

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....	7
1.1 Introduction.....	7
1.2 Définition des concepts de base.....	7
1.2.1 Qualité d'expérience et son importance.....	7
1.2.2 Mean opinion score (MOS)	8
1.2.3 Codecs.....	8
1.2.4 Quelques types de réseaux sans-fil hétérogènes	12
1.2.5 Les paramètres de qualité de service dans les réseaux sans fil	13
1.2.6 Les protocoles de la couche transport.....	14
1.2.7 Modèles d'estimation objective de la qualité d'expérience	15
1.3 Classification des facteurs qui affectent la qualité d'expérience	16
1.3.1 Classification proposée par Brunnström et al. (2013)	17
1.3.2 Classification proposée par Amour et al. (2015)	18
1.4 Synthèse des travaux réalisés sur la modélisation de la qualité d'expérience	20
1.4.1 Approches discriminantes orientées vers l'encodage	21
1.4.2 Approches discriminantes orientées vers le réseau d'accès.....	24
1.4.3 Approches discriminantes orientées vers la perception visuelle humaine.....	28
1.4.4 Approche non discriminante et hybride orientée vers l'encodage et le réseau d'accès	30
1.5 Sommaire	32
CHAPITRE 2 LA MÉTHODOLOGIE ET LES MODÈLES PROPOSÉS POUR L'ESTIMATION DE LA VARIATION DE LA QoE VIDEO	35
2.1 Introduction.....	35
2.2 Modélisation de la QoE en fonction de paramètres liés à l'encodage	35
2.2.1 Matériels	35
2.2.2 Codage des vidéos en H.264 et VP9 avec l'outil FFmpeg	38
2.2.3 Simulation de la qualité visuelle perçue avec le logiciel BVQM de NTIA basé sur un modèle avec référence complète	40
2.2.4 Présentation des résultats dans le logiciel R	41
2.2.5 Modèle d'estimation sans référence proposé.....	41
2.2.6 Validation du modèle d'estimation sans référence proposé	46
2.3 Modélisation de la QoE en fonction de paramètre lié au réseau.....	46
2.3.1 Matériels	46
2.3.2 Émulation de réseau virtuel avec le logiciel VMWARE	47
2.3.3 Configuration de paramètres QoS avec NEWT.....	47
2.3.4 Liste des clips vidéo.....	48
2.3.5 Diffusion de flux vidéo avec le logiciel VLC	48

2.3.6	Simulation de la qualité visuelle perçue avec le logiciel référence complète VQM NTIA	48
2.3.7	Présentation des résultats dans le logiciel R	49
2.3.8	Modèle d'estimation sans référence proposé	49
2.3.9	Validation du modèle d'estimation sans référence proposé	51
2.4	Sommaire	51
CHAPITRE 3 RÉSULTATS NUMÉRIQUES		53
3.1	Introduction	53
3.2	Analyse de variation de la QoE en fonction de paramètres liés à l'encodage	53
3.2.1	Débit, Codec H.264 et VP9, Définition 640 x 480	53
3.2.2	Débit, Codec H.264 et VP9, Définition 720 x 480	56
3.2.3	Débit, Codec H.264 et VP9, Définition 1280 x 780	58
3.3	Analyse de variation de la QoE en fonction de paramètres liés à l'encodage	61
3.3.1	Débit, Codec H.264 et VP9, Définition 640 x 480	61
3.3.2	Débit, Codec H.264 et VP9, Définition 720 x 480	62
3.3.3	Débit, Codec H.264 et VP9, Définition 1280 x 720	64
3.4	Analyse de la variation moyenne de la QoE	66
3.4.1	Débit, Définition 640 x 480, 720 x 480 et 1280 x 720	66
3.4.2	Débit, Codec H.264 et VP9	68
3.5	Détermination des paramètres du modèle sans référence proposé lié à l'encodage et la vitesse du contenu vidéo	69
3.5.1	Paramètres v3, v4, v5	69
3.5.2	Paramètre « a » relatif à la définition	70
3.5.3	Paramètre « k » relatif au codec	72
3.5.4	Validation du modèle	75
3.6	Analyse de variation de la QoE en fonction de l'impact unique du taux de pertes de paquets et de l'impact résultant du taux de pertes de paquets et du débit d'encodage	77
3.6.1	Clips vidéo encodés en H.264 à 1 Mb/s, en définition 640 x 480	77
3.6.2	Clips vidéo encodés en H.264 à 3 Mb/s, en définition 640 x 480	79
3.6.3	Clips vidéo encodés en H.264 à 5 Mb/s, en définition 640 x 480	81
3.6.4	Clips vidéo encodés en H.264 à 7 Mb/s, en définition 640 x 480	83
3.6.5	Variation moyenne de la fonction f(plr, bitrate)	84
3.7	Détermination des paramètres du modèle sans référence proposé lié au facteur du réseau	87
3.7.1	Validation du modèle	91
3.8	Sommaire	94
CHAPITRE 4 DISCUSSION SUR LES RÉSULTATS D'ANALYSE ET LE MODÈLE PROPOSÉ		97
4.1	Introduction	97

4.2	Comparaison de nos résultats d'analyse de la variation de la qualité d'expérience en fonction de paramètres liés à l'encodage et au contenu ainsi que le modèle proposé à ceux d'autres auteurs orientés vers les paramètres liés à l'encodage	98
4.2.1	Joskowicz et Ardao (2009)	98
4.2.2	Kufa et al. (2016)	99
4.3	Comparaison de nos résultats d'analyse de la variation de la qualité d'expérience en fonction du taux de pertes de paquets ainsi que le modèle proposé à ceux d'autres auteurs orientés vers les paramètres liés au réseau d'accès	99
4.3.1	Battisti et al. (2014)	99
4.3.2	Plakia et al. (2016)	100
4.3.3	D. Pal et Vanijja (2017)	100
4.4	Comparaison du modèle proposé à celui de Debajyoti Pal et al. (2016) orienté vers les paramètres liés à l'encodage et au réseau	101
4.5	Applications	102
4.6	Sommaire	102
CONCLUSION		105
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		107

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.3	Relation entre les notes d'opinion moyennes et la qualité perçue40
Tableau 3.1	Valeurs optimales des paramètres v_3 , v_4 et v_5 du modèle d'estimation pour les groupes de clips vidéo à vitesse de contenu lente, moyenne et élevée, en définitions 640 x 480, 720 x 480 et 1280 x 720, encodés en H.264 et VP969
Tableau 3.3	Valeur du paramètre a relatif à la définition pour les groupes de clips vidéo à vitesse de contenu lente, moyenne et élevée, en définitions 640 x 480, 720 x 480 et 1280 x 720, encodés en H.26472
Tableau 3.4	Valeurs optimales du paramètres v_3 pour les vidéos encodées en VP9 en fonction de valeurs v_4 et v_5 des vidéos encodées en H.264.74
Tableau 3.5	Valeurs du paramètre k relatif au codec pour les groupes de clips vidéo à vitesse de contenu lente, moyenne et élevée, en définitions 640 x 480, 720 x 480 et 1280 x 720, encodés en H.264 et VP974
Tableau 3.6	Valeurs optimales des paramètres v_6 , v_7 et v_8 pour les vidéos encodées en H.264.89
Tableau 3.7	Valeurs optimales de v_8 en fonction des valeurs moyennes de v_6 et v_7 par vitesse de contenu pour les vidéos encodées en H.264 et en définition 640 x 48090
Tableau 3.8	Valeurs du coefficient de détermination R^2 pour le modèle d'estimation de la qualité des vidéos encodées en H.264 et en définition 640 x 480 et altérées par l'impact résultant du débit d'encodage et du taux de pertes de paquets93

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Architecture hiérarchique classifiant les facteurs influençant la QoE18
Figure 3.1	Variation de la QoE (en MOS) en fonction du débit d'encodage pour tous les clips vidéo encodés en H.264 et en définition 640 x 48054
Figure 3.2	Variation de la QoE (en MOS) en fonction du débit d'encodage pour tous les clips vidéo encodés en VP9 et en définition 640 x 48055
Figure 3.3	Variation moyenne de la QoE (en MOS) en fonction du débit d'encodage pour tous les clips vidéo encodés en H.264 et VP9 et en définition 640 x 48055
Figure 3.4	Variation de la QoE (en MOS) en fonction du débit d'encodage pour tous les clips vidéo encodés en H.264 et en définition 720 x 48057
Figure 3.5	Variation de la QoE (en MOS) en fonction du débit d'encodage pour tous les clips vidéo encodés en VP9 et en définition 720 x 48057
Figure 3.6	Variation moyenne de la QoE (en MOS) en fonction du débit d'encodage pour tous les clips vidéo encodés en H.264 et VP9 et en définition 720 x 48058
Figure 3.7	Variation de la QoE (en MOS) en fonction du débit d'encodage pour tous les clips vidéo encodés en H.264 et en définition 1280 x 780 ...59
Figure 3.8	Variation de la QoE (en MOS) en fonction du débit d'encodage pour tous les clips vidéo encodés en VP9 et en définition 1280 x 78060
Figure 3.9	Variation moyenne de la QoE (en MOS) en fonction du débit d'encodage pour tous les clips vidéo encodés en H.264 et VP9 et en définition 1280 x 72060
Figure 3.10	Variation de la QoE (MOS) en fonction du débit d'encodage pour tous les clips vidéo encodés en H.264, en définition 640 x 480 et classés par vitesse de mouvement lente, moyenne et élevée61

Figure 3.11	Variation de la QoE (MOS) en fonction du débit d'encodage pour tous les clips vidéo encodés en VP9, en définition 640 x 480 et classés par vitesse de mouvement lente, moyenne et élevée62
Figure 3.12	Variation de la QoE (en MOS) en fonction du débit d'encodage pour tous les clips vidéo encodés en H.264, en définition 720 x 480 et classés par vitesse de mouvement lente, moyenne et élevée63
Figure 3.13	Variation de la QoE (en MOS) en fonction du débit d'encodage pour tous les clips vidéo encodés en VP9, en définition 720 x 480 et classés par vitesse de mouvement lente, moyenne et élevée64
Figure 3.14	Variation de la QoE (en MOS) en fonction du débit d'encodage pour tous les clips vidéo encodés en H.264, en définition 1280 x 720 et classés par vitesse de mouvement lente, moyenne et élevée65
Figure 3.15	Variation de la QoE (en MOS) en fonction du débit d'encodage pour tous les clips vidéo encodés en VP9, en définition 1280 x 720 et classés par vitesse de mouvement lente, moyenne et élevée66
Figure 3.16	Variation moyenne de la QoE (en MOS) en fonction du débit d'encodage pour chaque groupe de vidéo à vitesse de contenu lente, moyenne et élevée, encodée en a) H.264 et 640 x 480, b) H.264 et 720 x 480, c) H.264 et 1280 x 720, d) VP9 et 640 x 480, e) VP9 et 720 x 480, f) VP9 et 1280 x 72067
Figure 3.17	Variation moyenne de la QoE (en MOS) en fonction du débit d'encodage pour tous les clips vidéo encodés par codec H.264 et VP9 et indépendamment de la définition68
Figure 3.18	Évaluation de la précision d'estimation du 1 ^{er} modèle proposé et celui de l'UIT G.1070 en fonction de l'impact des paramètres liés à l'encodage pour chaque groupe de vidéo encodé en H.264, à vitesse de contenu a) lente et en VGA, b) moyenne et en VGA, c) élevée et en VGA, d) lente et en SD, e) moyenne et en SD, f) élevée et en SD, g) lente et en HD, h) moyenne et en HD, i) élevée et en HD76

Figure 3.19	Évaluation de la précision d'estimation du 1 ^{er} modèle proposé et celui de l'UIT G.1070 en fonction de l'impact des paramètres liés à l'encodage pour chaque groupe de vidéo encodé en VP9, à vitesse de contenu a) lente et en VGA, b) moyenne et en VGA, c) élevée et en VGA, d) lente et en SD, e) moyenne et en SD, f) élevée et en SD, g) lente et en HD, h) moyenne et en HD, i) élevée et en HD.....	77
Figure 3.20	Variation de la qualité d'expérience (en MOS) en fonction de l'impact du taux de pertes de paquets et du débit d'encodage pour toutes les vidéos clips, en H.264 à 1 Mb/s, en définition 640x480.....	78
Figure 3.21	Variation de la qualité d'expérience (en MOS) en fonction du taux de pertes de paquets pour toutes les vidéos clips, encodées en H.264 à 1 Mb/s, en définition 640 x 480	79
Figure 3.22	Variation de la qualité d'expérience (en MOS) en fonction de l'impact du taux de pertes de paquets et du débit d'encodage pour toutes les vidéos clips, en H.264 à 3 Mb/s, en définition 640x480	80
Figure 3.23	Variation de la qualité d'expérience (en MOS) en fonction du taux de pertes de paquets pour toutes les vidéos clips, encodées en H.264 à 3 Mb/s, en définition 640 x 480	81
Figure 3.24	Variation de la qualité d'expérience (en MOS) en fonction de l'impact du taux de pertes de paquets et du débit d'encodage pour toutes les vidéos clips, en H.264 à 5 Mb/s, en définition 640 x 480	82
Figure 3.25	Variation de la qualité d'expérience (MOS) en fonction du taux de pertes de paquets pour toutes les vidéos clips, encodées en H.264 à 5 Mb/s, en définition 640 x 480	82
Figure 3.26	Variation de la qualité d'expérience (en MOS) en fonction de l'impact du taux de pertes de paquets et du débit d'encodage pour toutes les vidéos clips, en H.264 à 7 Mb/s, en définition 640 x 480.....	83
Figure 3.27	Variation de la qualité d'expérience (en MOS) en fonction du taux de pertes de paquets pour toutes les vidéos clips, encodées en H.264 à 7 Mb/s, en définition 640 x 480	84

Figure 3.28	Variation moyenne de la fonction $f(\text{plr}, \text{bitrate})$ en fonction du taux de pertes de paquets pour chaque groupe de vidéos à vitesse de contenu lente, encodées en H.264 et en 640 x 480 à 1 Mb/s, 3 Mb/s, 5 Mb/s et 7 Mb/s	85
Figure 3.29	Variation moyenne de la fonction $f(\text{plr}, \text{bitrate})$ en fonction du taux de pertes de paquets pour chaque groupe de vidéos à vitesse de contenu moyenne, encodées en H.264 et en 640 x 480 à 1 Mb/s, 3 Mb/s, 5 Mb/s et 7 Mb/s	86
Figure 3.30	Variation moyenne de la fonction $f(\text{plr}, \text{bitrate})$ en fonction du taux de pertes de paquets pour chaque groupe de vidéos à vitesse de contenu élevée, encodées en H.264 et en 640 x 480 à 1 Mb/s, 3 Mb/s, 5 Mb/s et 7 Mb/s	87
Figure 3.31	Variation de v_8 en fonction du débit d'encodage pour chaque groupe de vidéos à vitesse de contenu lente, moyenne et élevée, encodées en H.264 et en 640 x 480	91
Figure 3.32	Évaluation de la précision d'estimation du 2 ^{ème} modèle proposé et celui de l'UIT G.1070 en fonction de l'impact des paramètres liés à l'encodage et du taux de pertes de paquets pour chaque groupe de vidéo encodé en H.264 et en VGA, à vitesse de contenu a) lente et à 1 Mb/s, b) lente et à 3 Mb/s, c) lente et à 5 Mb/s, d) lente et à 7 Mb/s, e) moyenne et à 1 Mb/s, f) moyenne et à 3 Mb/s, g) moyenne et à 5 Mb/s, h) moyenne et à 7 Mb/s, i) élevée et à 1 Mb/s, j) élevée et à 3 Mb/s, k) élevée et à 5 Mb/s, l) élevée et à 7 Mb/s	94

INTRODUCTION

0.1 Contexte

Les technologies sans fil ont connu une évolution impressionnante depuis le début des années 2000. Elles se distinguent par des critères de performance tels que la portée maximale du réseau sans fil, le débit maximal de données, la bande de fréquence, la disponibilité, etc. Parmi ces technologies, nous pouvons citer les réseaux personnels sans fil tels que Bluetooth, Zigbee, les réseaux locaux sans fil comme Wifi, HyperLan, le réseau métropolitain sans fil Wimax et les réseaux de la téléphonie mobile tels que GSM, UMTS et LTE (Akhtman & Hanzo, 2010).

Grâce aux avancées technologiques, différents réseaux sans fil peuvent coexister et être interconnectés pour former un réseau sans fil hétérogène. Un utilisateur mobile se trouvant dans ce type de réseau a la possibilité de choisir son point d'attache au moment de sa connexion au reste du réseau ou de changer son point d'attache durant les transferts de données. La quantité maximale de données en bits par seconde possible sur un chemin de réseau définit sa bande passante.

Les résultats de recherche de Cisco sur l'évolution de la consommation de la bande passante estiment que la vidéo représentera les deux tiers du trafic des données mobiles mondiales en 2018 (Seeling & Reisslein, 2014). Cette prévision se justifie par le nombre sans cesse grandissant des équipements mobiles, des tablettes et des téléphones intelligents (Bentes Maia, Yehia, & De Errico, 2015). Alors que les ressources limitées des réseaux sans fils présentent déjà des défis pour transférer une vidéo en haute définition (Deng, Liu, Liu, Zhou, & Ci, 2015), l'explosion du trafic vidéo sur internet engendre une nouvelle problématique concernant l'optimisation de l'utilisation des ressources pour garantir une meilleure qualité de service. La complémentarité des différentes technologies sans fil a favorisé l'avènement de la technologie *multihoming*. Elle permet en outre au terminal mobile d'utiliser simultanément plusieurs interfaces pour se connecter à différentes technologies d'accès radio (Deng et al., 2015). Ainsi, lors d'une connexion TCP, les données peuvent être acheminées par différents

chemins: c'est l'objectif du *Multipath TCP* (Hyunwoo, Calin, & Schulzrinne, 2016). L'utilisation du *multihoming* offre plusieurs avantages tels que la hausse du débit pour le transfert des données et la réduction de la latence (Deng et al., 2015). Ces facteurs contribuent à améliorer l'expérience client, en d'autres termes la qualité d'expérience.

La qualité d'expérience est définie par « l'acceptabilité globale d'une application ou d'un service, tel que perçue subjectivement par l'utilisateur final » selon (ITU-T, 2007). L'optimisation de l'utilisation du *multihoming* nécessite un processus décisionnel pour décider d'ajouter ou non des interfaces au moment opportun pour maintenir ou améliorer la qualité perçue par l'utilisateur du système. Pour ce faire, le processus requiert un modèle d'estimation de la qualité d'expérience perçue sur chaque réseau. Cette recherche se focalise sur l'estimation de la qualité d'expérience perçue pour une vidéo transférée sur chaque réseau sans fil.

0.2 Problématique

Les travaux portant sur la modélisation de la qualité d'expérience peuvent être classés en fonction de la méthode utilisée, qui peut être subjective ou objective.

Les méthodes subjectives se basent essentiellement sur le jugement d'un groupe de personnes sélectionnées pour recueillir les notes attribuées à l'évaluation de la qualité d'expérience (Tsolkas, Liotou, Passas, & Merakos, 2017). Ces méthodes sont les meilleures et les plus précises pour mesurer de la qualité perçue par un utilisateur qui visualise une vidéo sur un réseau sans fil (De Moor et al., 2010). Elles sont néanmoins complexes, coûteuses, chronophages et sont souvent négligées à cause de la pression du temps, des contraintes budgétaires, de la courte durée du cycle de vie des produits et des services (Barakovic & Skorin-Kapov, 2013). Les méthodes subjectives étant exigeantes, il est nécessaire de concevoir des méthodes objectives d'estimation de la qualité d'expérience qui établissent une relation entre les valeurs de certains paramètres observables et les notes attribuées par les utilisateurs de service vidéo lors des tests subjectifs.

Des travaux ont été réalisés pour concevoir des méthodes objectives d'estimation de la qualité d'expérience. Ces travaux se distinguent par le type et le nombre de paramètres considérés influençant la qualité perçue. Des chercheurs ont restreint leur étude en développant des modèles dont les paramètres sont essentiellement orientés sur un seul aspect tel que la couche réseau (Plakia, Katsarakis, Charonyktakis, Papadopouli, & Markopoulos, 2016), le système visuel humain (Bentes Maia et al., 2015) ou l'encodage de la vidéo (Anegekuh, Sun, & Ifeachor, 2015). Une meilleure estimation de qualité nécessite toutefois une approche interdisciplinaire regroupant l'aspect technologique du réseau, le contexte d'usage, la condition sociale et psychologique de l'utilisateur et des enjeux commerciaux (Barakovic & Skorin-Kapov, 2013). Quelques travaux se sont penchés sur des modèles hybrides intégrant les pertes de paquets sur les réseaux et le débit d'encodage (Debajyoti Pal, Triyason, & Vanijja, 2016). Bien qu'ils aient permis une meilleure compréhension de l'impact des pertes de paquets et des paramètres liés à l'encodage sur la qualité d'expérience, ils ne tiennent pas compte de l'impact de la vitesse du contenu vidéo et de la définition puis ne s'adaptent pas dynamiquement au type de codec. Une analyse de l'impact de ces paramètres non considérés permettrait de concevoir un modèle d'estimation améliorée de la qualité d'expérience lors de l'acheminement de la vidéo sur un réseau sans fil.

0.3 Les objectifs de la recherche

L'objectif général de cette recherche est d'analyser l'impact de paramètres liés à l'encodage, au contenu vidéo et au réseau d'accès sur la qualité de la vidéo perçue pour concevoir un modèle hybride d'estimation de la qualité d'expérience lors de l'acheminement de la vidéo sur un réseau sans fil prenant en compte ces paramètres. Le modèle est dit hybride parce qu'il prend en compte des paramètres de couches différentes qui sont la couche réseau et la couche application. Notre objectif est plus précisément d'analyser l'impact des pertes de paquets, du débit d'encodage, mais aussi de la vitesse du contenu vidéo, de la définition, et du codec sur la qualité perçue par un utilisateur en vue de concevoir un modèle hybride d'estimation de la qualité d'expérience améliorant celui proposé par d'autres auteurs, lors de l'acheminement de

la vidéo sur un réseau sans fil. Pour atteindre cet objectif général, nous avons défini les objectifs spécifiques suivants :

- 1) analyser la variation de la qualité d'expérience en fonction du débit d'encodage sur des vidéos en définition 640 x 480 (VGA), 720 x 480 (SD), 1280 x 720 (HD), encodées en H.264 et VP9;
- 2) analyser la variation de la qualité d'expérience en fonction du débit d'encodage sur des vidéos groupées selon la vitesse du contenu lente, moyenne, rapide, en définition VGA, SD, HD, encodées en H.264 et VP9;
- 3) concevoir un modèle d'estimation de la qualité d'expérience prenant en compte l'impact du débit d'encodage, de la vitesse du contenu, la définition, du codec ;
- 4) analyser la variation de la qualité d'expérience en fonction du taux de pertes de paquets sur des vidéos en définition VGA et encodées en H.264;
- 5) concevoir un modèle d'estimation de la qualité d'expérience prenant en compte l'impact des pertes de paquets, du débit d'encodage et la vitesse du contenu.

Nous nous sommes limités à l'utilisation du protocole UDP pour la transmission de la vidéo sur un réseau sans fil hétérogène. UDP offre l'avantage particulier de communiquer en temps quasi réel. Nous n'avons considéré que deux codecs populaires H.264 et VP9. Nous ne nous sommes pas attachés à concevoir un processus décisionnel de l'utilisation ou non du MPTCP ni à prendre en compte d'autres paramètres tels que le coût de service, la consommation en énergie liée à l'utilisation du *multihoming* et les préférences d'utilisateurs.

0.4 Les contributions

Dans cette recherche nous avons proposé deux modèles d'estimation de la qualité d'expérience qui améliorent celui proposé par l'Union Internationale des Télécommunications et ceux proposés par d'autres auteurs. Nous avons aussi analysé la variation de la qualité d'expérience en fonction de l'impact de paramètres liés à l'encodage de vidéos et de l'impact résultant de

paramètres liés à l'encodage de vidéos et un paramètre important lié à la transmission des vidéos sur un réseau sans fil. Nos contributions sont récapitulées dans les points suivants:

- 1) le premier modèle d'estimation proposé prend en compte l'impact de ces paramètres liés à l'encodage et au contenu vidéo. Les modèles d'autres auteurs orientés uniquement vers des paramètres liés à l'encodage ne prennent généralement pas en compte l'impact de changements de la vitesse du contenu vidéo, de la définition et du type de codec. Le modèle proposé fait distinction des modèles de ces auteurs en considérant ces facteurs;
- 2) le second modèle d'estimation proposé est basé sur une approche non discriminante qui prend en compte l'impact du taux de pertes de paquets et de paramètres liés à l'encodage et au contenu vidéo sur la QoE. Cela fait distinction des modèles d'autres auteurs qui sont orientés uniquement vers des paramètres liés à l'encodage ou au réseau d'accès;
- 3) le second modèle d'estimation proposé se distingue de celui de l'Union Internationale des Télécommunications (orienté vers des paramètres liés à l'encodage ou au réseau d'accès) par sa simplicité et la prise en compte de l'impact de la définition, du type de codec et de la vitesse de contenu vidéo;
- 4) nos résultats numériques montrent l'impact de la variation moyenne de qualité d'expérience en fonction du débit d'encodage sur des vidéos groupées selon la vitesse du contenu lente, moyenne, rapide, en définition VGA, SD, HD, encodées en H.264 et VP9. Les observations faites de ces résultats sont très utiles pour la conception de modèles d'estimations appropriés et précis;
- 5) nos résultats numériques montrent l'impact de la variation de qualité d'expérience en fonction du taux de pertes de paquets, du débit d'encodage sur des vidéos en définition VGA et encodées en H.264, à vitesse de contenu lente, moyenne et élevée. Les observations faites de ces résultats sont très utiles pour la conception de modèles d'estimations appropriés et précis.

0.5 Plan du mémoire

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres.

Le premier chapitre présente une revue de littérature sur la modélisation de la qualité d'expérience. Il définit des notions élémentaires pour mieux comprendre le sujet, classifie les facteurs qui affectent la qualité d'expérience et évalue quelques travaux pertinents réalisés sur la modélisation de la qualité perçue lorsqu'une personne visualise une vidéo sur un réseau hétérogène.

Le deuxième chapitre décrit les matériels et l'environnement de test utilisés pour réaliser notre expérimentation. Il détaille la méthodologie utilisée pour concevoir un modèle hybride d'estimation de la qualité d'expérience prenant en compte l'impact des pertes de paquets, du débit d'encodage, mais aussi de la vitesse du contenu vidéo, de la définition de la vidéo et du codec.

Le troisième chapitre présente les résultats obtenus relatifs à l'impact de chaque paramètre considéré sur la qualité d'expérience et le modèle hybride proposé pour l'estimation de la qualité perçue lors de la diffusion de flux vidéo.

Le quatrième chapitre fait une étude comparative de notre contribution par rapport à des travaux similaires. Il relève les forces et les faiblesses de notre approche.

La conclusion souligne la contribution du travail réalisé dans cette recherche, fait des recommandations et propose des pistes d'amélioration qui peuvent faire l'objet de futures recherches.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Introduction

Cette revue de littérature définit et explique dans une première partie les notions de base relatives à la thématique de cette recherche, notamment la qualité d'expérience, les codecs, les techniques de diffusion de flux de vidéo, les technologies sans fil et les types de modèles d'estimation de la qualité d'expérience. La seconde partie de la revue présente une classification des facteurs qui affectent la qualité d'expérience. La troisième partie présente une évaluation de quelques travaux pertinents portant sur des approches diverses de modélisation de la qualité d'expérience. Elle explique le mode de fonctionnement de ces approches diverses, identifie leurs avantages et limites et montre la manière dont ces approches peuvent être complémentaires.

1.2 Définition des concepts de base

1.2.1 Qualité d'expérience et son importance

Le concept de qualité d'expérience apparaît dans de nombreuses disciplines telles que la psychologie sociale, les sciences cognitives, l'économie et les sciences de l'ingénieur (Laghari & Connelly, 2012). En technologie de l'information, l'évaluation de la qualité d'expérience dépend principalement de la perception de l'utilisateur et de son degré de satisfaction ou d'irritation à l'égard d'un service ou d'une application (Barakovic & Skorin-Kapov, 2013).

L'Union Internationale des Télécommunications (ITU-T, 2007) définit la qualité d'expérience comme « l'acceptabilité globale d'une application ou d'un service, telle que perçue

subjectivement par l'utilisateur final » qui « peut être influencée par le contexte et les attentes des utilisateurs ».

La mesure de la qualité d'expérience présente potentiellement des avantages multiples. Elle permet aux entreprises d'évaluer la qualité de leur service et de prendre des décisions pour se distinguer dans un environnement économique hautement compétitif (Barakovic & Skorin-Kapov, 2013); aux fournisseurs (de services, de réseaux, de contenu, etc.) de faire une gestion intelligente et efficace du réseau (Tsolkas et al., 2017) et de faciliter une gestion plus efficace de la mobilité dans les réseaux sans fil hétérogènes (Quadros et al., 2013), des ressources radio dans les réseaux sans fil (Farias Monteiro et al., 2015) et l'optimisation des machines virtuelles (Tsolkas et al., 2017).

1.2.2 Mean opinion score (MOS)

Le *Mean Opinion Score* (MOS) est la note moyenne d'opinion. Les recommandations (ITU-T-Rec-P10, 2017) définissent la note moyenne d'opinion comme étant la moyenne des notes d'opinion, située sur une échelle prédéfinie, que les utilisateurs de service associent à leur opinion sur la qualité d'un système. Cette note est généralement utilisée pour quantifier par des tests subjectifs ou des modèles objectifs la qualité perçue par l'utilisateur d'un service ou d'une application (Streijl, Winkler, & Hands, 2016). Par exemple, la valeur 5 peut être associée à la note excellente, 4 à bonne, 3 à moyenne, 2 à mauvaise et 1 à très mauvaise.

1.2.3 Codecs

Une vidéo est généralement composée d'un contenu (flux audio et vidéo) et d'un conteneur (généralement le format de fichier). Le conteneur regroupe et organise dans un même fichier différentes informations telles que le contenu, les sous-titres et les métadonnées. Après capture et numérisation, une vidéo brute et non compressée génère une importante quantité de données. Lors de la diffusion, ces données doivent être acheminées vers un réseau limité en ce qui

concerne la bande passante. Cette contrainte en bande passante peut dégrader la qualité de la vidéo perçue lors de la diffusion en temps réel. Une solution pour pallier cette limite est de compresser les flux vidéo diffusés. C'est le principe des codecs. La fonction principale des codecs est de compresser la source vidéo par l'encodeur en réduisant ou en supprimant les données redondantes et de la décompresser par le décodeur en restituant partiellement ou totalement la source vidéo (Akramullah, Ahmad, & Liou, 1995). Les codecs facilitent par le principe de compression la transmission de la vidéo numérique sur un réseau en diminuant la bande passante requise et réduisent la taille de stockage nécessaire pour sa sauvegarde.

1.2.3.1 Quelques paramètres d'encodage

Les paramètres d'encodage définissent la manière dont le codec transforme, compresse et convertit la vidéo. Ces paramètres peuvent varier d'un codec à un autre. Cette section définit quelques paramètres d'encodage fondamentaux.

La fréquence d'image est le nombre d'images affichées par seconde. La définition d'une vidéo est sa taille en pixels en termes de largeur x hauteur (Shinkel, 2012). La résolution d'une vidéo est le nombre de pixels par unité de mesure en points par pouce ou *dpi (dots per inch)* (Shinkel, 2012). Le débit d'encodage d'une vidéo est la quantité d'information en bits par seconde requise au lecteur pour le traitement de la vidéo (Shinkel, 2012). La structure d'un groupe d'images ou *group of pictures (GOP)* définit l'ordre de succession d'images de type intra, prédites et bidirectionnelles (Zatt, Porto, Scharcanski, & Bampi, 2010). Les images de type intra I sont codées sans prédiction (Zatt et al., 2010). Les images de type prédites P sont prédites à partir des images précédentes (Zatt et al., 2010). Les images de type B sont prédites à partir des images précédentes ou futures (Zatt et al., 2010). La quantification contrôle la balance entre le taux de compression et qualité de la vidéo (Huipin & Cote, 2008). Le profil contient tous les paramètres d'encodage.

1.2.3.2 Les normes H.264 et VP9

Les codecs dérivant des standards ou normes H.264 et VP9 sont des exemples de codecs populaires. H.264 est une norme de compression vidéo, développée et prise en charge par l'*ITU-T Video Coding Experts Group* (VCEG) et l'*ISO/IEC JTC1 Moving Picture Experts Group* (MPEG) et VP9 est une norme de compression ouverte et libre de droit développée par Google (De Cock, Mavlankar, Moorthy, & Aaron, 2016).

La norme H.264

La norme H.264 vise à fournir une meilleure tolérance aux erreurs de transmission sur les réseaux informatiques (Sullivan, 2005), un gain en efficacité de codage deux fois plus grand que celui de la norme H.263, une qualité équivalente à H.262 et une souplesse d'adaptation à une grande variété d'applications multimédias et services tels que la télévision interactive, l'internet vidéo, la vidéoconférence, la vidéo sur demande, la télévision à haute définition, le stockage vidéo HD DVD et Blu-ray (Vani & Sangeetha, 2012).

Les étapes du processus d'encodage et de décodage avec H.264 sont respectivement la prédiction, la transformation spatiale de blocs de pixels et l'encodage entropique durant la phase d'encodage et le décodage, la transformation inverse et la reconstruction de la vidéo durant la phase de décodage (Yun, Yong, & Jianshi, 2007). La prédiction est dite inter lorsqu'elle se base sur une ou plusieurs images de référence pour prédire le mouvement d'un macrobloc de pixels et intra lorsque les macroblocs voisins codés dans la même image sont utilisés pour prédire le prochain macrobloc. H.264 se base sur la transformée entière en cosinus discret sur des blocs de 4x4 pixels pour détecter les corrélations entre pixels voisins (Yun et al., 2007).

Les nouvelles fonctionnalités apportées à la norme H.264 améliorant l'efficacité de compression des normes précédentes incluent l'utilisation des tailles de bloc petites 16x16,

8x8, 4x4 pixels, un quart de pixel de précision, les techniques de codage entropique avancées telles que le codage adaptatif de longueur variable selon le contexte (*CABAC*) et le codage arithmétique binaire adaptatif basé sur le contexte (*CAVLC*) (Vani & Sangeetha, 2012).

La souplesse de H.264 à une grande variété d'applications et au transport sur différentes technologies est assurée par la répartition de l'information codée sur la couche de codage vidéo et la couche d'abstraction de réseau (Yun et al., 2007). Sa robustesse aux erreurs de transmission est accrue par les techniques d'ordonnancement flexible des macroblocs et d'ordonnancement arbitraire des tranches de taille flexible (Yao & Tan, 2012).

La norme VP9

L'objectif de la norme récente VP9 est d'atteindre à qualité vidéo équivalente une réduction du débit d'encodage de 50 % par rapport à sa prédécesseuse VP8 (Deep & Elarabi, 2017).

VP9 supporte la compression sans perte de la vidéo, les vidéos de très haute définition, le découpage d'une image en blocs de 64x64 pixels, dix modes de prédiction intra de l'état des pixels des blocs d'image, à savoir six modes angulaires (27°, 45°, 63°, 117°, 135°, 153°) ainsi que les modes DC, vertical, horizontal et TM, une précision de 1/8^e de pixel pour la luminance (Quotient de l'intensité lumineuse d'une source par sa surface apparente), les transformées *Discrete Cosine Transform* (DCT), *Asymmetric Discrete Sine Transform* (ADST) et *Walsh-Hadamard Transform* (WHT) pour la représentation de l'information dans le domaine fréquentiel (Il-Koo, Sunil, Yinji, & Jie, 2014).

1.2.4 Quelques types de réseaux sans-fil hétérogènes

Les réseaux sans fil et les réseaux de la téléphonie mobile sont deux technologies d'accès sans fil. Ils utilisent des ondes radioélectriques pour connecter des périphériques, des machines ou équipements distants dotés de la carte réseau sans fil.

Les réseaux sans fil peuvent être classés en fonction de leur portée en réseaux personnels sans fil, réseaux locaux sans fil et réseaux métropolitains sans fil (Guan-Ming et al., 2016). Guan-Ming et al. (2016) présentent les spécifications techniques suivantes pour les réseaux sans fil.

Les réseaux personnels sans fil interconnectent des périphériques dans un rayon réduit d'une dizaine de mètres au maximum. Le Bluetooth est un exemple de réseau personnel sans fil. Il permet d'atteindre un débit théorique de 1 Mb/s pour l'échange de données.

Les réseaux locaux sans fil sont communément présents dans les lieux de travail, les maisons, les restaurants et les aéroports. Le Wifi (*Wireless Fidelity*) est un exemple de réseau local sans fil. Parmi ces variantes, nous distinguons les réseaux répondant aux normes 802.11 utilisant des bandes de fréquence variant entre 2.4Ghz et 5Ghz. La norme 802.11b offre un débit de 11 Mb/s sur une fréquence 2.4 Ghz. Les normes 802.11a et 802.11g offrent un débit de 54 Mb/s respectivement sur les fréquences 5 Ghz et 2.4 Ghz. La norme 802.11n permet de transmettre les données à un débit théorique de 600 Mb/s sur un rayon variant de 20 m à 270 m.

Les réseaux métropolitains sans fil assurent la connectivité entre ou à l'intérieur de villes métropolitaines sur une portée maximale de 50 km. WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) dérivant de la norme 802.16 est un exemple de réseau métropolitain sans fil. WiMAX peut atteindre un débit théorique de 70 Mb/s.

1.2.5 Les paramètres de qualité de service dans les réseaux sans fil

La qualité de service (QoS) est définie par l'ensemble des caractéristiques d'un service de télécommunication permettant de satisfaire les besoins explicites et implicites de l'utilisateur du service selon la recommandation UIT-T E.800 (Barakovic & Skorin-Kapov, 2013).

Dans les réseaux sans fil, plusieurs paramètres servent à quantifier ou évaluer la qualité de service sur la couche réseau comme le débit de transmission, le délai de transit des paquets, la gigue et le taux de perte de paquets (Hyun Jong, Dong Geun, Hwa-Suk, Kee Seong, & Seong Gon, 2012).

Le délai de transit d'un paquet est le temps requis à un paquet pour se déplacer d'un nœud source à un nœud destination dans un réseau. Ces délais peuvent être causés par la congestion des canaux, le réordonnancement des paquets, des pannes d'équipements, etc. L'instabilité de service et la dégradation de la qualité de service sont deux exemples de conséquences de délai dans les réseaux sans fil (Gamal, Sadek, Rizk, & Abou-elSaoud, 2016).

La gigue est la variation du délai des paquets reçus. Elle peut être due à l'instabilité des conditions réseau telles que les fluctuations dans le volume de trafic et le nombre d'équipements connectés à un instant t . L'usage de la mémoire tampon au niveau de l'application sur le nœud destinataire pallie la gigue en lissant la variation du délai (Hyun Jong et al., 2012).

Le taux de perte de paquets est le pourcentage de paquets perdus au niveau du nœud destinataire par rapport aux paquets émis au niveau du nœud source. Les pertes de paquets peuvent être dues à des erreurs de bits transmis dans le réseau, des problèmes de transmission et/ou une détérioration de la qualité de la vidéo durant le transcodage (Hyun Jong et al., 2012). Elles peuvent être réduites par des algorithmes de correction d'erreurs. Une autre approche pour corriger les paquets perdus serait de relancer une demande de ces paquets au niveau du nœud source, cependant elle engendre plus de délais.

Le débit de transmission est la quantité d'information en bits envoyée par unité de temps par le nœud source. Le débit théorique maximal est la bande passante du réseau. La fiabilité du lien réseau et le délai de transit sont deux facteurs fondamentaux limitant le débit de transmission sur un réseau (Lu & Shen, 2014).

1.2.6 Les protocoles de la couche transport

UDP (*User Datagram Protocol*) et TCP (*Transport Control Protocol*) sont deux protocoles de la couche transport du modèle OSI (*Open Systems Interconnection*) permettant la communication entre des applications lancées à différents nœuds du réseau (Grinnemo et al., 2016).

TCP est un protocole orienté connexion et fiable garantissant l'intégrité des données transmises (Coonjah, Catherine, & Soyjaudah, 2015). Les données ne sont transmises qu'après établissement de connexion. TCP vérifie la bonne réception des données dans leur ordre d'envoi en lisant les messages d'accusé de réception (Coonjah et al., 2015). Les paquets perdus sont retransmis. Ce processus de renvoi de paquets cause plus de temps de latence qu'UDP. L'utilisation de TCP est par conséquent inconvenable pour les communications en temps réel. Nous utilisons dans cette recherche le protocole UDP adapté pour les communications en temps réel.

UDP est un protocole orienté paquet de données conçu pour faciliter une gestion simple et rapide de communications entre le nœud source et le nœud destinataire (Coonjah et al., 2015). Il permet l'envoi de paquets multiples et séparés à partir du nœud source. Ce protocole est non orienté connexion et ne s'acquitte ni de la réception des paquets envoyés au niveau du nœud destinataire ni de la correction des erreurs de paquets. Les paquets perdus durant l'échange d'informations ne sont pas retransmis. La simplicité et la rapidité du protocole UDP par rapport au protocole TCP peuvent s'expliquer par sa non-utilisation de mécanismes de contrôle de paquets reçus et d'accusés de réception. Le protocole UDP est communément utilisé pour les

communications *multicasts* et les applications en temps réel tolérant aux pertes de paquets et nécessitant des délais de latence minimum.

1.2.7 Modèles d'estimation objective de la qualité d'expérience

Les méthodes objectives d'estimation de la qualité d'expérience utilisent des algorithmes pour évaluer la qualité perçue contrairement aux méthodes subjectives qui nécessitent le jugement de participants ou observateurs. Ces méthodes se différencient en fonction du degré d'utilisation ou non d'une vidéo référence servant à apprécier la vidéo perçue, altérée soit par le codage ou par les conditions du trafic réseau durant sa transmission. Elles peuvent être classées en référence complète, référence réduite et sans référence (Bentes Maia et al., 2015).

Un modèle est dit sans référence lorsqu'il ne requiert pas de vidéo de référence pour évaluer la qualité d'une vidéo perçue (Bentes Maia et al., 2015). Ce type de modèle estime généralement la qualité perçue en se basant sur la corrélation établie entre les résultats des notes moyennes d'opinion et certains paramètres influençant la qualité. Le modèle sans référence est recommandé pour les applications en temps réel (Bentes Maia et al., 2015).

Un modèle est dit référence réduite lorsqu'il compare une partie de la vidéo de référence ou certaines de ses caractéristiques à la vidéo dégradée perçue pour évaluer la qualité d'expérience. L'objectif d'un modèle référence réduite est de minimiser la quantité d'information extraite de la vidéo de référence requise pour évaluer la vidéo dégradée perçue et de garantir une précision d'estimation acceptable (Bentes Maia et al., 2015).

Un modèle est dit référence complète lorsqu'il compare la totalité de la vidéo de référence image par image à la vidéo dégradée perçue pour évaluer la qualité d'expérience. Quelques propriétés de la vision humaine analysées par ce modèle durant l'évaluation incluent la sensibilité spatio-temporelle au contraste, le masquage spatial et temporel, l'adaptation chromatique (Bentes Maia et al., 2015). Le masquage s'explique par le fait que la sensibilité

de l'œil est réduite lors d'une activité dans son entourage (Yuan & Cheng, 2009). L'adaptation chromatique est la capacité du système visuel humain à converser l'apparence des objets de son environnement en dépit des changements de coloration de la lumière (Poynton, 2014). Le modèle avec référence complète est adapté pour un usage en temps différé et offre généralement une précision d'estimation meilleure que celles des modèles référence réduite et sans référence. Quelques raisons justifiant l'impraticabilité des modèles avec référence complète pour les applications en temps réels sont : leurs complexités, la latence accrue due à la transmission de la vidéo de référence et son traitement ou l'indisponibilité de la vidéo de référence.

Les métriques MSE (*Mean Square Error*), PSNR (*Peak Signal to Noise Ratio*), SSIM (*Structural Similarity*) et NTIA VQM (*National Telecommunication and Information Administration Video Quality Metric*) utilisées pour l'évaluation de la qualité vidéo sont des exemples de modèles avec référence complète. Les métriques MSE et PSNR sont relativement simples et se basent respectivement sur la mesure de la différence entre les images et la mesure de la fidélité des images (Bentes Maia et al., 2015). L'inconvénient de ces deux métriques par rapport aux métriques NTIA VQM et SSIM est la non-considération des caractéristiques du système visuel humain.

1.3 Classification des facteurs qui affectent la qualité d'expérience

Plusieurs auteurs ont proposé des approches de classification des facteurs affectant la qualité d'expérience. Celles proposées par (Brunnström et al., 2013) et (Amour et al., 2015) sont présentées par cette section.

1.3.1 Classification proposée par Brunnström et al. (2013)

Brunnström et al. (2013) ont classé les facteurs qui influencent la qualité d'expérience en facteurs humains, ceux liés au contexte et ceux liés au système.

Les facteurs humains englobent l'état émotionnel de l'individu, ses pensées, ses sentiments et sa perception de la réalité. Cette perception peut être forgée par certains facteurs démographiques et socio-économiques (Brunnström et al., 2013).

Les facteurs contextuels sont liés à l'environnement physique, temporel, social, économique de l'utilisateur. Ces facteurs comprennent certains aspects spatiaux tels que le lieu, les caractéristiques du milieu, des aspects temporels comme par exemple l'heure dans la journée (Brunnström et al., 2013).

Les facteurs relatifs au système permettent d'apprécier la qualité d'une application ou d'un service (Brunnström et al., 2013). Ces facteurs sont liés à la capture des données multimédias, à la production de contenu, au codage, au réseau d'accès et au terminal (Brunnström et al., 2013). Parmi les facteurs liés au codage, Brunnström et al. (2013) citent le débit d'encodage, la définition, la fréquence d'image. Les auteurs énoncent, à titre d'exemple, comme facteurs liés au réseau d'accès la bande passante, le débit, le délai, la gigue, les pertes de paquets et le taux d'erreur ; comme facteurs liés au terminal le stockage d'information et la taille de l'écran ; et comme facteurs liés à la production de contenu le type de contenu et fiabilité de l'information.

Brunnström et al. (2013) affirment que les facteurs qui influencent la qualité d'expérience ne peuvent être isolés car ils peuvent être interdépendants.

1.3.2 Classification proposée par Amour et al. (2015)

Amour et al. (2015) ont présenté dans leurs travaux de nombreuses approches proposées dans la littérature portant sur la classification des facteurs qui influencent la qualité d'expérience. Ils ont identifié comme problème qu'il n'existait pas une méthodologie fondamentale de classification de facteurs influençant la QoE dans les environnements mobiles tels que ceux de la vidéo sur demande, la Voix sur IP. Ils ont proposé une nouvelle architecture hiérarchique et extensible qui classe les facteurs influençant la qualité d'expérience des utilisateurs d'applications mobiles en trois couches : la couche *Monitoring entity*, la couche *Contextual Monitoring Entity* et la couche *Experimentation Monitoring Entity*. Cette architecture est présentée dans la figure 1.1.

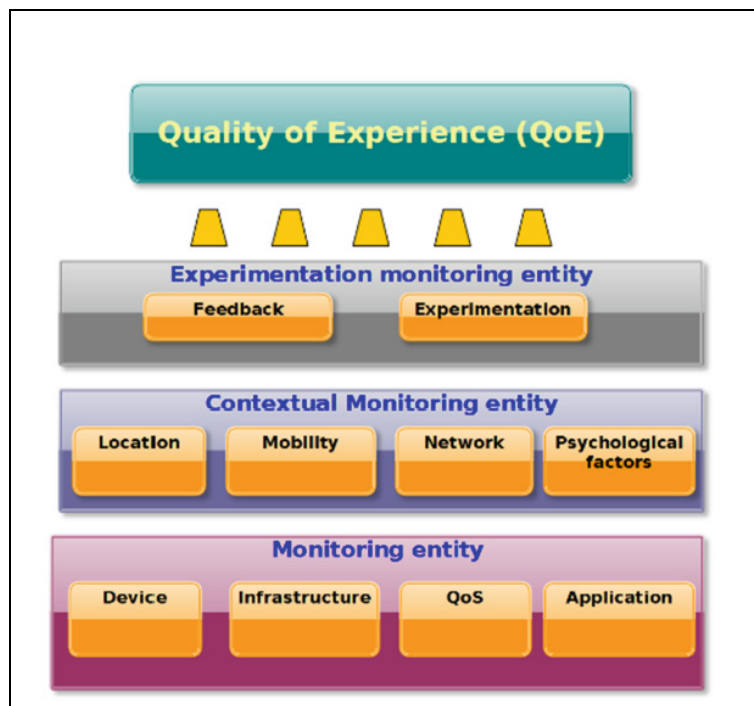


Figure 1.1 Architecture hiérarchique classifiant les facteurs influençant la QoE

Tirée d'Amour, Souihi, Hoceini, et Mellouk (2015)

Les auteurs ont inclus dans la couche *Monitoring Entity* les facteurs liés au périphérique, à l'infrastructure, à la qualité de service et l'application. Ils listent comme facteurs liés au

périphérique la vitesse du processeur, la taille de la mémoire RAM (*Random Access Memory*) et la résolution de l'écran ; comme facteurs liés à l'infrastructure le type du réseau d'accès, le coût de service ; comme facteurs liés à la qualité de service la bande passante, la latence, la gigue ; et comme facteurs liés à l'application le codec, le nombre d'images par seconde, le nombre de connexions HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*) et le temps de téléchargement.

Les auteurs regroupent dans la couche *Contextual Monitoring Entity* les facteurs liés au lieu, à la mobilité, au réseau et les facteurs psychologiques. Ils citent, à titre d'exemples, comme facteurs liés au lieu, les coordonnées GPS (*global positioning system*) et l'emplacement de la cellule et son nom ; comme facteurs liés à la mobilité la vitesse et l'accélération du terminal mobile ; comme facteurs liés au réseau le nom de l'opérateur et le type de réseau ; et comme facteurs psychologiques les caractéristiques de l'utilisateur et son comportement.

Les auteurs définissent comme éléments de la couche *Experimentation Monitoring Entity* les retours d'information sur les avis des utilisateurs, le nombre de visites et le temps d'écoute ou durée de visionnage.

Amour et al. (2015) ont testé cette classification selon deux méthodes : la méthode non discriminante et la méthode discriminante. La méthode non discriminante englobe un nombre élevé de facteurs possibles indépendamment de leur catégorie. La méthode discriminante sépare les facteurs par ordre d'appartenance. Ils ont conclu que la méthode non discriminante permettrait d'avoir une estimation plus précise de la qualité d'expérience. Cette conclusion valide l'hypothèse de Brunnström et al. (2013) qui énonce que les facteurs qui influencent la qualité d'expérience ne peuvent pas être isolés car ils peuvent être interdépendants. Brunnström et al. (2013) n'ont proposé qu'une expérimentation pour valider leur hypothèse.

Notre recherche s'oriente sur la classification proposée par Amour et al. (2015). Cette classification est appropriée aux contextes des environnements mobiles et bonifie celle de Brunnström et al. (2013) en incluant la couche *Experimentation Monitoring Entity* qui

regroupe les retours d'information sur les avis des utilisateurs, le nombre de visites et le temps d'écoute ou durée de visionnage.

Notre recherche se focalise dans la section suivante sur les modèles d'estimation basés sur la méthode discriminante et non discriminante dont les facteurs sont liés à la perception visuelle humaine, à l'encodage et au réseau d'accès. Ces facteurs appartiennent aux couches de la couche *Experimentation Monitoring Entity et Monitoring Entity*. Nous nous sommes limité à ces trois types de facteurs à cause de notre domaine d'étude.

1.4 Synthèse des travaux réalisés sur la modélisation de la qualité d'expérience

Les travaux portant sur les modèles objectifs d'estimation de la qualité de la vidéo perçue peuvent être regroupés en fonction des facteurs considérés. Cette recherche se concentre sur des facteurs liés à la perception visuelle humaine, à l'encodage et au réseau d'accès. La première section de cette partie présente et analyse des approches discriminantes orientées vers l'encodage, celles de Joskowicz et Ardao (2009) et Kufa, Polak, et Kratochvil (2016). La seconde section présente et analyse des approches discriminantes orientées vers le réseau d'accès, notamment celles de Battisti, Carli, et Paudyal (2014), Plakia et al. (2016) et D. Pal et Vanijja (2017). La troisième section présente et analyse des approches discriminantes orientées sur la perception visuelle humaine, à savoir celles de Minhas et al. (2016) et deux modèles avec référence complète SSIM et NTIA VQM. La dernière section analyse une approche hybride et non discriminante, celle de Debajyoti Pal et al. (2016) et s'achève par une conclusion. Cette recherche vise à concevoir une approche nouvelle hybride basée sur la complémentarité de quelques travaux.

1.4.1 Approches discriminantes orientées vers l'encodage

1.4.1.1 Approche de Joskowicz et Ardao (2009)

Joskowicz et Ardao (2009) ont étudié l'influence de la variation du mouvement du contenu vidéo sur la qualité d'expérience. Leur modèle représenté par l'équation (1.2) vise à améliorer la version simplifiée du modèle d'estimation de la qualité vidéo selon la recommandation *G.1070* de l'union internationale des télécommunications définie par l'équation (1.1).

$$Vq = 1 + v3(1 - \frac{1}{1 + (\frac{b}{v4})^{v5}}) \quad (1.1)$$

Tirée de Joskowicz et Ardao (2009)

$$Vq = 1 + 4k(1 - \frac{1}{1 + (\frac{a * b}{v4})^{v5}}) \quad (1.2)$$

Tirée de Joskowicz et Ardao (2009)

On note que Vq est une estimation des notes d'opinion moyennes. Les auteurs ont varié le débit d'encodage b entre 50 kb/s et 12 Mb/s. Les paramètres du modèle $v3$, $v4$, $v5$ sont à déterminer en fonction de chaque couple de valeurs (Vq , b) au moyen de la méthode des moindres carrés. Le paramètre k dépend du codec et a dépend de la définition de la vidéo.

Joskowicz et Ardao (2009) ont défini a comme un facteur multiple du débit d'encodage car ils ont observé que les mêmes clips avaient des allures similaires dans toutes les définitions lorsque le débit était augmenté ou réduit. Ils ont défini $a = 1$ pour une définition de référence R1. Le calcul de a pour une définition R2 est basé sur la condition suivante : pour toutes les valeurs MOS de la définition R1 équivalentes à celles de la définition R2, a pour la définition R2 est la moyenne des valeurs de débit d'encodage correspondantes de la définition R1 divisée par celles de la définition R2 (Joskowicz & Ardao, 2009).

Joskowicz et Ardao (2009) ont défini la valeur de k pour une vidéo encodée en une définition particulière, à débit d'encodage donné et en codec de référence à un. Ils ont calculé la valeur de k pour la même vidéo encodée en la même définition, à même débit d'encodage et en un codec nouveau en tant que le rapport de la qualité perçue même vidéo encodée en un codec nouveau moins un sur la qualité perçue de la même vidéo encodée en le codec de référence.

Joskowicz et Ardao (2009) ont testé leur modèle sur plus de 1500 vidéos encodées en MPEG-2 et H.264. Ils ont classé les vidéos en fonction de la vitesse du mouvement du contenu étant lente, moyenne ou élevée et de la définition étant 720 x 576, 640 x 480, 352 x 288 et 176 x 144.

Les résultats de leur étude ont montré qu'il existe une forte corrélation entre les valeurs du paramètre $v4$ et la vitesse du contenu. Les auteurs ont constaté que l'erreur quadratique entre les notes d'opinion moyennes et les valeurs estimées est minimisée lorsque l'impact du mouvement du contenu est considéré par leur modèle. Ils ont conclu que la prise en compte de l'influence du mouvement du contenu dans le modèle simplifié proposé par la recommandation *G.1070* améliore la précision d'estimation de la qualité perçue. D'autres améliorations apportées par ces auteurs incluent la détermination des paramètres k et a relatifs au type de codec et à la définition de la vidéo respectivement. Les auteurs ont remarqué qu'à une qualité perçue équivalente pour une même vidéo source encodée en différentes définitions, un débit d'encodage supérieur est requis pour une définition supérieure. Ils ajoutent que la qualité perçue s'améliore avec l'augmentation du débit d'encodage.

1.4.1.2 Approche de Kufa et al. (2016)

Kufa et al. (2016) ont étudié l'impact de l'encodage en H.265 et VP9 sur la qualité d'une vidéo source en haute définition complète (1080p) et ultra haute définition (2160p). Les auteurs justifient le choix des codecs H.265 et VP9 par le fait qu'ils sont ceux qui permettent la meilleure réduction de la bande passante requise pour la transmission des vidéos. Ils ont comparé quelques méthodes avec référence complète d'évaluation de la qualité, notamment PSNR, SSIM et VQM par rapport à la méthode visuelle subjective pour des vidéos hautes définitions complètes et ultra hautes définitions encodées en VP9 et H.265.

Les auteurs ont sélectionné pour l'expérimentation 4 séquences vidéo de 10 secondes ayant différentes complexités temporelles et spatiales et 21 étudiants moyennement âgés de 23,5 ans pour les tests subjectifs. Chaque participant disposait d'une durée de 8 secondes pour noter la qualité perçue. Les tests subjectifs ont duré 17 min.

Les résultats de l'évaluation subjective et objective ont montré que la différence en qualité perçue pour une même vidéo en haute définition complète et ultra haute définition, encodée en H.265 et VP9 est insignifiante (Kufa et al., 2016). Les auteurs ont constaté que la méthode objective VQM est la meilleure qui offre une estimation précise de la qualité d'expérience. VQM présente le *paramètre* de corrélation de rang de Spearman le plus élevé aussi bien pour les vidéos hautes définitions complètes (0.91) qu'ultra hautes définitions (0.89) encodées en VP9 et H.265. Ce paramètre permet d'analyser les relations non linéaires monotones entre deux variables, notamment les valeurs estimées et les notes d'opinion moyennes (Xiao, Ye, Esteves, & Rong, 2016). Les auteurs ont aussi observé qu'à débit d'encodage équivalent, la qualité perçue pour une séquence vidéo haute définition complète est meilleure que celle de la même vidéo en ultra haute définition.

Kufa et al. (2016) n'ont proposé aucun modèle sans référence d'évaluation de la qualité perçue et se sont limités au débit d'encodage et aux paramètres standards des codecs, facteurs liés à l'encodage.

1.4.1.3 Limites de ces approches

L'approche de Joskowicz et Ardao (2009) permet de comprendre l'influence du débit d'encodage, des définitions 720 x 576, 640 x 480, 352 x 288 et 176 x 144, des codecs MPEG-2 et H.264 et du mouvement du contenu vidéo sur la qualité d'expérience. De plus, cette approche présente un modèle sans référence pour l'estimation. Kufa et al. (2016) ont montré l'impact de l'encodage en H.265 et VP9 sur la qualité d'une vidéo source en haute définition complète (1080p) et ultra haute définition (2160p). Cependant, cette approche ne propose aucun modèle sans référence pour l'estimation. Ces deux approches se sont limitées aux facteurs liés à l'encodage.

Il s'avère toutefois nécessaire de concevoir un modèle sans référence pour l'estimation de la qualité des vidéos encodées en VP9 prenant en compte l'influence débit d'encodage, de la définition, du mouvement du contenu, des codecs populaires H.264 et VP9 et autres facteurs liés au réseau.

1.4.2 Approches discriminantes orientées vers le réseau d'accès

1.4.2.1 Approche de (Battisti et al., 2014)

Battisti et al. (2014) ont étudié l'influence des paramètres de qualités de service (QoS) suivants sur la qualité d'expérience (QoE): le taux de pertes de paquets, la gigue, le débit de transmission et le délai initial. Ils ont aussi analysé la performance de plusieurs modèles de corrélation QoS-QoE basés sur des fonctions linéaire, polynomiale, logistique, exponentielle, logarithmique et puissance.

Les séquences vidéo brutes utilisées pour l'expérimentation sont tirées de la base de données *ReTRiEVED*, présentent des complexités temporelles et spatiales variées et ont une durée comprise entre 7 et 9 secondes (Battisti et al., 2014). Les auteurs ont varié le débit de transmission entre 0,5 Mb/s et 5 Mb/s, le taux de pertes de paquets entre 0 % et 10 %, la gigue

entre 1 ms et 5 ms et le délai initial entre 0 ms et 1000 ms. L'expérimentation s'est déroulée en deux sessions de 20 min séparées par une pause de 30 min.

Les résultats de leur étude ont montré que la variation du taux de pertes de paquets, de la gigue et du débit de transmission a une forte influence sur la qualité d'expérience. La qualité perçue se détériore quasi exponentiellement avec l'augmentation du taux de pertes de paquets et de la gigue et s'améliore avec la croissance du débit d'encodage sur l'intervalle de valeurs choisies. Les auteurs ont toutefois observé que le délai initial n'a aucun impact direct sur la qualité perçue. Ils ont trouvé que la fonction logistique définie par l'équation (1.3) présente la meilleure corrélation QoS-QoE pour la gigue, le taux de pertes de paquets et le débit de transmission.

$$QoE = a + \frac{b}{1 + c(x + d)^e} \quad (1.3)$$

Tirée de Battisti et al. (2014)

Les paramètres du modèle a , b , c , d , e sont à déterminer. x désigne la valeur du paramètre de qualité de service.

1.4.2.2 Approche de Plakia et al. (2016)

Plakia et al. (2016) ont réalisé une étude expérimentale dans deux environnements différents l'un dans une grande compagnie de télécommunication et l'autre dans un laboratoire pour déterminer les paramètres QoS prédominants affectant la qualité d'expérience. Les paramètres considérés sont la fréquence d'événements de remise en tampon, les pertes de paquets, le retard de démarrage de la lecture de la vidéo et les changements de la définition de la vidéo, la gigue et la puissance du signal, le type de terminal mobile.

Les auteurs ont utilisé un modèle basé sur de multiples algorithmes d'apprentissage automatique pour estimer la qualité d'expérience en fonction de la variation des paramètres

QoS sélectionnés. Ce modèle sélectionne l'algorithme offrant la meilleure précision d'estimation. Les algorithmes d'apprentissage automatique composant ce modèle sont les réseaux neuronaux artificiels, la régression à vecteurs de support, l'arbre de décision et le classificateur naïf bayésien. Plakia et al. (2016) ont comparé leur modèle à la loi de Weber-Fechner.

Les résultats de leur étude ont montré que la qualité perçue est mauvaise pour un retard de démarrage supérieur à 10 secondes. Les auteurs affirment que la réduction de la définition de la vidéo et de la fréquence d'événements de remise en tampon améliorerait la qualité perçue. Ils ont observé que la détérioration des conditions réseau (gigue et pertes de paquets élevées et faible puissance du signal) et l'accroissance du retard de démarrage et de la fréquence d'événements de remise en tampon affectent négativement la qualité perçue. La performance de leur modèle par rapport à la loi de Weber-Fechner est meilleure en termes d'erreur absolue moyenne (0,5185 en compagnie et 0,6133 au laboratoire). Les auteurs rapportent que les paramètres prédominants varient en fonction de la complexité de l'environnement expérimental.

1.4.2.3 Approche de D. Pal et Vanijja (2017)

D. Pal et Vanijja (2017) ont étudié l'impact de 5 paramètres QoS liés au réseau sur la qualité d'expérience. Ces paramètres sont : le délai initial, les pertes de paquets, la gigue, la bande passante et le délai de mise en tampon. Les auteurs ont ensuite analysé la performance de plusieurs modèles de corrélation QoS - QoE sur la base des résultats d'expérimentation et déterminé le modèle d'estimation le plus approprié pour chaque paramètre. Ces modèles sont des fonctions linéaire, logistique, logarithmique et exponentielle.

Les auteurs ont sélectionné 35 participants âgés entre 18 et 35 ans pour les tests subjectifs. L'expérimentation s'est déroulée dans les conditions proposées par la recommandation P.910 de l'Union Internationale des télécommunications. Les séquences vidéo utilisées ont une durée

de 10 secondes et une complexité d'informations spatio-temporelles variée. Ces séquences vidéo en définition 1920 x 1080 ont été encodées en H.265 et VP9.

Les observations de leur étude corroborent celles de Battisti et al. (2014) pour la gigue, les pertes de paquets et le débit de transmission et contredisent celles de Battisti et al. (2014) pour le délai initial. L'accroissement individuel du taux de pertes de 0,1 à 10 %, de la gigue de 1 à 5,5 secondes et du délai de mise en tampon de 5 à 40 secondes cause une détérioration quasi exponentielle de la qualité d'expérience. L'augmentation du débit de transmission de 500 kb/s à 4100 kb/s améliore la qualité perçue de 0 à 5 pour les vidéos encodées en H.265 et VP9. Au-dessus d'un débit de 4100 kb/s, la qualité perçue se dégrade. Contrairement à l'étude de Battisti et al. (2014) qui n'établit aucune corrélation entre la qualité d'expérience et le délai initial, les résultats de D. Pal et Vanijja (2017) montrent que la qualité se détériore quasi exponentiellement pour variation du délai initial de 0 à 50 secondes. Cette différence se justifie par la petite intervalle de variation du délai initial de 0 à 1 seconde choisie par Battisti et al. (2014) qui est inadéquate pour observer l'influence de ce paramètre sur la qualité d'expérience.

D. Pal et Vanijja (2017) ont identifié les modèles de corrélation *QoS-QoE* les plus appropriés pour chaque paramètre. Ces modèles sont définis par les équations suivantes.

$$MOS_{PL} = a \times \exp(b \times PL) + c \times \exp(d \times PL) \quad (1.4)$$

Tirée de D. Pal et Vanijja (2017)

$$MOS_J = a \times \exp(b \times J) + c \times \exp(d \times J) \quad (1.5)$$

Tirée de D. Pal et Vanijja (2017)

$$MOS_{VID} = a \times \exp(b \times VID) + c \times \exp(d \times VID) \quad (1.6)$$

Tirée de D. Pal et Vanijja (2017)

$$MOS_{BD} = a \times \exp(b \times BD) + c \times \exp(d \times BD) \quad (1.7)$$

Tirée de D. Pal et Vanijja (2017)

$$MOS_T = a \times \log(T) + b \quad (1.8)$$

Tirée de D. Pal et Vanijja (2017)

PL : pertes de paquets;

J : Gigue;

VID : délai initial;

BD : délai de mise en tampon;

T : débit de transmission;

a, b, c, d : paramètres du modèle à déterminer.

1.4.2.4 Limites de ces approches

Les travaux présentés par Battisti et al. (2014), Plakia et al. (2016) et D. Pal et Vanijja (2017) nous permettent de comprendre l'influence de quelques facteurs liés au réseau d'accès sur la qualité d'expérience. Ces travaux ont proposé divers modèles sans références d'estimation. Toutefois, leurs modèles ne considèrent pas l'influence des facteurs liés à l'encodage.

1.4.3 Approches discriminantes orientées vers la perception visuelle humaine

1.4.3.1 Approche de Minhas et al. (2016)

Minhas et al. (2016) ont étudié l'impact des saccades durant la lecture d'une vidéo sur la qualité d'expérience pour en conclure que l'augmentation du nombre de saccades entraîne une dégradation accrue de la qualité d'expérience.

Ils ont ensuite comparé les résultats d'estimation de la qualité dérivants du modèle avec référence complète PEVQ (*Perceptual evaluation of video quality*) et du modèle sans référence TQM (*Temporal quality metric*) aux notes d'opinion moyennes attribuées par les participants durant les tests subjectifs. Les auteurs ont graphiquement observé que les résultats de TQM se rapprochent plus des notes d'opinion moyennes par rapport à ceux de PEVQ. Ils expliquent que TQM est conçu pour évaluer la qualité perçue en fonction de l'influence de la durée des saccades et que PEVQ est orienté sur le comportement du système visuel humain. Ils ont constaté que contrairement à TQM, PEVQ prend en compte l'influence des changements de la fréquence d'images par seconde.

1.4.3.2 SSIM et NTIA VQM

SSIM (*Structural Similarity*), NTIA VQM (*National Telecommunication and Information Administration Video Quality Metric*) sont des modèles avec référence complète.

SSIM se base sur un principe du système visuel humain qui montre que les pixels spatialement proches sont interdépendants (Bentes Maia et al., 2015). SSIM compare les distorsions structurelles de corrélation, contraste et luminance entre la vidéo de référence et la vidéo perçue (Bentes Maia et al., 2015).

NTIA VQM évalue la qualité d'expérience en mesurant les effets perceptifs de plusieurs distorsions telles que le bruit, le flou, le mouvement saccadé et non naturel, la distorsion des blocs et la distorsion des couleurs (Chikkerur, Sundaram, Reisslein, & Karam, 2011). Des études ont démontré que NTIA VQM présente les meilleures performances en estimation de la qualité perçue par un paramètre de corrélation de Pearson de 0,9 sur la base de données de test VQEG FRTV Phase II (Chikkerur et al., 2011). Ce modèle a été normalisé par ANSI (*American National Standards Institute*) en juillet 2003 et inclus dans les recommandations ITU-T J.144 et ITU-R BT.1683 (Chikkerur et al., 2011). Cette recherche utilise le modèle avec

référence complète NTIA VQM comme étant une meilleure alternative aux tests subjectifs nécessitant la participation de personnes humaines.

1.4.3.3 Limite de ces approches

Les travaux orientés vers la perception visuelle humaine se basent sur le comportement du système visuel humain pour évaluer la qualité. Le modèle avec référence complète NTIA VQM s'avère la meilleure alternative aux tests subjectifs. Cependant, l'inconvénient de ce modèle pour les applications en temps réel est la nécessité de transférer la vidéo de référence.

1.4.4 Approche non discriminante et hybride orientée vers l'encodage et le réseau d'accès

1.4.4.1 Approche de Debajyoti Pal et al. (2016)

Debajyoti Pal et al. (2016) ont réalisé une étude visant à améliorer le modèle proposé par la recommandation G.1070 de l'Union Internationale des Télécommunications par la détermination des paramètres de ce modèle pour la prise en charge de vidéos haute définitions encodées en H.265. Ce modèle est présenté par les équations (1.9), (1.10), (1.11) et (1.12). Les paramètres supportés de ce modèle sont la fréquence d'images par seconde F_r , le taux de perte de paquets P_{pl} et le débit d'encodage B_r ; $v_3, v_4, v_5, v_8, v_9, v_{10}, v_{11}$ et v_{12} sont des paramètres à déterminer; O_{fr} est la fréquence optimale d'images par seconde qui maximise la qualité perçue à un débit d'encodage donné; D_{fr} est le degré de robustesse de la qualité vidéo lié à la fréquence d'images par seconde.

Les résultats de leur étude montrent qu'en absence de pertes de paquets, les valeurs estimées par le modèle G.1070 se rapprochent plus précisément des notes d'opinion moyennes sur un intervalle de débit d'encodage variant de 1000 kb/s à 8000 kb/s que celui de 512 kb/s à 1000 kb/s. Les auteurs rapportent aussi qu'en cas de pertes de paquets, ce modèle est valide si le

taux de pertes de paquets est inférieur à 2 %. Les valeurs du paramètre de corrélation de Pearson en absence et en présence de pertes de paquets sont respectivement 0,89 et 0,389. Le paramètre de corrélation de Pearson permet d'apprécier l'intensité de la relation linéaire entre les notes d'opinion moyennes et les valeurs estimées par le modèle G.1070.

$$Vq = 1 + I_{coding} \exp\left(-\frac{P_{ppl}}{D_{ppl}}\right) \quad (1.9)$$

Tirée de Debajyoti Pal et al. (2016)

$$I_{coding} = I_{ofr} \exp\left(-\frac{(\ln(Fr) - \ln(Ofr))^2}{2Dfr^2}\right) \quad (1.10)$$

Tirée de Debajyoti Pal et al. (2016)

$$I_{ofr} = v3 - \frac{v3}{1 + \left(\frac{b}{v4}\right)^{v5}} \quad (1.11)$$

Tirée de Debajyoti Pal et al. (2016)

$$D_{ppl} = v10 + v11 \exp\left(-\frac{Fr}{v8}\right) + v12 \exp\left(-\frac{Br}{v8}\right) \quad (1.12)$$

Tirée de Debajyoti Pal et al. (2016)

1.4.4.2 Limite de cette approche

L'approche de Debajyoti Pal et al. (2016) basée sur une extension du modèle G.1070 pour la prise en charge du codec H.265 permet d'estimer la qualité d'expérience en fonction de l'impact de la variation la fréquence d'images par seconde, le taux de perte de paquets et le débit d'encodage. Toutefois, cette approche ne définit pas précisément et individuellement l'impact du mouvement du contenu, de la définition et du type de codec sur la qualité perçue.

1.5 Sommaire

Les travaux portant sur les modèles objectifs d'estimation de la qualité de la vidéo perçue peuvent être classés en fonction des facteurs considérés, qui peuvent être liés à l'encodage, au réseau d'accès ou à la perception visuelle humaine.

Les approches présentées par Joskowicz et Ardao (2009), Kufa et al. (2016) se sont limitées aux facteurs liés à l'encodage. L'approche de Joskowicz et Ardao (2009) propose un modèle sans référence d'évaluation de la qualité d'expérience en fonction de l'influence du débit d'encodage, des définitions vidéo 720 x 576, 640 x 480, 352 x 288 et 176 x 144, des codecs MPEG-2 et H.264 et du mouvement du contenu vidéo sur la qualité d'expérience. Les travaux de Kufa et al. (2016) montrent l'impact de l'encodage en H.265 et VP9 sur la qualité d'une vidéo source en haute définition complète (1080p) et ultra haute définition (2160p) et ne proposent aucun modèle sans référence pour l'estimation de la qualité. Ces deux approches discriminantes orientées sur des facteurs liés à l'encodage ne permettent pas d'estimer objectivement la qualité perçue des vidéos encodées en VP9 en fonction de l'influence du débit d'encodage, de la définition, du mouvement du contenu, des codecs populaires H.264 et VP9.

Les travaux présentés par Battisti et al. (2014), Plakia et al. (2016) et D. Pal et Vanijja (2017) étudient l'influence de quelques facteurs liés au réseau d'accès sur la qualité d'expérience. Ces travaux ont proposé des modèles sans référence d'estimation. Toutefois, leurs modèles ne considèrent pas l'influence des facteurs liés à l'encodage.

L'approche hybride et non discriminante de Debajyoti Pal et al. (2016), basée sur une extension du modèle sans référence G.1070 de l'Union Internationale des Télécommunications pour la prise en charge du codec H.265, évalue la qualité d'expérience en fonction de l'influence de facteurs liés à l'encodage (la fréquence d'images par seconde et le débit d'encodage) et un facteur lié au réseau (le taux de perte de paquets). Toutefois, cette approche ne définit pas précisément et individuellement l'impact du mouvement du contenu, de la définition et du type de codec sur la qualité perçue.

Ce manque de prise en compte de la vitesse du contenu vidéo, de la définition et du type de codec dans le modèle G.1070, paramètres influençant la qualité perçue a été la motivation de notre approche. Notre objectif est de concevoir un modèle sans référence et non-discriminant d'estimation de la qualité d'expérience prenant en compte l'influence des paramètres qui sont le taux de pertes de paquets, le débit d'encodage, le mouvement du contenu vidéo, les codecs populaires H.264 et VP9 et les définitions vidéo 640 x 480, 720 x 480 et 1280 x 720.

CHAPITRE 2

LA MÉTHODOLOGIE ET LES MODÈLES PROPOSÉS POUR L'ESTIMATION DE LA VARIATION DE LA QoE VIDEO

2.1 Introduction

Ce chapitre présente la méthodologie et les modèles proposés dans cette recherche qui améliorent celui proposé par l'Union Internationale des Télécommunications et ceux proposés par d'autres auteurs. La première partie présente le premier modèle proposé pour analyser et estimer la qualité d'expérience en fonction de l'impact de paramètres liés à l'encodage et au contenu vidéo. Ces paramètres sont le débit d'encodage, la vitesse du contenu, la définition et le type de codec. Les modèles d'autres auteurs sont orientés uniquement vers des paramètres liés à l'encodage et ils ne prennent généralement pas en compte l'impact de changements de la vitesse du contenu vidéo, de la définition et du type de codec. Le modèle proposé fait distinction des modèles de ces auteurs. La seconde partie présente le second modèle proposé qui est basé sur une approche non discriminante. Cette approche prend en compte l'impact du taux de pertes de paquets et de paramètres liés à l'encodage et au contenu vidéo sur la QoE. Cela fait distinction des modèles d'autres auteurs qui sont orientés uniquement vers des paramètres liés à l'encodage ou au réseau d'accès.

2.2 Modélisation de la QoE en fonction de paramètres liés à l'encodage

2.2.1 Matériels

Les matériels utilisés ont été des clips vidéo, l'outil FFmpeg, le logiciel développé par NTIA et le logiciel R.

Liste des clips vidéo et leurs caractéristiques

Les clips vidéo sont téléchargés de la base de données de VQEG (*Video Quality Experts Group*) et sont les mêmes que ceux utilisés par Joskowicz. et al. (2011). Ils sont présentés dans le tableau 2.1 selon leur nom et leur vitesse de contenu. Ces clips vidéo sélectionnés sont au nombre de 16 et ont une durée moyenne de 5 secondes. Ils peuvent être classés en fonction de leur définition, leur nombre d'images, leur taille et la vitesse de leur contenu. La définition des clips dont le nom se termine par « _525.yuv » est de 1440 x 486. Le nombre d'images qu'ils contiennent est de 260 (VQEG, 2004). La taille de ces clips est de 181958400 bytes. La définition des clips dont le nom se termine par « _625.yuv » est 1440 x 576. Le nombre d'images qu'ils contiennent est de 220 (VQEG, 2004). La taille de ces clips est de 182 MB.

La vitesse de contenu des clips dont les noms commencent par « src14, src4, src21, src20, src16 » est lente, « src3, src22, src7, src10 » est moyenne et « src2, src5, src19, src9, src13, src17 » est élevée (Joskowicz & Ardao, 2009).

Nom des clips vidéo

Tableau 2.1 Noms des clips vidéo et vitesse de leur contenu
Adapté de Joskowicz et Ardao (2009)

Source	Nom	Vitesse de contenu	Source	Nom	Vitesse de contenu
2	Barcelona	Élevée	14	New York 2	Lente
3	Harp	Moyenne	16	Betes Pas Betes	Lente
4	Moving Graphic	Lente	17	Le point	Élevée
5	Canoa Valsesia	Élevée	18	Autumns leaves	Lente
7	Fries	Moyenne	19	Football	Élevée
9	Rugby	Élevée	20	Sailboat	Lente
10	Mobile Calendar &	Moyenne	21	Susie	Lente
13	Balloon-pops	Élevée	22	Tempete	Moyenne

Description de l'outil FFmpeg

L'outil FFmpeg est une application capable d'encoder, de décoder, de transcoder, de diffuser et de lire des flux vidéo et audio (Bellard, 2000). Cet outil supporte une grande variété de codecs et peut être installé sur différents systèmes d'exploitation tels que Linux, Windows, Mac OS X (Bellard, 2000). Il est libre et gratuit. Il peut être utilisé en ligne de commande et permet ainsi de programmer l'exécution automatique de tâches multiples. Dans le cadre de notre recherche, nous l'avons utilisé en ligne de commande pour encoder les vidéos au format brut sélectionnées en H.264 et VP9.

Description du logiciel développé par NTIA

Le logiciel développé par NTIA permet de simuler la qualité visuelle perçue par des participants de tests subjectifs (Joskowicz & Ardao, 2009). Ce logiciel comporte plusieurs modèles références réduites et un modèle avec référence complète. Dans le cadre de notre recherche, nous avons sélectionné, dans l'interface du logiciel, le modèle avec référence complète basé sur les recommandations ITU-T J.144 et ITU-R BT.1683 pour simuler la qualité visuelle. La marge d'erreur d'estimation de ce modèle avec référence complète est de l'ordre de +/- 0,1 sur l'échelle 0-1 (Joskowicz & Ardao, 2009).

Description du logiciel R

R est un langage et environnement utilisé pour l'analyse, la manipulation et la transformation de données, le développement de logiciels statistiques et la génération de graphiques prêts à être utilisés (Ross & Robert, 2017). Dans le cadre de notre recherche, nous l'avons utilisé pour tracer les courbes de variation de la qualité d'expérience en fonction de paramètres liés à l'encodage et au réseau d'accès et pour calculer les paramètres de notre modèle d'estimation.

2.2.2 Codage des vidéos en H.264 et VP9 avec l'outil FFmpeg

Paramètres de codage H.264 et VP9

Nous avons choisi des paramètres de codage qui sont compatibles avec une grande diversité de périphériques et de systèmes tels qu'Android, iPhone, iPad. Ces paramètres doivent toutefois être supportés par le logiciel de NTIA utilisé pour la simulation de la qualité visuelle perçue.

Les paramètres de codage en H.264 définis dans le tableau 2.2 sont ceux proposés par Joskowicz. et al. (2011). Les paramètres de codage en VP9 définis dans le tableau 2.2 sont ceux recommandés par Google. Dans le cadre de cette recherche, nous avons choisi les définitions vidéo populaires 640 x 480 (VGA), 720 x 480 (SD), 1280 x 720 (HD) et 18 valeurs de débit d'encodage qui sont 0.1 Mb/s, 0.3 Mb/s, 0.5 Mb/s, 0.7 Mb/s, 0.9 Mb/s, 1 Mb/s, 1.5 Mb/s, 2 Mb/s, 2.5 Mb/s, 3 Mb/s, 3.5 Mb/s, 4 Mb/s, 4.5 Mb/s, 5 Mb/s, 5.5 Mb/s, 6 Mb/s, 7 Mb/s et 8 Mb/s afin de tracer des courbes précises de la variation de la qualité d'expérience en fonction du débit.

Tableau 2.2 Paramètres de codage H.264 et VP9
Adapté de Joskowicz, Ardao, et Sotelo (2011) et de Google (s.d)

H.264	
Profile/Level	Profile high422@ Level 3.0
Max GOP size	33
Frame type	2 B-Frames
Entropy coding	CABAC
Interlacing	Non-Interlaced
Video frame rate	30 fps
Video bitrate	0.2 Mb-12Mb
Bit rate encoding type	CBR
Video resolution	640 x 480; 720 x 480; 1280 x 720
VP9	
Deadline	Real-time
Keyframe spacing (GoP)	240
Quality	Real-time
Video frame rate	30 fps
Video bitrate	0.2 Mb-12Mb
Bit rate encoding type	CBR
Video resolution	640 x 480; 720 x 480; 1280 x 720

Méthodologie

Les 16 clips vidéo originaux ont été convertis au format non compressé AVI supporté par le logiciel BVQM NTIA avec FFmpeg. Ils sont les vidéos de référence au format brut. Ces vidéos ont ensuite été encodées et compressées en H.264 et VP9 au moyen de FFmpeg selon les paramètres de codage présentés dans la figure 2.1. Chaque clip vidéo est encodé en 18 valeurs du débit d'encodage, en 3 définitions vidéo 640 x 480, 720 x 480 et 1280 x 720 et en deux codecs H.264 et VP9. Le nombre de vidéos encodés est égal à 1728. Ces vidéos encodées ont subi des altérations liées au codage. Elles ont été reconverties au format non compressé AVI. La section suivante présente la simulation de la qualité visuelle sur la base de chaque paire (vidéo de référence, vidéo encodée).

2.2.3 Simulation de la qualité visuelle perçue avec le logiciel BVQM de NTIA basé sur un modèle avec référence complète

Méthodologie

La simulation de qualité visuelle perçue avec le logiciel BVQM de NTIA s'est déroulée en 3 grandes étapes : la sélection de paires (vidéo originale au format brut, vidéo encodée en H.264 et VP9), la sélection du modèle avec référence complète basé sur les recommandations ITU-T J.144 et ITU-R BT.1683 et la présentation des valeurs VQM.

Les valeurs VQM sont comprises entre 0 et 1. Elles ont été converties en notes d'opinion moyennes (MOS) au moyen de l'équation (2.2).

$$MOS = 5 - 4 * VQM \quad (2.1)$$

Adaptée de Joskowicz et Ardao (2009)

La relation entre les notes d'opinion moyennes et la qualité perçue est présentée dans le tableau 2.3

Tableau 2.3 Relation entre les notes d'opinion moyennes et la qualité perçue
Adapté de Joskowicz et Ardao (2009)

MOS	Qualité
5	Excellente
4	Bonne
3	Moyenne
2	Mauvaise
1	Très mauvaise

Les résultats des notes d'opinion moyennes ont été présentés dans un tableau. Ce tableau contient pour chaque vidéo encodée les informations relatives à l'identifiant de la vidéo, au codec, à la définition, la vitesse du contenu, le débit d'encodage et la note d'opinion moyenne.

2.2.4 Présentation des résultats dans le logiciel R

Méthodologie

La table contenant les informations des notes d'opinion moyennes et les caractéristiques des vidéos encodées a été importée dans le logiciel R. Dans ce logiciel, un script a été écrit pour tracer les courbes de variation de la qualité d'expérience en fonction des paramètres liés à l'encodage qui sont le débit d'encodage, la définition, le type de codec et la vitesse du contenu.

2.2.5 Modèle d'estimation sans référence proposé

L'objectif visé par cette partie de la méthodologie est de concevoir un modèle d'estimation de la variation moyenne de la qualité d'expérience en fonction du débit d'encodage, de la vitesse du contenu vidéo, de la définition et des codecs H.264 et VP9. Les définitions vidéo sont 640 x 480, 720 x 480 et 1280 x 720. Le débit d'encodage varie entre 0.1 Mb/s et 8 Mb/s. La vitesse du contenu vidéo est lente, moyenne ou élevée. Nous avons implémenté le modèle extensible présenté dans l'équation (2.2).

$$Vq = 1 + v3 * k(1 - \frac{1}{1 + (\frac{b}{a * v4})^{v5}}) \quad (2.2)$$

Adaptée de Joskowicz et Ardao (2009)

On note que Vq est une estimation des notes d'opinion moyennes. La lettre b représente le débit d'encodage; $v3$, $v4$, $v5$ sont les paramètres du modèle G.1070; le paramètre k dépend du codec et a dépend de la définition de la vidéo.

Détermination des paramètres v_3 , v_4 , v_5

Les paramètres v_3 , v_4 , v_5 ont été calculés à partir de l'équation (2.3) dans le logiciel R en fonction de chaque couple de valeurs (Vq, b) au moyen de la méthode des moindres carrés.

$$Vq = 1 + v_3 \left(1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{b}{v_4} \right)^{v_5}} \right) \quad (2.3)$$

Tirée de Joskowicz et Ardao (2009)

Les meilleures valeurs des paramètres v_3 , v_4 et v_5 qui minimisent la somme de l'erreur quadratique entre les valeurs MOS et ces valeurs estimées par le modèle ont été calculées pour chaque groupe de vidéos à vitesse du contenu lente, moyenne et élevée, encodées en H.264 et VP9 et en définitions 640 x 480, 720 x 480, 1280 x 720.

La valeur minimale de la somme de l'erreur quadratique (S_{min}) entre les valeurs réelles et les valeurs estimées par le modèle est définie par l'équation (2.4)

$$S_{min} = \min_{vi} \sum_{d=0}^n (MOS - M(d, vi))^2 \quad (2.4)$$

Adaptée de Joskowicz et Ardao (2009)

$M(d, vi)$ représente les valeurs Vq d'estimation de la qualité ;

S_{min} est la valeur minimale de la somme de l'erreur quadratique entre les valeurs réelles et les valeurs estimées par le modèle.

Les valeurs du paramètre de détermination R^2 ont été calculées pour déterminer la corrélation entre les valeurs MOS et ces valeurs estimées par le modèle. Ce paramètre permet d'apprécier l'adéquation entre notre modèle d'estimation et les valeurs MOS.

Intégration et détermination du paramètre a relatif à la définition

L'équation (2.5) est une amélioration de l'équation (2.3). Elle prend en compte le paramètre a relatif à la définition.

$$Vq = 1 + v3(1 - \frac{1}{1 + (\frac{b}{a * v4})^{v5}}) \quad (2.5)$$

Adaptée de Joskowicz et Ardao (2009)

Joskowicz et Ardao (2009) ont défini $1/a$ comme un facteur multiple du débit d'encodage car ils ont observé que les mêmes clips avaient des allures similaires dans toutes les définitions lorsque le débit était augmenté ou réduit. Ils ont défini $1/a = 1$ pour une définition de référence R1. Le calcul de $1/a$ pour une définition R2 est basé sur la condition suivante : pour toutes les valeurs MOS de la définition R1 équivalentes à celles de la définition R2, $1/a$ pour la définition R2 est la moyenne des valeurs de débit d'encodage correspondantes de la définition R1 divisée par celles de la définition R2 (Joskowicz & Ardao, 2009).

Nous avons utilisé une approche nouvelle pour le calcul de a en nous basant sur des observations similaires à celle de Joskowicz et Ardao (2009). De l'équation (2.5) adaptée de Joskowicz et Ardao (2009), nous avons trouvé que le paramètre a modifie $v4$. Ce paramètre contrôle le changement d'échelle du modèle.

Nous avons calculé les meilleures valeurs des paramètres $v3$, $v4$ et $v5$ qui minimisent la somme de l'erreur quadratique entre les valeurs MOS et ces valeurs estimées par le modèle (équation (2.3)) pour chaque groupe de vidéos à vitesse du contenu lente, moyenne et élevée, encodées en H.264 en les définitions 640 x 480, 720 x 480 et 1280 x 720.

Nous avons calculé les valeurs moyennes de $v3$ et $v5$ pour toutes les définitions et par vitesse du contenu lente, moyenne et élevée pour les vidéos encodées en H.264. Ces valeurs de $v3$ et $v5$ sont constantes par vitesse de contenu en dépit des changements de définition. Nous avons

ensuite calculé au moyen de la méthode des moindres carrés les meilleures valeurs de v_4 en fonction de ces valeurs moyennes de v_3 et v_5 pour chaque groupe de vidéos à vitesse du contenu lente, moyenne et élevée, encodées en H.264 et en les définitions 640 x 480, 720 x 480, 1280 x 720.

Nous avons défini la valeur de a à un pour toutes les vidéos en définition 640 x 480. Nous avons calculé a pour chaque groupe de vidéos à vitesse du contenu lente, moyenne et élevée, encodées en H.264 et en les définitions 720 x 480 et 1280 x 720 au moyen de l'équation (2.6).

$$a_{new\ resolution} = \frac{v4_new_resolution}{v4_reference_resolution} \quad (2.6)$$

La valeur de a pour les vidéos en définitions 720 x 480 en une vitesse de contenu particulière est la valeur de v_4 pour ces mêmes vidéos divisée par la valeur de v_4 pour ces mêmes vidéos en la même vitesse de contenu et en définition 640 x 480.

La valeur de a pour les vidéos en définitions 1280 x 720 en une vitesse de contenu particulière est la valeur de v_4 pour ces mêmes vidéos divisée par la valeur de v_4 pour ces mêmes vidéos en la même vitesse de contenu et en définition 640 x 480.

Intégration et détermination du paramètre relatif au type de codec

Le paramètre k a été intégré à l'équation (2.5) pour former l'équation (2.2).

$$Vq = 1 + v_3 * k \left(1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{b}{a * v_4} \right)^{v_5}} \right) \quad (2.2)$$

Adaptée de Joskowicz et Ardao (2009)

Joskowicz et Ardao (2009) ont défini la valeur de k pour une vidéo encodée en une définition particulière, à débit d'encodage donné et en codec de référence à un. Ils ont calculé la valeur de k pour la même vidéo encodée en la même définition, à même débit d'encodage et en un codec nouveau en fonction de l'équation (2.7).

$$k = \frac{MOS(VP9) - 1}{MOS(H.264) - 1} \quad (2.7)$$

Adaptée de Joskowicz et Ardao (2009)

Nous avons utilisé une approche nouvelle et simple pour le calcul de k en nous basant sur des observations similaires à celle de Joskowicz et Ardao (2009). De l'équation (2.7) adaptée de Joskowicz et Ardao (2009), nous avons trouvé que le paramètre k modifie $v3$. Ce paramètre contrôle la translation verticale du modèle d'estimation.

Nous avons conservé les valeurs $v4$ et $v5$ obtenues pour le codec H.264. Nous avons ensuite calculé $v3$ pour les vidéos en VP9 en fonction de ces valeurs $v4$ et $v5$ au moyen de la méthode des moindres carrés pour chaque groupe de vidéos à vitesse du contenu lente, moyenne et élevée, et en les définitions 640 x 480, 720 x 480 et 1280 x 720.

Nous avons défini la valeur de k à un pour toutes les vidéos encodées en H.264. Nous avons calculé la valeur de k pour chaque groupe de vidéos à vitesse du contenu lente, moyenne et élevée, encodées en VP9 et en les définitions 640 x 480, 720 x 480 et 1280 x 720 au moyen de l'équation (2.8).

$$k_{vp9} = \frac{v3_{vp9}}{v3_{h264}} \quad (2.8)$$

La valeur de k pour une vidéo à une vitesse de contenu particulière, une définition donnée et encodée en VP9 est la valeur de $v3$ pour ces mêmes vidéos divisée par la valeur de $v3$ pour la même vidéo en la même vitesse de contenu et même définition encodée en H.264.

2.2.6 Validation du modèle d'estimation sans référence proposé

Nous avons validé notre modèle en fonction du paramètre de détermination R^2 . Sa formule est présentée dans l'équation (2.9). L'estimation de notre modèle est très imprécise si R^2 tend vers 0 et est très précise si R^2 tend vers 1. Nous avons ensuite comparé sa précision d'estimation à celui de la recommandation G.1070 de l'Union Internationale des Télécommunications.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y - \hat{y})^2}{\sum(y - \bar{y})^2} \quad (2.9)$$

Adaptée de (Raghavendra, Naik, Venkatramaphanikumar, Kumar, & Krishna, 2014)

y désigne les valeurs MOS;

$\hat{y}$ désigne les valeurs estimées par le modèle;

$\bar{y}$ désigne la moyenne des valeurs MOS.

2.3 Modélisation de la QoE en fonction de paramètre lié au réseau

2.3.1 Matériels

VMWARE

VMWARE Workstation est un logiciel servant à l'émulation de machines et de réseaux virtuels configurables (EMC, 1999). Il permet d'exécuter plusieurs systèmes d'exploitation (EMC, 1999). Il peut être installé sur Windows ou Linux et être utilisé dans le cadre des activités de développement de logiciel, de test d'applications, de simulation de réseaux (EMC, 1999).

NEWT

Le logiciel *Network Emulator for Windows Toolkit* (NEWT) émule différentes conditions de réseaux sans fil et filières (Lonny, Ivan, & Juan, 2010). Il possède une interface permettant de configurer la latence d'un réseau, la bande passante disponible, le taux de pertes de paquets, les erreurs de propagations, le comportement de la mise en file d'attente et la réorganisation des paquets (Lonny et al., 2010).

VLC

Video Lan Client (VLC) est lecteur multimédia simple, rapide et gratuit capable de lire la plupart des fichiers multimédias et les flux réseau (Jean-Baptiste, 2001). Il permet aussi de diffuser des flux vidéo entre plusieurs machines en utilisant différents protocoles de la couche transport (Jean-Baptiste, 2001). La version du programme utilisée dans cette recherche est 2.2.6.

2.3.2 Émulation de réseau virtuel avec le logiciel VMWARE

Deux machines virtuelles ont été connectées dans VMWARE par un réseau virtuel LAN de 1 Gb/s. Ces machines possèdent les caractéristiques suivantes : mémoire RAM 512 MB, disque dur 40 GB, nombre de processeur un et système d'exploitation XP.

2.3.3 Configuration de paramètres QoS avec NEWT

Sur l'une des machines virtuelles, le logiciel NEWT a été installé. Ce logiciel a été utilisé pour configurer le taux de pertes de paquets à 0,1 %, 0,5 %, 1 %, 3 %, 5 %, et 8 %. Ces valeurs de taux de pertes de paquets sont similaires à celles de (D. Pal & Vanijja, 2017).

2.3.4 Liste des clips vidéo

Les clips vidéo utilisés sont uniquement ceux qui sont encodés en H.264. Une limitation observée durant notre étude est que le logiciel VLC ne supporte pas encore la diffusion de flux encodés en VP9.

2.3.5 Diffusion de flux vidéo avec le logiciel VLC

Le logiciel VLC a été installé sur les deux machines virtuelles pour la diffusion et la sauvegarde de flux vidéo. Les paramètres par défaut de ce logiciel ont été conservés.

Les vidéos encodées en H.264 ont été diffusées en UDP avec VLC à partir la machine A et ont été lues et sauvegardées avec VLC à partir de la machine B après avoir subi des distorsions liées à différentes valeurs du taux de pertes de paquets (0 %, 0,1 %, 0,5 %, 1 %, 3 %, 5 %, et 8 %).

2.3.6 Simulation de la qualité visuelle perçue avec le logiciel référence complète VQM NTIA

La simulation de qualité visuelle perçue avec le logiciel BVQM de NTIA s'est déroulée en 3 grandes étapes : la sélection de paires (vidéo originale au format brut, vidéo encodée en H.264 et VP9), la sélection du modèle avec référence complète basé sur les recommandations ITU-T J.144 et ITU-R BT.1683 et la présentation des valeurs VQM.

Les valeurs VQM sont comprises entre 0 et 1. Elles ont été converties en notes d'opinion moyennes (MOS) au moyen de l'équation (2.2).

Les résultats des notes d'opinion moyennes ont été présentés dans un tableau. Ce tableau contient pour chaque vidéo encodée les informations relatives à l'identifiant de la vidéo, au

codec, à la définition, la vitesse du contenu, le débit d'encodage, le taux de pertes de paquets et la note d'opinion moyenne.

2.3.7 Présentation des résultats dans le logiciel R

Le tableau contenant les informations des notes d'opinion moyennes et les caractéristiques des vidéos encodées en H.264 a été importé dans le logiciel R. Dans ce logiciel, un script a été écrit pour tracer les courbes de variation de la qualité d'expérience en fonction des paramètres liés à l'encodage et au réseau d'accès qui sont le débit d'encodage, la définition, et le taux de pertes de paquets.

2.3.8 Modèle d'estimation sans référence proposé

L'objectif visé par cette partie est de concevoir un modèle d'estimation de la variation moyenne de la qualité d'expérience en fonction du débit d'encodage, de la vitesse du contenu vidéo, du taux de pertes de paquets, de la définition et du codec. La définition est de 640 x 480. Les valeurs du débit d'encodage sont 1 Mb/s, 3 Mb/s, 5 Mb/s et 7 Mb/s. La vitesse du contenu vidéo est lente, moyenne ou élevée. Le codec sélectionné est H.264. Nous avons implémenté le modèle extensible présenté dans l'équation (2.10).

$$Vq = 1 + v3 * k(1 - \frac{1}{1 + (\frac{b}{a * v4})^{v5}}) * f(plr, b) \quad (2.10)$$

Adaptée de Joskowicz et Ardao (2009)

Soit $f(plr, b)$ la fonction définie dans l'équation (2.11). On note que Vq la qualité perçue en fonction de l'impact résultant du taux de pertes de paquets et du débit d'encodage. La lettre b représente le débit d'encodage; $v3$, $v4$, $v5$ sont les paramètres du modèle G.1070; le paramètre

k dépend du codec et a dépend de la définition de la vidéo ; plr désigne le taux de pertes de paquets.

$$f(plr, b) = (Vq - 1) / (v3 * k(1 - \frac{1}{1 + (\frac{b}{a * v4})^{v5}})) \quad (2.11)$$

Nous avons calculé les valeurs de $f(plr, b)$ en fonction l'équation (2.11). Nous avons tracé $f(plr, b)$ en fonction du taux de pertes de paquets et avons observé que cette fonction est exponentielle et décroissante pour les différentes valeurs du débit d'encodage. Nous avons défini $f(plr, b)$ par l'équation (2.12)

$$f(plr, b) = v6 + v7 * \exp(v8 * PLR) \quad (2.12)$$

Nous avons calculé les valeurs optimales de $v6$, $v7$ et $v8$ en utilisant la méthode des moindres carrés pour les groupes de vidéos à vitesse de contenu lente, moyenne et élevée, encodés en définition 640 x 480 et H.264 à 1 Mb/s, 3 Mb/s, 5 Mb/s et 7 Mb/s. Le paramètre $v6$ contrôle la translation verticale de la fonction (plr, b) . Le paramètre $v7$ contrôle le changement d'échelle verticale de la fonction (plr, b) . Le paramètre $v8$ contrôle le taux de décroissance ou le changement d'échelle horizontale de la fonction (plr, b) .

Les courbes de (plr, b) en fonction du taux de pertes de paquets nous ont permis de déduire que $v8$ est une fonction du débit d'encodage b .

Nous avons calculé les valeurs moyennes de $v6$ et $v7$ par vitesse de contenu. Les valeurs de $v6$ et $v7$ demeurent constantes par vitesse de contenu en débit des changements du débit d'encodage. Nous avons ensuite calculé les valeurs optimales de $v8$ au moyen de la méthode

des moindres carrés en fonction des valeurs moyennes de v_6 et v_7 par vitesse de contenu et par débit d'encodage.

Nous avons tracé v_8 en fonction du débit d'encodage par vitesse de contenu.

2.3.9 Validation du modèle d'estimation sans référence proposé

Nous avons validé notre modèle en fonction du paramètre de détermination R^2 . Sa formule est présentée dans l'équation (2.9). L'estimation de notre modèle est très imprécise si R^2 tend vers 0 et est très précise si R^2 tend vers 1. Nous avons ensuite comparé sa précision d'estimation à celui de la recommandation G.1070 de l'Union Internationale des Télécommunications.

2.4 Sommaire

Ce chapitre a décrit la méthodologie et les modèles proposés dans cette recherche. Dans la première partie, nous avons présenté le premier modèle proposé pour analyser et estimer la qualité d'expérience en fonction de l'impact de paramètres liés à l'encodage. Ces paramètres liés sont le débit d'encodage, la vitesse du contenu (lente, moyenne et rapide), la définition (VGA, SD et HD) et le type de codec (H.264 et VP9). Les modèles d'autres auteurs sont orientés uniquement vers des paramètres liés à l'encodage et ils ne prennent généralement pas en compte l'impact de changements de la vitesse du contenu vidéo, de la définition et du type de codec. Le modèle proposé fait distinction des modèles de ces auteurs.

Dans la seconde partie, nous avons présenté le second modèle proposé qui est basé sur une approche non discriminante. Cette approche prend en compte l'impact du taux de pertes de paquets et de paramètres liés à l'encodage et au contenu vidéo sur la QoE. Ces paramètres liés à l'encodage sont le débit d'encodage, la vitesse du contenu vidéo (lente, moyenne et rapide), la définition (VGA) et le type de codec (H.264). Cela fait distinction des modèles d'autres auteurs qui sont orientés uniquement vers des paramètres liés à l'encodage ou au réseau.

d'accès. En absence de dégradations liées à la fréquence d'images par seconde, le second modèle proposé se distingue de celui de l'Union Internationale des Télécommunications (orienté vers des paramètres liés à l'encodage ou au réseau d'accès) par sa simplicité et la prise en compte de l'impact de la définition, du type de codec et de la vitesse de contenu.

Les modèles proposés peuvent être utilisés dans de futures recherches pour optimiser le processus décisionnel dans le *multihoming* et pour faire une gestion intelligente et efficace des ressources du réseau. Ces modèles peuvent être utilisés par des entreprises pour l'estimation de la qualité d'expérience perçue de leur service vidéo et pour la prise de décision intelligente leur permettant de se distinguer dans un environnement économique hautement compétitif (Barakovic & Skorin-Kapov, 2013). Dans le prochain chapitre, nous les utilisons pour l'estimation et l'analyse de la variation de la qualité perçue.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS NUMÉRIQUES

3.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats numériques de notre recherche. La première partie de ce chapitre analyse la variation de la qualité d'expérience en fonction de paramètres liés à l'encodage qui sont le débit, les définitions 640 x 480, 720 x 480, 1280 x 720 et les codecs H.264 et VP9 et la vitesse du contenu. Elle présente ensuite le modèle d'estimation de la qualité d'expérience proposé prenant en compte ces paramètres liés à l'encodage. La seconde partie de ce chapitre analyse la variation de la qualité d'expérience en fonction de l'impact du taux de pertes de paquets lié à la transmission sur un réseau d'accès et de l'impact résultant du taux de pertes de paquets et du débit d'encodage. Elle présente le modèle d'estimation de la qualité d'expérience proposé prenant en compte ces paramètres liés au réseau d'accès et à l'encodage.

3.2 Analyse de variation de la QoE en fonction de paramètres liés à l'encodage

3.2.1 Débit, Codec H.264 et VP9, Définition 640 x 480

La figure 3.1 présente la variation de la qualité perçue en fonction du débit du flux vidéo pour toutes les vidéos en définition 640 x 480, encodées en H.264 et la figure 3.2 cette variation pour les mêmes vidéos encodées en VP9. La figure 3.3 compare la variation moyenne de la qualité perçue de toutes les vidéos en définition 640 x 480, encodées en H.264 à celle de toutes les vidéos encodées en VP9.

La qualité perçue s'améliore lorsque le débit du flux vidéo utilisé pour l'encodage augmente pour toutes les vidéos en définition 640 x 480. La variation moyenne de la qualité perçue est relativement mauvaise pour un débit inférieur à 0.75 Mb/s pour le codec H.264 et 0.25 Mb/s

pour le codec VP9. Elle est relativement bonne pour un débit supérieur à 0.75 Mb/s pour le codec H.264 et pour un débit compris entre 0.25 et 0.75 Mb/s pour le codec VP9. Elle est excellente pour un débit supérieur à 0.75 Mb/s pour le codec VP9.

Nous constatons qu'une même vidéo présente une allure similaire lorsqu'il est encodé dans les deux codecs H.264 et VP9 en 640 x 480. La courbe du codec VP9 peut être estimée par une translation verticale de celle du codec H.264. Cette translation peut être contrôlée par le paramètre v3. Pour un débit supérieur à 1 Mb/s, les courbes VP9 et H.264 sont quasi parallèles; l'écart entre les deux courbes en terme qualité perçue est environ de 1.

Nous constatons que le codec VP9 est meilleur que le codec H.264 en ce qui concerne la variation de la qualité perçue pour un même débit du flux vidéo utilisé pour l'encodage de toutes les vidéos en définition 640 x 480. Les courbes des vidéos encodées en VP9 sont plus rapprochées de celle de la variation moyenne que celles des vidéos encodées en H.264.

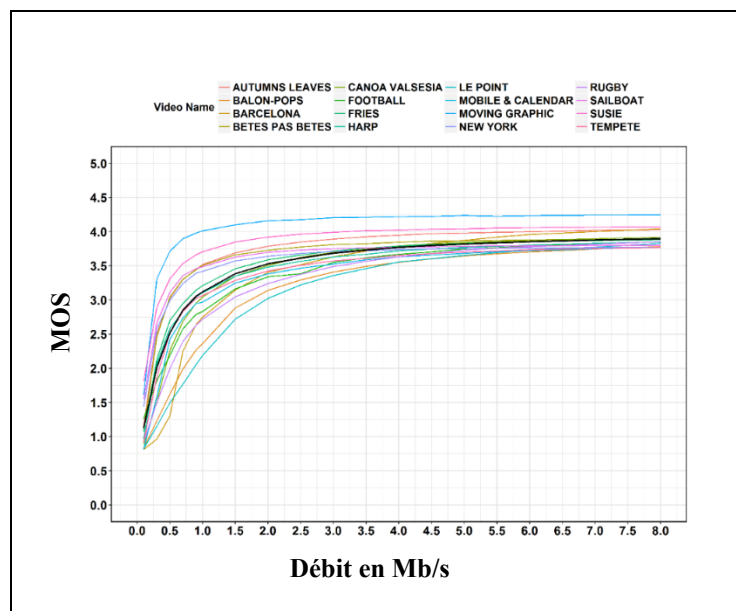


Figure 3.1 Variation de la QoE (en MOS) en fonction du débit d'encodage pour tous les clips vidéo encodés en H.264 et en définition 640 x 480

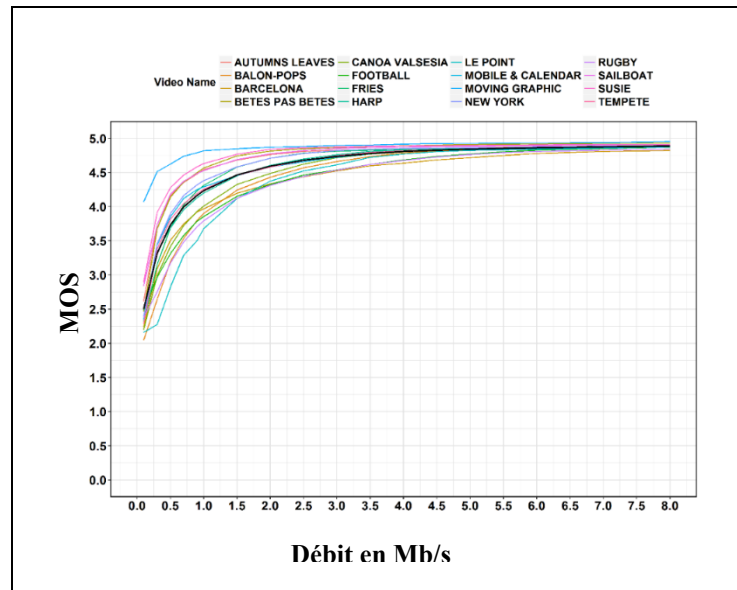


Figure 3.2 Variation de la QoE (en MOS) en fonction du débit d'encodage pour tous les clips vidéo encodés en VP9 et en définition 640 x 480

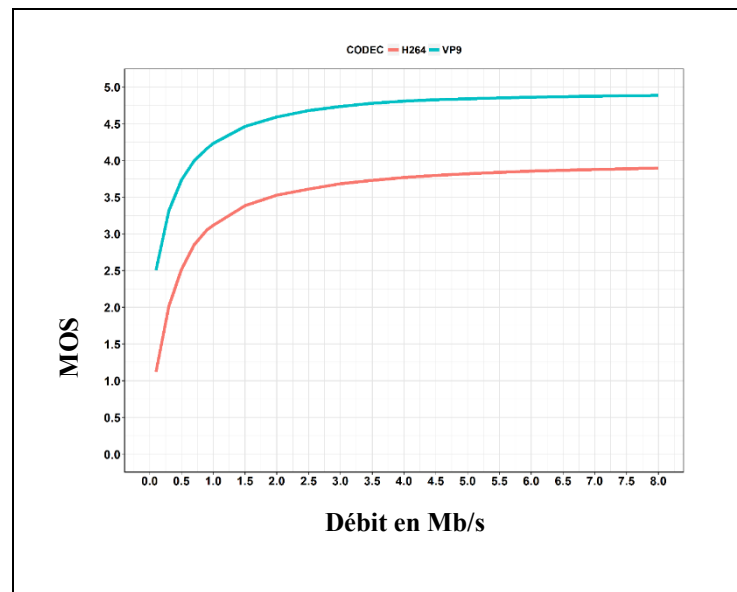


Figure 3.3 Variation moyenne de la QoE (en MOS) en fonction du débit d'encodage pour tous les clips vidéo encodés en H.264 et VP9 et en définition 640 x 480

3.2.2 Débit, Codec H.264 et VP9, Définition 720 x 480

La figure 3.4 présente la variation de la qualité perçue en fonction du débit du flux vidéo pour toutes les vidéos en définition 720 x 480, encodées en H.264 et la figure 3.5 cette variation pour les mêmes vidéos encodées en VP9. La figure 3.6 compare la variation moyenne de la qualité perçue de toutes les vidéos en définition 720 x 480, encodées en H.264 à celle de toutes les vidéos encodées en VP9.

La qualité perçue s'améliore lorsque le débit du flux vidéo utilisé pour l'encodage augmente pour toutes les vidéos en définition 720 x 480. La variation moyenne de la qualité perçue est relativement mauvaise pour un débit inférieur à 1 Mb/s pour le codec H.264 et 0.25 Mb/s pour le codec VP9. Elle est relativement bonne pour un débit supérieur à 1 Mb/s pour le codec H.264 et pour un débit compris entre 0.25 Mb/s et 0.75 Mb/s pour le codec VP9. Elle est excellente pour un débit supérieur à 0.75 Mb/s pour le codec VP9.

Nous constatons qu'une même vidéo présente une allure similaire lorsqu'il est encodé dans les deux codecs H.264 et VP9 en 720 x 480. La courbe du codec VP9 peut être estimée par une translation verticale de celle du codec H.264. Cette translation peut être contrôlée par le paramètre $v3$. Pour un débit supérieur à 0.75 Mb/s, les courbes VP9 et H.264 sont quasi parallèles; l'écart entre les deux courbes en terme qualité perçue est environ de 1.

Nous constatons que le codec VP9 est meilleur que le codec H.264 en ce qui concerne la variation de la qualité perçue pour un même débit du flux vidéo utilisé pour l'encodage de toutes les vidéos en définition 720 x 480. Les courbes des vidéos encodées en VP9 sont plus rapprochées de celle de la variation moyenne que celles des vidéos encodées en H.264.

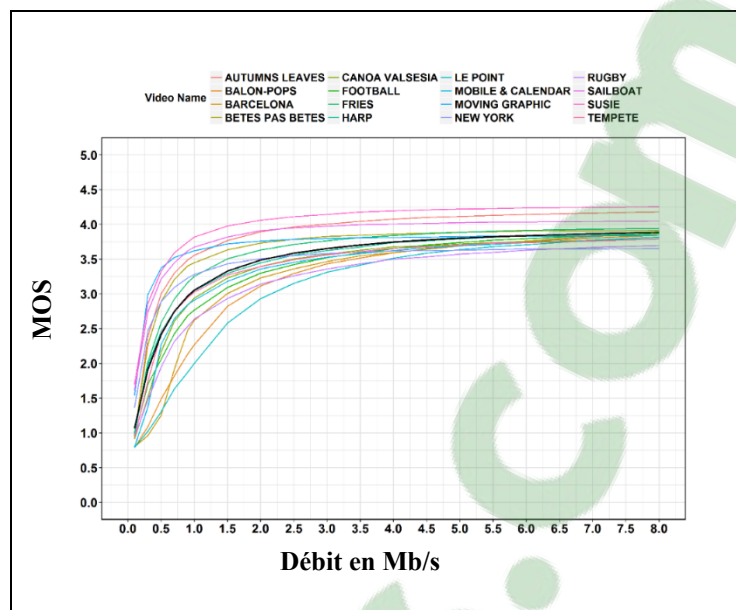


Figure 3.4 Variation de la QoE (en MOS) en fonction du débit d'encodage pour tous les clips vidéo encodés en H.264 et en définition 720 x 480

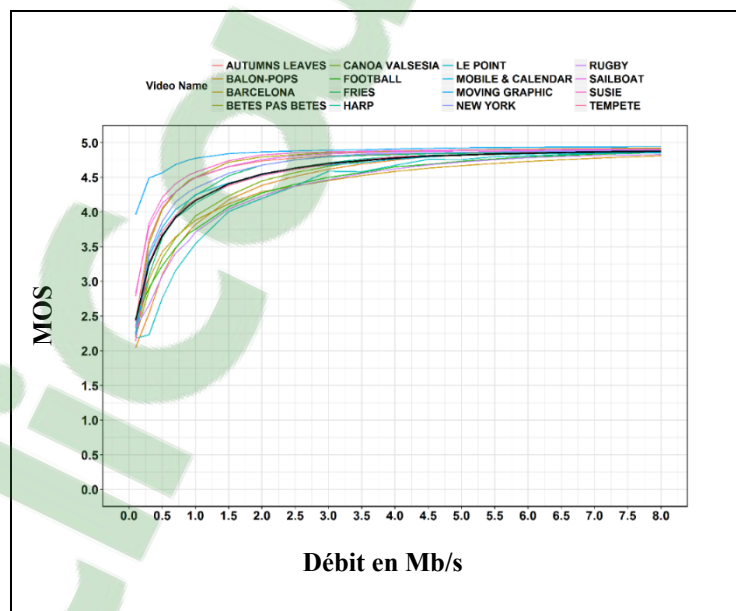


Figure 3.5 Variation de la QoE (en MOS) en fonction du débit d'encodage pour tous les clips vidéo encodés en VP9 et en définition 720 x 480

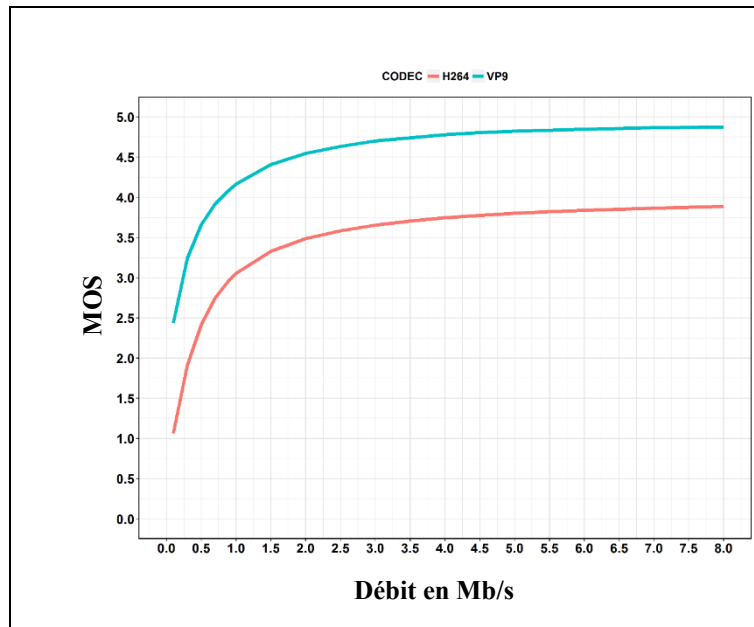


Figure 3.6 Variation moyenne de la QoE (en MOS) en fonction du débit d'encodage pour tous les clips vidéo encodés en H.264 et VP9 et en définition 720 x 480

3.2.3 Débit, Codec H.264 et VP9, Définition 1280 x 780

La figure 3.7 présente la variation de la qualité perçue en fonction du débit du flux vidéo pour toutes les vidéos en définition 1280 x 720, encodées en H.264 et la figure 3.8 cette variation pour les mêmes vidéos encodées en VP9. La figure 3.9 compare la variation moyenne de la qualité perçue de toutes les vidéos en définition 1280 x 720, encodées en H.264 à celle de toutes les vidéos encodées en VP9.

La qualité perçue s'améliore lorsque le débit du flux vidéo utilisé pour l'encodage augmente pour toutes les vidéos en définition 1280 x 720. La variation moyenne de la qualité perçue est relativement mauvaise pour un débit inférieur à 2 Mb/s pour le codec H.264 et 0.5 Mb/s pour le codec VP9. Elle est relativement bonne pour un débit supérieur à 2 Mb/s pour le codec H.264 et pour un débit compris entre 0.5 Mb/s et 1.75 Mb/s pour le codec VP9. Elle est excellente pour un débit supérieur à 1.75 Mb/s pour le codec VP9.

Nous constatons qu'une même vidéo présente une allure presque similaire lorsqu'il est encodé dans les deux codecs H.264 et VP9 en 1280 x 720. La courbe du codec VP9 peut être estimée par une translation verticale de celle du codec H.264. Cette translation peut être contrôlée par le paramètre v3. Pour un débit supérieur à 1.75 Mb/s, les courbes VP9 et H.264 sont quasi parallèles; l'écart entre les deux courbes en terme qualité perçue est environ de 1.

Nous constatons que le codec VP9 est meilleur que le codec H.264 en ce qui concerne la variation de la qualité perçue pour un même débit du flux vidéo utilisé pour l'encodage de toutes les vidéos en définition 1280 x 720. Les courbes des vidéos encodées en VP9 sont plus rapprochées de celle de la variation moyenne que celles des vidéos encodées en H.264.

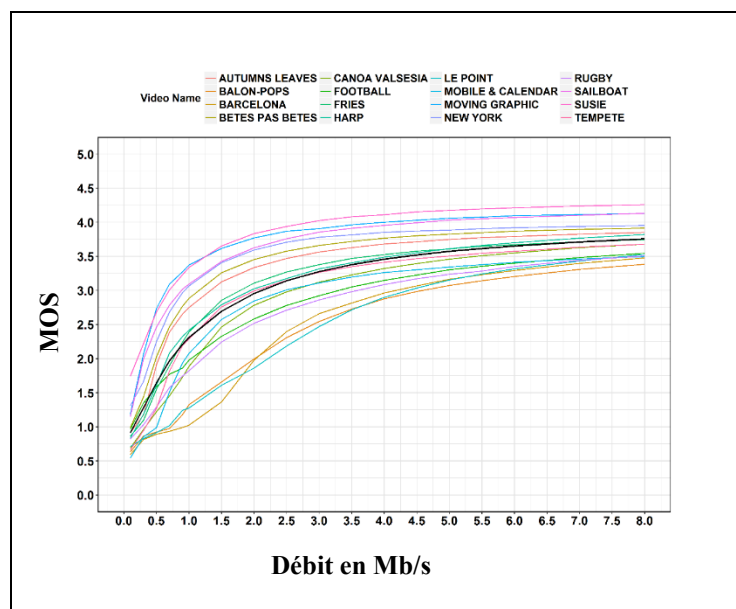


Figure 3.7 Variation de la QoE (en MOS) en fonction du débit d'encodage pour tous les clips vidéo encodés en H.264 et en définition 1280 x 780

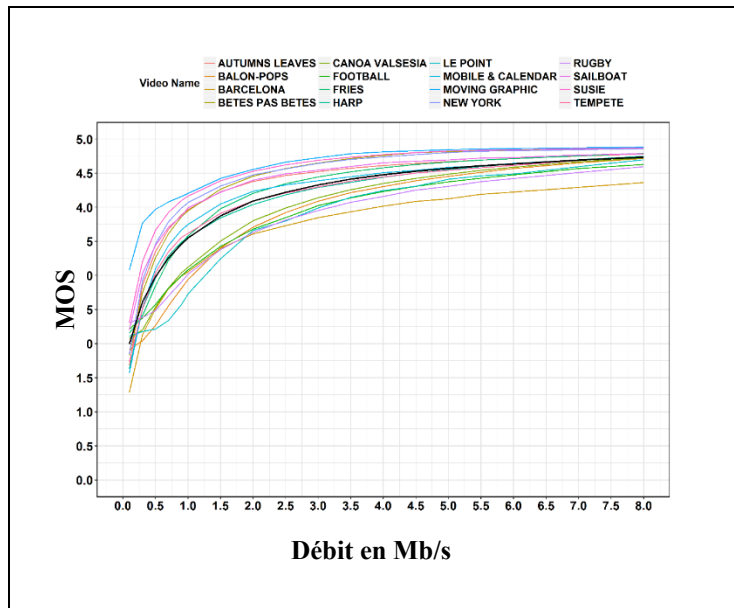


Figure 3.8 Variation de la QoE (en MOS) en fonction du débit d'encodage pour tous les clips vidéo encodés en VP9 et en définition 1280 x 780

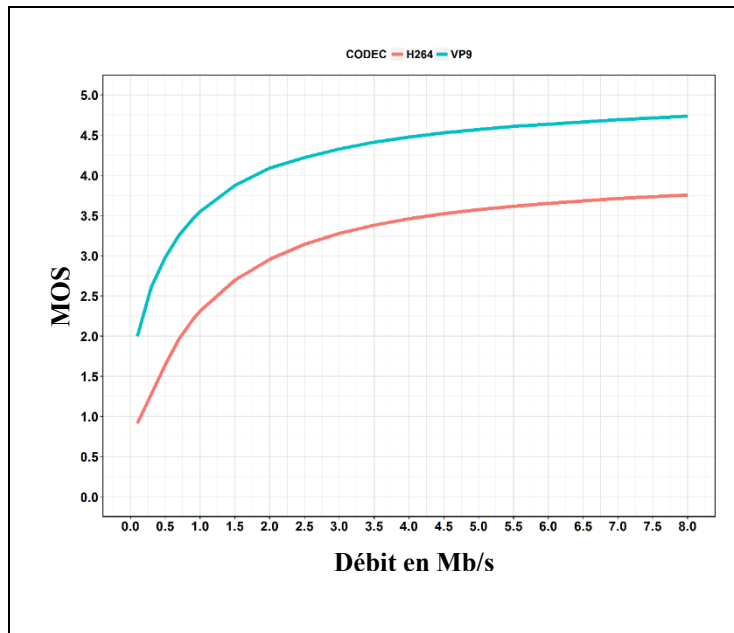


Figure 3.9 Variation moyenne de la QoE (en MOS) en fonction du débit d'encodage pour tous les clips vidéo encodés en H.264 et VP9 et en définition 1280 x 720

3.3 Analyse de variation de la QoE en fonction de paramètres liés à l'encodage

3.3.1 Débit, Codec H.264 et VP9, Définition 640 x 480

Les figures 3.10 et 3.11 nous permettent d'apprécier l'impact de la vitesse de mouvement du contenu vidéo sur la qualité perçue en fonction du débit du flux vidéo pour les vidéos en définitions 640 x 480 et encodées en H.264 et VP9. Nous observons que la qualité perçue pour un même débit du flux vidéo s'améliore généralement lorsque la vitesse du contenu vidéo diminue et se dégrade lorsqu'elle augmente.

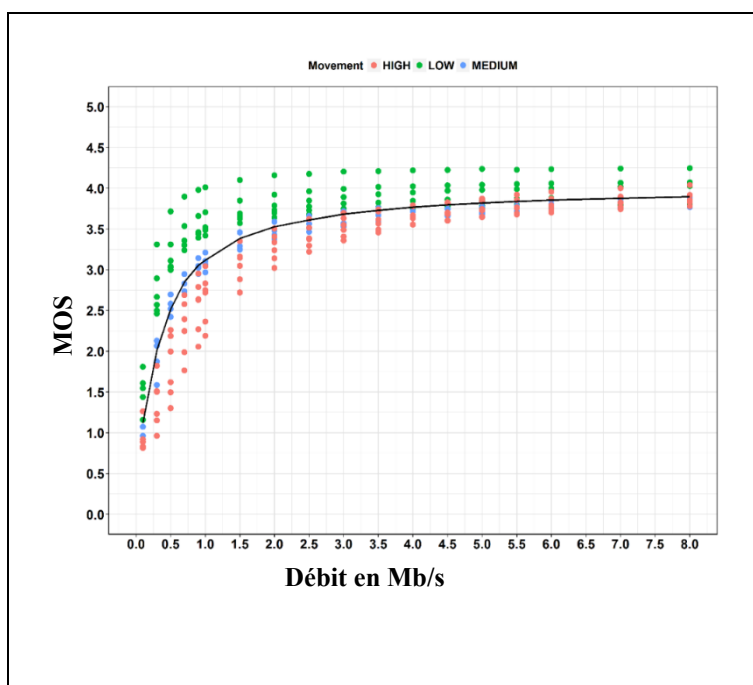


Figure 3.10 Variation de la QoE (MOS) en fonction du débit d'encodage pour tous les clips vidéo encodés en H.264, en définition 640 x 480 et classés par vitesse de mouvement lente, moyenne et élevée

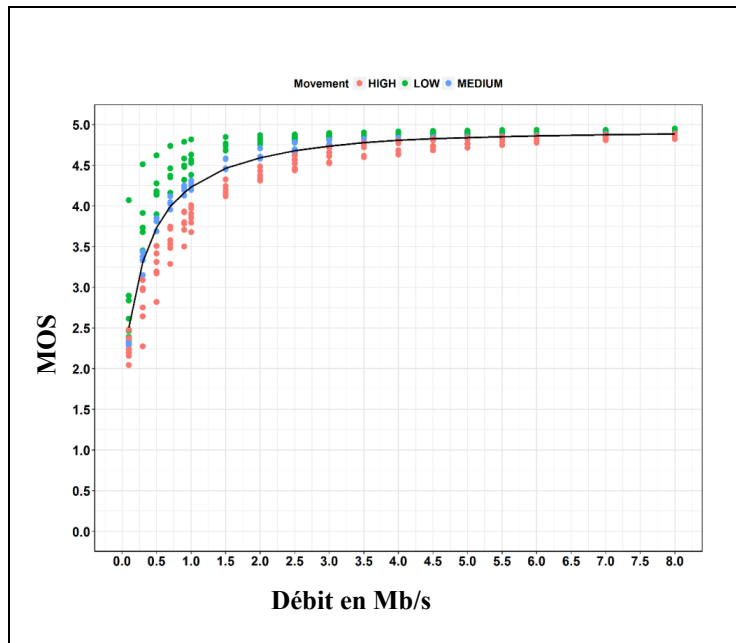


Figure 3.11 Variation de la QoE (MOS) en fonction du débit d'encodage pour tous les clips vidéo encodés en VP9, en définition 640 x 480 et classés par vitesse de mouvement lente, moyenne et élevée

3.3.2 Débit, Codec H.264 et VP9, Définition 720 x 480

Les figures 3.12 et 3.13 nous permettent d'apprécier l'impact de la vitesse de mouvement du contenu vidéo sur la qualité perçue en fonction du débit du flux vidéo pour les vidéos en définitions 720 x 480 et encodées en H.264 et VP9. Nous observons que la qualité perçue pour un même débit du flux vidéo s'améliore généralement lorsque la vitesse du contenu vidéo diminue et se dégrade lorsqu'elle augmente.

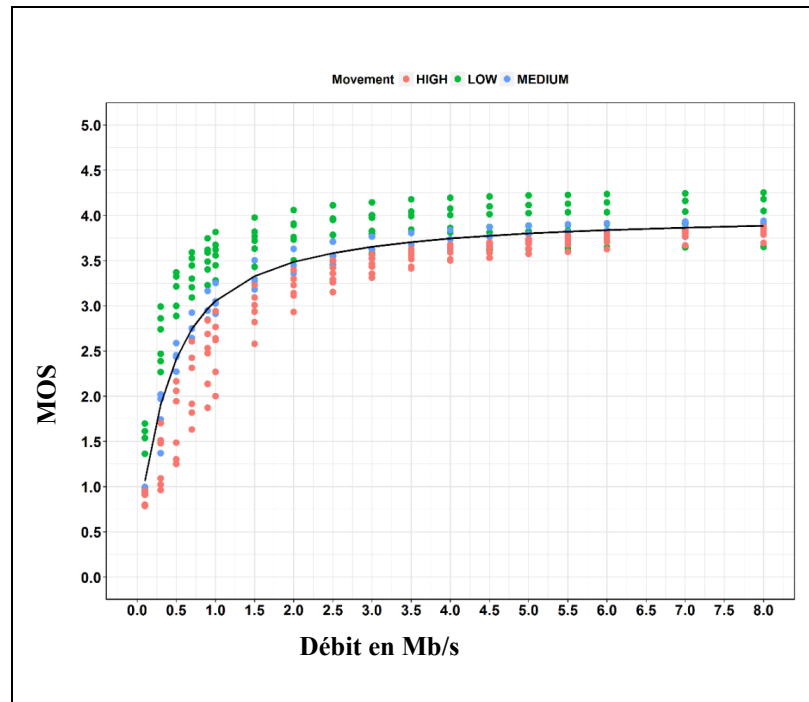


Figure 3.12 Variation de la QoE (en MOS) en fonction du débit d'encodage pour tous les clips vidéo encodés en H.264, en définition 720 x 480 et classés par vitesse de mouvement lente, moyenne et élevée

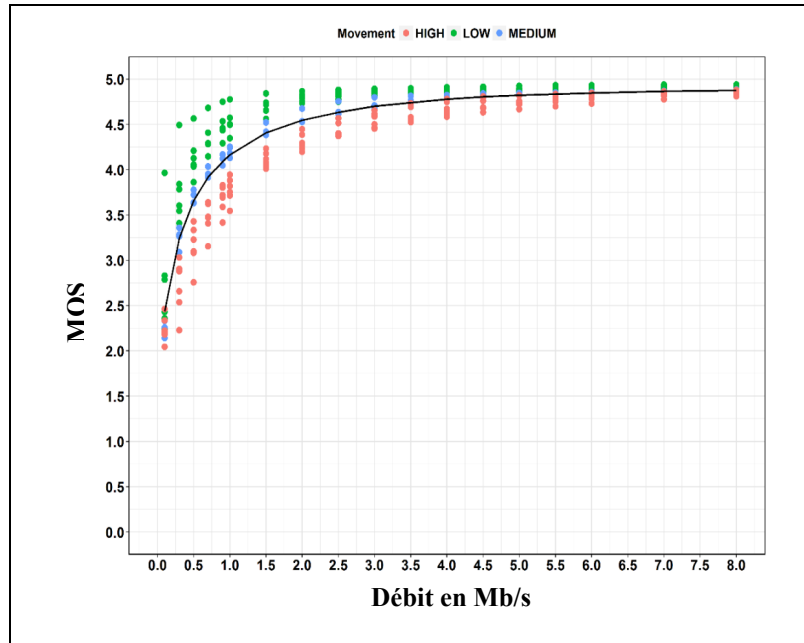


Figure 3.13 Variation de la QoE (en MOS) en fonction du débit d'encodage pour tous les clips vidéo encodés en VP9, en définition 720 x 480 et classés par vitesse de mouvement lente, moyenne et élevée

3.3.3 Débit, Codec H.264 et VP9, Définition 1280 x 720

Les figures 3.14 et 3.15 nous permettent d'apprécier l'impact de la vitesse de mouvement du contenu vidéo sur la qualité perçue en fonction du débit du flux vidéo pour les vidéos en définitions 1280 x 720 et encodées en H.264 et VP9. Nous observons que la qualité perçue pour un même débit du flux vidéo s'améliore généralement lorsque la vitesse du contenu vidéo diminue et se dégrade lorsqu'elle augmente.

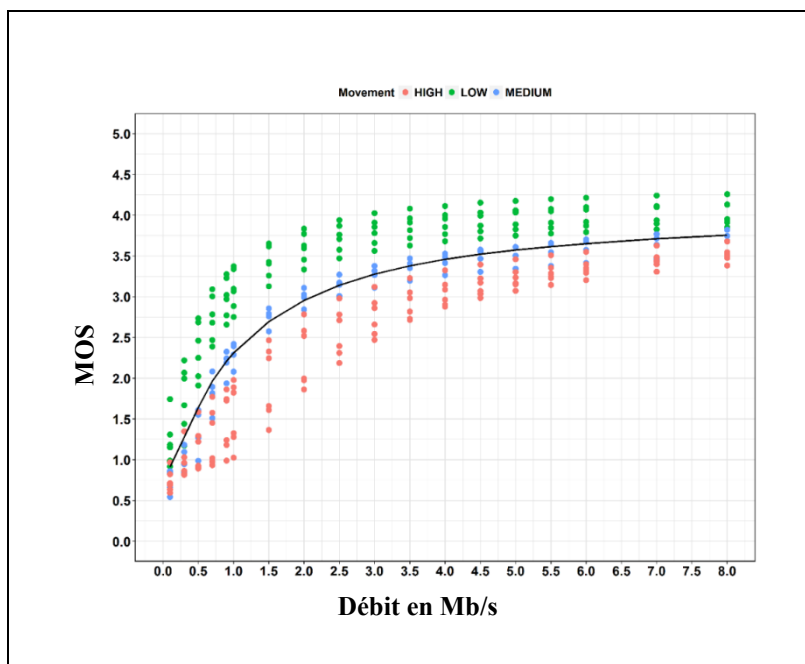


Figure 3.14 Variation de la QoE (en MOS) en fonction du débit d'encodage pour tous les clips vidéo encodés en H.264, en définition 1280 x 720 et classés par vitesse de mouvement lente, moyenne et élevée

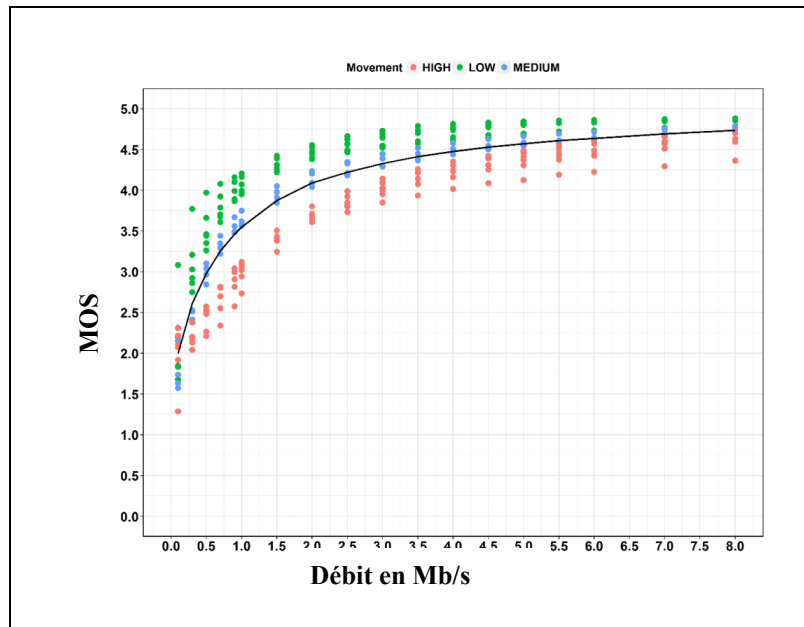


Figure 3.15 Variation de la QoE (en MOS) en fonction du débit d'encodage pour tous les clips vidéo encodés en VP9, en définition 1280 x 720 et classés par vitesse de mouvement lente, moyenne et élevée

3.4 Analyse de la variation moyenne de la QoE

3.4.1 Débit, Définition 640 x 480, 720 x 480 et 1280 x 720

La figure 3.16 nous permet d'apprécier l'impact de la définition sur la qualité perçue pour un même débit du flux vidéo pour chaque groupe de vidéo à vitesse de contenu lente, moyenne et élevée, encodée en a) H.264 et 640 x 480, b) H.264 et 720 x 480, c) H.264 et 1280 x 720, d) VP9 et 640 x 480, e) VP9 et 720 x 480, f) VP9 et 1280 x 720

La qualité perçue pour un même débit du flux vidéo s'améliore lorsque la définition décroît et se dégrade lorsque la définition accroît.

L'allure des courbes de la qualité perçue en fonction du débit pour les mêmes vidéos utilisées est similaire pour les trois différentes définitions. La qualité perçue pour une vidéo encodée en une définition R2 peut être estimée en fonction de la qualité perçue pour la même vidéo encodée en une définition R1 en introduisant dans le modèle d'estimation un facteur qui contrôle le changement d'échelle. Ce facteur modifie $v4$.

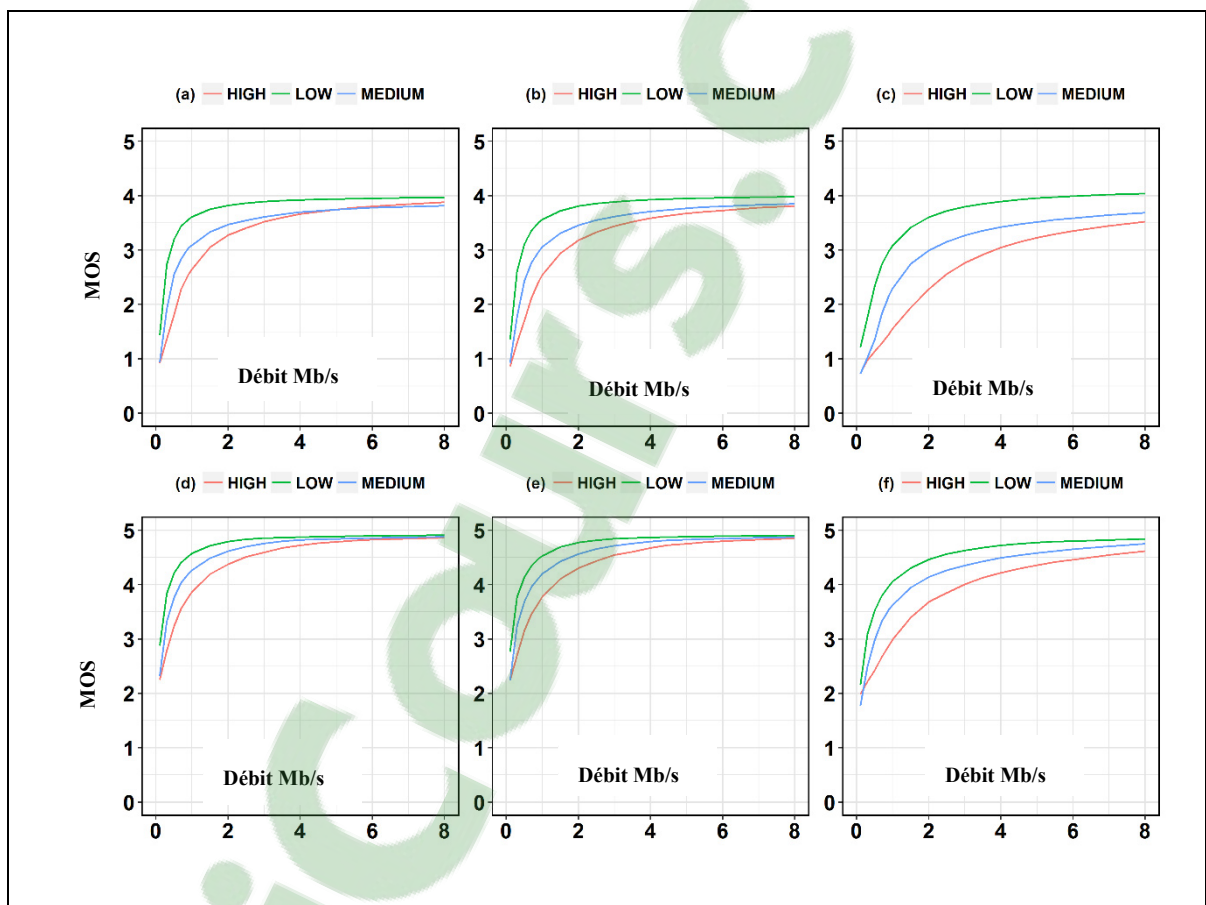


Figure 3.16 Variation moyenne de la QoE (en MOS) en fonction du débit d'encodage pour chaque groupe de vidéo à vitesse de contenu lente, moyenne et élevée, encodée en
a) H.264 et 640 x 480, b) H.264 et 720 x 480, c) H.264 et 1280 x 720,
d) VP9 et 640 x 480, e) VP9 et 720 x 480, f) VP9 et 1280 x 720

3.4.2 Débit, Codec H.264 et VP9

La figure 3.17 présente la variation moyenne de la qualité perçue en fonction du débit, pour toutes vidéos utilisées, encodées en VP9 et H.264.

Nous constatons que le codec VP9 est meilleur que celui du codec H.264 en ce qui concerne la variation de qualité perçue pour un même débit du flux vidéo utilisé.

La courbe du codec VP9 peut être estimée par une translation verticale de celle du codec H.264. Cette translation peut être contrôlée en introduisant dans le modèle d'estimation un facteur qui modifie v3.

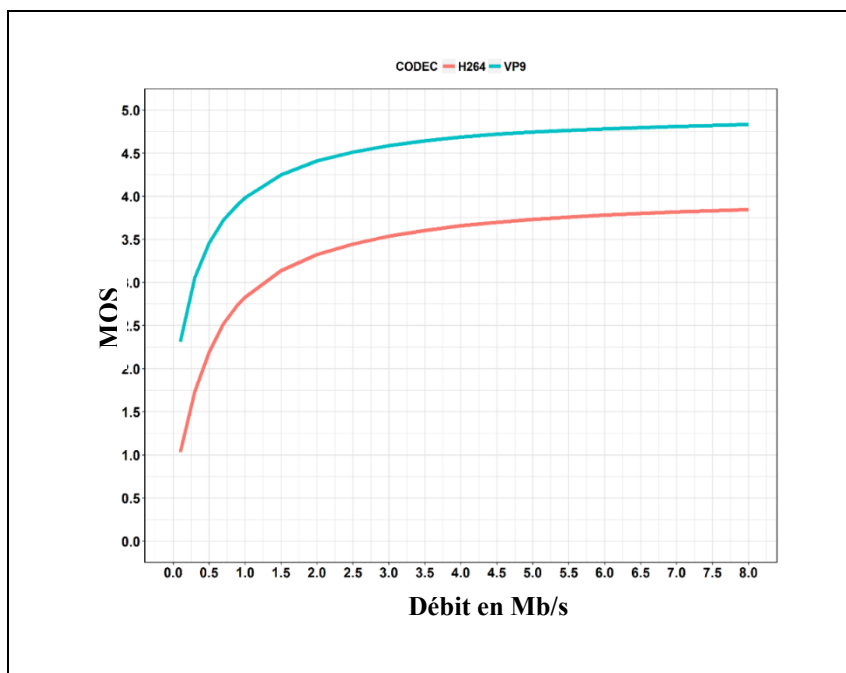


Figure 3.17 Variation moyenne de la QoE (en MOS) en fonction du débit d'encodage pour tous les clips vidéo encodés par codec H.264 et VP9 et indépendamment de la définition

3.5 Détermination des paramètres du modèle sans référence proposé lié à l'encodage et la vitesse du contenu vidéo

3.5.1 Paramètres v3, v4, v5

Le tableau 3.1 présente les valeurs optimales des paramètres v3, v4 et v5 du modèle d'estimation de la QoE (équation (2.3)) pour chaque groupe de vidéos à vitesse de contenu lente, moyenne et élevée, en définitions 640 x 480, 720 x 480 et 1280 x 720 et encodées en H.264 et VP9 (figure 3.16).

$$Vq = 1 + v3 \left(1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{b}{v4} \right)^{v5}} \right) \quad (2.3)$$

Tirée de Joskowicz et Ardao (2009)

Tableau 3.1 Valeurs optimales des paramètres v3, v4 et v5 du modèle d'estimation pour les groupes de clips vidéo à vitesse de contenu lente, moyenne et élevée, en définitions 640 x 480, 720 x 480 et 1280 x 720, encodés en H.264 et VP9

DEFINITION	VITESSE DU CONTENU	v3	v4	v5	R ²	v3	v4	v5	R ²
		H264				VP9			
640x480	LENTE	2,956	0,264	1,641	0,997	3,995	0,115	0,979	0,999
	MOYENNE	2,785	0,481	1,629	0,991	4,041	0,217	0,950	0,999
	ELEVEE	2,893	0,862	1,651	0,997	4,393	0,431	0,745	0,994
720x480	LENTE	2,969	0,292	1,629	0,996	3,997	0,128	0,985	0,999
	MOYENNE	2,820	0,536	1,644	0,993	4,043	0,239	0,942	1,000
	ELEVEE	2,827	0,934	1,705	0,997	4,496	0,510	0,705	0,994
1280x720	LENTE	3,091	0,609	1,451	0,999	4,064	0,284	0,889	1,000
	MOYENNE	2,641	1,085	2,005	0,992	4,040	0,512	0,911	1,000
	ELEVEE	2,688	2,116	1,883	0,996	5,649	2,628	0,580	0,989

La valeur minimale du paramètre de détermination R^2 pour chaque groupe de vidéos à vitesse de contenu lente, moyenne et élevée, en définitions 640 x 480, 720 x 480 et 1280 x 720 et encodées en H.264 et VP9 est de 0,98. L'estimation de notre modèle est donc très précise avec ces valeurs de v_3 , v_4 et v_5 .

3.5.2 Paramètre « a » relatif à la définition

L'intégration du paramètre a au modèle d'estimation G.1070 de référence (équation (2.3)) rend notre modèle adaptatif au changement des définitions sélectionnées dans notre étude. Notre modèle est présenté par l'équation (2.5). Le paramètre a est une fonction de v_4 sur la base de l'équation (2.3) et (2.5). Ce paramètre contrôle le changement d'échelle du modèle.

Nous avons calculé les valeurs moyennes de v_3 et v_5 pour toutes les définitions et par vitesse du contenu lente, moyenne et élevée pour les vidéos encodées en H.264 en nous basant sur les résultats du tableau 3.1. Ces valeurs de v_3 et v_5 sont constantes par vitesse de contenu en dépit des changements de définition. Nous avons ensuite calculé au moyen de la méthode des moindres carrés les valeurs optimales de v_4 en fonction de ces valeurs moyennes de v_3 et v_5 pour chaque groupe de vidéos à vitesse du contenu lente, moyenne et élevée, encodées en H.264 et en les définitions 640 x 480, 720 x 480, 1280 x 720.

Le tableau 3.2 présente les valeurs moyennes des paramètres v_3 , v_5 et valeurs optimales de v_4 du modèle d'estimation pour les groupes de clips vidéo à vitesse de contenu lente, moyenne et élevée, en définitions 640 x 480, 720 x 480 et 1280 x 720 encodés en H.264.

$$Vq = 1 + v_3 \left(1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{b}{a * v_4} \right)^{v_5}} \right) \quad (2.5)$$

Adaptée de Joskowicz et Ardao (2009)

Tableau 3.2 Valeurs moyennes des paramètres v_3 , v_5 et valeur optimale de v_4 du modèle d'estimation pour les groupes de clips vidéo à vitesse de contenu lente, moyenne et élevée, en définitions 640 x 480, 720 x 480 et 1280 x 720, encodés en H.264

DEFINITION	VITESSE DU CONTENU	v_3	v_4	v_5
		H264		
640x480	LENTE	3,005	0,272	1,574
	MOYENNE	2,749	0,427	1,759
	ELEVEE	2,802	0,744	1,746
720x480	LENTE	3,005	0,300	1,574
	MOYENNE	2,749	0,462	1,759
	ELEVEE	2,802	0,839	1,746
1280x720	LENTE	3,005	0,581	1,574
	MOYENNE	2,749	1,027	1,759
	ELEVEE	2,802	2,037	1,746

Nous avons défini la valeur de a à un pour toutes les vidéos en définition 640 x 480. Nous avons calculé a pour chaque groupe de vidéos à vitesse du contenu lente, moyenne et élevée, encodées en H.264 et en les définitions 720 x 480 et 1280 x 720 au moyen de l'équation (2.6). Les valeurs de a sont présentées dans le tableau 3.3.

$$a_{new\,resolution} = \frac{v4_{new\,resolution}}{v4_{reference\,resolution}} \quad (2.6)$$

La valeur de a pour les vidéos en définitions 720 x 480 en une vitesse de contenu particulière est la valeur de v_4 pour ces mêmes vidéos divisée par la valeur de v_4 pour ces mêmes vidéos en la même vitesse de contenu et en définition 640 x 480.

La valeur de a pour les vidéos en définitions 1280 x 720 en une vitesse de contenu particulière est la valeur de v_4 pour ces mêmes vidéos divisée par la valeur de v_4 pour ces mêmes vidéos en la même vitesse de contenu et en définition 640 x 480.

Tableau 3.3 Valeur du paramètre a relatif à la définition pour les groupes de clips vidéo à vitesse de contenu lente, moyenne et élevée, en définitions 640 x 480, 720 x 480 et 1280 x 720, encodés en H.264

DEFINITION	VITESSE DU CONTENU	a
		H.264
640x480	LENTE	1,000
	MOYENNE	1,000
	ELEVEE	1,000
720x480	LENTE	1,101
	MOYENNE	1,081
	ELEVEE	1,127
1280x720	LENTE	2,136
	MOYENNE	2,404
	ELEVEE	2,738

3.5.3 Paramètre « k » relatif au codec

L'intégration du paramètre « k » dans l'équation (2.5) rend notre modèle (équation (2.2)) adaptatif au changement des codecs et définitions sélectionnés.

$$Vq = 1 + v3 * k(1 - \frac{1}{1 + (\frac{b}{a * v4})^{v5}}) \quad (2.2)$$

Adaptée de Joskowicz et Ardao (2009)

Joskowicz et Ardao (2009) ont défini la valeur de k pour une vidéo encodée en une définition particulière, à débit d'encodage donné et en codec de référence à un. Ils ont calculé la valeur de k pour la même vidéo encodée en la même définition, à même débit d'encodage et en un codec nouveau en fonction de l'équation (2.7).

$$k = \frac{MOS(VP9) - 1}{MOS(H.264) - 1} \quad (2.7)$$

Adaptée de Joskowicz et Ardao (2009)

Nous avons utilisé une approche nouvelle et simple pour le calcul de k en nous basant sur des observations similaires à celle de Joskowicz et Ardao (2009). De l'équation (2.2) adaptée de Joskowicz et Ardao (2009), nous avons trouvé que le paramètre k modifie $v3$. Ce paramètre contrôle la translation verticale du modèle d'estimation.

Nous avons conservé les valeurs $v4$ et $v5$ obtenues pour le codec H.264. Nous avons ensuite calculé $v3$ pour les vidéos en VP9 en fonction de ces valeurs $v4$ et $v5$ au moyen de la méthode des moindres carrés pour chaque groupe de vidéos à vitesse du contenu lente, moyenne et élevée, et en les définitions 640 x 480, 720 x 480 et 1280 x 720. Ces résultats sont présentés dans le tableau 3.4.

Nous avons défini la valeur de k à un pour toutes les vidéos encodées en H.264. Nous avons calculé la valeur de k pour chaque groupe de vidéos à vitesse du contenu lente, moyenne et élevée, encodées en VP9 et en les définitions 640 x 480, 720 x 480 et 1280 x 720 au moyen de l'équation (2.8).

$$k_{vp9} = \frac{v3_{vp9}}{v3_{h264}} \quad (2.8)$$

La valeur de k pour une vidéo à une vitesse de contenu particulière, une définition donnée et encodée en VP9 est la valeur de $v3$ pour ces mêmes vidéos divisée par la valeur de $v3$ pour la même vidéo en la même vitesse de contenu et même définition encodée en H.264. Les valeurs de k sont présentées dans le tableau 3.5.

Nous observons que de la valeur de k pour chaque groupe de vidéo à vitesse de contenu lente, moyenne et élevée demeure quasi constante en dépit des changements de définition.

Tableau 3.4 Valeurs optimales du paramètres $v3$ pour les vidéos encodées en VP9 en fonction de valeurs $v4$ et $v5$ des vidéos encodées en H.264

DEFINITION	VITESSE DU CONTENU	v3	v4	v5	R ²	v3	v4	v5	R ²
		H264				VP9			
640x480	LENTE	3,005	0,272	1,574	0,996	4,020	0,272	1,574	0,997
	MOYENNE	2,749	0,427	1,759	0,991	3,970	0,427	1,759	0,989
	ELEVEE	2,802	0,744	1,746	0,996	4,061	0,744	1,746	0,994
720x480	LENTE	3,005	0,300	1,574	0,996	4,030	0,300	1,574	0,996
	MOYENNE	2,749	0,462	1,759	0,992	3,963	0,462	1,759	0,986
	ELEVEE	2,802	0,839	1,746	0,997	4,076	0,839	1,746	0,994
1280x720	LENTE	3,005	0,581	1,574	0,998	4,038	0,581	1,574	0,987
	MOYENNE	2,749	1,027	1,759	0,997	4,023	1,027	1,759	0,964
	ELEVEE	2,802	2,037	1,746	0,998	4,339	2,037	1,746	0,984

Tableau 3.5 Valeurs du paramètre k relatif au codec pour les groupes de clips vidéo à vitesse de contenu lente, moyenne et élevée, en définitions 640 x 480, 720 x 480 et 1280 x 720, encodés en H.264 et VP9

DEFINITION	VITESSE DU CONTENU	k	
		H264	VP9
640x480	LENTE	1	1,338
	MOYENNE	1	1,445
	ELEVEE	1	1,449
720x480	LENTE	1	1,341
	MOYENNE	1	1,442
	ELEVEE	1	1,455
1280x720	LENTE	1	1,344
	MOYENNE	1	1,464
	ELEVEE	1	1,548

3.5.4 Validation du modèle

Notre modèle d'estimation est défini par l'équation (2.2). Les valeurs de v_3 , v_4 et v_5 sont celles pour les vidéos encodées en H.264 et en définition 640 x 480. Ces valeurs sont présentées dans le tableau 3.2. Les valeurs de a , k et R^2 sont présentées dans les tableaux 3.3, 3.5 et 3.4.

$$Vq = 1 + v_3 * k \left(1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{b}{a * v_4} \right)^{v_5}} \right) \quad (2.2)$$

Adaptée de Joskowicz et Ardao (2009)

Les figures 3.18 et 3.19 présentent l'évaluation de la précision d'estimation du 1^{er} modèle proposé et celui de l'UIT G.1070 en fonction de l'impact des paramètres liés à l'encodage pour chaque groupe de vidéo encodé en H.264 et VP9, à vitesse de contenu a) lente et en VGA, b) moyenne et en VGA, c) élevée et en VGA, d) lente et en SD, e) moyenne et en SD, f) élevée et en SD, g) lente et en HD, h) moyenne et en HD, i) élevée et en HD.

PM désigne le premier modèle proposé.

La valeur minimale du coefficient de détermination R^2 pour le modèle proposé est 0.96 pour les groupes de vidéos à vitesse du contenu lente, moyenne et élevée, en définitions VGA, SD et HD et encodées en H.264 et VP9. Cela veut dire que notre modèle estime à 96 % la distribution des valeurs MOS en fonction du débit d'encodage. L'estimation de notre modèle est très précise et meilleure que celui de l'UIT G.1070 dans la plupart des scénarios. Cela se justifie par le fait que le proposé prend en compte la vitesse du contenu vidéo et celui de l'UIT G.1070 considère la variation moyenne de la QoE pour toutes vidéos caractérisées par différentes vitesse de contenu.

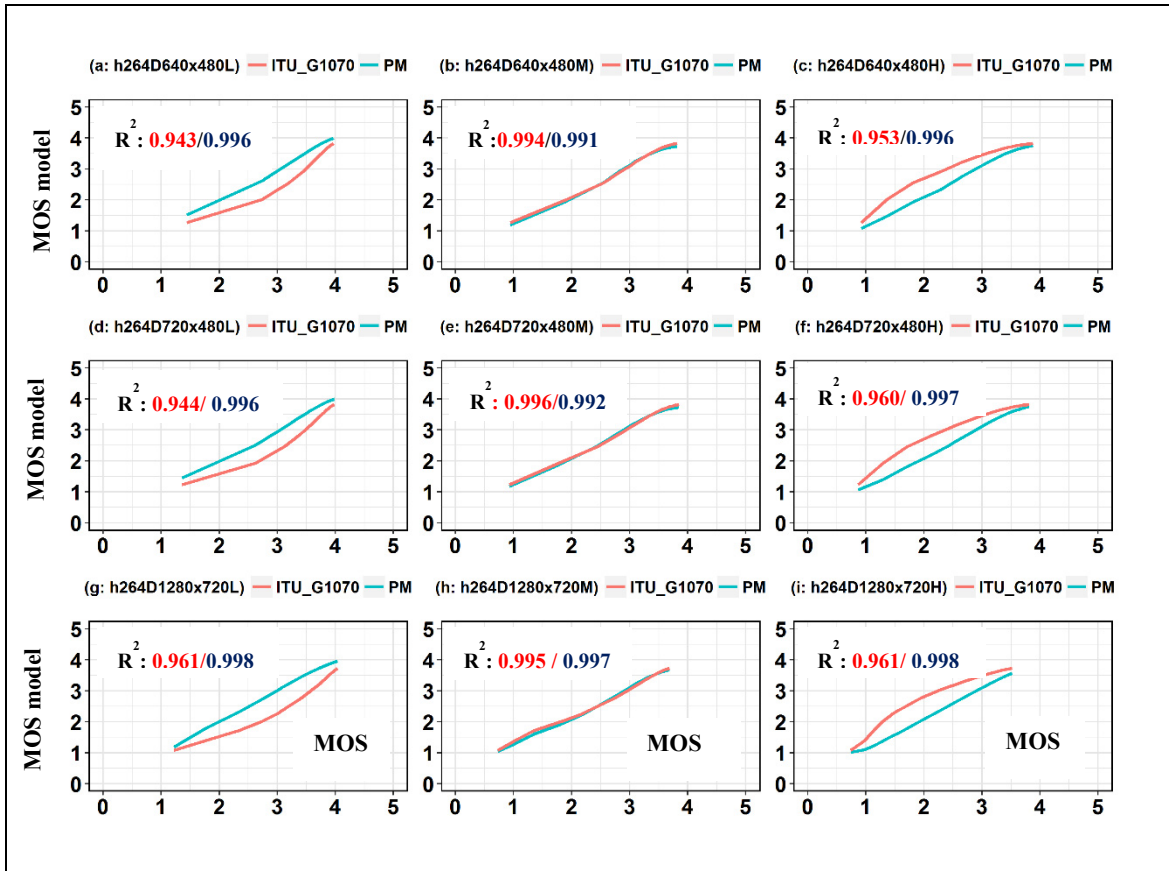


Figure 3.18 Évaluation de la précision d'estimation du 1^{er} modèle proposé et celui de l'UIT G.1070 en fonction de l'impact des paramètres liés à l'encodage pour chaque groupe de vidéo encodé en H.264, à vitesse de contenu a) lente et en VGA, b) moyenne et en VGA, c) élevée et en VGA, d) lente et en SD, e) moyenne et en SD, f) élevée et en SD, g) lente et en HD, h) moyenne et en HD, i) élevée et en HD

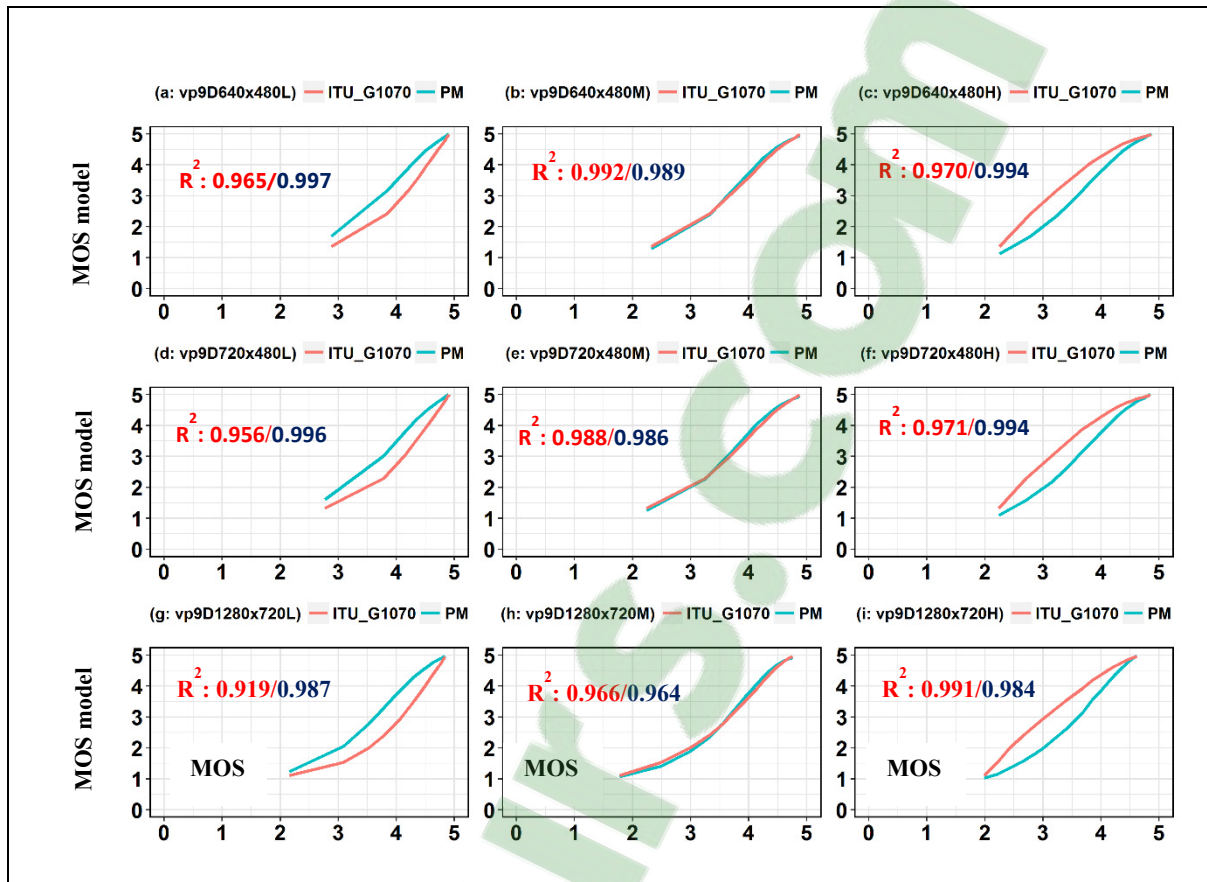


Figure 3.19 Évaluation de la précision d'estimation du 1^{er} modèle proposé et celui de l'UIT G.1070 en fonction de l'impact des paramètres liés à l'encodage pour chaque groupe de vidéo encodé en VP9, à vitesse de contenu a) lente et en VGA, b) moyenne et en VGA, c) élevée et en VGA, d) lente et en SD, e) moyenne et en SD, f) élevée et en SD, g) lente et en HD, h) moyenne et en HD, i) élevée et en HD

3.6 Analyse de variation de la QoE en fonction de l'impact unique du taux de pertes de paquets et de l'impact résultant du taux de pertes de paquets et du débit d'encodage

3.6.1 Clips vidéo encodés en H.264 à 1 Mb/s, en définition 640 x 480

La figure 3.20 présente la variation de la QoE en fonction de l'impact unique du taux de pertes de paquets et la figure 3.21 cette variation en fonction de l'impact résultant du taux de pertes

de paquets et du débit d'encodage sur des vidéos clips encodées en H.264 à 1 Mb/s, en définition 640 x 480.

Nous observons que la variation moyenne la qualité perçue se détériore quasi-exponentiellement lorsque le taux de pertes de paquets augmente. La qualité perçue optimale est limitée par l'impact de la dégradation liée au débit d'encodage et à la définition.

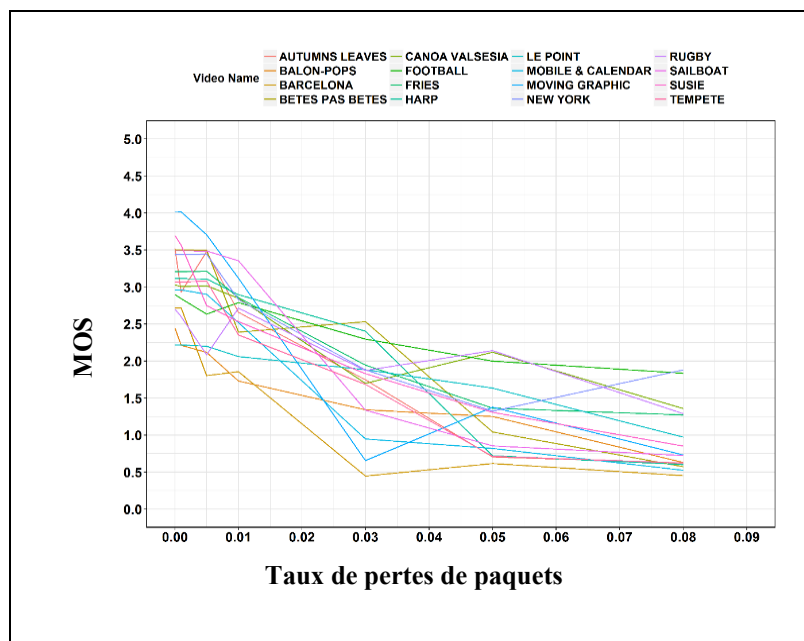


Figure 3.20 Variation de la qualité d'expérience (en MOS) en fonction de l'impact du taux de pertes de paquets et du débit d'encodage pour toutes les vidéos clips, en H.264 à 1 Mb/s, en définition 640x480

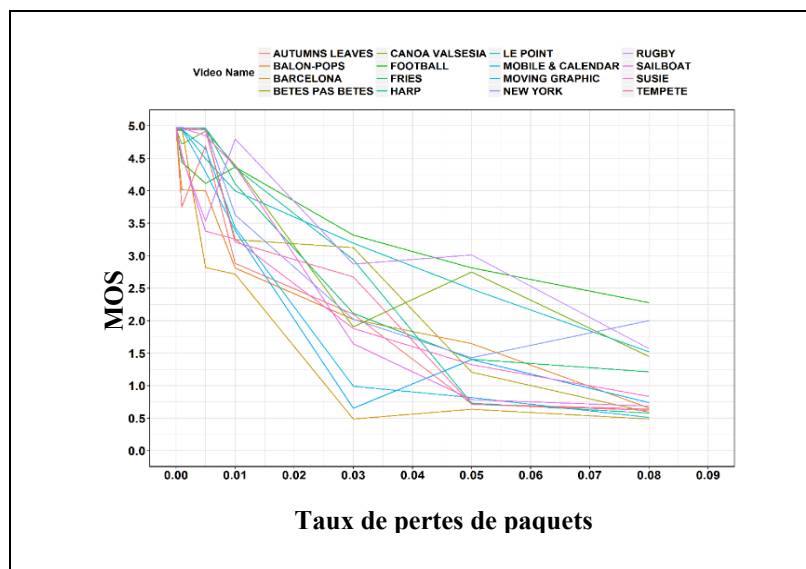


Figure 3.21 Variation de la qualité d'expérience (en MOS) en fonction du taux de pertes de paquets pour toutes les vidéos clips, encodées en H.264 à 1 Mb/s, en définition 640 x 480

3.6.2 Clips vidéo encodés en H.264 à 3 Mb/s, en définition 640 x 480

La figure 3.23 présente la variation de la QoE en fonction de l'impact unique du taux de pertes de paquets et la figure 3.22 cette variation en fonction de l'impact résultant du taux de pertes de paquets et du débit d'encodage sur des vidéos clips encodées en H.264 à 3 Mb/s, en définition 640 x 480.

Nous observons que la variation moyenne la qualité perçue se détériore quasi-exponentiellement lorsque le taux de pertes de paquets augmente. La qualité perçue optimale est limitée par l'impact de la dégradation liée au débit d'encodage et à la définition.

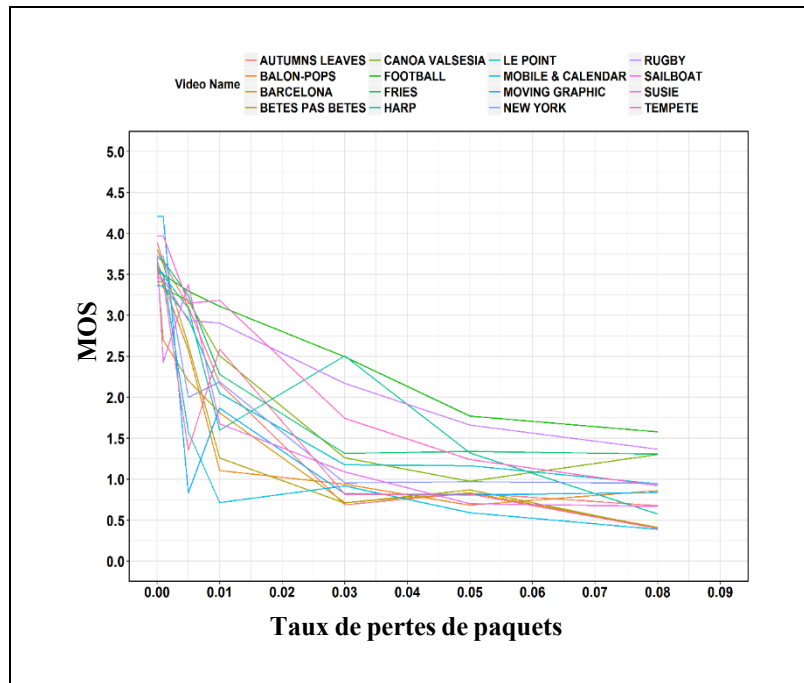


Figure 3.22 Variation de la qualité d'expérience (en MOS) en fonction de l'impact du taux de pertes de paquets et du débit d'encodage pour toutes les vidéos clips, en H.264 à 3 Mb/s, en définition 640x480

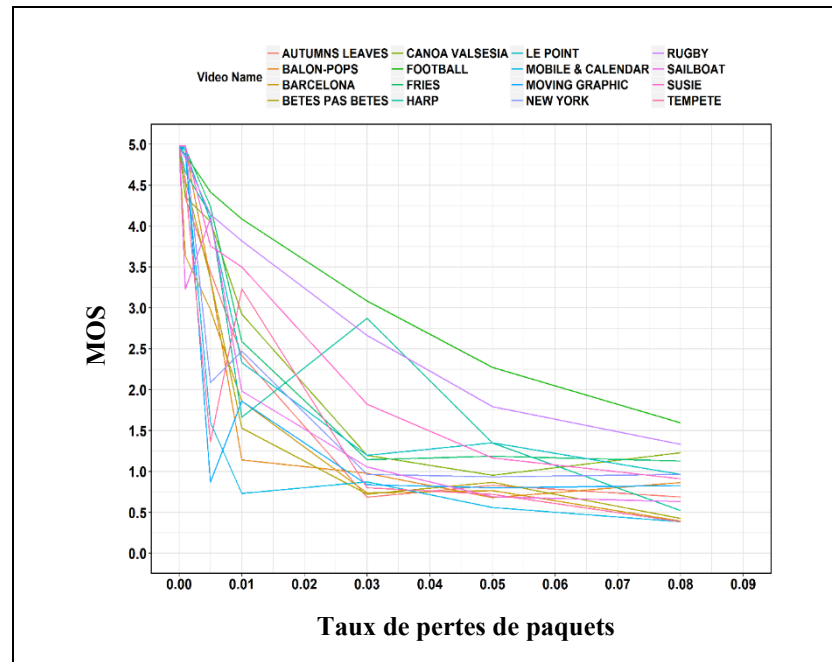


Figure 3.23 Variation de la qualité d'expérience (en MOS) en fonction du taux de pertes de paquets pour toutes les vidéos clips, encodées en H.264 à 3 Mb/s, en définition 640 x 480

3.6.3 Clips vidéo encodés en H.264 à 5 Mb/s, en définition 640 x 480

La figure 3.25 présente la variation de la QoE en fonction de l'impact unique du taux de pertes de paquets et la figure 3.24 cette variation en fonction de l'impact résultant du taux de pertes de paquets et du débit d'encodage sur des vidéos clips encodées en H.264 à 5 Mb/s, en définition 640 x 480.

Nous observons que la variation moyenne la qualité perçue se détériore quasi-exponentiellement lorsque le taux de pertes de paquets augmente. La qualité perçue optimale est limitée par l'impact de la dégradation liée au débit d'encodage et à la définition.

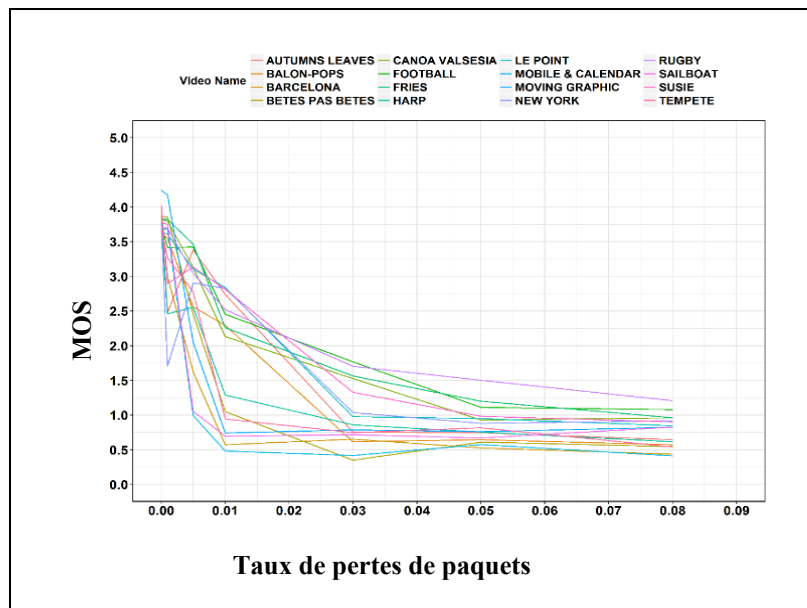


Figure 3.24 Variation de la qualité d'expérience (en MOS) en fonction de l'impact du taux de pertes de paquets et du débit d'encodage pour toutes les vidéos clips, en H.264 à 5 Mb/s, en définition 640 x 480

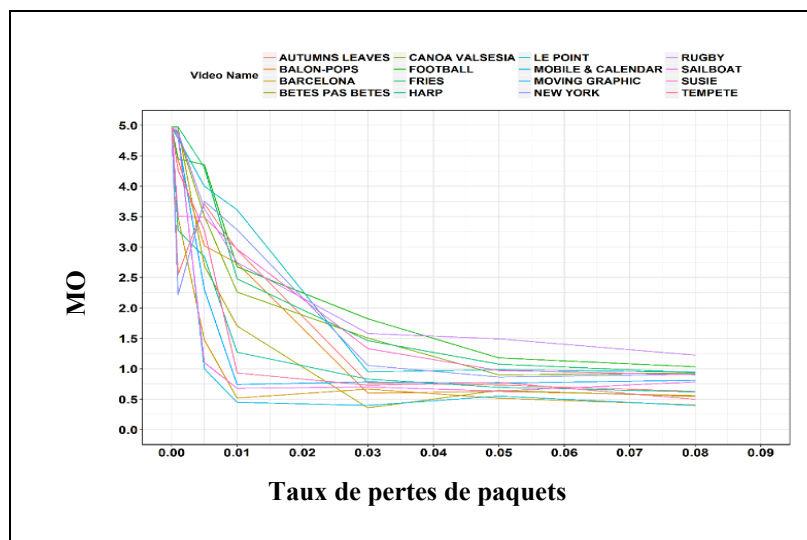


Figure 3.25 Variation de la qualité d'expérience (MOS) en fonction du taux de pertes de paquets pour toutes les vidéos clips, encodées en H.264 à 5 Mb/s, en définition 640 x 480

3.6.4 Clips vidéo encodés en H.264 à 7 Mb/s, en définition 640 x 480

La figure 3.27 présente la variation de la QoE en fonction de l'impact unique du taux de pertes de paquets et la figure 3.26 cette variation en fonction de l'impact résultant du taux de pertes de paquets et du débit d'encodage sur des vidéos clips encodées en H.264 à 7 Mb/s, en définition 640 x 480.

Nous observons que la variation moyenne la qualité perçue se détériore quasi-exponentiellement lorsque le taux de pertes de paquets augmente. La qualité perçue optimale est limitée par l'impact de la dégradation liée au débit d'encodage et à la définition.

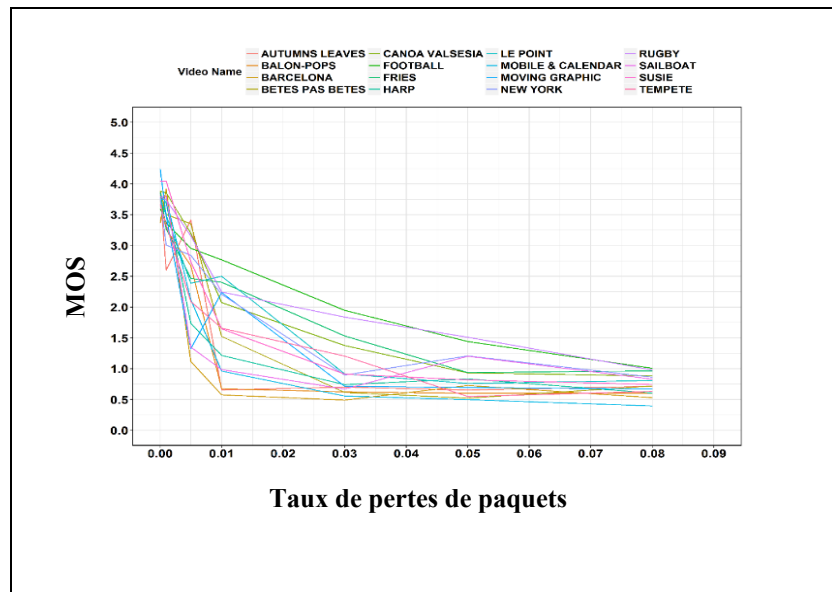


Figure 3.26 Variation de la qualité d'expérience (en MOS) en fonction de l'impact du taux de pertes de paquets et du débit d'encodage pour toutes les vidéos clips, en H.264 à 7 Mb/s, en définition 640 x 480

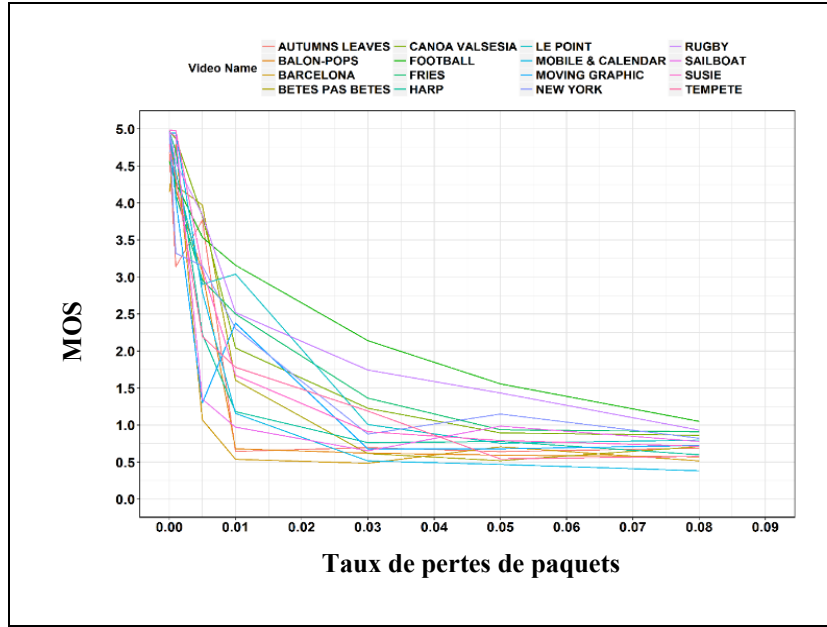


Figure 3.27 Variation de la qualité d'expérience (en MOS) en fonction du taux de pertes de paquets pour toutes les vidéos clips, encodées en H.264 à 7 Mb/s, en définition 640 x 480

3.6.5 Variation moyenne de la fonction $f(plr, \text{bitrate})$

Soit $f(plr, b)$ la fonction définie dans l'équation (2.11). On note que Vq la qualité perçue en fonction de l'impact résultant du taux de pertes de paquets et du débit d'encodage. La lettre b représente le débit d'encodage; $v3$, $v4$, $v5$ sont les paramètres du modèle G.1070; le paramètre k dépend du codec et a dépend de la définition de la vidéo ; plr désigne le taux de pertes de paquets.

$$f(plr, b) = (Vq - 1) / (v3 * k(1 - \frac{1}{1 + (\frac{b}{a * v4})^{v5}})) \quad (2.11)$$

Nous avons tracé $f(plr, b)$ en fonction du taux de pertes de paquets. Les figures 3.28, 3.29 et 3.30 présentent la variation moyenne de la fonction $f(plr, \text{bitrate})$ en fonction du taux de pertes de paquets pour chaque groupe de vidéos à vitesse de contenu lente, moyenne et élevée, encodées en H.264 et en 640 x 480 à 1 Mb/s, 3 Mb/s, 5 Mb/s et 7 Mb/s. Cette fonction est définie dans l'équation (2.11).

Nous observons des figures 3.28, 3.29 et 3.30 que $f(plr, b)$ est une fonction est exponentielle et décroissante pour les différentes valeurs du débit d'encodage.

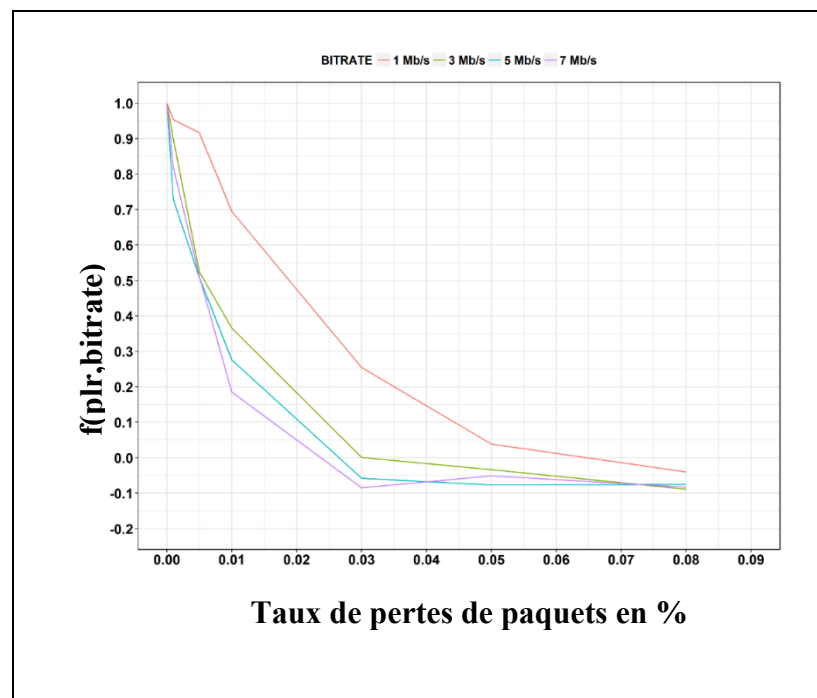


Figure 3.28 Variation moyenne de la fonction $f(plr, \text{bitrate})$ en fonction du taux de pertes de paquets pour chaque groupe de vidéos à vitesse de contenu lente, encodées en H.264 et en 640 x 480 à 1 Mb/s, 3 Mb/s, 5 Mb/s et 7 Mb/s

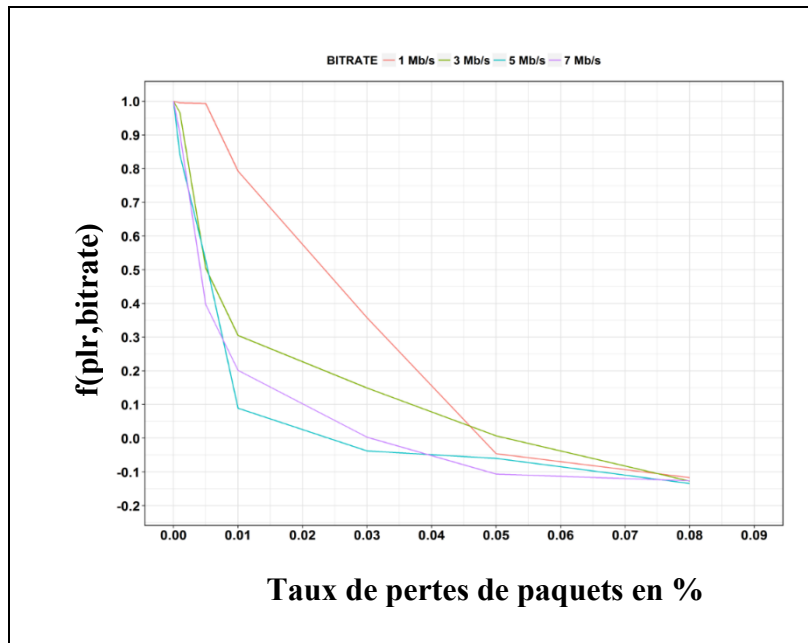


Figure 3.29 Variation moyenne de la fonction $f(\text{plr}, \text{bitrate})$ en fonction du taux de pertes de paquets pour chaque groupe de vidéos à vitesse de contenu moyenne, encodées en H.264 et en 640 x 480 à 1 Mb/s, 3 Mb/s, 5 Mb/s et 7 Mb/s

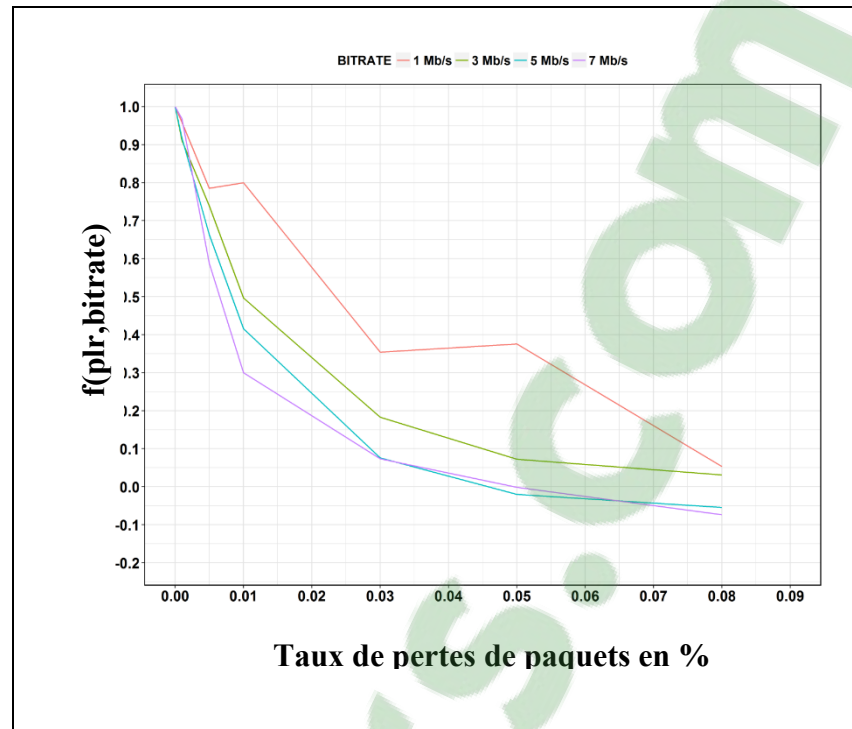


Figure 3.30 Variation moyenne de la fonction $f(\text{plr}, \text{bitrate})$ en fonction du taux de pertes de paquets pour chaque groupe de vidéos à vitesse de contenu élevée, encodées en H.264 et en 640 x 480 à 1 Mb/s, 3 Mb/s, 5 Mb/s et 7 Mb/s

3.7 Détermination des paramètres du modèle sans référence proposé lié au facteur du réseau

L'objectif visé par cette partie est de concevoir un modèle d'estimation de la variation moyenne de la qualité d'expérience en fonction du débit d'encodage, de la vitesse du contenu vidéo, du taux de pertes de paquets, de la définition et du codec. La définition est de 640 x 480. Les valeurs du débit d'encodage sont 1 Mb/s, 3 Mb/s, 5 Mb/s et 7 Mb/s. La vitesse du contenu vidéo est lente, moyenne ou élevée. Le codec sélectionné est H.264. Nous avons implémenté le modèle extensible présenté dans l'équation (2.10).

$$Vq = 1 + v3 * k(1 - \frac{1}{1 + (\frac{b}{a * v4})^{v5}}) * f(plr, b) \quad (2.10)$$

Adaptée de Joskowicz et Ardao (2009)

On note que Vq est une estimation de la qualité perçue en fonction de l'impact résultant du taux de pertes de paquets et du débit d'encodage. La lettre b représente le débit d'encodage; $v3$, $v4$, $v5$ sont les paramètres du modèle G.1070; le paramètre k dépend du codec et a dépend de la définition de la vidéo ; plr désigne le taux de pertes de paquets.

$$f(plr, b) = (Vq - 1) / (v3 * k(1 - \frac{1}{1 + (\frac{b}{a * v4})^{v5}})) \quad (2.11)$$

Nous avons tracé $f(plr, b)$ en fonction du taux de pertes de paquets et avons observé des figures 3.28, 3.29 et 3.30 que cette fonction est exponentielle et décroissante pour les différentes valeurs du débit d'encodage. Nous avons défini $f(plr, b)$ par l'équation (2.12)

$$f(plr, b) = v6 + v7 * \exp(v8 * PLR) \quad (2.12)$$

Le paramètre $v6$ contrôle la translation verticale de la fonction (plr, b) . Le paramètre $v7$ contrôle le changement d'échelle verticale de la fonction (plr, b) . Le paramètre $v8$ contrôle le taux de décroissance ou le changement d'échelle horizontale de la fonction (plr, b) .

Nous avons calculé les valeurs optimales de $v6$, $v7$ et $v8$ en utilisant la méthode des moindres carrés pour les groupes de vidéos à vitesse de contenu lente, moyenne et élevée, encodés en définition 640 x 480 et H.264 à 1 Mb/s, 3 Mb/s, 5 Mb/s et 7 Mb/s. Ces valeurs sont présentées dans le tableau 3.6.

Tableau 3.6 Valeurs optimales des paramètres v6, v7 et v8 pour les vidéos encodées en H.264

DEFINITION	VITESSE DU CONTENU	DEBIT D'ENCODAGE	v6	v7	v8
			H.264		
640x480	LENTE	1	-0,1385	1,1654	-34,5651
		3	-0,0599	1,0499	-99,4400
		5	-0,0807	1,0090	-110,3390
		7	-0,0806	1,0651	-130,8074
	MOYENNE	1	-0,4006	1,4625	-23,0615
		3	-0,0092	1,0327	-118,3641
		5	-0,0908	1,0958	-142,5212
		7	-0,0816	1,0971	-145,6751
	ELEVÉE	1	-0,0481	1,0197	-24,1844
		3	0,0367	0,9522	-67,0887
		5	-0,0432	1,0401	-78,4904
		7	-0,0212	1,0534	-109,5139

Les figures 3.28, 3.29 et 3.30 et le tableau 3.6 nous ont permis de déduire que v8 est une fonction du débit d'encodage b .

Nous avons calculé les valeurs moyennes de v6 et v7 par vitesse de contenu en fonction des résultats du tableau 3.6. Les valeurs de v6 et v7 demeurent constantes par vitesse de contenu en débit des changements du débit d'encodage. Nous avons ensuite calculé les valeurs optimales de v8 au moyen de la méthode des moindres carrés en fonction des valeurs moyennes de v6 et v7 par vitesse de contenu et par débit d'encodage. Ces valeurs sont présentées dans le tableau 3.7.

Tableau 3.7 Valeurs optimales de v8 en fonction des valeurs moyennes de v6 et v7 par vitesse de contenu pour les vidéos encodées en H.264 et en définition 640 x 480

DEFINITION	VITESSE DU CONTENU	DEBIT D'ENCODAGE	v6	v7	v8	R ²
			H.264			
640x480	LENTE	1	-0,0899	1,0724	-35,7183	0,9921
		3	-0,0899	1,0724	-92,2022	0,9946
		5	-0,0899	1,0724	-117,4804	0,9865
		7	-0,0899	1,0724	-128,2485	0,9960
	MOYENNE	1	-0,1456	1,1720	-31,7895	0,9747
		3	-0,1456	1,1720	-84,4727	0,9591
		5	-0,1456	1,1720	-132,8984	0,9854
		7	-0,1456	1,1720	-130,4993	0,9888
	ELEVÉE	1	-0,0189	1,0164	-26,6434	0,9570
		3	-0,0189	1,0164	-59,1694	0,9965
		5	-0,0189	1,0164	-82,7571	0,9990
		7	-0,0189	1,0164	-104,2431	0,9914

Nous avons tracé v8 en fonction du débit d'encodage par vitesse de contenu. La figure 3.31 présente la variation de v8 en fonction du débit d'encodage pour chaque groupe de vidéos à vitesse de contenu lente, moyenne et élevée, encodées en H.264 et en 640 x 480.

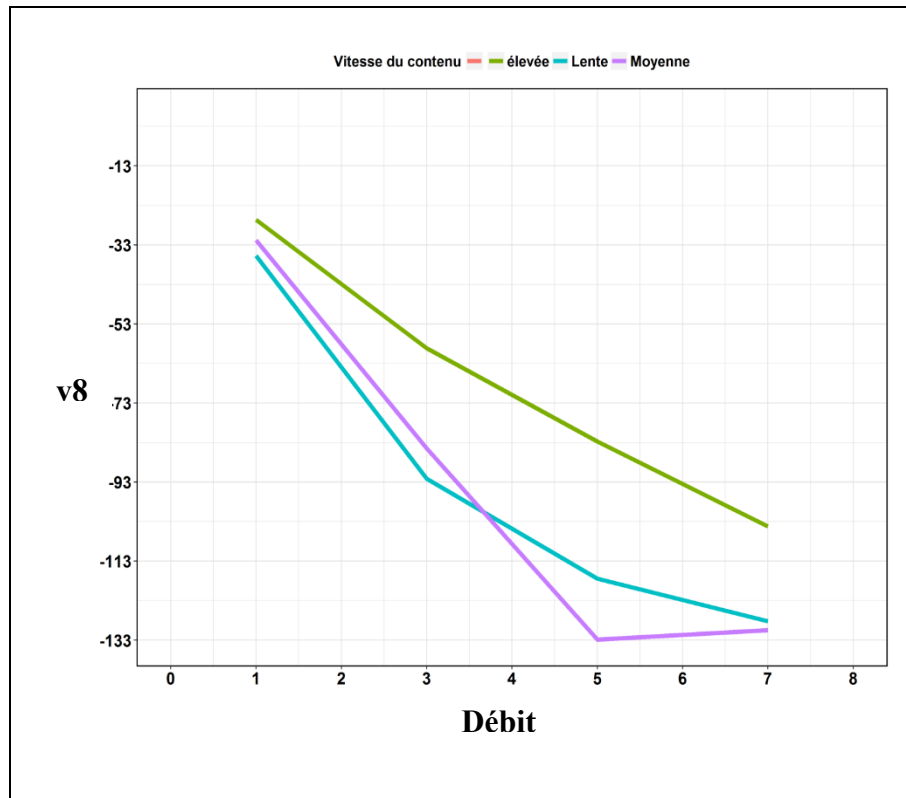


Figure 3.31 Variation de v_8 en fonction du débit d'encodage pour chaque groupe de vidéos à vitesse de contenu lente, moyenne et élevée, encodées en H.264 et en 640 x 480

3.7.1 Validation du modèle

Notre modèle d'estimation est défini par l'équation (2.10) et (2.11). Les valeurs de v_3 , v_4 et v_5 sont celles pour les vidéos encodées en H.264 et en définition 640 x 480. Ces valeurs sont présentées dans le tableau 3.2. Les valeurs de a et k sont présentées dans les tableaux 3.3 et 3.5. Les valeurs de v_6 , v_7 , v_8 sont présentées dans le tableau 3.7. La figure 3.32 présente l'évaluation de la précision d'estimation du 2^{ème} modèle proposé et celui de l'UIT G.1070 en fonction de l'impact des paramètres liés à l'encodage et du taux de pertes de paquets pour chaque groupe de vidéo encodé en H.264 et en VGA, à vitesse de contenu a) lente et à 1 Mb/s, b) lente et à 3 Mb/s, c) lente et à 5 Mb/s, d) lente et à 7 Mb/s, e) moyenne et à 1 Mb/s, f)

moyenne et à 3 Mb/s, g) moyenne et à 5 Mb/s, h) moyenne et à 7 Mb/s, i) élevée et à 1 Mb/s, j) élevée et à 3 Mb/s, k) élevée et à 5 Mb/s, l) élevée et à 7 Mb/s

PM désigne le deuxième modèle proposé.

Les valeurs de R^2 pour notre modèle sont présentées dans le tableau 3.8. La valeur minimale du coefficient de détermination R^2 pour le deuxième modèle proposé est 0.95 pour les groupes de vidéos à vitesse du contenu lente, moyenne et élevée, en définitions 640 x 480 et encodées en H.264. Cela veut dire que notre modèle estime à 95 % la distribution des valeurs MOS en fonction du débit d'encodage et du taux de pertes de paquets. L'estimation de notre modèle est très précise et meilleure que celui de l'UIT G.1070 dans la plupart des scénarios. Cela se justifie par le fait que le proposé prend en compte la vitesse du contenu vidéo et celui de l'UIT G.1070 considère la variation moyenne de la QoE pour toutes vidéos caractérisées par différentes vitesse de contenu.

$$Vq = 1 + v3 * k(1 - \frac{1}{1 + (\frac{b}{a * v4})^{v5}}) * f(plr, b) \quad (2.10)$$

Adaptée de Joskowicz et Ardao (2009)

$$f(plr, b) = v5 + v6 * \exp(v7 * PLR) \quad (2.11)$$

Tableau 3.8 Valeurs du coefficient de détermination R^2 pour le modèle d'estimation de la qualité des vidéos encodées en H.264 et en définition 640 x 480 et altérées par l'impact résultant du débit d'encodage et du taux de pertes de paquets

DEFINITION	VITESSE DU CONTENU	DEBIT D'ENCODAGE	R ²
			H.264
640x480	LENTE	1	0,9921
		3	0,9946
		5	0,9865
		7	0,9960
	MOYENNE	1	0,9747
		3	0,9591
		5	0,9854
		7	0,9888
	ELEVÉE	1	0,9570
		3	0,9965
		5	0,9990
		7	0,9914

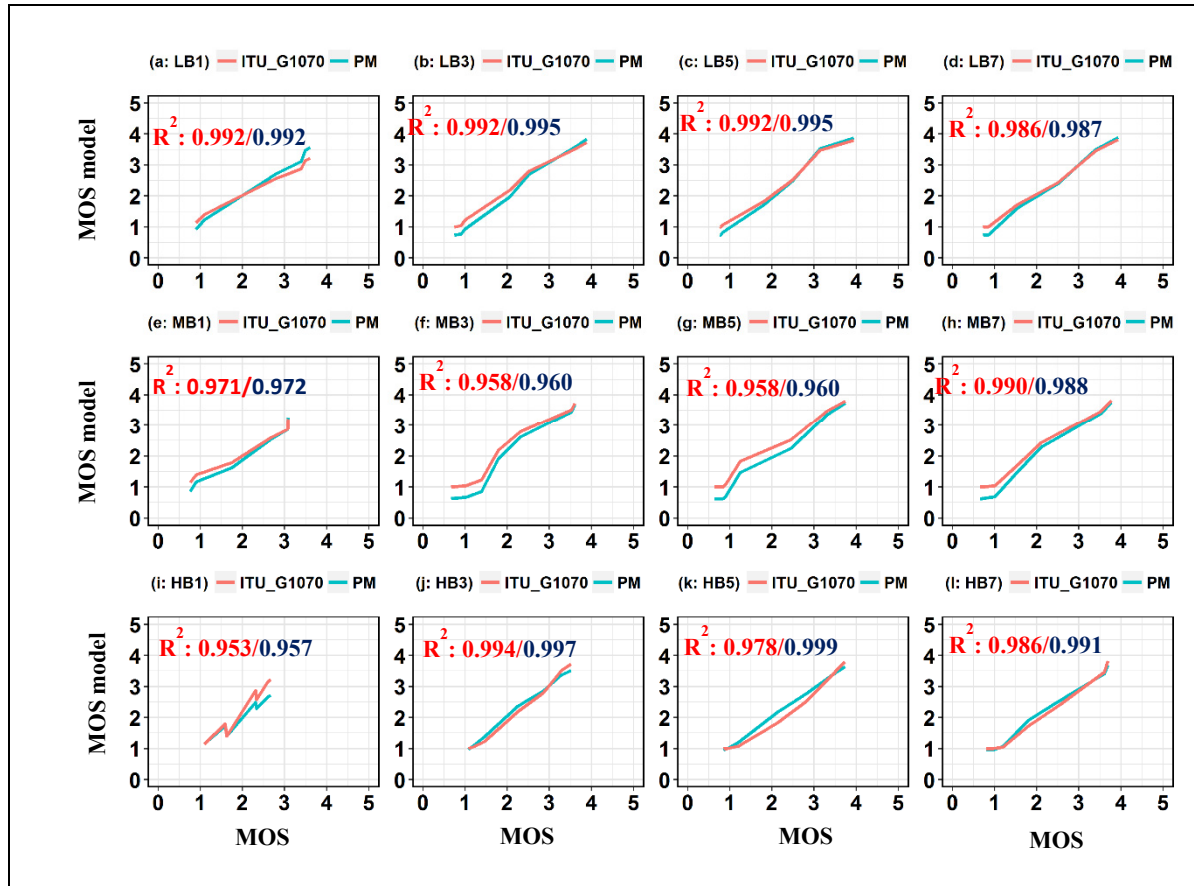


Figure 3.32 Évaluation de la précision d'estimation du 2^{ème} modèle proposé et celui de l'UIT G.1070 en fonction de l'impact des paramètres liés à l'encodage et du taux de pertes pour chaque groupe de vidéo encodé en H.264 et en VGA, à vitesse de contenu a) lente et à 1 Mb/s, b) lente et à 3 Mb/s, c) lente et à 5 Mb/s, d) lente et à 7 Mb/s, e) moyenne et à 1 Mb/s, f) moyenne et à 3 Mb/s, g) moyenne et à 5 Mb/s, h) moyenne et à 7 Mb/s, i) élevée et à 1 Mb/s, j) élevée et à 3 Mb/s, k) élevée et à 5 Mb/s, l) élevée et à 7 Mb/s

3.8 Sommaire

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de notre recherche. Dans une première partie, nous avons analysé la variation de la qualité d'expérience en fonction de paramètres liés à l'encodage et au contenu qui sont le débit, les définitions vidéo 640 x 480, 720 x 480, 1280 x 720 et les codecs H.264 et VP9 et la vitesse du contenu. Nous avons ensuite présenté le modèle d'estimation de la qualité d'expérience proposé prenant en compte ces paramètres liés à

l'encodage et au contenu. En absence de perte de paquets, la valeur minimale du paramètre de détermination R^2 pour notre modèle d'estimation est de 0.96 pour la qualité perçue des vidéos encodées en H.264 et VP9, en 640 x 480, 720 x 480 et 1280 x 720. L'estimation de notre modèle est très précise et meilleure que celui de l'UIT G.1070 dans la plupart des scenarios.

Dans la seconde partie, nous avons analysé la variation de la qualité d'expérience en fonction de l'impact du taux de pertes de paquets lié à la transmission sur un réseau d'accès et de l'impact résultant du taux de pertes de paquets et du débit d'encodage. Nous avons ensuite présenté le modèle d'estimation de la qualité d'expérience proposé prenant en compte ces paramètres liés au réseau d'accès et à l'encodage. En cas de perte de paquets, la valeur minimale du paramètre de détermination R^2 pour notre modèle d'estimation est 0.95 pour la qualité perçue des vidéos encodées en H.264 et en 640 x 480. L'estimation de notre modèle est très précise et meilleure que celui de l'UIT G.1070 dans la plupart des scenarios.

Les modèles proposés peuvent être utilisés dans de futures recherches pour optimiser le processus décisionnel dans le *multihoming* et pour faire une gestion intelligente et efficace des ressources du réseau. Ces modèles peuvent être utilisés par des entreprises pour l'estimation de la qualité d'expérience perçue de leur service vidéo et pour la prise de décision intelligence leur permettant de se distinguer dans un environnement économique hautement compétitif (Barakovic & Skorin-Kapov, 2013). Les observations faites de nos résultats d'analyse peuvent être utilisées dans la conception de nouveaux modèles d'estimations

CHAPITRE 4

DISCUSSION SUR LES RÉSULTATS D'ANALYSE ET LE MODÈLE PROPOSÉ

4.1 Introduction

Ce chapitre compare les résultats de notre recherche à ceux d'autres auteurs. Il présente les améliorations apportées et les limites de notre étude. La première partie de ce chapitre compare nos résultats d'analyse de la variation de la qualité d'expérience en fonction de paramètres liés à l'encodage et au contenu qui sont le débit, les définitions vidéo 640 x 480, 720 x 480, 1280 x 720 et les codecs H.264 et VP9 et la vitesse du contenu ainsi que le modèle proposé prenant en compte le taux de pertes de paquets et ces paramètres liés à l'encodage et au contenu à ceux d'autres auteurs orientés uniquement vers les paramètres liés à l'encodage.

La seconde partie compare nos résultats d'analyse de la variation de la qualité d'expérience en fonction du taux de pertes de paquets ainsi que le modèle proposé prenant en compte le taux de pertes de paquets et des paramètres liés à l'encodage et au contenu à ceux d'autres auteurs orientés uniquement vers les paramètres liés au réseau d'accès.

La dernière partie compare le modèle proposé prenant en compte le taux de pertes de paquets et des paramètres liés à l'encodage et au contenu à ceux d'autres auteurs orientés vers les paramètres liés au réseau d'accès et à l'encodage.

4.2 Comparaison de nos résultats d'analyse de la variation de la qualité d'expérience en fonction de paramètres liés à l'encodage et au contenu ainsi que le modèle proposé à ceux d'autres auteurs orientés vers les paramètres liés à l'encodage

4.2.1 Joskowicz et Ardao (2009)

Les résultats de nos travaux sont similaires à ceux de Joskowicz et Ardao (2009) en ce qui concerne l'impact de la variation du débit d'encodage, de la définition et du mouvement du contenu vidéo sur la qualité d'expérience. Ces résultats montrent que la qualité perçue s'améliore lorsque le débit d'encodage augmente. À une qualité perçue équivalente pour une même vidéo source encodée en différentes définitions, un débit d'encodage supérieur est requis pour une définition supérieure. La qualité perçue pour un même débit du flux vidéo s'améliore généralement lorsque la vitesse du contenu vidéo diminue et se dégrade lorsqu'elle augmente. Le modèle d'estimation proposé, comme celui de Joskowicz et Ardao (2009) prend en compte l'impact de la variation du débit d'encodage, de la définition, du mouvement du contenu vidéo et du codec.

Nos travaux améliorent ceux de Joskowicz et Ardao (2009). En effet, notre étude est basée sur les codecs H.264 et VP9 et sur les définitions vidéo 640 x 480 (VGA), 720 x 480 (SD), 1280 x 720 (HD). VP9 permet la meilleure réduction de la bande passante requise pour la transmission des vidéos. Ces codecs et ces définitions sont populaires et compatibles avec la plupart des appareils mobiles. L'étude de Joskowicz et Ardao (2009) est basée sur les codecs MPEG-2 et H.264 et sur les définitions 720 x 576, 640 x 480, 352 x 288 et 176 x 144. Notre méthode de calcul du paramètre a relatif à la définition est simple car nous l'avons défini comme une fonction de $v4$. La valeur de a augmente lorsque la définition s'accroît. Joskowicz et Ardao (2009) ont défini $1/a$ comme un facteur multiple du débit d'encodage car ils ont observé que les mêmes clips avaient des allures similaires dans toutes les définitions lorsque le débit était augmenté ou réduit. La valeur de $1/a$ dans leurs travaux diminue lorsque la définition s'accroît. Notre méthode de calcul du paramètre k relatif au type de codec est simple car nous l'avons défini comme une fonction de $v3$. Joskowicz et Ardao (2009) ont défini k comme une fonction du débit d'encodage et de la définition. Le modèle proposé dans notre

étude améliore celui de Joskowicz et Ardao (2009). En effet, notre modèle est basé sur une approche non-discriminante qui prend en compte l'impact du taux de pertes de paquets et de paramètres liés à l'encodage sur la QoE. L'approche discriminante de Joskowicz et Ardao (2009) ne prend pas en compte l'impact ce paramètre lié au réseau d'accès sur la QoE.

4.2.2 Kufa et al. (2016)

Les résultats de nos travaux sont similaires à ceux de Kufa et al. (2016) en ce qui a trait à l'impact de la variation du débit d'encodage et de la définition sur la qualité d'expérience. La qualité perçue s'améliore lorsque le débit d'encodage augmente. À débit d'encodage équivalent, la qualité perçue pour une séquence vidéo encodée en une définition de référence est meilleure que celle de la même vidéo encodée en une définition supérieure. Notre étude est basée sur les codecs H.264 et VP9 et les définitions VGA, SD et HD. Celle de Kufa et al. (2016) est basée sur les codecs H.265 et VP9 et les définitions HD et ultra haute définition (UHD). Notre étude améliore celle de (Kufa et al., 2016) car elle propose un modèle d'estimation sans référence de la QoE contrairement à celle de Kufa et al. (2016) qui ne propose aucun modèle d'estimation sans référence.

4.3 Comparaison de nos résultats d'analyse de la variation de la qualité d'expérience en fonction du taux de pertes de paquets ainsi que le modèle proposé à ceux d'autres auteurs orientés vers les paramètres liés au réseau d'accès

4.3.1 Battisti et al. (2014)

Les résultats de nos travaux sont similaires à ceux de Battisti et al. (2014) en ce qui concerne l'impact de la variation du taux de pertes de paquets sur la QoE. La qualité perçue se détériore quasi exponentiellement lorsque le taux de pertes de paquets augmente. Notre étude s'est limitée à un seul paramètre réseau. Battisti et al. (2014) ont étudié l'impact des paramètres de qualités de service (QoS) qui sont la gigue, le débit de transmission et le délai initial sur la

qualité d'expérience (QoE). La qualité perçue se détériore quasi exponentiellement lorsque la gigue accroît et s'améliore lorsque le débit d'encodage croît sur l'intervalle de valeurs choisies dans leur étude. Les auteurs ont toutefois observé que le délai initial n'a aucun impact direct sur la qualité perçue. Le modèle proposé dans notre étude est meilleur que celui de Battisti et al. (2014) car il est basé sur une approche non-discriminante qui prend en compte l'impact de paramètres liés à l'encodage et au réseau d'accès qui sont le débit d'encodage, la définition, le contenu et l'impact de la vitesse du contenu vidéo et du taux de pertes de paquets. L'approche de Battisti et al. (2014) est discriminante et ne prend qu'un seul paramètre réseau à la fois.

4.3.2 Plakia et al. (2016)

Notre étude diffère de celle de Plakia et al. (2016) qui consistait à déterminer les paramètres QoS prédominants affectant la qualité d'expérience. Les paramètres considérés dans leur étude sont la fréquence d'évènements de remise en tampon, les pertes de paquets, le retard de démarrage de la lecture de la vidéo et les changements de la définition de la vidéo, la gigue et la puissance du signal, le type de terminal mobile. Le modèle proposé dans notre étude est plus simple que celui de Plakia et al. (2016) qui sélectionne le meilleur modèle d'estimation parmi les algorithmes d'apprentissage automatique suivants: les réseaux neuronaux artificiels, la régression à vecteurs de support, l'arbre de décision et le classificateur naïf bayésien. Notre modèle contrairement à celui de Plakia et al. (2016) est basé sur une approche non-discriminante qui prend en compte l'impact de paramètres liés à l'encodage et au réseau d'accès qui sont le débit d'encodage, la définition, le contenu et l'impact de la vitesse du contenu vidéo et du taux de pertes de paquets.

4.3.3 D. Pal et Vanijja (2017)

Les résultats de nos travaux sont similaires à ceux de D. Pal et Vanijja (2017) en ce qui a trait à l'impact de la variation du taux de pertes de paquets sur la QoE. La qualité perçue se détériore quasi exponentiellement lorsque le taux de pertes de paquets augmente. Notre étude s'est

limitée à un seul paramètre réseau. D. Pal et Vanijja (2017) ont étudié l'impact de 5 paramètres QoS liés au réseau sur la qualité d'expérience. Ces paramètres sont : le délai initial, les pertes de paquets, la gigue, la bande passante et le délai de mise en tampon. Ils ont trouvé que l'accroissement individuel du taux de pertes de 0,1 à 10 %, de la gigue de 1 à 5,5 secondes, et du délai de mise en tampon de 5 à 40 secondes entraîne une détérioration quasi exponentielle de la qualité d'expérience. L'augmentation du débit de transmission de 500 kb/s à 4100 kb/s améliore la qualité perçue de 0 à 5 pour les vidéos encodées en H.265 et VP9. Au-dessus d'un débit de 4100 kb/s, la qualité perçue se dégrade. La qualité se détériore quasi exponentiellement lorsque le délai initial varie entre 0 et 50 seconde. Le modèle proposé dans notre étude est meilleur que celui de D. Pal et Vanijja (2017). En effet, il est basé sur une approche non-discriminante qui prend en compte l'impact de paramètres liés à l'encodage et au réseau d'accès qui sont le débit d'encodage, la définition, le contenu et l'impact de la vitesse du contenu vidéo et du taux de pertes de paquets. L'approche de D. Pal et Vanijja (2017) est discriminante et ne prend qu'un seul paramètre réseau à la fois.

4.4 Comparaison du modèle proposé à celui de Debajyoti Pal et al. (2016) orienté vers les paramètres liés à l'encodage et au réseau

Le modèle proposé dans notre étude est similaire à celui de Debajyoti Pal et al. (2016) basée sur une approche non discriminante car ces deux modèles prennent en compte l'impact du débit d'encodage, du taux de perte de paquets et sont des extensions du modèle G.1070. Mais il s'en distingue de celui de Debajyoti Pal et al. (2016) car il ne prend pas en compte l'impact de la fréquence d'images par seconde. Ceci constitue une limite de notre étude. Notre modèle prend en compte le codec H.264 et VP9 et les définitions 640 x 480, 720 x 480 et 1280 x 720. Celui de Debajyoti Pal et al. (2016) prend en compte le codec H.265 et la définition 1920 x 1080. Le modèle proposé dans notre étude est meilleur que celui de Debajyoti Pal et al. (2016). En effet, il prend en compte l'impact des changements de définition, de vitesse de contenu et de codec sur la QoE. Notre modèle est plus simple que celui de Debajyoti Pal et al. (2016) qui est le même que celui proposé par l'Union Internationale des Télécommunications (Équations (1.9), (1.10), (1.11) et (1.12)). En absence de perte de paquets, la valeur minimale du paramètre de

détermination R^2 pour notre modèle d'estimation est de 0.96 pour la qualité perçue des vidéos encodées en H.264 et VP9, en 640 x 480, 720 x 480 et 1280 x 720. Celle de Debajyoti Pal et al. (2016) est de 0.792 pour la qualité perçue des vidéos encodées en H.265, en 1920 x 1080. En cas de perte de paquets, la valeur minimale du paramètre de détermination R^2 pour notre modèle d'estimation est 0.95 pour la qualité perçue des vidéos encodées en H.264 et en 640 x 480 et celle de Debajyoti Pal et al. (2016) est 0.784 pour la qualité perçue des vidéos encodées en H.265 et en 1920 x 1080. Cela signifie que la précision d'estimation de notre modèle est meilleur que celui de Debajyoti Pal et al. (2016).

4.5 Applications

Les résultats de nos travaux peuvent être utilisés pour optimiser le processus décisionnel dans le *multihoming* et pour faire une gestion intelligente et efficace des ressources du réseau. En effet, l'utilisation du *multihoming* offre plusieurs avantages tels que la hausse du débit pour le transfert des données et la réduction de la latence (Deng et al., 2015). Ces résultats permettent aux entreprises d'évaluer la qualité de leur service vidéo et de prendre des décisions pour se distinguer dans un environnement économique hautement compétitif (Barakovic & Skorin-Kapov, 2013). Ils peuvent être utilisés pour évaluer la qualité d'expérience des utilisateurs de services vidéo en temps réel tels que whatsapp, Viber, les systèmes de surveillance, la vidéo conférence, etc...

4.6 Sommaire

Dans ce chapitre, nous avons comparé les résultats de notre recherche à ceux d'autres auteurs et présenté les améliorations apportées et les limites de notre étude. Nous avons comparé dans la première partie nos résultats d'analyse de la variation de la qualité d'expérience en fonction de paramètres liés à l'encodage et au contenu qui sont le débit, les définitions vidéo VGA, SD et HD, les codecs H.264 et VP9 et la vitesse du contenu ainsi que le modèle proposé prenant

en compte le taux de pertes de paquets et ces paramètres liés à l'encodage et au contenu à ceux d'autres auteurs orientés uniquement vers les paramètres liés à l'encodage. En effet, le modèle proposé se distingue de celui de ces auteurs parce qu'il est basé sur une approche non discriminante qui prend en compte l'impact du taux de pertes de paquets et de paramètres liés à l'encodage et au contenu vidéo sur la QoE.

Dans la seconde partie, nous avons comparé nos résultats d'analyse de la variation de la qualité d'expérience en fonction du taux de pertes de paquets ainsi que le modèle proposé prenant en compte des paramètres liés à l'encodage, au contenu, et le taux de pertes de paquets à ceux d'autres auteurs orientés uniquement vers les paramètres liés au réseau d'accès. En effet, le modèle proposé se distingue de celui de ces auteurs parce qu'il est basé sur une approche non discriminante qui prend en compte l'impact du taux de pertes de paquets et de paramètres liés à l'encodage et au contenu vidéo sur la QoE.

Dans la dernière partie, nous avons comparé les modèles proposés prenant en compte le taux de pertes de paquets et des paramètres liés à l'encodage et au contenu à ceux d'autres auteurs orientés vers les paramètres liés au réseau d'accès et à l'encodage. En absence de dégradations liées à la fréquence d'images par seconde, le modèle proposé se distingue de celui de Debajyoti Pal et al. (2016) qui est le même que celui de l'Union Internationale des Télécommunications orienté vers des paramètres liés à l'encodage ou au réseau d'accès par sa simplicité et la prise en compte de l'impact de la définition, du type de codec et de la vitesse de contenu. De plus, sa précision d'estimation est meilleure que celui de Debajyoti Pal et al. (2016) en absence et en cas de pertes de paquets

CONCLUSION

Dans cette recherche, nous avons analysé l'impact de paramètres liés à l'encodage, au contenu vidéo et au réseau d'accès sur la qualité de la vidéo perçue pour concevoir un modèle hybride d'estimation de la qualité d'expérience lors de l'acheminement de la vidéo sur un réseau sans fil. Plus précisément, nous avons analysé l'impact des pertes de paquets, du débit d'encodage, mais aussi de la vitesse du contenu vidéo, la définition, du codec sur la qualité perçue par un utilisateur. Les résultats de nos analyses nous ont permis de concevoir un modèle hybride d'estimation de la qualité d'expérience qui améliore celui proposé par l'Union Internationale des Télécommunications et ceux proposés dans d'autres auteurs.

Dans une première partie, nos résultats montrent l'impact de la variation de qualité d'expérience en fonction du débit d'encodage sur des vidéos encodées en H.264 et VP9 et l'impact de la variation moyenne de qualité d'expérience en fonction du débit d'encodage sur des vidéos groupées selon la vitesse du contenu lente, moyenne, rapide, encodées en H.264 et VP9. Nous avons conçu un modèle d'estimation de la qualité d'expérience prenant en compte l'impact de ces paramètres liés à l'encodage qui sont le débit d'encodage, la vitesse du contenu, la définition et le type de codec. En absence de perte de paquets, l'estimation de notre modèle pour la qualité perçue des vidéos encodées en H.264 et VP9, en VGA, SD et HD est très précise et meilleure que celui du l'UIT G.1070 dans la plupart des scénarios.

Dans une seconde partie, nos résultats montrent l'impact de la variation de qualité d'expérience en fonction du taux de pertes de paquets sur des vidéos en définition VGA et encodées en H.264. Nous avons conçu un second modèle d'estimation de la qualité d'expérience prenant en compte l'impact des pertes de paquets, du débit d'encodage, et de la vitesse du contenu sur ces vidéos en définition VGA et encodées en H.264. En cas de perte de paquets, l'estimation de notre modèle pour la qualité perçue des vidéos encodées en H.264 et en VGA est très précise et meilleure que celui du l'UIT G.1070 dans la plupart des scénarios.

Le second modèle proposé est basé sur une approche non discriminante qui prend en compte l'impact du taux de pertes de paquets et de paramètres liés à l'encodage et au contenu vidéo sur la QoE. Cela fait distinction des modèles d'autres auteurs qui sont orientés uniquement vers des paramètres liés à l'encodage ou au réseau d'accès.

En absence de dégradations liées à la fréquence d'images par seconde, le modèle proposé se distingue aussi de celui de l'Union Internationale des Télécommunications (orienté vers des paramètres liés à l'encodage ou au réseau d'accès) par sa simplicité et la prise en compte de l'impact de la définition, du type de codec et de la vitesse de contenu.

Travaux futurs

Les applications de la qualité d'expérience sont multiples. Les modèles proposés peuvent être utilisés dans de futures recherches pour optimiser le processus décisionnel de sélection d'interfaces pour le *multihoming* et pour faire une gestion intelligente et efficace des ressources du réseau. Ces modèles peuvent être appliqués pour le monitoring de la qualité perçue de certains services vidéo en temps réel. Nous récapitulons nos recommandations pour de futurs travaux dans les points suivants :

- 1) estimation simplifiée de la vitesse moyenne des objets dans un contenu vidéo en temps réel dans les téléphones intelligents;
- 2) conception d'un modèle basée sur la QoE pour l'optimisation du mécanisme de la sélection d'interfaces pour le *multihoming*;
- 3) extension du modèle proposé pour la prise en compte de la fréquence d'images par seconde;
- 4) extension du modèle proposé pour la prise en compte de nouveaux codecs et autres définitions vidéo;
- 5) extension du modèle proposé pour la prise en compte d'autres facteurs déterminants.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Akhtman, J., & Hanzo, L. (2010). Heterogeneous networking: an enabling paradigm for ubiquitous wireless communications. *Proceedings of the IEEE*, 98(2), 135-138. doi: 10.1109/JPROC.2009.2037213.
Repéré à <http://dx.doi.org/10.1109/JPROC.2009.2037213>
- Akramullah, S. M., Ahmad, I., & Liou, M. L. (1995). A Data-Parallel Approach for Real-Time MPEG-2 Video Encoding. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 30(2), 129-146. doi: <https://doi.org/10.1006/jpdc.1995.1133>.
Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0743731585711331>
- Amour, L., Souihi, S., Hoceini, S., & Mellouk, A. (2015). A Hierarchical Classification Model of QoE Influence Factors. Dans *Wired/Wireless Internet Communications 13th International Conference, WWIC 2015, 25-27 May 2015* (pp. 225-238). Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-22572-2_16.
Repéré à http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-22572-2_16
- Anegekuh, L., Sun, L., & Ifeakor, E. (2015). Encoding and video content based HEVC video quality prediction. *Multimedia Tools and Applications*, 74(11), 3715-3738. doi: 10.1007/s11042-013-1795-z.
Repéré à <http://dx.doi.org/10.1007/s11042-013-1795-z>
- Barakovic, S., & Skorin-Kapov, L. (2013). Survey and Challenges of QoE Management Issues in Wireless Networks. *Journal of Computer Networks and Communications*, 165146 (165128 pp.). doi: 10.1155/2013/165146.
Repéré à <http://dx.doi.org/10.1155/2013/165146>
- Battisti, F., Carli, M., & Paudyal, P. (2014). QoS to QoE mapping model for wired/wireless video communication. Dans *2014 Euro Med Telco Conference (EMTC), 12-15 Nov. 2014* (pp. 6 pp.). IEEE. doi: 10.1109/EMTC.2014.6996648.
Repéré à <http://dx.doi.org/10.1109/EMTC.2014.6996648>
- Bellard, F. (2000). About FFmpeg.
Repéré à <https://ffmpeg.org/about.html>
- Bentes Maia, O., Yehia, H. C., & De Errico, L. (2015). A concise review of the quality of experience assessment for video streaming. *Computer Communications*, 57, 1-12. doi: 10.1016/j.comcom.2014.11.005.
Repéré à <http://dx.doi.org/10.1016/j.comcom.2014.11.005>
- Brunnström, K., Beker, S. A., De Moor, K., Dooms, A., Egger, S., Garcia, M.-N., . . . Zgank, A. (2013). *Qualinet White Paper on Definitions of Quality of Experience*. Qualinet

White Paper on Definitions of Quality of Experience Output from the fifth Qualinet meeting, Novi Sad, March 12, 2013.

Repéré à <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00977812>

Chikkerur, S., Sundaram, V., Reisslein, M., & Karam, L. J. (2011). Objective video quality assessment methods: A classification, review, and performance comparison. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 57(2 PART 1), 165-182. doi: 10.1109/TBC.2011.2104671.

Repéré à <http://dx.doi.org/10.1109/TBC.2011.2104671>

Coonjah, I., Catherine, P. C., & Soyjaudah, K. M. S. (2015). Experimental performance comparison between TCP vs UDP tunnel using OpenVPN. Dans *2015 International Conference on Computing, Communication and Security (ICCCS)* (pp. 1-5). doi: 10.1109/CCCS.2015.7374133

De Cock, J., Mavlankar, A., Moorthy, A., & Aaron, A. (2016). A large-scale video codec comparison of x264, x265 and libvpx for practical vod applications. Dans *Applications of Digital Image Processing XXXIX, August 29, 2016 - September 1, 2016* (Vol. 9971, pp. The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)). SPIE. doi: 10.1117/12.2238495.

Repéré à <http://dx.doi.org/10.1117/12.2238495>

De Moor, K., Joseph, W., Ketyko, I., Tanghe, E., Deryckere, T., Martens, L., & De Marez, L. (2010). Linking users' subjective QoE evaluation to signal strength in an IEEE 802.11b/g wireless LAN environment. *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, 2010. doi: 10.1155/2010/541568.

Repéré à <http://dx.doi.org/10.1155/2010/541568>

Deep, V., & Elarabi, T. (2017). HEVC/H.265 vs. VP9 state-of-the-art video coding comparison for HD and UHD applications.

Dans *2017 IEEE 30th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)* (pp. 1-4). doi: 10.1109/CCECE.2017.7946796

Deng, Z., Liu, Y., Liu, J., Zhou, X., & Ci, S. (2015). QoE-Oriented Rate Allocation for Multipath High-Definition Video Streaming Over Heterogeneous Wireless Access Networks. doi: 10.1109/JSYST.2015.2430893.

Repéré à <http://dx.doi.org/10.1109/JSYST.2015.2430893>

EMC, C. (1999). Exécutez plusieurs systèmes d'exploitation sur un seul PC.

Repéré à <https://www.vmware.com/fr/products/workstation-pro.html>

Farias Monteiro, V., Aguiar Sousa, D., Maciel, T. F., Lima, F. R. M., Rodrigues, E. B., & Cavalcanti, F. R. P. (2015). Radio resource allocation framework for quality of experience optimization in wireless networks. *IEEE Network*, 29(6), 33-39. doi: 10.1109/MNET.2015.7340422.

- Gamal, M., Sadek, N., Rizk, M. R. M., & Abou-elSaoud, A. K. (2016). Delay compensation using Smith predictor for wireless network control system. *Alexandria Engineering Journal*, 55(2), 1421-1428. doi: 10.1016/j.aej.2016.04.005.
Repéré à <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2016.04.005>
- Grinnemo, K. J., Jones, T., Fairhurst, G., Ros, D., Brunstrom, A., & Hurtig, P. (2016). Towards a flexible Internet transport layer architecture. Dans *2016 IEEE International Symposium on Local and Metropolitan Area Networks (LANMAN)* (pp. 1-7). doi: 10.1109/LANMAN.2016.7548846
- Guan-Ming, S., Xiao, S., Yan, B., Mea, W., Vasilakos, A. V., & Haohong, W. (2016). QoE in video streaming over wireless networks: perspectives and research challenges. *Wireless Networks*, 22(5), 1571-1593. doi: 10.1007/s11276-015-1028-7.
Repéré à <http://dx.doi.org/10.1007/s11276-015-1028-7>
- Huipin, Z., & Cote, G. (2008). Modeling quantization matrices for perceptual image/video encoding. Dans *Visual Communications and Image Processing 2008, 29 Jan. 2008* (Vol. 6822, pp. 682210-682211). SPIE - The International Society for Optical Engineering. doi: 10.1117/12.767137.
Repéré à <http://dx.doi.org/10.1117/12.767137>
- Hyun Jong, K., Dong Geun, Y., Hwa-Suk, K., Kee Seong, C., & Seong Gon, C. (2012). QoE assessment model for video streaming service using QoS parameters in wired-wireless network. Dans *2012 14th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)* (pp. 459-464).
- Hyunwoo, N., Calin, D., & Schulzrinne, H. (2016). Towards dynamic MPTCP Path control using SDN. Dans *2016 IEEE NetSoft Conference and Workshops (NetSoft), 6-10 June 2016* (pp. 286-294). IEEE. doi: 10.1109/NETSOFT.2016.7502424.
Repéré à <http://dx.doi.org/10.1109/NETSOFT.2016.7502424>
- Il-Koo, K., Sunil, L., Yinji, P., & Jie, C. (2014). Coding efficiency comparison of new video coding standards: HEVC vs VP9 vs AVS2 video. Dans *2014 IEEE International Conference on Multimedia and Expo Workshops (ICMEW), 14-18 July 2014* (pp. 6 pp.). IEEE. doi: 10.1109/ICMEW.2014.6890700.
Repéré à <http://dx.doi.org/10.1109/ICMEW.2014.6890700>
- ITU-T-Rec-P10. (2017). Vocabulary for performance and quality of service.
- ITU-T. (2007). Vocabulary for performance and quality of service, Amendment 2: New definitions for inclusion in Recommendation. ITU-T P.10/G.100.
- Jean-Baptiste, K. (2001). VLC media player
Repéré à <https://www.videolan.org/vlc/index.fr.html>

- Joskowicz, J., & Ardao, J. C. L. (2009). Enhancements to the opinion model for video-telephony applications. Dans *5th International Latin American Networking Conference, LANC 2009, September 24, 2009 - September 25, 2009* (pp. 87-94). Association for Computing Machinery. doi: 10.1145/1636682.1636697.
Repéré à <http://dx.doi.org/10.1145/1636682.1636697>
- Joskowicz, J., Ardao, J. C. L., & Sotelo, R. (2011). Including the Effects of Video Content in the ITU-T G.1070 Video Quality Function.
- Kufa, J., Polak, L., & Kratochvil, T. (2016). HEVC/H.265 vs. VP9 for Full HD and UHD video: Is there any difference in QoE? Dans *2016 International Symposium ELMAR* (pp. 51-55). doi: 10.1109/ELMAR.2016.7731753
- Laghari, K. U. R., & Connelly, K. (2012). Toward total quality of experience: A QoE model in a communication ecosystem. *IEEE Communications Magazine*, 50(4), 58-65. doi: 10.1109/MCOM.2012.6178834.
Repéré à <http://dx.doi.org/10.1109/MCOM.2012.6178834>
- Lonny, K., Ivan, N., & Juan, A., Diaz. (2010). Standalone Network Emulator Tool.
Repéré à <https://blogs.technet.microsoft.com/juanand/2010/03/05/standalone-network-emulator-tool/>
- Lu, N., & Shen, X. S. (2014). Scaling Laws for Throughput Capacity and Delay in Wireless Networks — A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(2), 642-657. doi: 10.1109/SURV.2013.081313.00039
- Minhas, T. N., Shahid, M., Lovstrom, B., Rossholm, A., Zepernick, H. J., & Fiedler, M. (2016). QoE rating performance evaluation of ITU-T recommended video quality metrics in the context of video freezes. *Australian Journal of Electrical & Electronics Engineering*, 13(2), 122-131. doi: 10.1080/1448837X.2015.1094855.
Repéré à <http://dx.doi.org/10.1080/1448837X.2015.1094855>
- Pal, D., Triyason, T., & Vanijja, V. (2016). Extending the ITU-T G.1070 Opinion Model to Support Current Generation H.265/HEVC Video Codec. Dans O. Gervasi, B. Murgante, S. Misra, A. M. A. C. Rocha, C. M. Torre, D. Tanar, B. O. Apduhan, E. Stankova & S. Wang (Éds.), *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2016: 16th International Conference, Beijing, China, July 4-7, 2016, Proceedings, Part II* (pp. 106-116). Cham: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-42108-7_8.
Repéré à http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-42108-7_8
- Pal, D., & Vanijja, V. (2017). Effect of network QoS on user QoE for a mobile video streaming service using H.265/VP9 codec. *Procedia Computer Science*, 111, 214-222. doi: 10.1016/j.procs.2017.06.056.
Repéré à <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2017.06.056>

- Plakia, M., Katsarakis, M., Charonyktakis, P., Papadopouli, M., & Markopoulos, I. (2016). On user-centric analysis and prediction of QoE for video streaming using empirical measurements. Dans *2016 Eighth International Conference on Quality of Multimedia Experience (QoMEX)* (pp. 1-6). doi: 10.1109/QoMEX.2016.7498962
- Poynton, C. (2014). *Digital Video and HD - Algorithms and Interfaces* (2nd Edition).
- Quadros, C., Cerqueira, E., Neto, A., Pescapé, A., Riker, A., Immich, R., & Curado, M. (2013). A quality of experience handover system for heterogeneous multimedia wireless networks. Dans *2013 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC 2013)*, 28-31 Jan. 2013 (pp. 1064-1068). IEEE. doi: 10.1109/ICCNC.2013.6504239.
Repéré à <http://dx.doi.org/10.1109/ICCNC.2013.6504239>
- Raghavendra, K. V., Naik, D. S. B., Venkatramaphanikumar, S., Kumar, S. D., & Krishna, S. V. R. (2014). Weather Based Prediction of Pests in Cotton. Dans *2014 International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks* (pp. 570-574). doi: 10.1109/CICN.2014.129
- Ross, I., & Robert, G. (2017). What is R?
Repéré à <https://www.r-project.org/about.html>
- Seeling, P., & Reisslein, M. (2014). I. Want. Pixels. (Entering the Age of 4k). *IEEE Potentials*, 33(6), 27-30. doi: 10.1109/MPOT.2014.2335793.
Repéré à <http://dx.doi.org/10.1109/MPOT.2014.2335793>
- Shinkel. (2012). Comprendre et encoder des vidéos pour votre appareil mobile.
Repéré à <http://shinkel.over-blog.com/page-7329587.html>
- Streijl, R. C., Winkler, S., & Hands, D. S. (2016). Mean opinion score (MOS) revisited: methods and applications, limitations and alternatives. *Multimedia Systems*, 22(2), 213-227. doi: 10.1007/s00530-014-0446-1.
Repéré à <http://dx.doi.org/10.1007/s00530-014-0446-1>
- Sullivan, G. J. (2005). The H.264/MPEG-4 AVC video coding standard and its deployment status. Dans *Visual Communications and Image Processing 2005, 12-15 July 2005* (Vol. 5960, pp. 596024-596021). SPIE - The International Society for Optical Engineering. doi: 10.1117/12.631573.
Repéré à <http://dx.doi.org/10.1117/12.631573>
- Tsolkas, D., Liotou, E., Passas, N., & Merakos, L. (2017). A survey on parametric QoE estimation for popular services. *Journal of Network and Computer Applications*, 77, 1-17. doi: 10.1016/j.jnca.2016.10.016.
Repéré à <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnca.2016.10.016>

- Vani, R., & Sangeetha, M. (2012). Survey on H.264 standard. Dans *Advances in Computer Science and Information Technology. Computer Science and Information Technology: Second International Conference, CCSIT 2012, Bangalore, India, January 2-4, 2012*. (Vol. 86, pp. 397-410). Springer Verlag. doi: 10.1007/978-3-642-27317-9_41.
Repéré à http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-27317-9_41
- VQEG. (2004). Readme Video Quality Experts Group Test Sequences Repéré à ftp://vqeg.its.bldrdoc.gov/SDTV/VQEG_PhaseI/TestSequences/Reference/README.txt
- Xiao, C., Ye, J., Esteves, R. M., & Rong, C. (2016). Using Spearman's correlation paramètres for exploratory data analysis on big dataset. Dans (14 éd., Vol. 28, pp. 3866-3878). John Wiley and Sons Ltd. doi: 10.1002/cpe.3745.
Repéré à <http://dx.doi.org/10.1002/cpe.3745>
- Yao, H., & Tan, Y. (2012). The study of H. 264 standard key technology and analysis of prospect. Dans *2011 SSITE International Conference on Computers and Advanced Technology in Education, ICCATE 2011, November 3, 2011 - November 4, 2011* (Vol. 126 AISC, pp. 49-54). Springer Verlag. doi: 10.1007/978-3-642-25908-1_7.
Repéré à http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-25908-1_7
- Yuan, F., & Cheng, E. (2009). Video quality metric based on edge detection and temporal masking effect. Dans *2009 2nd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System (PEITS 2009), 19-20 Dec. 2009* (Vol. vol.1, pp. 121-124). IEEE. doi: 10.1109/PEITS.2009.5407057.
Repéré à <http://dx.doi.org/10.1109/PEITS.2009.5407057>
- Yun, W., Yong, Z., & Jianshi, L. (2007). Brief analysis of the H.264 coding standard. Dans *3rd International Conference on International Information Hiding and Multimedia Signal Processing, IIHMSP 2007, November 26, 2007 - November 28, 2007* (Vol. 2, pp. 154-157). IEEE Computer Society. doi: 10.1109/IIHMSP.2007.4457675.
Repéré à <http://dx.doi.org/10.1109/IIHMSP.2007.4457675>
- Zatt, B., Porto, M., Scharcanski, J., & Bampi, S. (2010). Gop structure adaptive to the video content for efficient H.264/AVC encoding. Dans *2010 IEEE International Conference on Image Processing* (pp. 3053-3056). doi: 10.1109/ICIP.2010.5651700