des mémoires tampons. La station Ethernet émet ici des paquets sur une durée limitée pour éviter ce phénomène. La valeur maximale de cette durée est directement liée à la taille de la mémoire au niveau de la couche MAC du point d'accès. Avant toute perte de paquet, des agrégats de taille croissante sont émis jusqu'à atteindre le seuil de taille. Puis des agrégats de taille maximale sont émis car seule la première condition du corollaire s'applique.

L'objectif de cette section est de définir, en analysant la norme, les étapes nécessaires à l'émission d'une trame et de calculer le temps d'émission de chaque agrégat jusqu'à atteindre le seuil de taille. Ces valeurs seront comparées dans la section suivante avec les résultats issus d'une simulation.

#### 3.1 Règles d'émission avec HCF EDCA

La Figure 4 représente les étapes nécessaires à l'émission et à l'acquittement d'une PPDU de données à partir des choix effectués pour ce cas d'étude (section 2). Elles sont justifiées ci-après et le temps nécessaire à leur exécution est calculé dans les parties 3.1, 3.2 et 3.3.

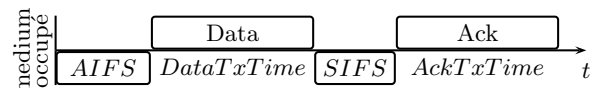


Figure 4 – Étapes d'une émission avec HCF EDCA

Suivant HCF EDCA, les stations obtiennent l'accès au médium au travers d'une opportunité de transmission (TXOP). Une TXOP est définie par un instant de début et une durée limite fixée ici à une MSDU. Cette valeur signifie l'émission d'une MSDU ou d'une A-MSDU (9.19.2.2, (IEEE-802.11n 2012)). De plus, le temps d'attente minimum est différent du classique DIFS défini pour DCF : c'est un AIFS calculé suivant l'équation (1).

$$AIFS = SIFS + AIFSN * SlotTime \quad (1)$$

AIFSN peut prendre des valeurs différentes en fonction de la classe de service (access category (AC))

à laquelle il s'applique (Tableau 2 établi à partir de Tableau 8-105, (IEEE-802.11n 2012)).

AC	Nom commun	AIFSN
AC_BK	Background	7
AC_BE	Best effort	3
AC_VI	Video	2
AC_VO	Voice	2

Tableau 2 – Valeurs par défaut de l'AIFSN en fonction de sa classe de service

Avec des valeurs nulles pour  $CW_{min}$  et  $CW_{max}$ , la valeur du backoff est forcément nulle elle aussi. C'est la raison pour laquelle il n'apparaît pas en Figure 4. Ce problème est minimisé par la présence d'une seule classe de service sur une unique station émettant des trames dans notre scénario.

La méthode de calcul du temps de transmission d'une trame de donnée est présentée en partie 3.2 de cette section. L'acquiescement par bloc (*Block Ack*) étant désactivé, chaque MPDU est acquiescé immédiatement par l'émission d'une trame d'acquiescement (Ack) après un SIFS. Le calcul du temps de transmission d'un acquiescement est décrit dans la partie 3.3 de cette section.

### 3.2 Calcul du temps de transmission d'une trame de données

Les paramètres du cas d'étude permettent d'identifier le format de la trame MAC décrit en Figure 5. Le champ *Data* peut alors contenir une MSDU ou une A-MSDU. Comme dit précédemment, le premier paquet sera émis immédiatement après réception par le point d'accès mais les paquets suivants seront agrégés. Agréger implique un nouveau format de trame avec de nouvelles en-têtes et de nouvelles règles de remplissage.

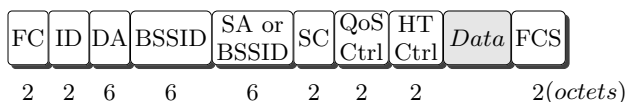


Figure 5 – Format d'une trame de données

Le format d'une A-MSDU est décrit en Figure 6. Chaque sous-trame de l'A-MSDU (sauf la dernière) est remplie pour que sa taille soit un multiple de 4 octets (8.3.2.2, (IEEE-802.11n 2012)).

Tous les paramètres concernant le format de la trame sont maintenant définis. Le reste de cette section explique le format de PPDU choisi et le temps nécessaire à son émission.

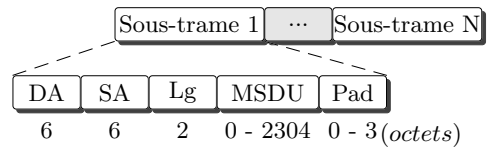


Figure 6 – Format d'une A-MSDU

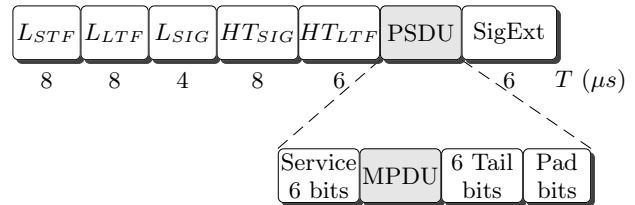


Figure 7 – Format d'une PPDU HT-mixed

Le Tableau 1 montre que le choix de format de PPDU est HT-mixed. Ce format est décrit en Figure 7 (établie à partir de la Figure 20-1, (IEEE-802.11n 2012)). Avec un seul flux spatial et sans STBC les stations sans fil n'utilisent qu'un seul flux spatio-temporel (Tableau 20-12, (IEEE-802.11n 2012)). STBC peut être utilisé lorsque l'émetteur possède au moins deux chaînes de transmission (Tableau 20-21, (IEEE-802.11n 2012)). Un seul flux spatio-temporel conduit à un seul champ Data HT-LTF (Tableau 20-13, (IEEE-802.11n 2012)) et sans flux spatial d'extension, il n'y a aucun champ Extension HT-LTF (Tableau 20-14, (IEEE-802.11n 2012)). Comme décrit dans la section 9.3.8 de (IEEE-802.11n 2012), une durée SigExt sans aucune transmission doit être respectée après l'émission d'une PPDU au format HT-mixed.

Le temps de transmission de cette trame de donnée est calculé suivant l'équation (2) (établie à partir des équations (20-92) et (20-32), (IEEE-802.11n 2012)) :

$$DataTxTime = T_{L\_PRE} + T_{LSIG} + T_{HT\_PRE} + T_{HT\_SIG} + T_{SYM} * N_{SYM} + SigExt \quad (2)$$

$$\text{avec, } N_{SYM} = m * \left\lceil \frac{16 + 8 * l + 6 * N_{ES}}{m * N_{DBPS}} \right\rceil \quad (3)$$

$$\text{et } T_{L\_PRE} = T_{L\_STF} + T_{L\_LTF}$$

La signification des paramètres de ces équations est donnée en annexe A. Les valeurs des quatre premiers termes de l'équation (2) sont identifiées à partir de la configuration de la couche physique des stations de ce cas d'étude (section 2). La dernière partie de cette équation donne le temps nécessaire à la transmission du champ *Data*. Cette transmission doit respecter un nombre entier de symboles OFDM. Des bits de remplissage sont donc ajoutés à ce champ *Data*. Dans l'équation (3), le numérateur de la fraction représente

la longueur des données de la PPDU (Figure 7) et  $l$  représente la taille de la MPDU en octets (Figure 5).

### 3.3 Calcul du temps de transmission d'un acquittement



Figure 8 – Format de trame d'un acquittement

Les acquittements (Ack) sont définis comme des trames de contrôle. Elles doivent être émises dans une PPDU différente de celle utilisée pour les données. En effet, il y a sept conditions à remplir (listées en 9.7.6.1 de (IEEE-802.11n 2012)) pour pouvoir émettre un acquittement dans une PPDU HT. Aucune de ces conditions n'est respectée dans notre cas. Les acquittements sont donc émis dans une PPDU non-HT. Le format de trame d'un acquittement et celui d'une PPDU non-HT sont respectivement illustrés en Figure 8 et 9.

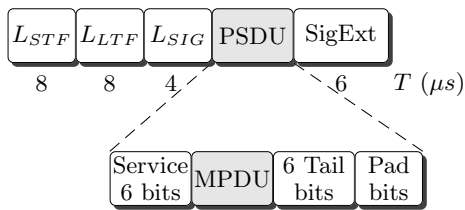


Figure 9 – Format d'une PPDU non-HT

Afin de calculer le temps nécessaire à la transmission d'un acquittement, le débit doit être sélectionné en deux étapes :

- identifier le débit de référence (non-HT) relatif au débit de transmission de la trame précédente (9.7.6.5.2 et 9.7.9, (IEEE-802.11n 2012))
- choisir le plus grand débit défini pour ce BSS qui est supérieur ou égal à ce débit de référence.

Le débit de transmission choisi pour les trames est de 65 Mb/s. Il correspond au MCS numéro sept (modulation 64-QAM, taux de codage 5/6) détaillé dans le Tableau 20-30 de (IEEE-802.11n 2012) (bande passante 20 MHz, un flux spatial). À partir du Tableau 9-5 (IEEE-802.11n 2012), le débit de référence déduit est égal à 54 Mbps.

*“If the received frame is of the modulation class HT and the control response frame is carried in a non-HT PPDU, the control response frame shall be transmitted using one of the ERP-OFDM or OFDM modulation.”* (9.7.6.5.2, (IEEE-802.11n 2012))

Une modulation OFDM implique un ensemble de débits obligatoire composé de 6, 12 et 24 Mb/s pour les trames de contrôle (Tableau 18-16, (IEEE-802.11n 2012)).

*“Only the data transfer rates of the mandatory rate set of the attached PHY are guaranteed to be supported [...]. Higher layer protocols may negotiate a rate outside the mandatory rate set.”* (9.7.1, (IEEE-802.11n 2012))

Sans information sur les débits négociés par les protocoles des couches supérieures, le débit de transmission d'un acquittement est égal à 24 Mb/s. Au même titre que pour la transmission d'une trame de donnée, une durée SigExt doit être respectée lorsque le format de PPDU est non-HT. Le temps de transmission de cet acquittement est calculé selon l'équation (4) (établie à partir des équations (18-29) et (18-11), (IEEE-802.11n 2012)) :

$$AckTxTime = T_{PRE} + T_{SIG} + T_{SYM} * N_{SYM} + SigExt \quad (4)$$

$$\text{avec, } N_{SYM} = \left\lceil \frac{16 + 8 * l + 6}{N_{DBPS}} \right\rceil \quad (5)$$

La signification des paramètres de ces équations est donnée en annexe A. Les équations (2) et (3) sont respectivement proches des équations (4) et (5). Les explications qui font suite aux premières s'appliquent aux secondes.

### 3.4 Application numérique

Le chronogramme présenté en Figure 10 représente les flux entrants et sortants du système. Cette section a pour but d'expliquer le raisonnement conduisant à ce chronogramme tout en calculant les valeurs temporelles de chaque étape.

Les valeurs contenues dans le Tableau 3 ont été collectées à partir des Tableaux (20-6) et (20-30) (IEEE-802.11n 2012). Celles contenues dans le Tableau 4 proviennent des Tableaux (18-4) et (18-5) (IEEE-802.11n 2012). L'application respective des valeurs des Tableaux 3 et 4 aux équations (2) et (4) conduit aux résultats suivants (équation (6) et (7)).

Le temps nécessaire à l'émission d'une trame de données contenant une seule MSDU est calculé dans l'équation 6. La numérotation de chaque valeur de  $DataTxTime$  correspond au nombre de MSDUs contenues dans l'agrégat. Le format des sous-trames de cet agrégat est décrit en Figure 6.

$$\begin{aligned} l_{data1} &= 30 + 500 + 4 = 534 \text{ octets} \\ DataTxTime1 &= 36 + 4 * \left\lceil \frac{16 + 8 * 534 + 6}{260} \right\rceil + 6 \\ &= 36 + 4 * 17 + 6 = 110 \mu s \quad (6) \end{aligned}$$

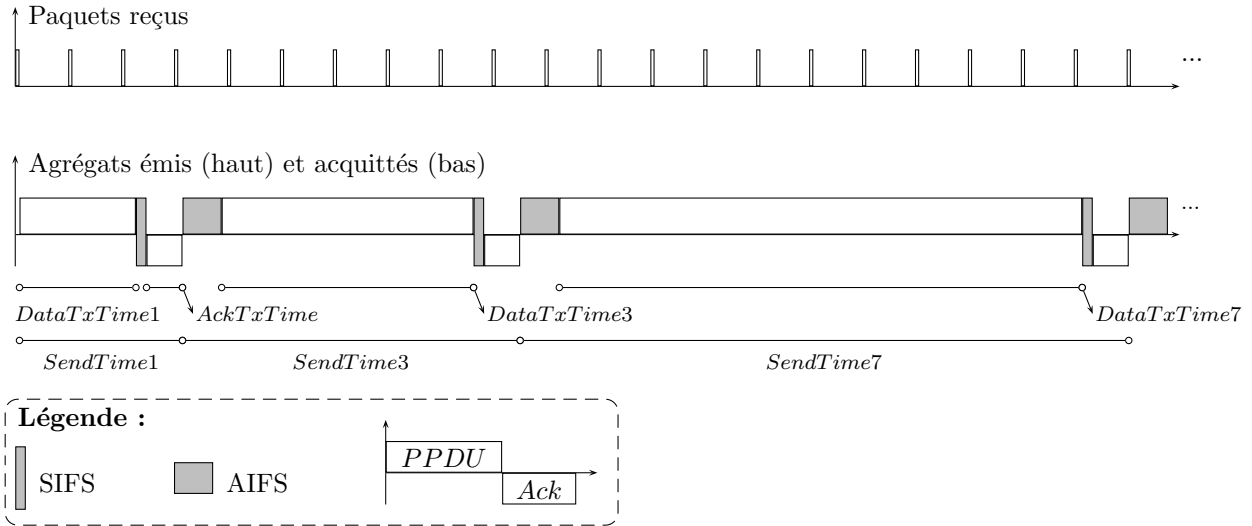


Figure 10 – Chronogramme entre entrée et sortie du système

Paramètre	Valeur
$T_{L\_PRE}$	16 $\mu s$
$T_{L\_SIG}$	4 $\mu s$
$T_{HT\_PRE}$	8 $\mu s$
$T_{HT\_SIG}$	8 $\mu s$
$T_{SYM}$	4 $\mu s$
$m$	1
$N_{DBPS}$	260
$N_{ES}$	1

Tableau 3 – Valeurs appliquées au temps de transmission des données

Le temps d'émission des acquittements suivant chaque transmission d'une trame de données est calculé en équation 7.

$$\begin{aligned}
 l_{ack} &= 14 \text{ octets} \\
 AckTxTime &= 20 + 4 * \left\lceil \frac{16 + 8 * 14 + 6}{192} \right\rceil + 6 \\
 &= 20 + 4 * 2 + 6 = 34 \mu s
 \end{aligned} \tag{7}$$

Le médium ayant été libre pour une durée supérieure à un AIFS, le premier paquet est immédiatement émis. Le temps total nécessaire à l'émission de la première trame est calculé dans l'équation (8).

$$\begin{aligned}
 SendTime1 &= DataTxTime + SIFS \\
 &+ AckTxTime = 154 \mu s
 \end{aligned} \tag{8}$$

Après écoulement de cette durée, une nouvelle transmission va débuter mais elle est précédée d'un AIFS.

Paramètre	Valeur
$T_{PRE}$	16 $\mu s$
$T_{SIG}$	4 $\mu s$
$T_{SYM}$	4 $\mu s$
$N_{DBPS}$	192

Tableau 4 – Valeurs appliquées au temps de transmission des acquittements

Lors de cet AIFS, le système poursuit l'accumulation de paquets afin de former un agrégat. Après  $SendTime1 + AIFS = 191 \mu s$ , trois paquets attendent en mémoire (arrivés à 50, 100 et 150  $\mu s$ ).

Procédons au calcul du temps requis pour émettre cet agrégat de trois paquets. Sans procédure de tirage du backoff, seule la taille de la trame de données  $l$  change ce qui modifie la valeur de son temps de transmission,  $DataTxTime$  (équation (10)).

$$\begin{aligned}
 l_{data3} &= 30 + 3 * 14 \text{ (en-têtes)} + 3 * 500 \\
 &+ 2 * 2 \text{ (remplissage)} + 4 \\
 &= 1580 \text{ octets}
 \end{aligned} \tag{9}$$

$$DataTxTime3 = 36 + 4 * 49 + 6 = 238 \mu s \tag{10}$$

Cette nouvelle taille de MPDU (équation (9)) est calculée en utilisant les informations sur les A-MSDU données en partie 3.2. Calculée de la même manière que dans l'équation (8), la valeur du temps total d'émission est donnée dans l'équation (11).

$$\begin{aligned} SendTime3 &= AIFS + DataTxTime + SIFS \\ &+ AckTxTime = 319 \mu s \end{aligned} \quad (11)$$

avec,  $AIFS = 3 * 9 + 10 = 37 \mu s$

Après  $SendTime3 + AIFS = 356 \mu s$ , sept paquets attendent en mémoire. Les paquets arrivent toujours toutes les  $50 \mu s$  et nous sommes à  $t = 547 \mu s$ .

$$\begin{aligned} l_{data7} &= 30 + 7 * 14 + 7 * 500 + 6 * 2 + 4 \\ &= 3644 \text{ octets} \end{aligned}$$

$$DataTxTime7 = 36 + 4 * 113 + 6 = 494 \mu s \quad (12)$$

$$SendTime7 = 575 \mu s \quad (13)$$

Les valeurs données par les équations (12) et (13) concernent un agrégat de sept paquets. Après l'écoulement de  $SendTime7 + AIFS = 612 \mu s$ , onze paquets attendent en mémoire mais le système n'est pas capable d'envoyer un agrégat d'une taille supérieure à sept paquets à cause du seuil de 3839 octets. Le nombre de paquets dans la mémoire va donc croître à l'infini tout comme le délai d'accès au medium.

Pour éviter les débordements mémoire, les stations arrêtent d'émettre après  $20 ms$ . Cette limite temporelle permet de calculer une approximation  $B$  de la taille minimale de la mémoire dans le but d'éviter toute perte (équation (14)).

$$B = \left\lceil \frac{20}{0.575} \right\rceil * (12 - 7) * 500 * 8 = 700000 \text{ bits} \quad (14)$$

#### 4 Comparaison entre norme et simulation

Riverbed Opnet modeler embarque un moteur de simulation à événement discret. Ses modèles sont composés de machines à états et chaque état est programmé en langage C. Les modèles sont fournis soit par les constructeurs des équipements réseau soit par Opnet comme modèles génériques respectueux de la standardisation. Des paramètres technologiques comme les tailles mémoires, les fréquences processeurs et les capacités des cartes réseaux peuvent également être inclus dans les modèles. Cet article se focalise sur les modèles générique dans la mesure où ce sont eux qui ont servi à la vérification lors de la standardisation de 802.11n (Skordoulis et al. 2008). Nous utilisons des modèles génériques et c'est pourquoi nous nous attachons à vérifier que leur implémentation respecte les spécifications de la norme IEEE 802.11n.

Opnet permet de choisir des modèles de propagation particulier aux réseaux sans fil. Dans notre cas, nous

nous sommes attachés à considérer le modèle de propagation en espace libre ce qui nous assure, au vu des faibles distances choisies, un très faible BER et ainsi de ne subir aucune perte de paquet.

Les paramètres du simulateur Opnet (en particulier ceux du Tableau 1) sont choisis en considérant le cas d'étude utilisé à la section précédente. Une taille de 1024000 bits pour la mémoire permet de respecter la contrainte évoquée à la fin de la partie 3.4. La station sans fil et le point d'accès sont placés proches l'un de l'autre afin de minimiser le délai de propagation. Les sondes de collecte choisies dans Opnet sont listées dans le Tableau 5.

Nom	Point de collecte
load (b/s)	point d'accès
data traffic sent (b/s)	point d'accès
data traffic received (b/s)	station sans fil
control traffic sent (b/s)	station sans fil
control traffic received (b/s)	point d'accès
MSDU per MPDU	point d'accès
MAC queue size (packets)	point d'accès
MAC delay (s)	point d'accès

Tableau 5 – Sondes choisies dans Opnet

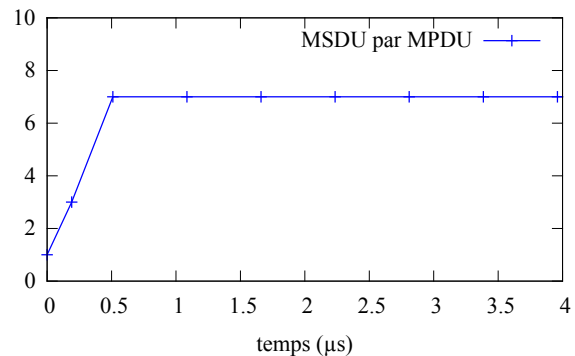


Figure 11 – Nombre de MSDU par MPDU

En complément des sondes listées dans le Tableau 5, plusieurs sondes collectant les pertes de paquets ont été placées depuis la couche MAC de la station Ethernet jusqu'à la couche MAC de la station sans fil. Les valeurs nulles collectées par celles-ci nous assurent qu'aucune perte n'est apparue. D'autre part, les statistiques sur le nombre de paquets dans l'agrégat (Figure 11) correspondent aux résultats donnés par la norme avec un paquet, puis trois paquets, puis sept paquets jusqu'à la fin de la simulation. De plus, les graphiques représentant le délai d'accès au medium (Figure 12) et le nombre de paquet en mémoire (Figure 13) montrent le comportement attendu : une



croissance à l'infini. Comme le montre la Figure 13 tant qu'un agrégat est en formation le nombre de paquets en mémoire augmente mais dès lors qu'un agrégat est définitivement libéré tous les paquets relatifs à cet agrégat sont écartés d'où une décroissance de la courbe.

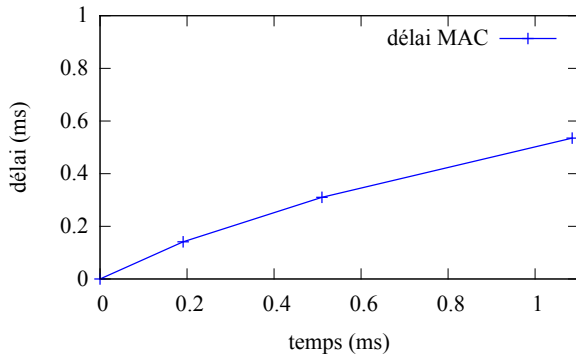


Figure 12 – Délai d'accès au médium

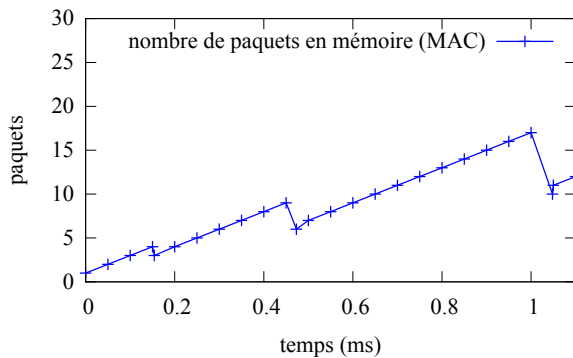


Figure 13 – Nombre de paquets dans la mémoire de la couche MAC

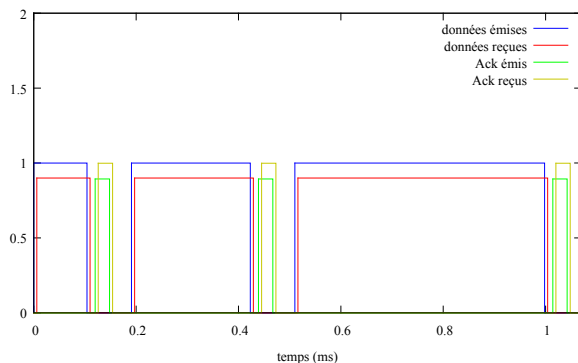


Figure 14 – Trafic observé sur le réseau sans fil

La Figure 14 représente le trafic sur le réseau sans fil vu du point d'accès (courbe haute) et vu de la station sans fil (courbe basse). Ce graphique permet de calculer les valeurs des temps d'émission d'un agrégat (données) et d'un acquittement. Le Tableau 6 montre que la simulation approche les résultats calculés à partir de la norme de 19 ns. Cet écart de

Nom	Norme	Simulation
<i>AckTxTime</i>	34 $\mu s$	34.019 $\mu s$
<i>DataTxTime1</i>	110 $\mu s$	110.019 $\mu s$
<i>SendTime1</i>	154 $\mu s$	154.038 $\mu s$
<i>DataTxTime3</i>	238 $\mu s$	238.019 $\mu s$
<i>SendTime3</i>	319 $\mu s$	319.038 $\mu s$
<i>DataTxTime7</i>	494 $\mu s$	494.019 $\mu s$
<i>SendTime7</i>	575 $\mu s$	575.038 $\mu s$

Tableau 6 – Comparaison des délais entre la norme et la simulation

19 ns entre les résultats correspond au délai de propagation, étant donné qu'il est constant pour chaque trame émise. En faisant abstraction de cet écart, on remarque une parfaite égalité entre les délais calculés suivant la norme et ceux observés en simulation. Ces résultats nous conduisent donc à être confiant avec l'implémentation du système d'agrégation de 802.11n au sein d'Opnet, au moins sur ce cas d'étude.

## 5 Conclusion

Opnet a apporté une nouvelle définition du système d'agrégation de paquets dans 802.11n. Cette définition crée une divergence avec les travaux de la littérature. Elle semble plus logique à nos yeux et l'étude menée dans cet article confirme notre intuition. Les résultats obtenus attestent du bon respect de la norme de la part d'Opnet. La méthodologie présentée dans cet article pourra être reprise dans d'autres cas d'études en modifiant, par exemple, le nombre d'antennes à l'émission.

Le problème était ici relatif à l'évolution d'une technologie. La norme ne définissant pas tout, les constructeurs doivent choisir un moyen d'implémenter cette technologie. Notre analyse, de part sa prise en compte à la fois des spécifications de la norme, mais aussi de la modélisation "générique" proposée par Opnet, permettra alors d'évaluer la confiance à accorder en chaque modèle constructeur (avec leurs spécificités d'implémentation).

Cette reformulation des conditions de libération des agrégats restreint le recours au mécanisme d'agrégation. En conséquence, il nous paraît opportun de redéfinir la plage de validité des résultats obtenus dans notre modélisation théorique (Breck et al. 2014). Nos travaux futurs s'attacheront à estimer l'atteignabilité des majorants calculés en les comparant avec des résultats de simulation.

## A Signification des paramètres des équations 2, 3, 4 et 5

$T_{L\_PRE}$  : durée du préambule non-HT (rétrocompatibilité).

$T_{L\_SIG}$  : durée de la signalisation non-HT (rétrocompatibilité).

$T_{HT\_PRE}$  : durée du préambule HT (pour les stations 802.11n).

$T_{HT\_SIG}$  : durée de la signalisation HT (pour les stations 802.11n).

$T_{SYM}$  : intervalle de temps entre deux symboles.

$N_{SYM}$  : nombre de symboles OFDM.

$SigExt$  : durée des extensions ajoutées au signal.

$m$  : indique l'utilisation ou non de STBC (vaut 2 si utilisé et 1 sinon).

$l$  : longueur de la trame.

$N_{ES}$  : nombre d'encodeurs BCC pour les données.

$N_{DBPS}$  : nombre de bits de données par symbole (varie en fonction du MCS et donc de la modulation entre autre).

$T_{L\_STF}$  : durée de la séquence courte du préambule non-HT.

$T_{L\_LTF}$  : durée de la séquence longue du préambule non-HT.

$T_{PRE}$  : durée du préambule PLCP pour OFDM.

$T_{SIG}$  : durée de la signalisation BPSK-OFDM.

## B Définitions, abréviations et acronymes

Cette annexe a été inspirée par la section 3 de (IEEE-802.11n 2012).

**AIFS** : arbitration interframe space, le temps minimal suivant un medium occupé et précédant l'émission d'une nouvelle trame (utilisé dans HCF).

**A-MPDU** : aggregated-MPDU, une structure contenant de multiples MPDU transportées dans une seule PPDU.

**A-MSDU** : aggregated-MSDU, une structure contenant de multiples MSDU transportées dans une seule MPDU.

**BCC** : binary convolutional code, un algorithme de codage des données utilisé dans plusieurs modulations.

**BSS** : basic service set, un ensemble de stations qui

sont en compétition pour le même medium.

**CWmin** et **CWmax** : les limites basse et haute de l'intervalle de tirage du backoff.

**DCF** : distributed coordination function, la plus connue des méthodes d'accès de 802.11.

**DIFS** : distributed (coordination function) interframe space, le temps d'attente minimum dans DCF.

**HCF EDCA** : hybrid coordination function (HCF) utilisant enhanced distributed control access (EDCA) comme méthode d'accès au medium. EDCA fournit une qualité de service en séparant les paquets dans des classes de service. Chaque classe de service possède des valeurs propres pour AIFS, CWmin et CWmax.

**HT** : high-throughput, un terme relatif à la nouvelle couche physique de 802.11n.

**HT-mixed** : high-throughput mixed, un format de PPDU compatible avec les précédentes versions de 802.11.

**MCS** : modulation and coding scheme, une spécification des paramètres de la couche physique de 802.11n (HT) qui consiste en une modulation et un taux de codage.

**MSDU** : medium access control (MAC) service data unit, l'unité d'information au sein de la couche MAC.

**MPDU** : MAC protocol data unit, l'unité de donnée échangée entre deux entités MAC.

**non-HT** : non high-throughput, un format de PPDU qui correspond à une couche physique d'une version antérieure à 802.11n émise par une station 802.11n.

**OFDM** : orthogonal frequency division multiplexing, une modulation utilisée entre autre dans 802.11n.

**PPDU** : physical layer convergence procedure (PLCP) protocol data unit, l'unité de donnée échangée entre deux entités physiques.

**SIFS** : short interframe space, le temps nominal requis par les couches MAC et physique pour débiter la réponse à une trame reçue.

**STBC** : space-time block coding, permet des débits plus élevés en utilisant de multiples chaînes de transmission côté émetteur et/ou côté récepteur.

**TXOP** : transmission opportunity, un intervalle de temps (dans HCF) au cours duquel une station a le droit d'initier une séquence d'échange de trames sur le medium.

## REFERENCES

- Bhanage, G. et al. (2009). Implication of mac frame aggregation on empirical wireless experimentation, *IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM*, pp. 1–7.
- Breck, D. et al. (2014). Delay and backlog bounds for an aggregation system in wireless networks, IFAC World Congress, Cape Town.
- Ginzburg, B. & Kesselman, A. (2007). Performance analysis of a-MPDU and a-MSDU aggregation in IEEE 802.11n, IEEE Sarnoff Symposium, pp. 1–5.
- IEEE-802.11n (2012). Standard for information technology. Telecommunications and information exchange between systems local and metropolitan area networks. specific requirements part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications.
- Kuppa, S. & Dattatreya, G. (2006). Modeling and analysis of frame aggregation in unsaturated WLANs with finite buffer stations, *IEEE International Conference on Communications*, pp. 967–972.
- Lin, Y. & Wong, V. W. S. (2006). WSN01-1: frame aggregation and optimal frame size adaptation for IEEE 802.11n WLANs, *IEEE Global Communication Conference*, pp. 1–6.
- Riverbed (2014). Opnet modeler 17.5, <http://www.riverbed.com>.
- Skordoulis, D. et al. (2008). IEEE 802.11n MAC frame aggregation mechanisms for next-generation high-throughput WLANs, *IEEE Wireless Communications* **15**(1): 40–47.
- Wang, C.-Y. & Wei, H.-Y. (2009). IEEE 802.11n MAC enhancement and performance evaluation, *Mobile Networks and Applications* **14**(6): 760–771.