

**TECHNIQUES D'ÉVALUATION OBJECTIVE DE LA QUALITÉ
DANS UN ENVIRONNEMENT NUMÉRIQUE**

(1999-2000)

Résumé

Le présent Rapport est une version révisée du Rapport UIT-R BT.2020 sur l'état d'avancement des techniques d'évaluation objective de la qualité audio et vidéo.

Le Groupe de travail mixte (GTM) 10-11Q a été chargé par le Groupe de travail (GT) 11E et 10C et le Groupe d'action (GA) 10-4 d'élaborer des Recommandations sur l'évaluation de la qualité. Le présent Rapport traite plus particulièrement de la Question UIT-R 64/11 – Paramètres de qualité objective des images et méthodes de mesure et de contrôle associées pour les images de télévision numérique. Cette Question témoigne de l'intérêt que portent actuellement les radiodiffuseurs aux techniques d'évaluation objective de la qualité et de contrôle des programmes audio et vidéo. Des systèmes numériques de radiodiffusion et de télévision sont aujourd'hui en service dans plusieurs pays, d'où la nécessité d'élaborer des Recommandations.

Des progrès considérables ont été accomplis avec la mise au point définitive de la Recommandation UIT-R BS.1387 – Méthode de mesure objective de la qualité du son perçu, qui traite de l'évaluation objective de la qualité audionumérique. Il est prévu d'effectuer d'autres travaux relatifs aux méthodes de contrôle du son numérique. Le Groupe d'experts sur la qualité vidéo (VQEG, *Video Quality Experts Group*) a entrepris un ensemble exhaustif de tests de validation des méthodes de mesure objective de la qualité d'image des systèmes bilatéraux avec référence complète. Mais il reste beaucoup à faire en ce qui concerne l'ensemble des méthodes d'évaluation objective de la qualité vidéo.

Le présent Rapport constitue une première étape sur la voie du règlement des problèmes en suspens. Il est structuré comme suit:

- § 1: Evolution des techniques de mesure: passage des techniques analogiques aux techniques numériques avec compression.
- § 2: Examen des Recommandations.
- § 3: Bilan des travaux en cours et faits nouveaux.
- § 4: Méthode proposée par le GTM 10-11Q pour l'élaboration de Recommandations futures.
- § 5: Conclusions provisoires sur les objectifs et les priorités à fixer pour les Recommandations futures.

Le GTM 10-11Q envisage de collaborer avec d'autres Commissions d'études (CE) et GT afin de pouvoir se faire une meilleure idée de l'évolution des méthodes de mesures numériques et d'éviter que des solutions apparemment identiques, mais pourtant différentes, ne soient proposées. Pour ce faire, le GTM 10-11Q estime que la meilleure façon de procéder consiste à recenser les applications et les besoins.

Le présent Rapport sera tenu à jour de manière à prendre en compte les nouveaux besoins et à suivre l'évolution de l'évaluation objective de la qualité numérique.

1 Evolution des techniques de mesure: passage des techniques analogiques aux techniques numériques avec compression

Dans le présent paragraphe, nous passerons brièvement en revue l'évolution des techniques de mesure et le passage de l'analyse indirecte des signaux à l'analyse directe du contenu.

Les fonctions logistiques bien connues (par exemple les lignes d'essai d'intervalle vertical de suppression de trame (VBI, *vertical blanking interval*) qui ont permis de concevoir et de contrôler les systèmes de télévision analogique ne sont plus valables pour les raisons suivantes:

- la structure des signaux de transmission de programmes a évolué. Elle repose aujourd'hui sur l'utilisation de flux de transport numériques, pour lesquels on a mis au point des analyseurs de protocole;

- pour que la diffusion numérique soit efficace, il faut procéder à une compression à l'aide de techniques de codage non linéaires complexes. Le recours à ces techniques non linéaires ne permet pas d'effectuer des analyses classiques des signaux d'essai;
- la qualité est aujourd'hui fortement dépendante du contenu, et donc variable dans le temps, ce qui ne fait qu'ajouter à la complexité des mesures.

De ce fait, il n'existe qu'une faible corrélation entre les mesures objectives classiques indirectes et la qualité audio et vidéo correspondante.

Une solution possible consiste à associer l'analyse du flux numérique et celle du contenu de l'image. La première analyse est relativement facile à effectuer, car le comportement et les caractéristiques du système sont parfaitement définis dans les spécifications. En conséquence, on a élaboré de nouveaux modèles d'évaluation objective de la qualité de l'image. L'évaluation objective de la qualité numérique repose sur la recherche des caractéristiques et le traitement du modèle perceptuel ou sur une combinaison de ces deux procédés (c'est-à-dire que l'on tient compte à la fois des procédés de codage et des caractéristiques de la perception humaine).

On trouvera ci-après une liste préliminaire des applications de mesure examinées dans le présent Rapport.

- Elaboration, évaluation et installation de codecs et de multiplexeurs statistiques.
- Surveillance du réseau en service et hors service.
- Evaluation de la qualité du matériel de production avec compression.
- Surveillance du matériel d'entrée générique.
- Surveillance continue en temps réel.

En conséquence, on envisage de recommander certains modèles qui serviront de base à la mise au point d'équipements de mesure de l'évaluation et de la surveillance de la qualité. Il est aujourd'hui admis que différents modèles peuvent être adoptés pour différents domaines d'application.

2 Examen des Recommandations

2.1 Rapports et Recommandations actuels

Audio: Recommandation UIT-R BS.1387 – Méthode de mesure objective de la qualité du son perçu.

Vidéo: ANSI [1996].

Recommandation UIT-T J.143 – Besoins de l'utilisateur concernant des mesures objectives de la qualité vidéo perçue pour la télévision numérique par câble.

Rapport UIT-R BT.2020 – Techniques d'évaluation objective de la qualité dans un environnement numérique.

2.2 Recommandations en projet

Vidéo

GTM 10-11Q – Evaluation objective de la qualité vidéo, en collaboration avec le Groupe d'experts sur la qualité vidéo (VQEG).

Avant-projet de nouvelle Recommandation UIT-T J.OVQ de la CE 9 de la normalisation des télécommunications – Techniques de mesure de la qualité de signal vidéo perçue en présence de signal de référence intégral.

Avant-projet de nouvelle Recommandation UIT-T J.OVQ de la CE 9 de la normalisation des télécommunications – Techniques de mesure de la qualité de signal vidéo perçue en présence de signal de référence réduit.

Avant-projet de nouvelle Recommandation UIT-T J.OVQ de la CE 9 de la normalisation des télécommunications – Techniques de mesure de la qualité de signal vidéo perçue en absence de signal de référence.

CE 12 de la normalisation des télécommunications – projet de nouvelle Recommandation UIT-T P.OVQ – Evaluation objective de la qualité vidéo (référence complète), en collaboration avec le Groupe d'experts sur la qualité vidéo (VQEG). Cette recommandation traite de l'évaluation de la qualité vidéo à des débits binaires d'au moins 768 kbit/s.

CE 12 de la normalisation des télécommunications – projet de nouvelle Recommandation UIT-T P.RSQ – Evaluation objective de la qualité vidéo de systèmes bilatéraux à large bande réduite à la source. Des mesures de ce type sont nécessaires lorsque les données vidéo source et comprimées ne se trouvent pas au même endroit.

CE 12 de la normalisation des télécommunications – projet de nouvelle Recommandation UIT-T P.LBQ – Evaluation objective de la qualité vidéo à de faibles débits binaires (~16 kbit/s à 1,5 Mbit/s); applications de visioconférence et multimédia à de faibles débits binaires.

CE 12 de la normalisation des télécommunications – projet de nouvelle Recommandation UIT-T P.TRQ – Evaluation objective de la qualité vidéo en cas de défauts de transmission sur les réseaux de transmission par paquets, les réseaux mobiles et les autres réseaux.

3 Bilan des travaux en cours et faits nouveaux

Le présent Rapport fait le point des techniques d'évaluation de la qualité dans un environnement numérique et recense les principales méthodes numériques existantes. Les différentes méthodes s'appuient sur les définitions élaborées dans la Recommandation UIT-T J.143 par la CE 9 de la normalisation des télécommunications.

3.1 Principales méthodes numériques existantes

3.1.1 Systèmes bilatéraux

Un système générique bilatéral est conçu pour fonctionner avec deux entrées: le matériel de référence d'une part, et le matériel testé d'autre part. En général, ces systèmes ne doivent pas nécessairement fonctionner en temps réel et peuvent être utilisés uniquement avec une bibliothèque limitée. Leur objectif consiste essentiellement à évaluer (ou à classer) la qualité de fonctionnement des codecs numériques, mais ils peuvent aussi servir à évaluer la qualité d'une chaîne de transmission numérique complète avec codage, transmission et décodage. En général, l'indication de la qualité de ces types de systèmes est très précise.

3.1.2 Systèmes bilatéraux avec référence réduite

Ces systèmes sont conçus pour assurer la surveillance de la qualité de fonctionnement d'un réseau de transmission numérique. Ils ont ceci de particulier qu'ils peuvent évaluer la qualité en temps réel et en service sans avoir à utiliser un signal de référence spécialisé. L'information relative à la qualité est recueillie à l'entrée du réseau et est transmise à tout point nodal avec le signal. Au point nodal où la qualité doit être évaluée, on recalcule l'information relative à la qualité localement et on la compare à l'information reçue afin d'effectuer le contrôle de qualité. Il arrive que les indicateurs de qualité fournis par ces systèmes ne soient pas aussi précis que dans le cas des systèmes bilatéraux (avec référence complète). Ces systèmes donnent une indication de la «disponibilité» du service garantie par la «transparence» du processus de transmission.

3.1.3 Systèmes unilatéraux

Cette famille de systèmes repose sur l'analyse du matériel existant «tel quel». L'origine de la dégradation n'est pas connue et il est difficile d'aller au-delà de certaines limites. Pour l'essentiel, les systèmes bilatéraux recherchent certaines dégradations a priori pouvant être causées par un codeur numérique générique ou par certaines discontinuités sur une liaison de transmission numérique. Pour ces raisons, la qualité des indicateurs de ces systèmes est limitée et on ne peut pas les utiliser actuellement pour toutes les dégradations possibles. On peut aussi se servir de ces systèmes pour obtenir une indication de la «disponibilité» du service.

3.2 Systèmes actuellement disponibles ou en projet

Le VQEG analyse actuellement certaines des méthodes de mesure existantes de la qualité objective de l'image. Le VQEG est un groupe informel dont la création a été encouragée par la CE 11 des radiocommunications, le GTM 10-11Q, ainsi que les CE 9 et 12 de la normalisation des télécommunications.

On trouvera dans le Tableau 1 une vue d'ensemble des systèmes disponibles actuellement. Tous ces systèmes sont classés par famille (D = bilatéral; S = unilatéral; RRD = bilatéral avec référence réduite).

Des études sont prévues au sein de l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) en vue d'obtenir un ensemble de scènes d'essai subissant des dégradations contrôlées. L'échelle de perception sera calibrée pour chaque scène, c'est-à-dire que le pas de l'échelle correspondra à la plus petite dégradation que peut détecter la scène. On espère que ces études constitueront un ensemble de matériels de référence de bonne qualité pour tester les systèmes de demain.

TABLEAU 1

Société ou laboratoire	Partenaire	Pays	Système audio	Système vidéo	Type de système	Temps réel	En service	Produit commercial	Essai VQEG
CCETT		France		X	S			X	
CCETT		France	X		D/S			X	
CRC		Canada	X		D			X	
CRC ⁽¹⁾		Canada	X		D			X	
FHG ⁽¹⁾	Opticom	Allemagne	X		D	X		X	
KDD		Japon		X	D			X	X
KPN ⁽¹⁾	Opticom	Pays-Bas Allemagne		X	D			X	
Mitsubishi	NHK	Japon		X	D			X	X
Opticom		Allemagne	X		D			X	
Rohde & Schwarz	IFN	Allemagne		X	S		X	X	X
Snell & Wilcox		Royaume-Uni		X	S			X	
TDF		France	X	X	RRD			X	
Tektronix	Sarnoff	Etats-Unis d'Amérique		X	D			X	X
Tektronix		Etats-Unis d'Amérique		X	S	X	X	X	
ECI Telecom		Israël		X	D				
CPqD		Brésil		X	D				X
EPFL		Suisse		X	D				X
KPN	Swiss Telecom	Pays-Bas Suisse		X	D				X
NASA		Etats-Unis d'Amérique		X	D				X
NTIA		Etats-Unis d'Amérique		X	RRD				X
Tapestries	EC ACTS	Consortium européen		X	D				X

⁽¹⁾ Ces produits ont été fabriqués et vendus avant la mise au point définitive de la norme PEAQ (Recommandation UIT-R BS.1387 – Méthode de mesure objective de la qualité de son perçu). Certains d'entre eux sont encore disponibles sur le marché.

3.3 Qualité vidéo objective: état d'avancement des travaux du VQEG

Le projet de rapport du VQEG (Document 10-11Q/56, 21 janvier 2000) donne les résultats du processus d'évaluation des modèles de qualité vidéo objective tels qu'ils ont été proposés. Chacun de ceux, au nombre de dix, qui ont soumis un modèle, a présenté un modèle à utiliser pour le calcul de notes objectives permettant d'effectuer une comparaison avec une évaluation subjective dans une large gamme de systèmes vidéo et de séquences sources. Plus de 26 000 notes subjectives d'opinion ont été données: elles s'appuyaient sur le traitement par 16 systèmes vidéo différents de 20 séquences sources et sur l'évaluation des résultats par huit laboratoires indépendants répartis à travers le monde. On a divisé les tests

subjectifs en quatre quadrants: 50 Hz qualité haute, 50 Hz qualité basse, 60 Hz qualité haute et 60 Hz qualité basse. Le terme haute qualité désigne ici une qualité vidéo de production, dont le débit binaire se situe entre 3 Mbit/s et 50 Mbit/s. Le terme basse qualité se réfère à une qualité de distribution, dont le débit binaire se situe entre 768 kbit/s et 4,5 Mbit/s. L'évaluation subjective s'est effectuée dans le respect scrupuleux des procédures de la Recommandation UIT-R BT.500 relatives à la méthode à deux stimulus utilisant une échelle de qualité continue (DSCQS, *double stimulus continuous quality scale*). Les plans de test objectifs et subjectifs comprenaient des procédures de validation des notes subjectives et quatre échelles de comparaison des données objectives et subjectives.

Parmi les neuf modèles envisagés, sept ou huit (suivant l'échelle utilisée) présentent des qualités statistiques équivalentes, similaires à celle du rapport signal de puissance sur bruit (PSNR, *power signal-to-noise ratio*). Si, au départ, les plans de test n'utilisaient pas le PSNR, il a été décidé ultérieurement de considérer cette mesure comme étant constitutive d'un modèle de référence objectif. Après analyse, le rejet des valeurs fournies par trois des modèles a été décidé, ces données étant faussées par divers problèmes logiciels ou techniques.

Outre l'analyse de l'ensemble des données, on a procédé à l'analyse de sous-ensembles de données prélevées sur les quatre quadrants relatifs aux tests subjectifs et sur l'ensemble des données, à l'exclusion de certains systèmes de traitement vidéo. On a pu ainsi déterminer la sensibilité des résultats à divers paramètres spécifiques d'une application donnée.

Ces analyses ne permettent pas à l'heure actuelle au VQEG de proposer un ou plusieurs modèles pouvant figurer dans des Recommandations de l'UIT sur la mesure objective de la qualité de l'image. Cependant, même si aucun modèle n'a pu être validé par le VQEG, ces tests ont été un grand succès. Ainsi, la constitution d'un nouvel ensemble de données important figure parmi les plus belles réussites du VQEG. Jusqu'à présent en effet, les concepteurs de modèle ne pouvaient travailler que sur un nombre très limité de données vidéo évaluées de façon subjective. On peut penser qu'une fois mises à disposition les données actuelles du VQEG, les travaux à venir permettront d'améliorer de façon substantielle les techniques en matière de mesure objective de la qualité vidéo.

3.4 Proposition d'un modèle de référence pour la surveillance en service de la qualité vidéo

Comme il est indiqué plus haut, trois méthodes ont été définies, qui représentent différentes stratégies de mesure pour l'évaluation de la qualité vidéo:

- méthode utilisant une référence vidéo complète (systèmes bilatéraux);
- méthode utilisant une information de référence réduite (systèmes bilatéraux);
- méthode n'utilisant aucun signal de référence (systèmes unilatéraux).

Le GTM 10-11Q estime que, lors de la conception et de la mise au point d'un moniteur de qualité vidéo, une même structure générale de la procédure de mesure devrait être adoptée pour la méthode de référence réduite et pour la méthode des systèmes unilatéraux (Document 10-11/Q57 du 26 janvier 2000). Le modèle de référence se compose des quatre couches suivantes:

- *la méthodologie de mesure*: elle définit la classe ou la stratégie adaptée à l'application;
- *la méthode de mesure*: elle comprend un ensemble de modules, algorithmiques et des modules associés, dont le rôle est de traiter les entrées telles que les signaux d'origine ou les données de référence adaptées, et de fournir des résultats en sortie tels que les données de référence traitées, le niveau de dégradation, ou la notation de qualité finale;
- *le ou les module(s) algorithmique(s)* constitue(nt) le bloc de base des fonctions de traitement du signal utilisées par la méthode. Cette couche est au cœur de la méthode et fournit la qualification objective finale;
- *le ou le(s) module(s) associé(s)* constitue(nt) une fonction supplémentaire de support à la couche précédente et traite(nt) les tâches liées à l'horodatage, la synchronisation, la présentation des données, etc.

L'Annexe 1 contient un exposé détaillé complet de cette méthode. Le GTM 10-11Q recommande aux CE 9 et 12 de la normalisation des télécommunications, ainsi qu'au VQEG, d'utiliser ce modèle de référence. Adapter ultérieurement ce modèle à d'autres applications pourra se révéler judicieux. On étudie actuellement son utilisation pour les applications audio.

4 GTM 10-11Q – Méthode proposée pour l'élaboration de Recommandations futures

4.1 Etude des besoins dans certains domaines d'application

Le GTM 10-11Q a élaboré et distribué un questionnaire afin de connaître les besoins des radiodiffuseurs dans le domaine des techniques d'évaluation objective de la qualité.

Lorsqu'on analysera les données recueillies à l'aide de ce questionnaire, il faudra tenir compte de la nature (ou du rôle) de la société ayant répondu au questionnaire. Les données recueillies seront donc examinées séparément en fonction des catégories suivantes:

- Radiodiffuseurs.
- Fournisseurs de réseau.
- Organes de réglementation.

Le questionnaire a suscité beaucoup d'intérêt chez les radiodiffuseurs, et plus de 20 réponses ont été enregistrées. Elles montrent que la qualité de service (QoS) constitue l'une des grandes priorités et doit être examinée de toute urgence par les organes de normalisation compétents.

L'examen des réponses donne lieu aux remarques suivantes:

- toutes les réponses sauf une émanaient de sociétés ou d'organisations européennes; interroger à nouveau les sociétés et les organisations de la Région 2 semblerait donc indiqué.
- le contenu des réponses permet d'apprécier les priorités des radiodiffuseurs.
- les réponses faisaient souvent apparaître des commentaires détaillés relatifs à des thèmes ne figurant pas explicitement dans le questionnaire. Il faudra analyser soigneusement ces points et en rendre compte de manière appropriée.
- une seule réponse faisait état du besoin de contrôle de la qualité d'un multiplexeur ou d'un codec.
- la surveillance de l'ensemble de la chaîne, de la production à la distribution, est apparue comme étant la priorité majeure des radiodiffuseurs. Les points de surveillance OBLIGATOIRE sont les suivants:
 - la sortie de la chaîne de production (tête de distribution);
 - tous les points nodaux du réseau de transmission;
 - l'utilisateur final.

Les éléments ci-dessus semblent indiquer que les besoins exprimés concernent davantage les systèmes à référence réduite et les systèmes unilatéraux que les systèmes bilatéraux. On peut affirmer en conclusion de cette analyse préliminaire que les radiodiffuseurs montrent le plus vif intérêt à l'obtention de normes et de produits dont la conception répond aux préoccupations exprimées dans ce paragraphe.

Des informations supplémentaires relatives aux besoins des utilisateurs devraient en principe être disponibles lors de la réunion du GTM 10-11Q en septembre 2000.

4.2 Coordination avec d'autres CE et GT, en particulier les CE 9 et 12 de la normalisation des télécommunications

Le modèle de référence proposé constitue une base solide de coordination des approches techniques et des recommandations futures permettant la mise en œuvre des méthodes à référence réduite et des méthodes relatives aux systèmes unilatéraux. Des notes de liaison seront adressées aux CE 9 et 12 de la normalisation des télécommunications ainsi qu'au VQEG pour les inviter à adopter ce modèle en vue d'élaborer des spécifications techniques communes pour les recommandations de l'UIT traitant des mesures objectives de la qualité d'image. Le GTM 10-11Q entend tout mettre en œuvre pour que d'autres CE et GT et des Membres du Secteur lui soumettent des contributions fournissant des propositions de spécifications techniques relatives à tout ou partie(s) du modèle de référence. Elles devront être soumises dès que possible pour être prises en considération lors de la réunion de septembre 2000 du GTM 10-11Q; elles devront en tout état de cause être livrées avant la réunion suivante, prévue au printemps 2001.

5 Position actuelle du GTM 10-11Q

Le GTM 10-11Q reconnaît l'excellence du travail accompli par le VQEG concernant l'évaluation de la méthode des systèmes bilatéraux à référence complète. Le besoin urgent de méthodes à référence réduite et de méthodes relatives aux systèmes unilatéraux est à présent reconnu; ces méthodes permettront la surveillance en exploitation des services de télédiffusion et des services multimédias associés.

Le GTM 10-11Q souhaite que les travaux futurs du VQEG évaluent en parallèle les modèles de mesure objective de la qualité vidéo relatifs aux systèmes unilatéraux, aux systèmes bilatéraux et aux systèmes à référence réduite. Il préconise toutefois que priorité soit donnée à l'étude et à la validation des systèmes à référence réduite et des systèmes unilatéraux.

Etant donné que la surveillance de la qualité des signaux vidéo (par exemple ceux qu'utilisent les satellites, les câbles terrestres ou les systèmes de distribution de réseaux numériques à large bande) nécessitent des méthodes d'évaluation objective appropriées, il faudrait que tous les organismes de normalisation décident d'une méthode commune à chaque méthodologie et à chaque domaine d'application.

Le modèle de référence décrit dans l'Annexe 1 devrait donc servir de cadre aux trois méthodes pour permettre l'élaboration et l'évaluation des méthodes de mesure proposées. Il constitue une base solide pour la coordination des approches techniques et des Recommandations futures sur la mise en œuvre des méthodes à référence réduite et des méthodes relatives aux systèmes unilatéraux. La note de liaison adressée aux CE 9 et 12 de la normalisation des radiocommunications ainsi qu'au VQEG invite ces instances à adopter ce modèle en vue d'élaborer des spécifications techniques communes pour les Recommandations de l'UIT sur les mesures objectives de la qualité d'image. Le GTM 10-11Q encourage l'instauration d'une collaboration au sein du VQEG afin de permettre la définition d'une ou plusieurs solutions communes.

Le GTM 10-11Q entend tout mettre en œuvre pour que des CE, des GT et des Membres du Secteur lui soumettent des contributions proposant des spécifications techniques relatives à tout ou partie(s) du modèle de référence. Elles devront être soumises dès que possible, pour pouvoir être examinées lors de la réunion de septembre 2000 du GTM 10-11Q, et en tout état de cause, avant la réunion suivante, prévue au printemps 2001.

La nécessité d'agir rapidement ne doit cependant pas nuire à une évaluation correcte des méthodes objectives. Vu l'importance de la question, le GTM 10-11Q entend mobiliser des ressources importantes en vue de la préparation du processus de décision qui suivra la diffusion des futurs résultats du VQEG.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANSI [1996] ANSI T1.801.03, Transport numérique de signaux vidéo unidirectionnels – Paramètres pour l'évaluation objective de la qualité. American National Standards Institute. Etats Unis d'Amérique.

ANNEXE 1

Méthode de surveillance en service de la qualité vidéo pour les réseaux de diffusion de télévision numérique

1 Introduction

L'UIT-R et l'UIT-T ont constaté que des Recommandations traitant de l'évaluation de la qualité vidéo étaient nécessaires et ont donc élaboré de concert des Questions d'étude à ce sujet (Q. UIT-R 64/11, UIT-T Q.11/12 et UIT-T Q.22/9).

La gestion de la qualité de service des réseaux de télévision numérique impose de choisir la technique appropriée de mesure de la qualité vidéo. Certaines exigences incontournables ont déjà été identifiées:

- qualité des signaux entrants;
- surveillance en service, en temps réel et continue de la qualité de service du réseau exploité, etc.

La présente Annexe décrit la méthode générique recommandée pour l'évaluation de la qualité vidéo des réseaux de diffusion de télévision numérique.

2 Concepts généraux

La conception et l'élaboration d'un indicateur de qualité vidéo conduisent à envisager une structure générale de la procédure de mesure. Celle-ci se compose de sept couches:

- *la méthodologie de mesure*: elle définit la classe ou la stratégie adaptée à l'application;
- *la méthode de mesure*: elle comprend un ensemble de modules algorithmiques et des modules associés, dont le rôle est de traiter les entrées telles que les signaux d'origine ou les données de référence adaptées, et de fournir des résultats en sortie tels que les données de référence traitées, le niveau de dégradation, ou la notation de qualité finale;

- *le ou les module(s) algorithmique(s)* constitue(nt) le bloc de base des fonctions de traitement du signal qu'utilise la méthode. Cette couche est le cœur de la méthode et fournit la qualification objective finale;
- *le ou le(s) module(s) associé(s)* constitue(nt) une fonction supplémentaire de support à la couche précédente et traite(nt) les tâches liées à l'horodatage, la synchronisation, la présentation des données, etc.

3 Méthode de surveillance de la qualité de service du réseau

3.1 Méthodologie de mesure

Trois méthodes représentant différentes stratégies de mesure pour l'évaluation de la qualité des signaux vidéo ont été définies par la CE 9 de la normalisation des télécommunications (Document temporaire 36. J.OVQ – Methodologies for video quality assessment on networks in operation) et adoptées par le GTM 10-11Q des radiocommunications:

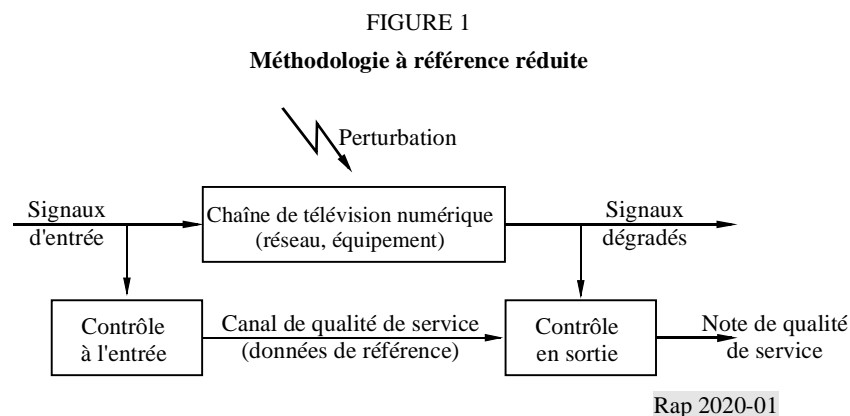
- méthode utilisant une référence vidéo complète;
- méthode utilisant une information de référence réduite;
- méthode n'utilisant aucun signal de référence.

Chacune de ces méthodes correspond à un besoin opérationnel spécifique et à un domaine d'application particulier, en raison de ses contraintes de mise en œuvre technique:

- pertinence des données mesurées;
- disponibilité de la référence;
- synchronisation des signaux ou données d'origine, ou des signaux ou données dégradées;
- canal de transmission des données de référence;
- mise en œuvre en temps réel;
- utilisation en service; etc.

Cette classification des méthodes permet de différencier les solutions pour identifier le domaine d'application aux plans de l'approche technique comme des contraintes. Elle conduit aussi à choisir une procédure adaptée au contrôle de la qualité de fonctionnement qui prenne en compte le contexte d'utilisation.

Il faut une grande quantité d'informations de référence fournies en un point de comparaison de sortie pour mettre en œuvre la première stratégie. Ce qu'il est possible d'envisager en laboratoire se révèle irréaliste dès lors qu'il s'agit d'opérer en service et sur le réseau tout entier, sauf à procéder à d'importantes manœuvres de compression, de sous-échantillonnage et de synchronisation avec les données de référence, ce qui supposerait l'utilisation d'algorithmes volumineux sur l'équipement test de bout de chaîne et en accroîtrait la complexité. Ainsi cette première stratégie aura-t-elle un inconvénient en ce qui concerne son rapport coût/qualité de fonctionnement.



La seconde stratégie nécessite des points de contrôle en entrée et en sortie de la chaîne; sa mise en œuvre est donc tout à fait indiquée pour une surveillance automatique et continue de la qualité des signaux dans des réseaux de télévision numérique. La mesure en service de l'écart entre signaux entrants et signaux sortants se révèle d'autant plus utile qu'elle indique la transparence des liaisons de transmission. Le débit binaire des données de référence est en revanche assez faible. La stratégie à adopter pour surveiller un réseau lorsque les données de référence sont réduites coule d'évidence. Le signal d'origine à considérer consiste en un flux réduit de données de référence présentant des caractéristiques appropriées, y compris de dégradation. Ce flux est ensuite aisément réparti par le canal de qualité de service vers les divers points de contrôle en sortie.

La troisième stratégie sera envisagée en remplacement de la seconde lorsque les données de référence ne sont plus disponibles, ce qui se produit quand on ne peut plus accéder aux signaux d'origine ou que le canal transmettant les données de référence est absent ou endommagé.

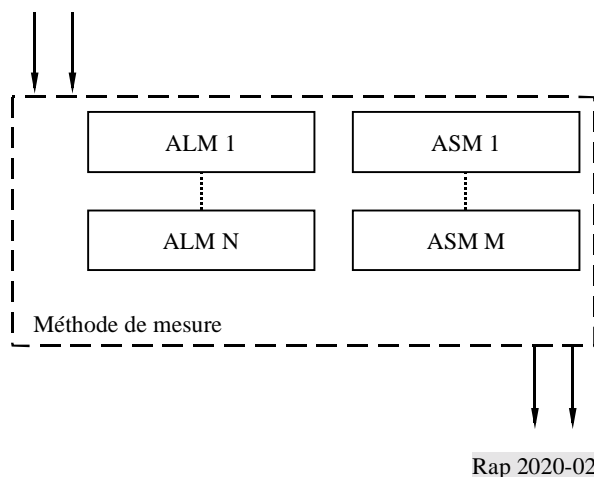
La méthode de surveillance de la qualité vidéo du réseau de télévision numérique que nous proposons de faire normaliser est celle dite des Systèmes bilatéraux à information de référence réduite, qui comprend une option de configuration ne nécessitant aucune référence.

3.2 Méthode de mesure

La présente proposition a pour but de donner une représentation conceptuelle de la méthode de mesure que l'on recommande d'utiliser. Aussi générique que possible, elle doit permettre de définir une structure généralisée ralliant les suffrages des auteurs et des organes de normalisation concernés. Sa description générique sera aussi ouverte que possible pour permettre l'amélioration des algorithmes et des techniques.

Il est nécessaire, conformément à la stratégie de mesure recommandée au § 3.1, de décrire une structure de la méthode de mesure constituant le cœur du traitement aux points de contrôle de mesure d'entrée et de sortie. La structure ci-après, qui se compose de modules algorithmiques (ALM, *algorithmic module*) et de modules associés (ASM, *associated module*), constitue un exemple type de configuration.

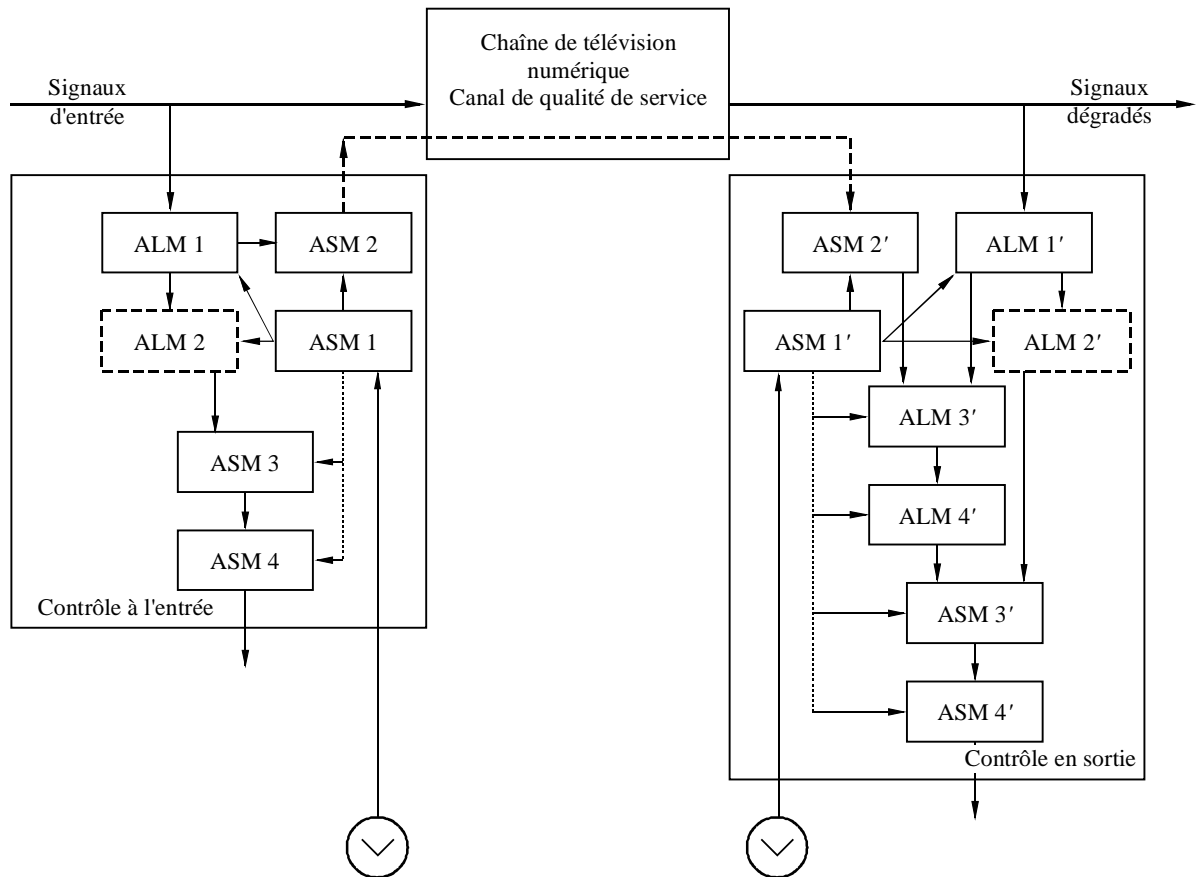
FIGURE 2
Structure de la méthode de mesure



Rap 2020-02

La structure de mesure ci-après donne la représentation générique proposée aux points de contrôle d'entrée et de sortie. Les termes AML et ASM désignent respectivement les modules algorithmiques et les modules associés figurant dans la méthode de mesure. Les indices N et N' se rapportent à des modules situés sur des points de contrôle respectivement en entrée ou en sortie de la chaîne de mesure.

FIGURE 3
Structure détaillée de la méthode de mesure



ALM 1 et 1' : représentation du signal
 ALM 2 et 2' : modèle d'évaluation de la qualité sans référence (optionnel)
 ALM 3' : synchronisation et comparaison des caractéristiques
 ALM 4' : modèle d'évaluation de la qualité avec référence réduite

ASM 1 et 1' : horodatage
 ASM 2 et 2' : traitement des données de référence
 ASM 3 et 3' : représentation des résultats
 ASM 4 et 4' : interfaces

Rap 2020-03

3.3 Modules algorithmiques

Les paragraphes suivants décrivent les principales fonctions des modules algorithmiques. Ils proposent aussi quelques exemples tirés de la littérature.

3.3.1 ALM 1 et 1' : Représentation du signal

Ces modules ont pour rôle d'extraire certaines caractéristiques du signal en entrée et/ou en sortie du système, suivant le point de contrôle et la méthode de mesure choisis. Le but de cet algorithme est d'utiliser les caractéristiques extraites pour mesurer l'effet sur le signal vidéo des dégradations causées par les équipements ou par la liaison de transmission. Une comparaison en bout de chaîne des caractéristiques extraites fournit un indicateur de la qualité vidéo (voir § 3.4.2). La qualité de ce module est liée non seulement à la pertinence de la représentation choisie, mais aussi à la quantité d'informations extraites à transmettre. Le choix de la technique utilisée est conditionné par la limitation du débit binaire assigné au canal des données de référence.

Le signal vidéo, initialement représenté par une matrice de pixels correspondant à des valeurs de luminance, subit une ou plusieurs transformations. Après d'éventuelles transformations matricielles ou après filtrage, on peut passer du domaine initial à un signal représenté par une matrice de nouvelles valeurs ou par un vecteur de caractéristiques.

Transformation mathématique du signal

On utilise dans ce cas des bancs de filtres passe-bandes, présentant chacun une sélectivité de fréquence spatiale, de direction et de fréquence temporelle [Watson, 1990]. Les transformations utilisées sont de types divers: transformée discrète en cosinus, fonction de Gabor, transformation cortex, filtres miroir en quadrature, ondelettes, etc. [Brétilon et autres, 1999; Daly, 1992; Teo et Heeger, 1994]. Les techniques multirésolution employées, qui reposent sur la décomposition de l'information visuelle, permettent une bonne visualisation spatiale et temporelle de l'information. Ce type de transformation conduit à une représentation de l'information adaptée à la vision humaine.

Extraction des caractéristiques

La représentation vectorielle des caractéristiques permet un très faible débit binaire des données de référence. Le vecteur concentre en effet considérablement le contenu informatif de l'image. On s'attend à ce que les paramètres extraits soient sensibles aux détériorations du signal causées par les différents systèmes (équipement, réseau ...). Dans la plupart des méthodes, la caractérisation d'une séquence vidéo repose sur des paramètres relatifs au contenu spatial et temporel, ou représentatifs de la seule dégradation (effet de bloc, flou ...). L'autre avantage de cette méthode réside dans la possibilité d'une mise en œuvre en temps réel de l'analyse vidéo, ce qui permet de mieux appréhender le caractère aléatoire des erreurs de transmission. Cette approche exige des algorithmes efficaces et évolutifs.

L'extraction de contours du signal vidéo entrant ou sortant est l'un des moyens permettant de caractériser spatialement ou temporellement une image. Il existe de nombreuses méthodes utilisées à cet effet (il s'agit le plus souvent des filtres de Sobel ou de Laplace) [Webster et autres, 1993; Ardito et Visca, 1995]. La valeur moyenne, l'écart-type, le maximum, le minimum ou l'énergie des pixels des images filtrées sont calculés et utilisés pour fournir une représentation des caractéristiques du signal: information temporelle, spatiale, etc. [Webster et autres, 1993; Baïna et Goudezeune, 1999; Baroncini, 1999].

D'autres types d'algorithmes utilisent en revanche certaines caractéristiques de dégradations vidéo résultant de techniques de codage normalisées (par exemple MPEG-2). Les caractéristiques peuvent rappeler une ou plusieurs fonctions de codage utilisées par les codecs: la grille de partage composée de blocs de 8×8 pixels, la transformée discrète en cosinus, la quantification de ses coefficients, l'estimation des déplacements appliquée au macro-blocs, etc. [Baroncini, 1999; Lauterjung, 1998].

Enfin, le module traitant de la représentation du signal est un bloc ayant pour entrée le signal d'origine et pour sortie la nouvelle représentation.

La représentation du signal est générée en sortie de l'ALM 1 après transformation mathématique du signal vidéo ou extraction de caractéristiques. Une caractéristique de distorsion peut ensuite être établie grâce à la comparaison au niveau de l'ALM 2 entre les images de référence et les images dégradées.

3.3.2 ALM 3': Synchronisation et comparaison des caractéristiques

On effectue une synchronisation et une comparaison des représentations des signaux entrants et sortants afin de mesurer l'effet des systèmes vidéo sur les signaux d'origine, et pour mesurer la qualité du signal vidéo de sortie (voir le § 3.3.1). On établit ainsi un diagnostic de mesure.

La méthode d'évaluation de la qualité proposée est une méthode comparative. La mesure de la qualité des signaux sur une ou plusieurs liaisons du réseau nécessite la comparaison de deux représentations du signal prélevées en des points divers. Cette méthode exige une synchronisation précise entre les mesures effectuées au point de contrôle d'entrée et celles réalisées au point de contrôle de sortie.

Il est de plus indispensable de s'assurer que chacune des mesures devant être synchronisées possède une information temporelle parfaitement exacte, afin de garantir la bonne correspondance d'horodatage entre la représentation en entrée et celle en sortie. La synchronisation et la comparaison informatiques s'effectuent échantillon par échantillon, image par image, ou composant par composant, suivant la représentation du signal choisie (matricielle ou vectorielle).

On entend par comparaison la différence relative ou absolue entre les signaux, ou entre leur représentation. L'amplitude du signal de comparaison et ses propriétés statistiques sont porteuses d'informations caractéristiques des distorsions générées. On extrait souvent un grand nombre de paramètres différents de ce signal d'erreur.

Plusieurs fonctions de comparaison ont été utilisées à cet effet. Certaines d'entre elles (SNR, MSE, PSNR par exemple) s'apparentent plutôt à des calculs de signal d'erreur et reposent sur une comparaison terme à terme des valeurs du signal.

On a introduit d'autres types de fonctions de comparaison (log_ratio, error et error_ratio), plus adaptés à la comparaison des caractéristiques. Les valeurs moyennes et maximales de ces fonctions ont permis d'obtenir six nouveaux paramètres de caractérisation. Les paramètres spatiaux, temporels et les paramètres de dégradation permettent de déterminer un

grand nombre de paramètres objectifs [Brétilon et autres, 1999; Webster et autres, 1993], dont découle une représentation de la dégradation entre deux séquences vidéo. Cette représentation de sortie alimentera l'entrée du module suivant, le modèle de perception.

3.3.3 ALM 2, 2' et 4': Modèle d'évaluation de la qualité

Le présent paragraphe concentre les caractéristiques définies précédemment en une unique valeur prédictive de qualité. On tient ainsi compte du fait que la simultanéité de plusieurs types de détérioration conditionne le jugement subjectif. Le but du modèle est de noter la qualité de perception par le biais de calculs informatiques. Il peut par exemple traiter les résultats relatifs à la comparaison des caractéristiques et les pondérer par des facteurs liés à la connaissance a priori de la vision humaine. Ainsi, la note globale de qualité est calculée à partir des paramètres du signal.

La qualité pouvant être détériorée par des types multiples de dégradation [Martens et Kayargalde, 1996], il faut procéder à une utilisation conjointe des mesures les plus pertinentes relatives à chaque dégradation, afin d'estimer par une note unique la qualité objective de perception. Un modèle combinatoire a été établi à cette fin. Plusieurs types de modèles peuvent figurer ce processus, qui s'appuie sur une méthode évolutive.

Le modèle le plus courant repose sur une combinaison linéaire des mesures de chaque détérioration. Les coefficients de pondération sont déterminés par un processus d'optimisation. L'objectif de cette méthode est de minimiser la distorsion (par exemple l'erreur quadratique moyenne) entre les évaluations objective et subjective. Ce processus, mis en œuvre dans plusieurs méthodes d'évaluation de la qualité [Algazi et autres, 1994; Webster et autres, 1993], s'effectue sur un grand nombre de séquences d'essai. Le coefficient de corrélation traduit la qualité du modèle pour une séquence donnée. Les systèmes analogiques (Recommandation UIT-R BT.654 – Qualité subjective des images de télévision en relation avec les principales dégradations du signal de télévision composite analogique; Manuel de l'UIT – Méthodes d'évaluation subjective en télévision) ont fait l'objet d'une variante à cette méthode, que l'on a appliquée aux images numériques [Xu et Hauske].

Le principal défaut de cette méthode résulte du fait que la combinaison des dégradations risque de détériorer de manière non linéaire la qualité perçue. Il conviendra par conséquent de proposer des méthodes ad hoc. Des techniques évolutives avancées, comme les réseaux neuronaux, ont été utilisées. On peut citer à titre d'exemple des études menées pour prévoir la qualité sur une échelle normalisée à cinq notes [Kotani et autres, 1995; Brétilon et autres, 1999].

Une fois le modèle établi, la simplicité et la facilité de mise en œuvre constituent les avantages principaux des méthodes évolutives. La qualité du modèle est cependant conditionnée par le choix pertinent des séquences d'essai ayant servi à le définir. Là réside le point faible généralement reconnu à cette méthode.

On peut appliquer le modèle d'évaluation de la qualité aux méthodes à systèmes bilatéraux de types 1 et 2 (cas du module ALM 4'). On peut aussi, dans le cas de dégradations spécifiques, l'appliquer à la méthode des systèmes unilatéraux. Le modèle (tout comme les modules ALM 2 et 2') est alors optionnel, et donne des mesures de qualité en des points pour lesquels aucune donnée de référence n'est disponible.

3.4 Modules associés

Les paragraphes ci-après décrivent les principales fonctions relatives aux modèles associés et proposent quelques exemples tirés de la littérature.

3.4.1 ASM 1 et 1': Horodatage

Il faut une référence de temps pour synchroniser les paramètres de qualité générés aux différents points de mesure, puisqu'on doit les comparer pour une même horodate. Les modules ASM 1 et 1' gèrent les indicateurs de qualité des points de mesure. Séquenceurs de l'ensemble du système, ils lancent tous les processus de mesure. Ils créent de plus les horodates servant au formatage des données de référence transmises au canal de qualité de service par les modules ASM 2 et 2'. Ils créent également les horodates servant au formatage des informations de qualité de service que les modules ASM 4 et 4' transmettent au système de surveillance. Les modules ASM 1 et 1' doivent utiliser une seule et même horloge accessible partout sur le réseau.

L'horloge interne (STC, *system time clock*) du système MPEG-2 constitue un exemple de référence de temps unique. Elle est utilisée comme référence de temps lors de l'établissement des horodates pour l'indicateur de qualité. Chaque point de mesure, quel que soit son emplacement sur le réseau, peut faire appel à cette horloge de référence interne au système MPEG-2 [Baïna et Goudezeune, 1999]. On obtient ainsi une synchronisation des opérations effectuées en entrée ou en sortie de l'équipement, ce qui permet la comparaison des paramètres. Toutes les mesures sont étiquetées d'une horodate spécifique, que l'on retrouve sur le flux MPEG-2.

3.4.2 ASM 2 et 2': Traitement des données de référence

Il faut transmettre aux stations de contrôle finales les informations relatives au signal de référence afin de les rendre accessibles à l'ensemble des réseaux de télévision numérique.

Une solution consiste à transmettre les paramètres d'entrée dans la même bande de fréquences que celle attribuée aux programmes de télévision numérique, par le biais d'un canal de qualité de service multiplexé au flux de transport MPEG-2. Un débit binaire de l'ordre de quelques kbits/s permet de transmettre les paramètres à un coût abordable et de les diffuser aisément vers tous les points de mesure de contrôle en sortie [Baïna et Goudezeune, 1999].

A cet effet, la création d'un canal de qualité de service a été suggérée et normalisée pour le service de radiodiffusion vidéonumérique (DVB, *digital video broadcasting*) (Recommendation for the usage of a user defined signalling channel embedded in a MPEG-2. Document TM1957(Rev.3) – Transport Stream under the Packet Identifier PID 0x001D. DVB). Le multiplexage du canal de qualité de service dans le flux de transport MPEG-2 a été proposé. Le service de radiodiffusion vidéonumérique a publié les recommandations traitant de l'utilisation d'un numéro d'identificateur de paquet (PID, *packet identifier*) spécifique au flux MPEG-2 et réservée à ce canal, dont on propose plusieurs applications.

Un exemple de mise en œuvre montre la façon dont les informations relatives à la qualité de service sont incorporées dans une partie test des données, plus précisément le PID d'un flux élémentaire dont les valeurs de mesure sont exactes. Son contenu est décrit en clair, ainsi que les valeurs de mesure traitées et les horodates. Cette information de référence est multiplexée au point de contrôle d'entrée, et transite à travers le réseau jusqu'au point de contrôle de sortie (Recommendation for the usage of a user defined signalling channel embedded in a MPEG-2. Document TM1957(Rev.3) – Transport Stream under the Packet Identifier PID 0x001D. DVB).

L'indicateur de qualité a pour rôle de gérer l'information de référence de ce canal de qualité de service, et doit aussi générer les paramètres de qualité permettant la surveillance du réseau. Des moyens d'insertion et d'extraction doivent être mis en œuvre dans les modules associés situés aux points de mesure d'entrée et de sortie ASM 2 et 2'. [Lauterjung, 1999; Veillard et Negru, 1999; Brétilon et Baïna, 1999] proposent un exemple de cette technique.

3.4.3 ASM 3 et 3': Représentation des résultats

Le module propose diverses façons de représenter la mesure (graphiques, courbes). Il traite aussi les questions relatives à la représentation de la mesure à court et à long terme, en particulier les problèmes liés à l'évanescence temporelle et à la représentation statistique de la mesure objective de la qualité.

3.4.4 ASM 4 et 4': Interfaces

Plusieurs solutions sont envisageables pour connecter l'indicateur de qualité au système de surveillance. Cette connexion permettra de recueillir les informations relatives à la qualité, avant de les redistribuer si besoin est.

Un serveur de pages HTML et des applets Java peuvent servir à réaliser l'interface. L'utilisation d'agents du protocole simple de gestion de réseau (SNMP, *simple network management protocol*) et de PROXY externes spécifiques constitue l'autre solution envisageable. Grâce à ces agents, on peut connecter les équipements au système de surveillance via la base d'informations de gestion (MIB, *management information base*) [Lipski, 1999].

4 Procédure d'évaluation

Les techniques d'évaluation du modèle reposent généralement sur la comparaison entre les mesures objectives et les notes subjectives. Il faut noter que les résultats obtenus en sortie dépendent grandement du choix de la méthode subjective.

La présente proposition vise à adapter chaque méthode, tant par des approches subjectives que par des approches objectives, afin d'optimiser la qualité de fonctionnement. Le but recherché est de proposer une procédure d'évaluation de la qualité du modèle qui tienne autant compte des difficultés de mise en œuvre que des considérations purement techniques.

La normalisation a pour objectif d'offrir des techniques répondant aux besoins des utilisateurs (radiodiffuseurs, industrie de la télévision, et fabricants T&M). Une efficacité théorique éthérée ne suffit pas: il faut aussi que les méthodes recommandées puissent être mises en œuvre sur les matériels usuels équipant les plates-formes, et ainsi s'adapter aux contraintes du monde réel. Citons à titre d'exemple la surveillance continue de bon nombre de programmes, qui nécessite des pièces à très bas prix. Ce type de contrainte se révèle être un critère bien plus important que l'amélioration de 0,05 du coefficient de corrélation.

5 Conclusions

Le but de la présente contribution est de proposer une méthodologie et une méthode de surveillance du réseau de diffusion de télévision numérique.

Nous proposons ici un modèle conceptuel décrivant les méthodes d'évaluation objective relatives à la perception de la qualité du signal. Cette approche générique, qui répond à une grande diversité de problèmes, pourra certainement recueillir un large consensus. Elle permettra aussi la comparaison judicieuse entre les modules logarithmiques et les modules associés. Comparer des fonctions de base caractérisées par leur entrée, leur sortie et leurs opérations internes se révèle en effet beaucoup plus aisé que d'essayer de comparer les caractéristiques de toutes les méthodes de mesure, qui vont de la représentation du signal à la notation de la qualité. Cette simplification est d'autant plus indispensable que les techniques employées sont complexes et qu'il est difficile de distinguer la meilleure des méthodes par le biais des tests de comparaison.

Les normes de l'UIT-T et de la DVB actuellement en vigueur renforcent encore la pertinence de la présente proposition. Il est en tout état de cause important que la solution retenue réponde aux exigences des organismes de normalisation.

La méthode et la structure générique proposées ici peuvent aussi être utilisées pour décrire les indicateurs de qualité de signaux audio, de signaux vidéo, ou d'un service audiovisuel.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALGAZI, V. R., OHIRA, H., KOTANI, K. et MIYAHARA, M. [mars 1994] Important distortion factors in the encoding of very high quality images. *SPIE*, Vol. 2298. Proc. Human Vision, Visual Processing and Digital Display V, San Diego (CA), Etats Unis d'Amérique.
- ARDITO, M. et VISCA, M. [septembre 1995] Correlation between objective and subjective measurements for video compressed systems. IBC Convention, Amsterdam, Pays-Bas.
- BAÏNA, J. et GOUDEZEUNE, G. [septembre 1999] Equipment and strategies for signal quality monitoring for digital television networks. *Proc. SMPTE J.*
- BARONCINI, V. [15 décembre 1999] Single-ended objective video quality assessment. International Workshop on Quality of Service for Digital Television, Munich, Allemagne.
- BRÉTILLON, P. et BAÏNA, J. [15 décembre 1999] Quality monitoring of broadcast audio and video signal. International Workshop on Quality of Service for Digital Television, Munich, Allemagne.
- BRÉTILLON, P., BAÏNA, J., JOURLIN, M. et GOUDEZEUNE, G. [septembre 1999] Method for image quality monitoring on digital television networks. *SPIE*, Vol. 3845, p. 298-305.
- DALY, S. [1992] The visible difference predictor: An algorithm for the assessment of image fidelity. *SPIE*, Vol. 1666. Human Vision, Visual Processing and Digital Display III, p. 2-15.
- KOTANI, K., KATAYAMA, M., MURAI, T. et MIYAHARA, M. [1995] Objective picture quality scale for color image coding. ICIP'95, Vol. 3, p. 133-136, Washington, DC, Etats Unis d'Amérique.
- LAUTERJUNG, J. [6-7 octobre 1998] First results of Digital Video Quality Measurements in DVB Networks. International Workshop on Quality of Service for Digital Television, Metz, France.
- LAUTERJUNG, J. (Rohde & Schwarz) [15 décembre 1999] The integration of a quality-of-service channel inserter and extractor in a test and measurement instrument. International Workshop on Quality of Service for Digital Television, Munich, Allemagne.
- LIPSKI, J. L. [15 décembre 1999] SNMP applied to DTV network equipment supervision. International Workshop on Quality of Service for Digital Television, Munich, Allemagne.
- MARTENS, J. B. et KAYARGALDE, V. [1996] Image quality prediction in a multidimensional perceptual space. *Proc. IEEE. Int. Conf. on Image Proc., ICIP'96*, Vol. I, p. 877-880, Lausanne, Suisse.
- TEO, P. C. et HEEGER, D. J. [1994] Perceptual image distortion. *SPIE*, Vol. 2179. Human Vision, Visual Display and Digital Display, p. 127-141.
- VEILLARD, M. (CCETT) et NEGRU, O. (THOMCAST) [15 décembre 1999] Interoperability in a multi-application DVB MG measurement point. International Workshop on Quality of Service for Digital Television, Munich, Allemagne.
- WATSON, A. [octobre 1990] Perceptual component architecture for digital video. *J. of the Optical Society of America*, Vol. 7, **10**, p. 1943-1954.
- WEBSTER, A., JONES, C. T., PINSON, M. H., VORAN, S. D. et WOLF, S. [juin 1993] An objective video quality assessment system based on human perception. *SPIE*, Vol. 1913, p. 15-26.
- XU, W. et HAUSKE, G. Picture quality evaluation based on error segmentation. *SPIE*, Vol. 2308, p. 1454-1465.