

Optimisation de routage et d'ordonnement des paquets avec contrôle dynamique de QoS différenciée dans les réseaux IP 5G -Mobile

Randrianandrasana A.S.¹, Randriamitantsoa P.A.², Randriamitantsoa A.A.³

Laboratoire de Recherche Télécommunication, Automatique, Signal et Images

(LR-T.A.S.I)

Ecole Doctorale en Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation

(ED-STII)

Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo

Université d'Antananarivo

BP 1500, Ankatso – Antananarivo 101 - Madagascar

¹*andoste13@gmail.com*, ²*rpauguste@gmail.com*, ³*andriau23@gmail.com*

Résumé

L'évolution technologique et l'ère actuelle de l'Internet préoccupent les opérateurs de télécommunications et suscitent les chercheurs dans le domaine à trouver des solutions à long termes afin d'assurer la satisfaction des utilisateurs en termes de Qualité de Service sur chacune des différentes applications existantes et à venir. En effet, les évolutions attendues dans les réseaux de l'ère de la 5G présentent un niveau d'exigences très élevé que ce soit en termes technologiques qu'en termes de qualité. Dans cette vision, notre travail dans cet article consiste à proposer de solutions d'optimisation aux niveaux du routage et de l'ordonnement des paquets au niveau des réseaux IP 5G-Mobile. Deux approches sont alors étudiées : au niveau du routage nous avons proposé un nouvel algorithme de routage IP basé le concept de l'apprentissage par renforcement ; au niveau des files d'attente nous avons proposé une nouvelle technique d'ordonnement des paquets basés sur les ordonnanceurs PQ et WFQ.

Mots-clés : réseaux IP, QoS, routage IP, apprentissage par renforcement, Q-Routing, mécanisme d'ordonnement.

Abstract

Technological development and the current era of the Internet are a concern for telecommunications operators and are prompting researchers in the field to find long-term solutions to ensure user satisfaction in terms of Quality of Service on each of the different existing and future applications.

Indeed, the developments expected in the networks of the 5G-Mobile era present a very high level of requirements, both in technological terms and in terms of quality. In this vision, our work in this paper consists of proposing optimization solutions at the routing and scheduling level of IP packets. Two approaches are then studied: at the routing level we proposed a new IP routing algorithm based on the concept of reinforcement learning; at the queue level we have proposed a new packet

scheduling technique based on the PQ and WFQ schedulers.

Keywords: IP network, QoS, IP routing, reinforcement learning, Q-Routing, scheduling.

1. Introduction

Nous avons choisi de consacrer nos travaux autour du routage et de la gestion des files d'attente (notamment au niveau du mécanisme d'ordonnancement) du fait que ces deux fonctions sont complémentaires et sont fondamentales au bon fonctionnement du réseau du fait qu'ils interagissent directement sur les trafics à écouler.

En effet, les objectifs généraux de ces deux concepts sont de maximiser le débit utile du réseau ; de satisfaire les seuils des indicateurs de performances pour assurer la qualité de service attendue par les utilisateurs : un faible délai de transit dans le réseau ainsi qu'une gigue acceptable, une faible probabilité de perte de paquets, une disponibilité assurée d'une route ou du réseau, une équité entre utilisateurs ; de minimiser le coût économique à utiliser ; et enfin d'éviter les congestions.

La première approche d'optimisation de routage s'agira d'un algorithme basé sur la technique de Q-Routing dans le but de remédier aux limites des protocoles de routage classique basé sur les algorithmes de Bellman-Ford et de Dijkstra en répondant aux besoins attendus par les différents services. Quant à la nouvelle technique d'ordonnancement, elle sera le résultat de la combinaison des principes des deux ordonnanceurs PQ et WFQ visant à assurer aux mieux les

exigences en termes de qualité de service pour chaque type d'application parcourant le réseau.

Ce travail s'organise de la manière suivante :

- Nous allons d'abord présenter l'architecture des réseaux de télécommunication 5G puis présenter une nouvelle architecture fonctionnelle de routeur qui permet de mettre en œuvre nos solutions d'optimisation ;
- Nous allons ensuite proposer notre nouvel algorithme utilisant l'apprentissage par renforcement ;
- Nous allons par la suite parler de notre technique d'ordonnancement basant sur les deux ordonnanceurs PQ et WFQ.

2. Réseau de télécommunication 5G

2.1 Architecture globale du réseau 5G

Le réseau de télécommunications 5G présente une architecture globale constituée d'un accès Radio appelé Next Generation RAN (NG-RAN) et d'un cœur réseau appelé 5G Core (ou 5GC) [1] [2].

Cette architecture est illustrée sur la **Figure 01** suivante.

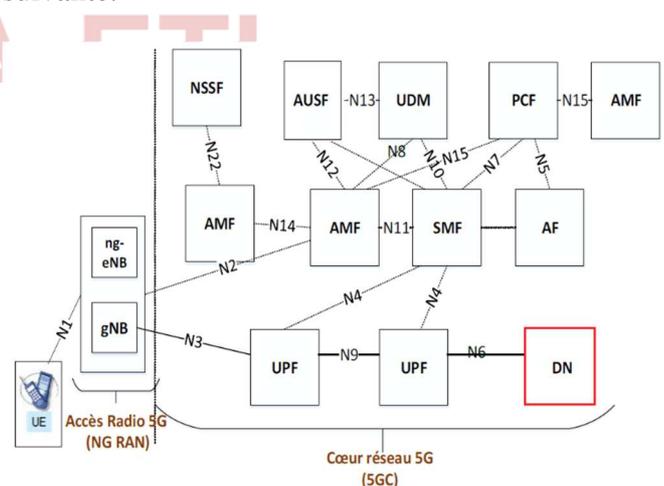


Figure 01 : Architecture globale du réseau 5G

Dans la partie Accès Radio 5G, les équipements utilisateurs ou User Equipment (UE) communiquent avec les stations de base soit par un lien radio 5G, soit par un lien radio 4G.

Nous pouvons distinguer deux types de stations de bases :

- le gNB ou next Generation Node Base Station qui est le nouveau eNodeB radio propre à la communication 5G;
- le ng-eNb ou Next Generation-eNb (encore appelés eLTE-eNB) est une évolution d'eNB qui prend en charge la connectivité à EPC et 5GC.

Nos travaux de recherche se rapportent au bloc en rouge (DN ou Data Network) de l'architecture 5G de la **Figure 01** qui concerne les réseaux de données, autrement dit les réseaux IP 5G

2.2 Internet 5G

L'évolution des technologies Internet a convergé vers un système tout IP à commutation de paquets, qui a façonné notre façon de vivre, de travailler, d'apprendre et de jouer.

Il s'avère que les moteurs du futur Internet sont toutes sortes de services et d'applications, de faibles débits (exemple les données de capteur et IoT) jusqu'aux plus élevés (exemple la vidéo haute définition streaming), qui doivent être compatibles pour prendre en charge diverses latences et différents appareils.

Ainsi, l'Internet 5G tourne principalement autour de cinq caractéristiques principales [3]:

- L'Internet des objets (IoT ou Internet of Things) : interconnecter simultanément les

différents appareils miniaturisés comme les capteurs ou non et à travers différentes technologies d'accès, pour différents scénarios et cas d'utilisation.

- La reconfiguration de réseau et le support de la virtualisation : concernent principalement les technologies de SDN (Software Defined Network) et de NFV (Network Function Virtualization)
- La mobilité : il s'agit de l'accès mobile aux services prenant en charge l'interopérabilité dans le large déploiement de technologies d'accès hétérogènes telles que 3G / LTE et WiMAX, ainsi que le WiFi
- Le contrôle de la qualité de service : définir des outils et des techniques des garanties de qualité prévisibles, mesurables et différenciées pour les applications en fonction de leur caractéristiques et exigences en garantissant des ressources suffisantes (bande passante) et en contrôlant paramètres de retard, de gigue et de perte de paquets.
- L'approche de sur-provisionnement en ressources : décrire un mécanisme générique, capable d'intégrer SDN et NFV pour un contrôle efficace de la surréservation de ressources pour prendre en charge une QoS différenciée sur l'Internet 5G.

3. Architecture fonctionnelle d'un routeur

3.1 Architecture classique d'un routeur

Les routeurs sont les équipements de base dans les réseaux IP. La file d'attente est une composante centrale dans l'architecture des routeurs.

En effet, un routeur est composé de processus asynchrones destinés à :

- Assembler les paquets reçus (file d'attente en entrée) ;
- Contrôler l'intégrité du paquet ;
- Déterminer l'interface de destination ;
- Transmettre les paquets (files d'attente en sortie)

La Figure 02 illustre le schéma bloc fonctionnel d'un routeur.

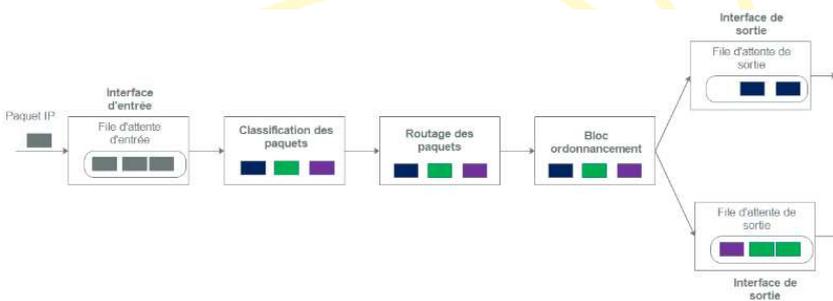


Figure 02 : Architecture d'un routeur

Cette architecture comprend toutes les fonctions de routage et les fonctions de gestion de file d'attente afin de traiter l'aiguillage des paquets IP vers sa destination.

3.2 Nouvelle architecture fonctionnelle du routeur

Dans le cadre de notre objectif, nous voulons tout d'abord proposer une nouvelle architecture qui va permettre d'intégrer nos deux approches d'optimisation. Celle-ci est présentée dans la Figure 03.

Figure 03 : Nouvelle architecture fonctionnelle

Nous allons présenter les blocs optimisés par notre nouvelle solution encadrés dans la figure 03. On distingue :

- Le bloc de différenciation de trafic : ce bloc correspond à la fonction de classification dans l'architecture classique (dans la figure 02). Cependant, contrairement à cette dernière, ce bloc se met en amont de la sélection du chemin, c'est-à-dire avant le bloc de routage car notre but est de différencier chaque type de trafic bien avant la décision de routage ;
- La politique de routage optimisée : il s'agit ici de la fonction de routage que nous allons optimiser à partir de notre approche se basant sur l'apprentissage par renforcement combiné avec une politique de seuil sur les métriques de QoS.
- Bloc d'ordonnement : chaque trafic différencié ayant été routé se trouve ensuite dans le bloc d'ordonnement où ils vont recevoir les traitements basés sur notre nouvelle solution.

3.3 Valeurs seuils des métriques de performances de la VoIP et de la vidéo

Les deux tableaux (01) et (02) suivants résument les valeurs seuils des paramètres réseaux pouvant qualifier les performances des deux applications critiques qui sont la VoIP et la vidéo sur trois niveaux de service : bon, moyen et mauvais.

Les paramètres décrits sont le délai de transit, la gigue et la perte de paquets.

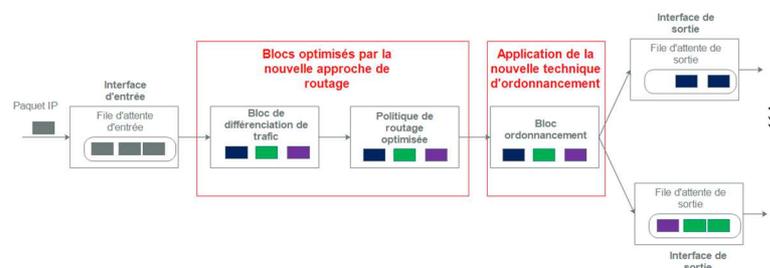


Tableau 01 : Valeurs seuils des métriques de performances de la VoIP

Niveau de service	Bon	Moyen	Mauvais
Délai de transit	$\Delta < 150ms$	$150 ms < \Delta < 400ms$	$\Delta > 400ms$
Gigue	$G < 20ms$	$20 ms < G < 50ms$	$G > 50ms$
Perte de paquets	$P < 1\%$	$1\% < P < 3\%$	$P > 3\%$

Tableau 02 : Valeurs seuils des métriques de performances de la vidéo

Niveau de service	Bon	Moyen	Mauvais
Délai de transit	$\Delta < 150ms$	$150 ms < \Delta < 400ms$	$\Delta > 400ms$
Gigue	$G < 20ms$	$20 ms < G < 50ms$	$G > 50ms$
Perte de paquets	$P < 0,5\%$	$0,5\% < P < 2,5\%$	$P > 2,5\%$

4. Nouvel algorithme de routage IP basé sur l'apprentissage par renforcement

L'apprentissage par renforcement fait partie des techniques de l'apprentissage automatique ou Machine Learning qui fait partie des solutions d'optimisations les plus utilisées par les

chercheurs. Ce concept est également sollicité dans plusieurs travaux de recherche dans le domaine du routage réseau en se basant principalement sur l'algorithme de Q-Learning.

En effet, plusieurs algorithmes de routage dans les réseaux ont été proposés notamment le Q-Routing [4] sur lequel se sont étendu plusieurs autres idées comme le Predictive Routing (PQ-Routing) ou le Q-Neural Routing [5] [6]. L'objectif de ces travaux est d'avoir un contrôle adaptatif de trafic dans un environnement dynamiquement instable (en termes de niveau de charge réseau et de topologie de réseau).

Aussi, d'autres applications du routage basées sur l'apprentissage par renforcement sont également étudiées comme pour les réseaux Adhoc, les réseaux WSN (Wireless Sensor Network), les réseaux Bluetooth, le SDN... [7] [8] [9] [10].

4.1 Vision et objectif de notre optimisation de routage

Dans ce travail, notre vision est de différencier les différents types de flux de trafics par applications et de répondre à la qualité de service correspondant à chacun d'eux lors de la décision de routage.

Ainsi, nous tentons de dépasser les limites des algorithmes de routage basé sur le Q-Routing déjà proposés par rapport aux points suivants :

- Identifier le type de trafic avant le routage,
- Prendre en compte le type de trafic lors de la décision de routage afin d'assurer la QoS qui lui correspond.

- Définir le ou les paramètres de qualité de service dont chaque type de trafic est le plus sensible afin d'en prendre en compte et d'assurer les exigences requises.
- Utiliser aux mieux toutes les ressources du réseau en considérant toutes les alternatives possibles dans la décision de routage et équilibrer ainsi les différentes charges du réseau.

- La voix comme pour le cas des VoIP (sur Messenger, Skype, Whatsapp)
- La vidéo qu'on rencontre dans les vidéoconférences, les jeux vidéo en ligne et les vidéos à la demande (VoD).

4.2 Principe de l'algorithme de routage

La topologie de réseau de la figure 03 illustre l'idée principale de notre approche.

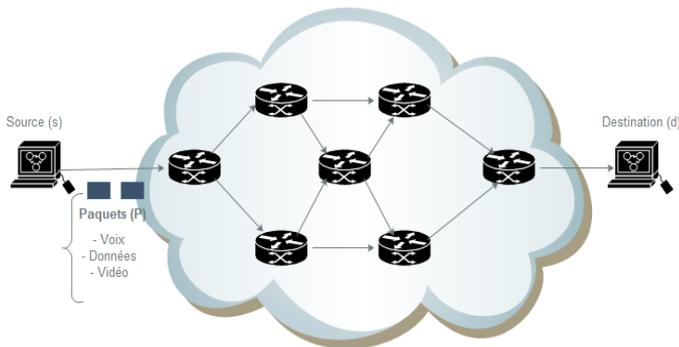


Figure 04 : Topologie de réseau à considérer

Notre algorithme va s'appuyer sur les bases de la politique de Q-Neural Routing [6-3] (étant elle-même une amélioration de l'algorithme de Q-Routing).

Nous allons apporter notre contribution à la différenciation des types de trafic avec prise en compte de leur niveau de QoS.

Nous allons ainsi étudier les trois principaux trafics présents sur Internet :

- Les données représentées par les applications telles que FTP, requêtes Web, mailing, Telnet...

Le tableau 03 qui suit va résumer la modélisation de notre problème de routage avec le concept de Q-Learning.

Tableau 03 : Modélisation du problème de routage par Q-Learning

Correspondance Q-Learning	Elément du réseau
Agent	Noeud du réseau (routeur)
Etat	Position du routeur courant x dans le réseau à l'instant t
Action	Choisir parmi ses voisins le routeur présentant le meilleur chemin pour chaque type de trafic considéré
Récompense	Somme des temps de bout-en-bout jusqu'à la destination prenant en compte la politique de seuil
Politique optimale à déterminer	Politique de Q-neural Routing + politique de seuil sur chaque nœud traversé

4.3 Modélisation mathématique de l'approche

Soient :

- P : le paquet à envoyer
- s : le terminal source ,

- N : L'ensemble des routeurs (des nœuds) du réseau,
- $x \in N$: le routeur courant directement connecté à s ,
- E : ensemble des états du réseau par rapport à la position du routeur courant,
- $x(t) \in E$: état au niveau du routeur x à l'instant t ,
- V_x : ensemble des routeurs voisins de x ,
- $y \in V_x$: routeur voisin de x choisi par x ,
- d : le terminal de destination,
- A : ensemble des actions possibles à choisir un des voisins du routeur courant
- $a_{x_t}(y, d) \in A$: choisir le voisin y pour aller à la destination d à l'état x_t ,
- w_x : le temps d'attente dans la file d'attente d'un routeur quelconque x ,
- τ_{xy} : le temps de transmission du paquet entre deux nœuds adjacents x, y ,
- R : ensemble des récompenses retournées à chaque choix de route
- $r(x, y, d) \in R$: récompense obtenue par x de la part de son voisin y en choisissant ce dernier pour aller à la destination d .
- $Q(x, y, d)$: Fonction valeur de x pour aller à la destination d en passant par y et désigne le temps d'acheminement de bout-en bout depuis x vers d .

Tel que :

$$T_y = \min_{z \in V_y} Q(y, z, d) \quad (02)$$

L'estimation de Q-valeur se fait à partir de la formule suivante [1] :

$$Q(x, y, d) = Q(x, y, d) + \eta \{r(x, y, d) - Q(x, y, d)\} \quad (03)$$

La figure (04) suivante illustre la topologie de la modélisation de l'approche

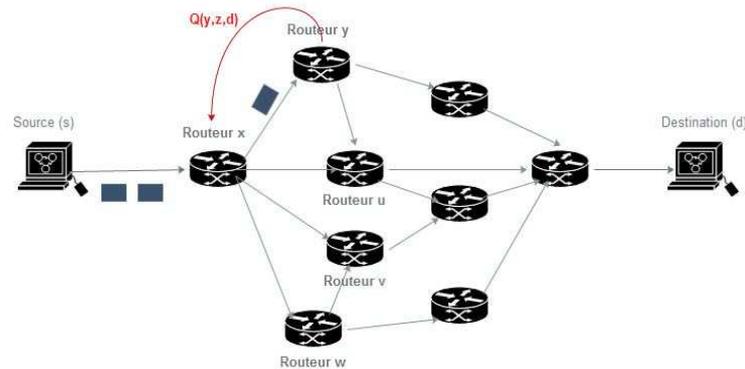


Figure 05 : Topologie de modélisation

4.3.1 Politique de seuil

Le principe de notre approche consiste à utiliser une politique spécifique que nous appellerons « Politique de seuil ». Il s'agit d'une stratégie visant à vérifier que le seuil de métrique de QoS ne soit pas dépassé afin de garantir la performance de l'application considérée.

Nous allons définir ce seuil suivant le type de trafic et selon leur besoin en termes de niveau de qualité attendu.

Selon les trois types de trafic à considérer, nous allons définir trois politiques de seuil différents à prendre en compte dans la décision de routage :

- Soit π_{Δ_v} la politique de seuil définie pour la voix, en considérant la métrique de délai Δ_v . Cette métrique peut être estimée à partir de la Q-valeur ;

Suivant le principe de l'apprentissage par renforcement et celui du Q-Routing, chaque récompense est définie par la formule suivante [1] :

$$r(x, y, d) = w_y + \tau_{xy} + T_y \quad (01)$$

- Soit π_P la politique de seuil définie pour la vidéo, en considérant la métrique de perte de paquets notée P.

minimise la valeur de Q^π , définie par la formule suivante :

$$\pi^* = \min_{y \in V_x} \{Q^\pi(x, y, d)\} \quad (07)$$

La perte de paquet peut être définie de la façon suivante :

$$P(\%) = \frac{n_d}{N} \times 100 \quad (04)$$

Avec n_d correspond au nombre de paquets détruits (rejetés) et N représente le nombre total de paquets vidéo à écouler.

- Soit π_{Δ_D} la politique de seuil définie pour les données, en considérant également de délai Δ_D .

Cette dernière sera obtenue de manière itérative suivant la technique d'exploration-exploitation adoptée.

Pour mettre en place notre algorithme, nous allons considérer quatre types de paquet noté T(P) :

- T(P) = 0 : il s'agit d'un paquet de renforcement
- T(P) = 1 : il s'agit d'un paquet de données
- T(P) = 2 : il s'agit d'un paquet de voix
- T(P) = 3 : il s'agit d'un paquet de vidéo

La figure (05) présente le détail de cette nouvelle politique de routage qui est l'essence même de notre travail.

4.3.2 Politique de routage

Posons :

- Π : l'ensemble des politiques de routage possibles
- $\pi \in \Pi$: est la politique de routage que nous allons adopter dans notre nouvel algorithme en vérifiant la politique de seuil, définie par :

$$\pi : E \rightarrow A \quad (05)$$

$$x_t \rightarrow a_{x_t}(y, d) | \pi_{\Delta} \text{ ou } \pi_P$$

- Q^π : désigne la fonction valeur obtenue en adoptant la politique π , définie par :

$$Q^\pi : (A, \Pi) \rightarrow R \quad (06)$$

$$(a_{x_t}(y, d), \pi) \rightarrow Q^\pi(x_t, y, d)$$

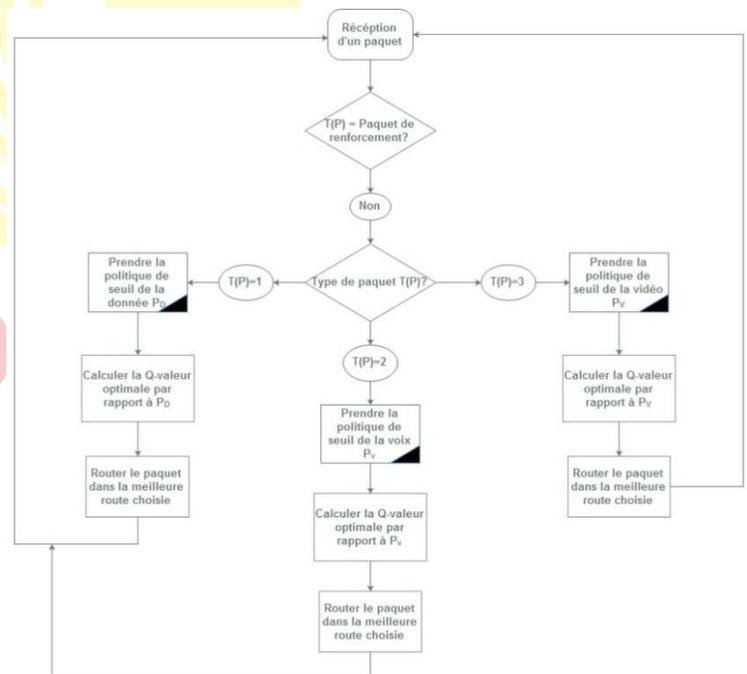


Figure 06 : Nouvelle politique de routage

4.4 Présentation de l'algorithme de routage

En tenant compte de la politique de seuil, la politique de routage optimale notée π^* est celle qui

La figure (06) illustre le processus général de notre nouvel algorithme de routage depuis la réception d'un paquet au niveau de chaque routeur du réseau.

Il inclut l'étape de transmission de paquets vers le voisin correspondant, l'étape de renforcement en renvoyant au routeur source le signal de renforcement et enfin l'étape de mise à jour des Q-valeurs ainsi que des contenus de la Q-table du routeur.

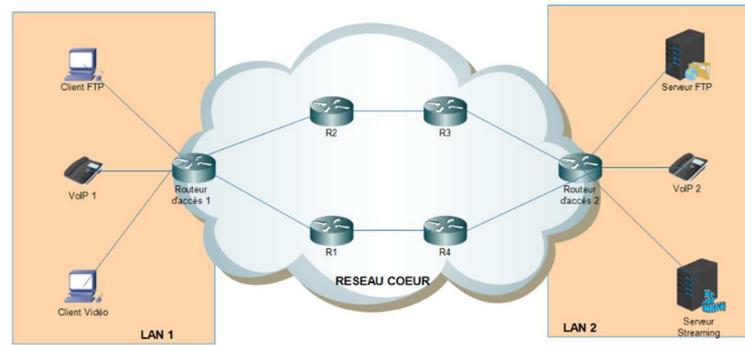


Figure 08 : Topologie de réseau à considérer

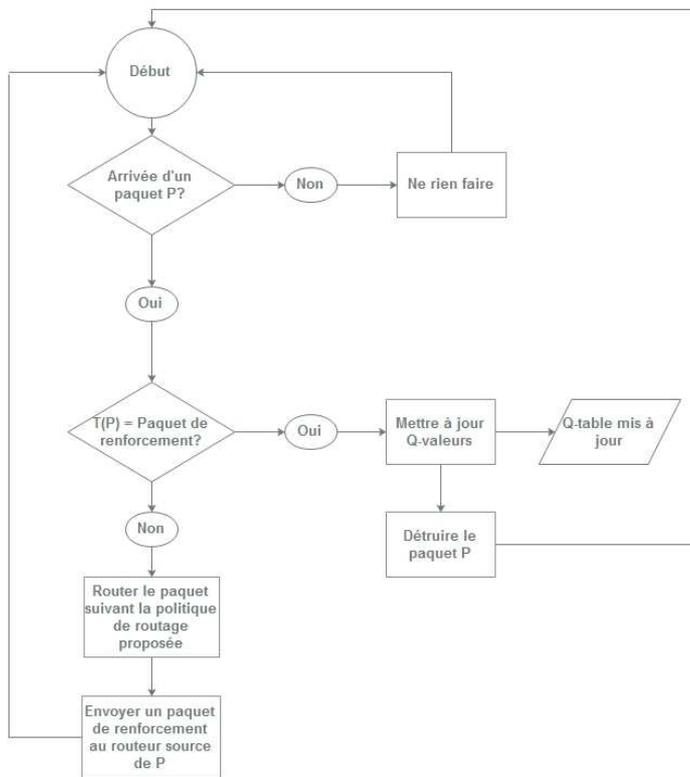


Figure 07 : Description générale de notre algorithme

4.5.2 Scénarii de simulation

Pour vérifier et analyser les performances de notre nouvel algorithme de routage, nous avons mis en place les quatre scénarii suivants :

- analyser les performances générales de la solution dans un contexte de réseau fonctionnel normal en termes de qualité de service des différentes applications;
- vérifier la tolérance de l'algorithme par rapport aux pannes dans le réseau;
- vérifier la tolérance de l'algorithme par rapport aux délais dans le réseau;
- comparer les performances de notre algorithme par rapport aux protocoles de routage existant notamment le RIP et l'OSPF.

4.5 Résultats de simulation de l'algorithme de routage appliqué dans l'Internet 5G

4.5.1 Topologie de réseau à étudier

4.5.3 Performances générales de notre algorithme de routage

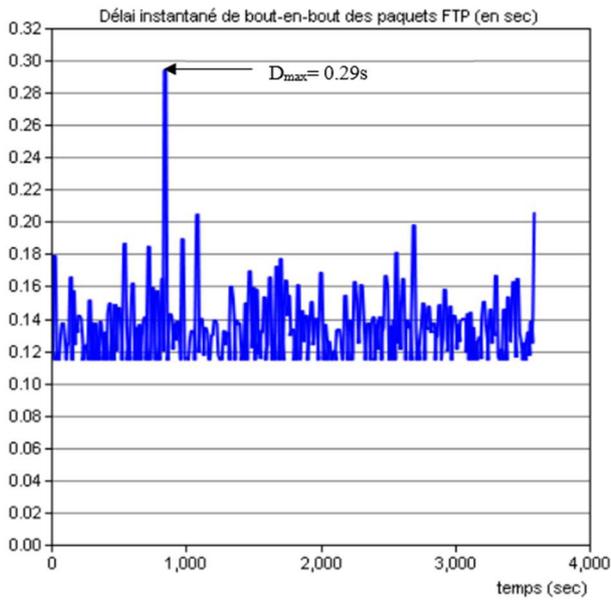


Figure 09 : *Décalé instantané des paquets FTP*

La **Figure 09** nous montre que nous avons une qualité de service élevée pour l'application FTP. En effet, les trafics FTP sont classés parmi les trafics élastique, ils ne présentent donc pas d'exigence en terme de décalé.

Or le résultat sur la **Figure 09** nous montre que le décalé de transit des paquets FTP va de 0.12s jusqu'au $D_{max}=0.29s$. Selon le tableau de valeurs seuils sur le tableau (01), le décalé maximum observé est largement en dessous de le seuil maximal pour caractériser un trafic à temps réel de bonne qualité de service

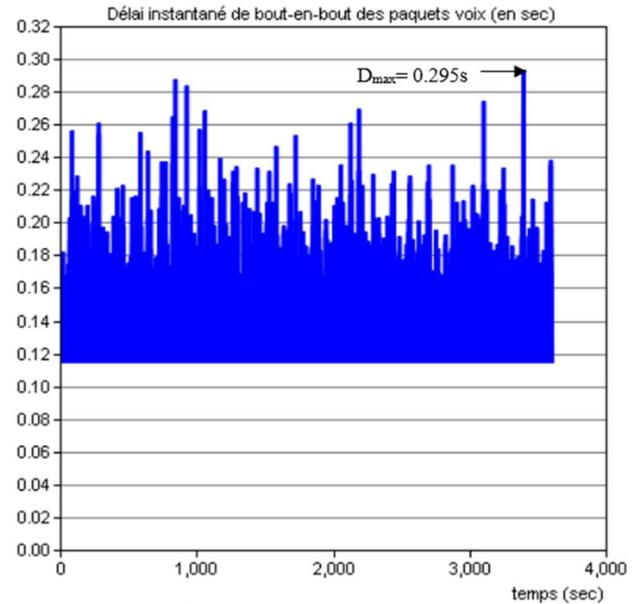


Figure 10 : *Décalé instantané des paquets voix*

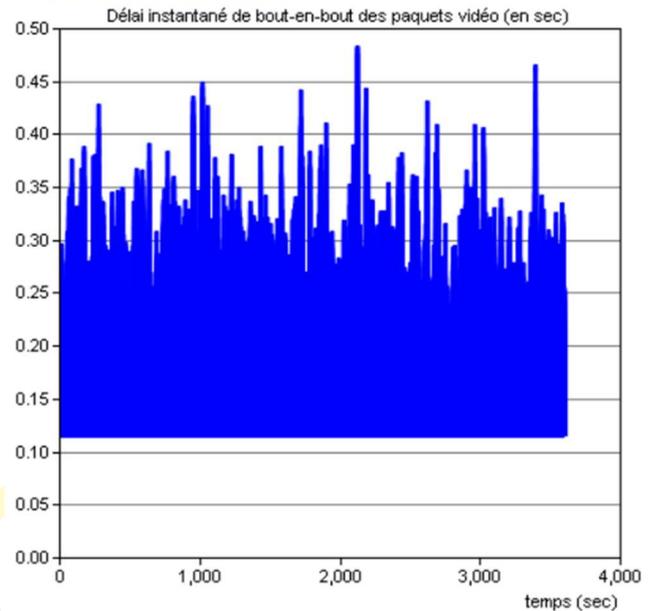


Figure 11 : *Décalé instantané des paquets vidéo*

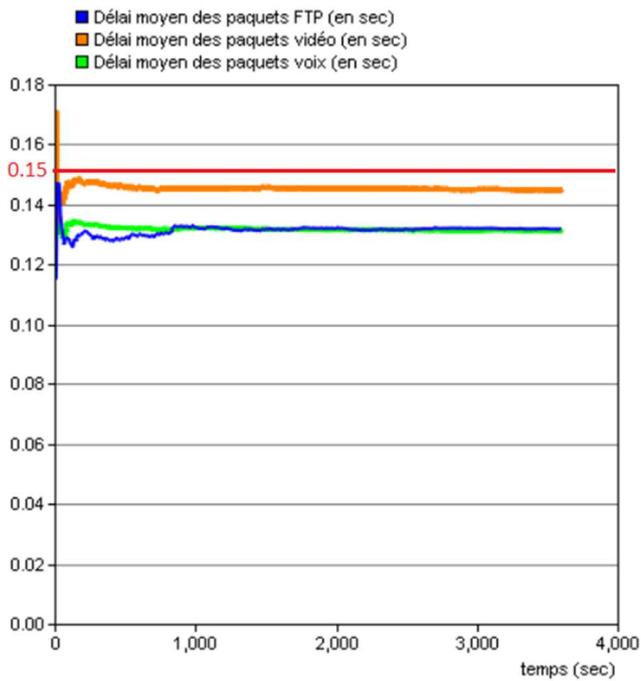


Figure 12 : Délai moyen des paquets FTP, voix et vidéo

En observant la **Figure 10**, nous pouvons dire que les délais des paquets se trouvent dans l'intervalle [0.115s – 0.295s]. En se référant au tableau valeurs seuils **Tableau (01)** pour qualifier la performance de l'application VoIP, nous constatons un niveau de qualité de service entre Moyen et bon. En effet, le seuil minimum pour avoir un niveau élevé de QoS est de 150ms soit de 0.15s et le seuil maximum à ne pas dépasser est de 400ms soit 0.4s.

Ainsi, en utilisant notre nouvel algorithme de routage, l'application VoIP se trouve bien dans la norme de la qualité de service requise.

En observant la **Figure 11**, les délais des paquets vidéo présentent plusieurs pics aux environs des 0.41s à 0.48s avec une plage de valeurs allant de 0.12s à 0.48s. Cependant nous pouvons quand même dire que la qualité de l'application vidéo est satisfaisante dans la globalité du temps par rapport

aux données du tableau de seuil **Tableau (02)** de performance vidéo dont le seuil maximal à ne pas de passer est de 400ms ou 0.4s.

En prenant en compte toutes les valeurs moyennes des délais pour les trois applications sur la **Figure 12**, nous pouvons voir qu'elles sont toutes au-dessous du seuil minimum permettant d'assurer un bon niveau de qualité de service des applications à temps réel telles que la voix et la vidéo, soit $D_{min} = 0.15s$. Ainsi pour la FTP, il n'y a rien à dire vu qu'elle est toujours à bon niveau de qualité de service parce qu'elle n'est pas exigeante en terme de délai.

4.5.4 Tolérance aux pannes réseau

Nous allons présenter le taux de charge de chacune des deux liaisons Routeur_acc_1 > R1 et Routeur_acc_1 > R2 présentées dans la topologie de la Figure 08.

Premièrement nous allons voir ce taux de charge avant la panne de la liaison Routeur_acc_1 > R2.

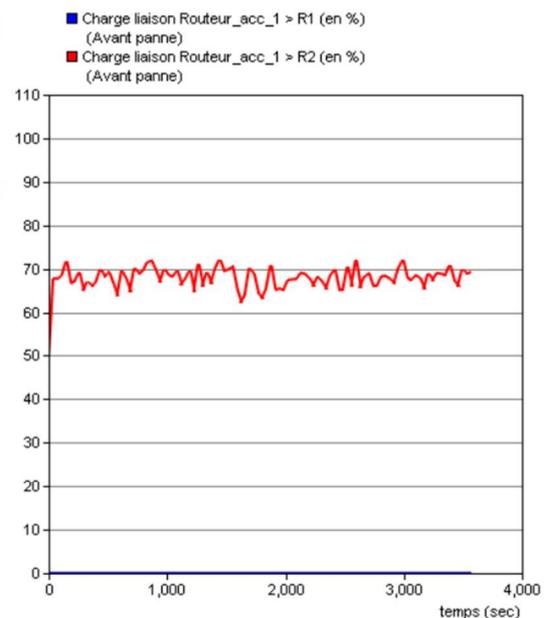


Figure 13 : Taux de charge d'utilisation des routes vers R1 et R2 avant la panne

Nous pouvons remarquer que la route qui passe par le routeur R2 est utilisée à environ 70% tandis que celle qui passe par le routeur R1 est quasiment sans charge.

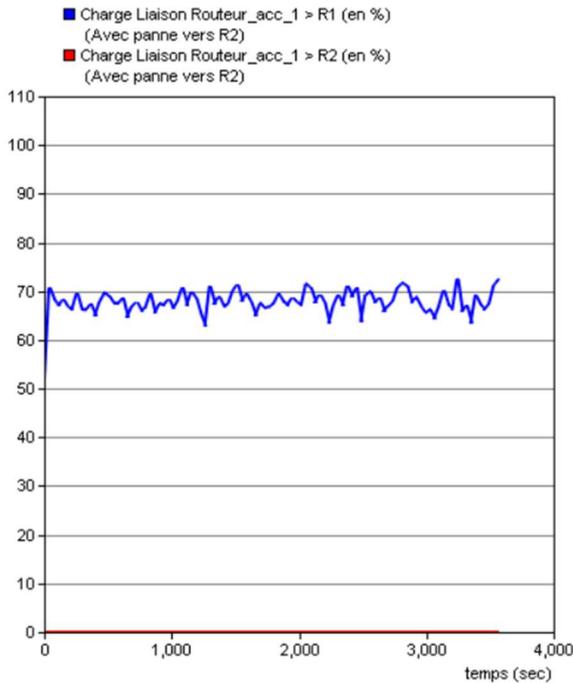


Figure 14 : Taux de charge d'utilisation des routes vers R1 et R2 après panne

En comparant les **Figures 13 et 14**, nous pouvons dire qu'après la panne de la route principale, les paquets ont emprunté la route secondaire qui passe par le routeur R1 avec un taux quasiment identique qui signifie qu'il n'y pas eu aucune perte de paquet.

En d'autres termes, ces résultats démontrent que notre algorithme de routage est réactif aux différentes pannes qui peuvent surgir au sein du réseau en cherchant d'autre route alternative quand celle-ci existe.

4.5.5 Tolérance aux délais réseau

Durant ce scénario, nous allons paramétrer un délai à la liaison principale passant par le routeur R2 soit $D=1.4s$ qui va affecter la voix et les données FTP. Il est à savoir que les seuils que nous avons fixés dans notre algorithme sont respectivement de 1s et de 0.4s pour la FTP et la voix.

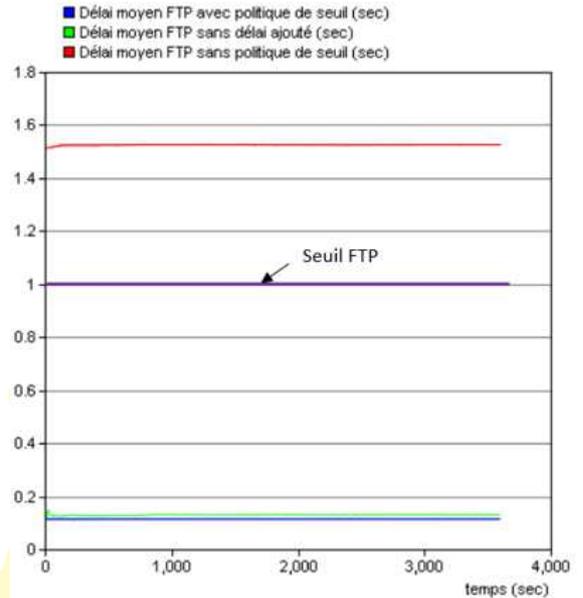


Figure 15 : Comparaison des délais moyens FTP avant et après délai ajouté

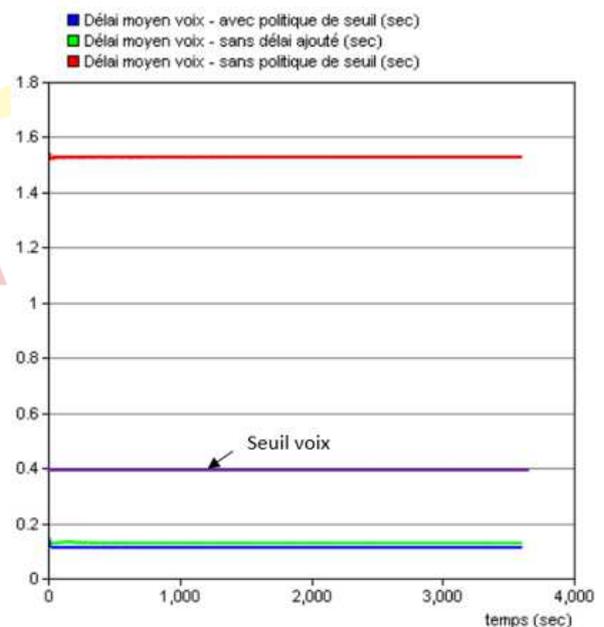


Figure 16 : Comparaison des délais moyens des paquets voix avant et après délai ajouté

De ces **figures 15 et 16**, nous pouvons rapidement remarquer que sans la politique de seuil le délai FTP et le délai voix dépassent largement les seuils minimum fixés respectifs tels que $D_{FTP} \approx D_{voix} \approx 1.55s > seuil_{FTP}(= 1s) > seuil_{voix}(= 0.4s)$.

Cependant, en regardant les courbes en bleu utilisant notre politique de seuil, nous pouvons voir que le délai satisfait grandement la qualité de service requise pour les deux applications FTP et VoIP. En effet les délais sont en moyenne aux environs de 0.11s.

D'un autre côté, nous observons également que les délais après l'ajout de latence sont sensiblement inférieurs aux délais précédemment observés dans le réseau fonctionnel initial (**Figure 12**). Ceci peut s'expliquer du fait que notre algorithme de routage a transféré la route pour les paquets FTP et voix vers celle qui passe par le routeur R1 quand il a détecté que les seuils ont été dépassés mais il a laissé la route principale (passant par R2) aux paquets vidéo pour lesquels le seuil fixé concerne le taux de perte de paquets et non le délai. Les délais sont donc inférieurs car il y a moins de trafics que dans le scénario 1.

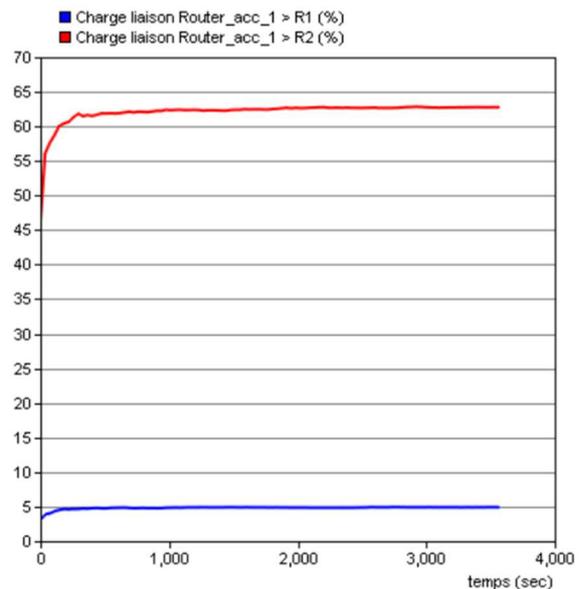


Figure 17 : Charge des liaisons vers R1 et vers R2 après l'ajout de latence

Nous pouvons constater que la route passant par le routeur R1 précédemment inutilisée (voir **figure 13**) est maintenant chargée de 5% environ du routage des paquets FTP et voix vers cette route. La charge passant par le routeur R2 quant à elle a diminué par rapport à celle dans la **figure 13**, soit à un taux moyen de 65%.

4.5.6 Comparaison de performances par rapport aux protocoles de routage RIP et OSPF

Nous allons comparer les résultats par rapport à chaque délai des différentes applications en utilisant les trois différents algorithmes de routage dans un contexte de réseau fonctionnel normal puis dans un contexte de réseau ayant une latence significative pour la voix.

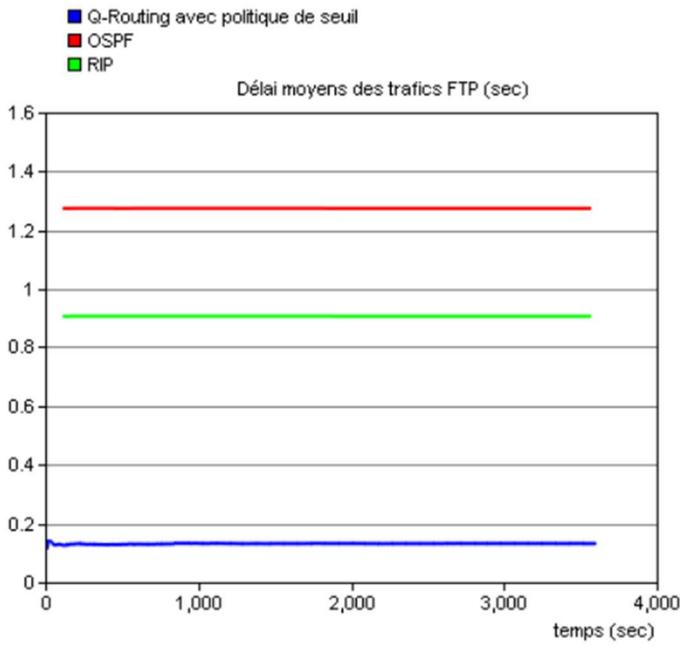


Figure 18 : *Comparaison des délais FTP dans un réseau normal*

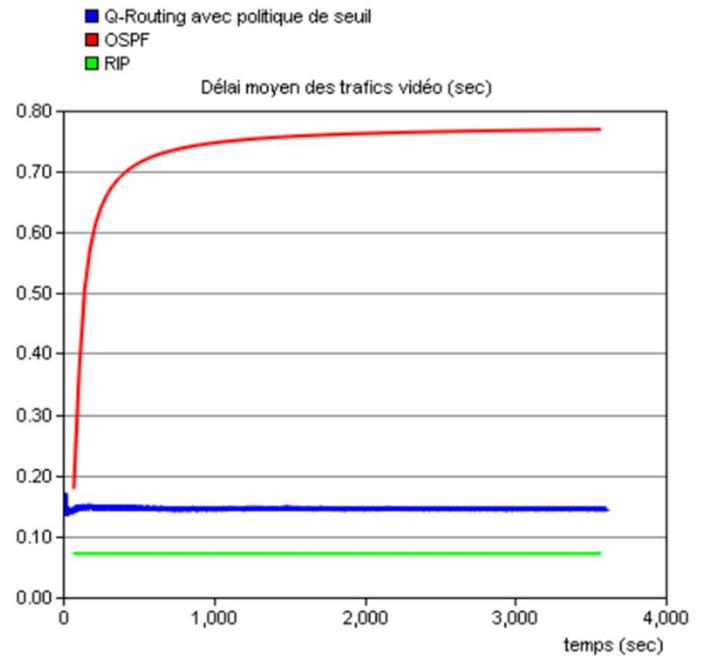


Figure 20 : *Comparaison des délais vidéo dans un réseau normal*

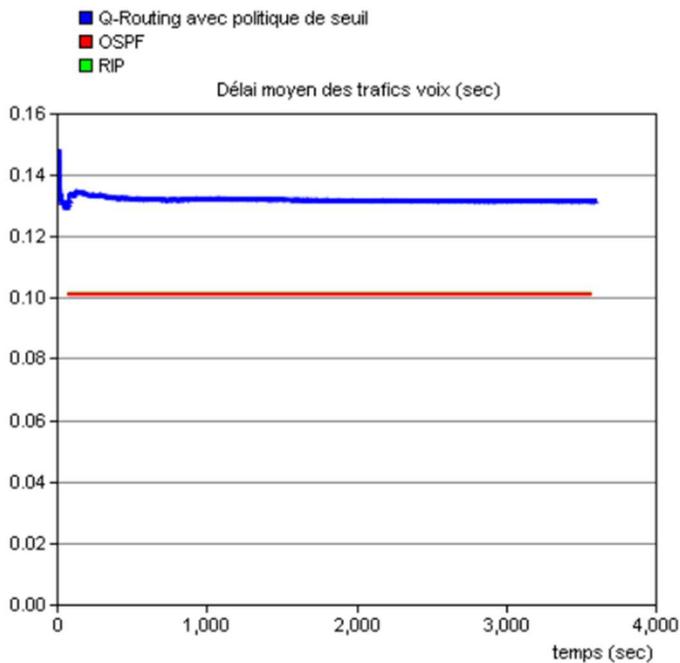


Figure 19 : *Comparaison des délais voix dans un réseau normal*

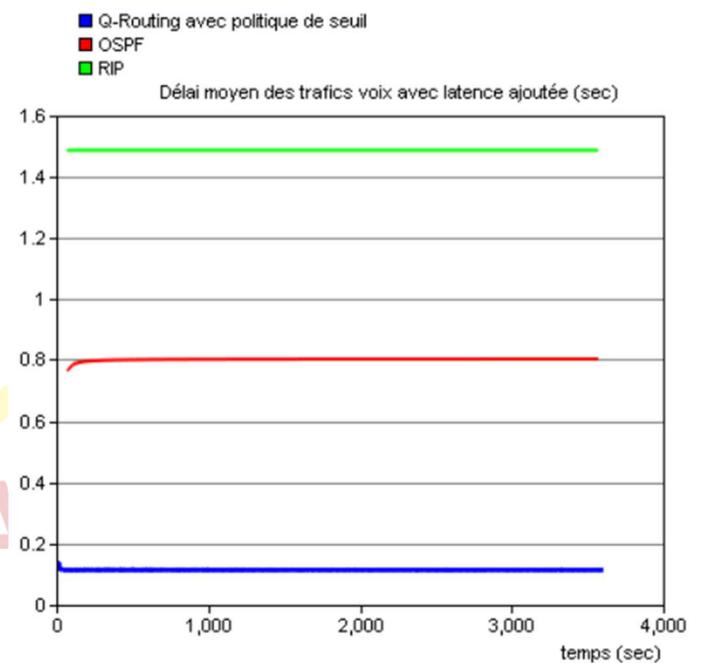


Figure 21 : *Comparaison des délais voix dans un réseau à latence ajoutée*

5. Nouvelle technique d'ordonnancement de paquets basée sur PQ et WFQ

5.1 Vision et objectif de l'approche

Le développement des techniques d'ordonnancement vise à contrôler le partage de ressources, pour isoler des classes de service et pour réduire le temps d'attente des paquets dans les files.

La problématique se réside dans le fait que bien que plusieurs techniques ont été proposées, chaque principe peut être bénéfique pour un certain type de trafic mais pénalisant pour d'autres.

Nous considérons toujours les trois trafics classés respectivement par niveau de priorité supérieure comme suit : la voix, la vidéo et les données.

Notre principal objectif est de trouver une solution d'ordonnancement qui traiterait de manière satisfaisante pour tout type de trafic, c'est-à-dire :

- Assurer une faible latence pour les trafics voix
- Assurer un faible taux de perte et une latence assez faible pour les trafics de vidéo
- Assurer de manière appropriée et juste la transmission des trafics de données, ne présentant d'exigences particulières en termes de délai ou de perte.

Pour atteindre cet objectif, nous allons nous inspirer des différents avantages et inconvénients des deux ordonnanceurs PQ et WFQ.

5.1.1 Ordonnanceur PQ

La technique d'ordonnancement Priority Queuing ou PQ assure un traitement rapide des paquets à services exigeant sur les délais.

La figure 22 ci-dessous décrit le principe de PQ.

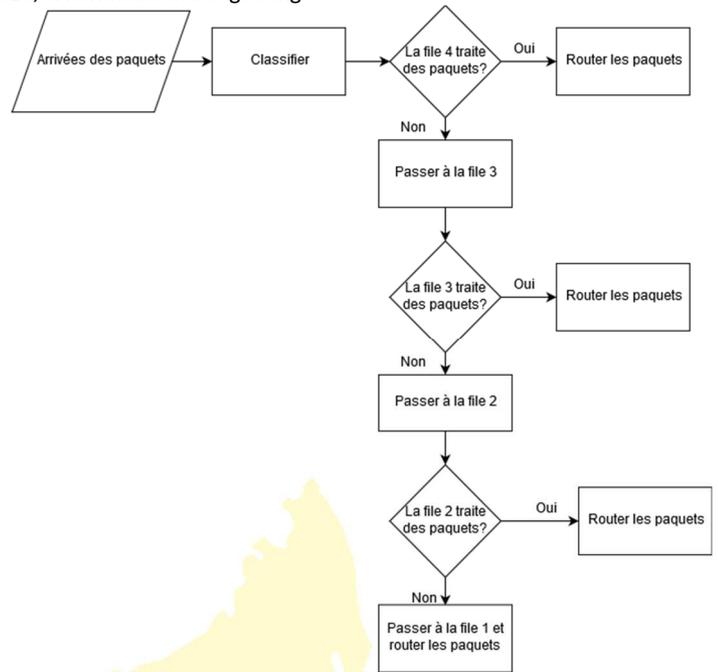


Figure 22 : Principe de l'ordonnanceur PQ

La motivation de PQ se trouve dans la faiblesse du délai de paquets. Cependant, PQ implique une dégradation des performances. Il peut y avoir un problème lorsque le trafic de haute priorité est très important ; en effet, il peut y avoir rejet des paquets du trafic normal à cause de la taille de la file d'attente basse priorité. C'est ce qu'on appelle « la famine ».

5.1.2 Ordonnanceur WFQ

La figure 23 présente la technique d'ordonnancement de WFQ (Weighted Fair Queuing).

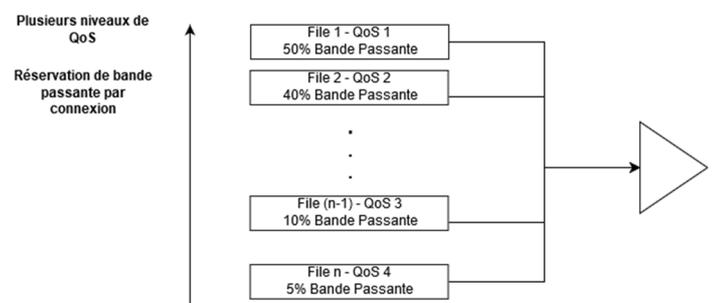


Figure 23 : Principe de l'ordonnanceur WFQ

L'ordonnanceur WFQ permet d'obtenir un degré d'équité entre les différentes applications. Il est possible d'obtenir une bande passante par connexion ainsi que des bornes de délais. Aussi, Les rafales sont lissées et il n'y a pas besoin de faire un contrôle de trafic en amont.

Sa faiblesse réside dans la complexité des calculs des estampilles à chaque paquet et les petites bornes de délais demandent une large réservation de bande passante.

5.2 Présentation et principe de la nouvelle approche d'ordonnancement

Notre approche consiste donc à la mise en étage des deux techniques de PQ et WFQ afin de traiter aux mieux nos applications. En effet, pour assurer les exigences en termes de délai nous allons utiliser PQ pour traiter les trafics prioritaires de voix et de vidéo. De plus, bien qu'on ait observé de la famine pour les paquets vidéo, nous avons également vu que PQ assure également un taux de perte de paquets. Or ce paramètre de perte est celui qui est le plus considéré pour avoir un niveau élevé de qualité de service pour les vidéos. Ainsi, il faut tenir compte de cet avantage.

Afin de palier au problème de famine, d'éviter que les trafics de voix monopolisent le traitement, nous allons mettre en amont de l'une des files de PQ un ordonnanceur WFQ spécifiquement la version WF^2Q^+ pour tirer ses avantages pour nos deux applications en temps réel (la voix et la vidéo).

Notre ordonnanceur PQ disposera donc de deux files :

- La première file à haute priorité pour les trafics de voix et vidéo
- La deuxième file de basse priorité pour les trafics de données.

Concernant l'architecture de WF^2Q^+ , nous disposerons également de deux files d'attentes l'une pour la voix et l'autre pour la vidéo.

Comme la voix est classée comme prioritaire, nous allons définir une pondération plus élevée aux paquets de voix par rapport à ceux de la vidéo.

De manière détaillée, à la sortie du bloc de routage, les différents flux de paquets sont routés vers une interface de sortie.

Chaque interface de sortie dispose d'un ou de plusieurs files d'attente. Dans notre cas, nous aurons quatre files d'attentes et deux ordonnanceurs mis en étage. Les trafics voix et vidéo seront placés dans les deux files d'attente de l'ordonnanceur WFQ et les trafics de données seront placés dans la file de basse priorité de l'ordonnanceur PQ.

Au niveau de WFQ, l'ordonnancement pondéré entre les trafics voix et vidéo sera effectué afin de ne pas monopoliser les trafics voix de haute priorité. Ainsi, ils arrivent chacun de façon équitable au niveau de la file de haute priorité de PQ.

Au niveau de PQ, les trafics de voix et de vidéo seront donc priorisés de façon optimale par rapport aux trafics de données, ce qui leur permet un traitement rapide avec un délai et un taux de perte minimisés.

Le principe de notre nouvelle solution d'ordonnancement est décrit dans la figure (24).

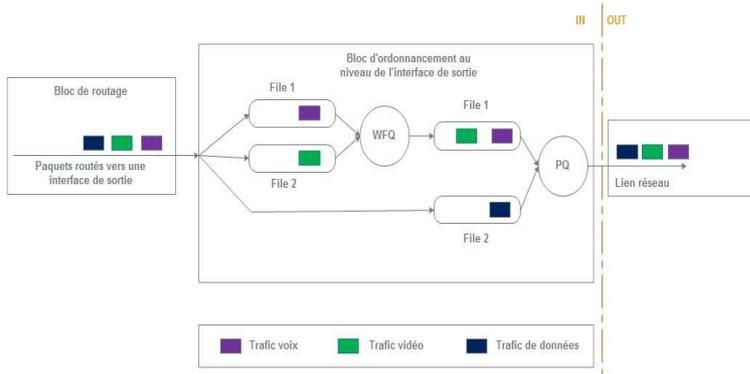


Figure 24 : Principe de la nouvelle technique d'ordonnancement

5.3 Résultats de simulation de l'optimisation d'ordonnancement appliqué dans l'Internet 5G

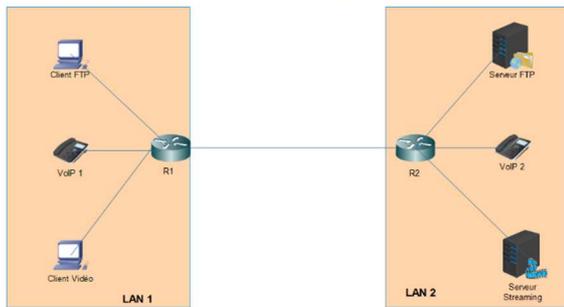


Figure 25 : Topologie de réseau pour la simulation

5.3.1 Scénarii de simulation

Pour vérifier et analyser les performances de notre nouvelle technique d'ordonnancement, nous allons comparer notre solution avec les ordonnanceurs existants qui sont le FIFO, le PQ et le WFQ.

Ainsi nous avons mis en place les quatre scénarii suivants :

- Scénario 1 : Ordonnanceur FIFO
- Scénario 2 : Ordonnanceur PQ
- Scénario 3 : Ordonnanceur WFQ
- Scénario 4 : Ordonnanceur combiné PQ_WFQ

5.3.2 Comparaison des délais moyens des trafics à temps réels

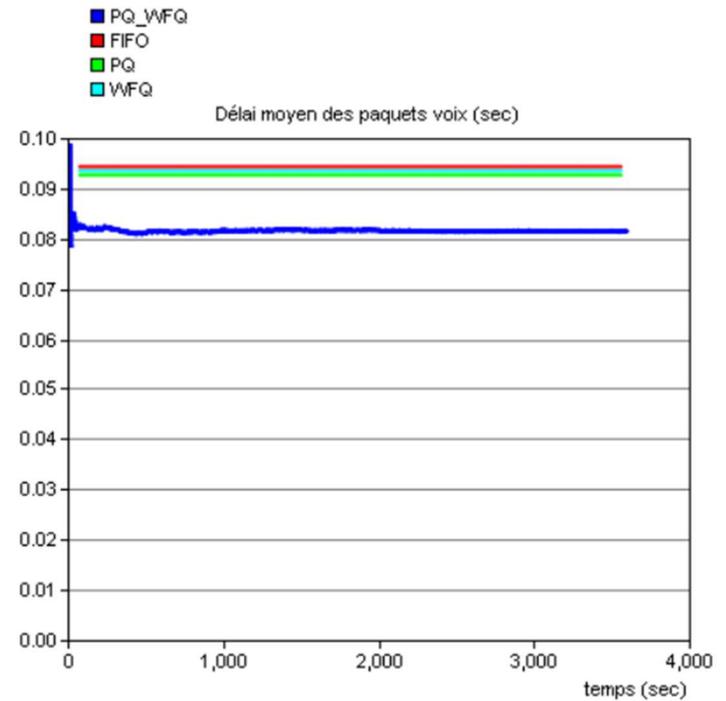


Figure 26 : Délais moyens des trafics voix

Pour les paquets voix sur la figure 26, nous pouvons observer que les délais avec les trois ordonnanceurs FIFO, PQ et WFQ sont sensiblement égaux soient $D_{FIFO} \approx D_{PQ} \approx D_{WFQ} \approx 0.093s$, alors qu'avec la combinaison de PQ et WFQ le délai moyen obtenu est environ de 0.081s.

Ceci nous montre alors que pour l'application VoIP, notre solution présente une meilleure performance de notre algorithme par rapport aux ordonnanceurs existants, bien que toutes les courbes offrent un excellent niveau de qualité de service, selon le **tableau (01)**.

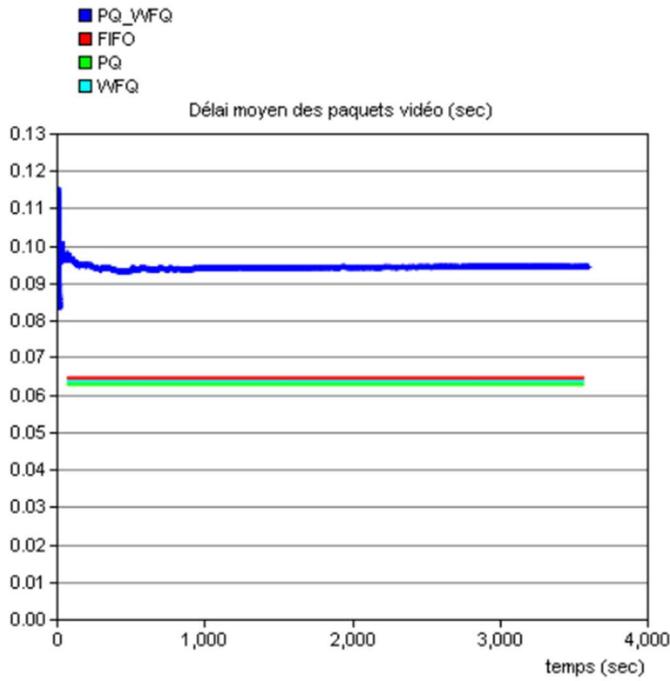


Figure 27 : Délais moyens des trafics vidéo

Quant aux paquets vidéo, le délai obtenu avec notre technique observé dans la **figure 27** est environ de 0.095s et présente une différence de 0.03s environ de plus que les délais avec les autres ordonnanceurs qui sont de $D_{FIFO} \approx D_{PQ} \approx D_{WFQ} \approx 0.065s$. Cependant, la différence est légère et notre résultat rempli toutefois les conditions d'une meilleure qualité vidéo en se référant au **Tableau (02)**.

5.3.3 Comparaison des nombres de paquets reçus pour chaque application

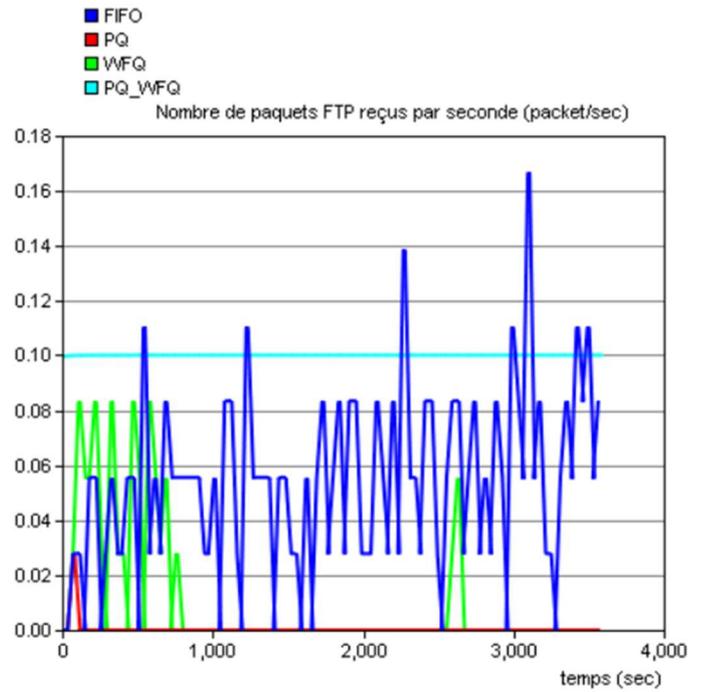


Figure 28 : Trafics FTP reçus

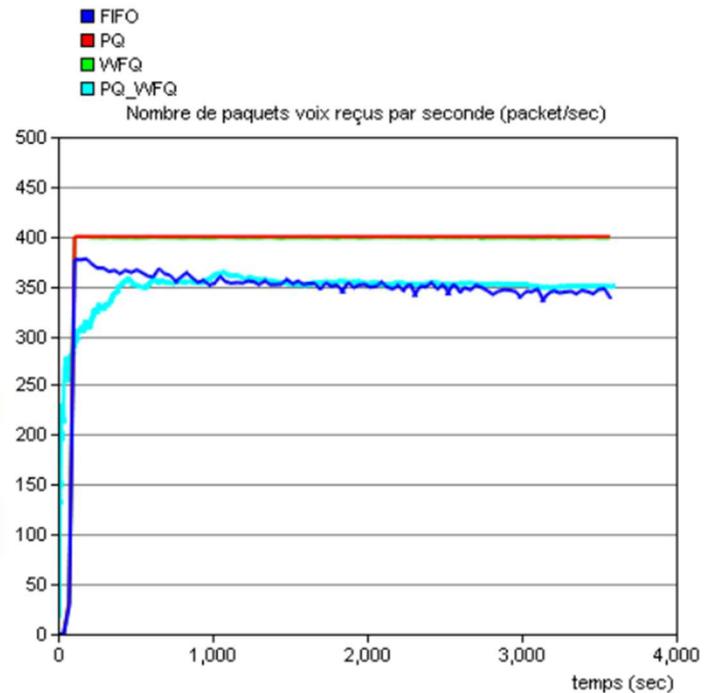


Figure 29 : Trafics voix reçus

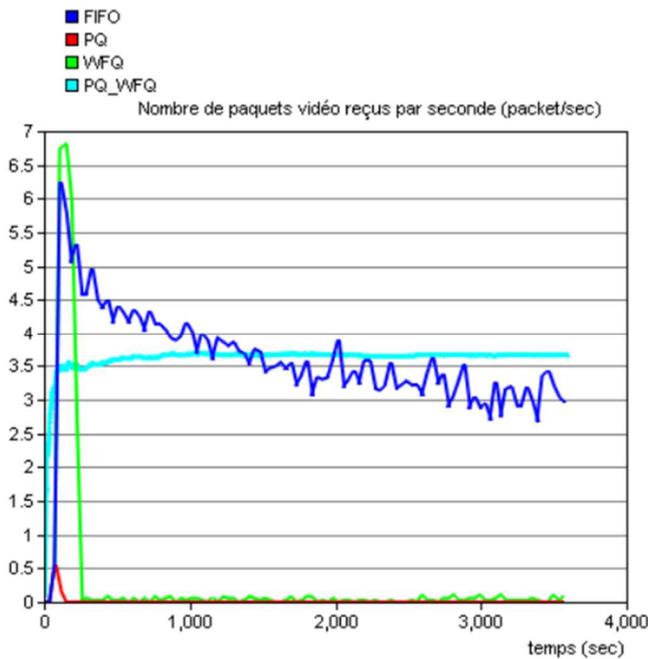


Figure 30 : Trafics vidéo reçus

A partir de la **Figure 28**, nous pouvons observer que l'ordonnanceur PQ (courbe en rouge) ne laisse passer presque aucun paquet FTP du fait que cette application a été classée dans la file ayant la plus basse prioritaire. L'ordonnanceur WFQ lui fait passer quelques trafics (poids WFQ assez faible) FTP au cours du temps car entre temps les trafics voix et vidéo sont transmis avec des poids plus importants. Ensuite, nous pouvons voir que les paquets FTP sont régulièrement transmis avec l'ordonnanceur FIFO car si ces derniers sont les premiers arrivés ils sont les premiers à sortir sans distinction de leur classe. Enfin, pour notre solution PQ_WFQ nous pouvons remarquer que les trafics FTP sont reçus de façon constante du fait que bien qu'ils sont de faible priorité, ils sont tout de même transmis car le système les laisse passer avec un faible taux pour ne pas dominer face aux deux autres applications mais sans pour autant être délaissés totalement.

Dans la **Figure 29** nous pouvons observer que les paquets voix reçus avec les ordonnanceurs PQ et WFQ sont les plus nombreux et sont sensiblement égaux $N_{PQ} \approx N_{WFQ} \approx 400 \text{ paquets/sec}$. Ceci peut s'expliquer du fait qu'avec PQ la voix sont transmis prioritairement tant que la file correspondante n'est pas vide ; quant avec WFQ, le poids affecté aux trafics voix sont largement supérieurs par rapport à ceux de la vidéo et de FTP. Après il y a notre courbe (en bleu cyan) qui est légèrement supérieure à celle de l'ordonnanceur FIFO avec $N_{PQ_WFQ} \approx 350 \text{ paquets/sec}$ et $N_{FIFO} \approx 349 \text{ paquets/sec}$. Notre solution obtient donc les avantages offerts par la combinaison des deux techniques PQ et WFQ.

Toutefois, la différence entre les quatre courbes peut également expliquer la différence des délais dans les résultats de la figure 26. En effet, dans la figure 26, nous avons vu que le délai avec notre solution est plus faible que ceux de PQ et WFQ car les paquets transmis ont été moins nombreux.

D'après les courbes de la **Figure 30** nous pouvons dire que les paquets vidéo sont transmis avec les ordonnanceurs FIFO, WFQ et PQ_WFQ tandis qu'avec PQ c'est presque nul du fait que la file de la vidéo passe après que la file de la voix soit traitée.

Cependant nous pouvons remarquer, que la courbe avec notre solution est meilleure car elle est plus constante et plus stable par rapport à celle de WFQ (en vert) qui présente un pic élevé pendant un certain temps et diminue grandement après ; et celle de FIFO (en bleu). En effet, le résultat avec

WFQ peut s'expliquer du fait que le taux de transmission des paquets vidéo est plus faible que la transmission des paquets voix pendant toute la durée de la simulation. Pour FIFO, la variation de la courbe peut s'expliquer par le fait que d'autres types de paquets intercalent entre les paquets vidéo. Enfin, le principe de notre algorithme qui laisse passer les trafics vidéo avec équité que les trafics voix peut expliquer sa performance par rapport aux autres. Ceci démontre toujours les bénéfices offerts par la combinaison des deux techniques PQ et WFQ pour les trafics à temps réels.

6. Conclusion

Dans ce travail nous avons proposé deux principales approches d'optimisation des réseaux IP.

La première approche se trouve au niveau du routage, notamment en proposant un nouvel algorithme de routage adaptatif basé sur la technique de l'apprentissage par renforcement notamment sur le principe de Q-Routing et de ses dérivés. Nous avons contribué à donner une nouvelle extension de cet algorithme en y définissant la notion de politique de seuil.

Les résultats de simulation obtenus nous a montré que la technique de Q-Routing combinée avec notre politique de seuil présente un avantage par rapport aux protocoles de routage classique RIP et OSPF en termes de qualité de service pour tout type d'application, mais aussi en termes de réactivité et d'adaptation du réseau face aux éventuels évènements de panne ou de latence.

La deuxième approche consiste à obtenir une meilleure gestion et un traitement optimisé au niveau de l'ordonnancement des paquets à la sortie du routeur. Elle consiste alors à mettre en étage les deux ordonnanceurs WFQ et PQ. Le choix de cette combinaison vise à profiter des avantages des deux techniques et à compenser l'inconvénient de l'une en utilisant le principe de l'autre.

Les résultats obtenus par comparaison entre notre solution et les ordonnanceurs FIFO, PQ et WFQ ont été largement satisfaisants en termes de délai et d'équité entre les différentes applications.

7. Références

- [1] Y. Wu, H. Huang, C. Wang, Y. Pan, « 5G Enabled Internet Of Thing », CRC Press, 2019
- [2] E. Dahlman, S. Parvall, J. Sköld, « 5G NR : The Next Generation Wireless Access », Academic Press, 2018
- [3] J. Rodriguez, « Fundamentals of 5G mobile networks », John Wiley and Sons, 2015
- [4] A. Boyan, M. L. Littman « *Packet Routing in Dynamically Changing Networks: A reinforcement learning approach* », Cognitive Science Research Group Bellcore, 1994
- [5] S. P. M. Choi, D.Y. Chang, « *Predictive Q-Routing: A Memory-based Reinforcement Learning Approach to Adaptive Traffic Control* », Department of Computer Science, University of Science

- [6] S. Hoceini « *Techniques d'Apprentissage par Renforcement pour le Routage Adaptatif dans les Réseaux de Télécommunication à trafic irrégulier* », Thèse de doctorat, 2004
- [7] Z. Mammeri, « *RL-based Routing in Network: Review and classification of approaches* », In Open Access Journal, IEEE Access, 2019
- [8] CY. Fan, CC. Hsu, WY. Wang, « *An innovative Routing Algorithm with Reinforcement Learning and Pattern Tree Adjustment for Wireless Sensor Network* », In Pan JS, Chen SM., Nguyen N.T. (eds), Computational Collective Intelligence, Technologies and Applications, Lecture Notes in Computer Science, Vol 6423, Springer, ICCCI, 2010
- [9] R. Olsson, J. Egeland « *Reinforcement Learning Routing Algorithm for Bluetooth Mesh Networks* », Thesis, KTH School of Electrical Engineering and Computer Science, Stockholm, 2018
- [10] C. Fang, C. Cheng, Z. Tang, C. Li « *Research on Routing Algorithm Based on Reinforcement Learning in SDN* », in Journal of Physics: Conf. Ser 1284012053, 2019